In-situ-Untersuchungen des Rohdichteprofils von Holzwerkstoffen am Beispiel von MDF

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität Hamburg
in der Fakultät für Mathematik,
Informatik und Naturwissenschaften
im Department Biologie

vorgelegt von
Matthias Gruchot
aus Kiel

Hamburg 2009

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. Jörg Ressel
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Herr Univ.-Doz. Dipl. Ing. Dr. Manfred Dunky
Tag der Disputation: 13. August 2009

Hamburg, den 26. Juli 2009

Universität Hamburg
64
Fakultät
Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Professor Dr. Jörg Ganzhorn
Leiter des Departments Biologie

Für meine Eltern,
meine Patentante und
meine Stammzellspenderin

Kurzfassung

Ziel der Arbeit ist es, erstmalig die kontinuierliche Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs über die gesamte Plattendicke zu verfolgen. Dazu wurde eine Verdichtungseinheit entwickelt, die an einen Röntgenscanner angepasst und in diesen eingebaut wurde. Die Probenkörper in der Verdichtungseinheit haben einen Durchmesser von 50 mm. Mit einer flächenmassen- und feuchteabhängigen Kalibrierfunktion werden die Dichtewerte aus den Messdaten des Röntgenscanners ermittelt. Die Korrektur der Massenschwächungskoeffizienten mit der Flächenmasse ist durch die Verwendung polychromatischer Röntgenstrahlung notwendig. Die Feuchte zeigt in den Kalibrierfunktionen einen geringeren Einfluss auf den Massenschwächungskoeffizienten als die Flächenmasse. In Verdichtungsversuchen, die teilweise auch einen Nachverdichtungsschritt enthalten, wurde die Entwicklung des Rohdichteprofils im Heißpressvorgang aufgezeichnet. Während der Verdichtungsphase bildet sich deutlich das charakteristische Rohdichteprofil mit den Dichtemaxima in den Deckschichten und einer nahezu homogenen Mittelschicht aus. Die Entwicklung des Rohdichteprofils wird stark vom sich ausbildenden Temperaturprofil, das mit Thermoelementen in der Matte bestimmt wurde, beeinflusst. In der anschließenden Haltephase ist auffallend, dass unmittelbar nach dem Erreichen der Solldistanz noch größere Dichteänderungen in den oberflächennahen Schichten auftreten. Diese sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Bewegungen einzelner Partikel zurückzuführen. Im weiteren Verlauf der Haltephase kommt es besonders in einem Bereich von 100 s nach Beginn des Heißpressvorgangs zu deutlichen Dichteänderungen in Deck- und Mittelschicht, die zum großen Teil auf eine Feuchtebewegung durch den konvektiven Feuchtetransport in der Partikelmatte zurückzuführen sind. Auffallend sind die qualitativ sehr ähnlichen Formen der Rohdichteprofile direkt nach Erreichen der Solldistanz in der Haltephase und unmittelbar vor Ende des Heißpressvorgangs. Durch die Nachverdichtungsschritte wurde ein Dichteplateau in der Mitte des Plattenquerschnittes erzeugt, das kein deutliches Minimum aufweist.

Der Vergleich zwischen Messdaten und Simulationsdaten aus dem Softwarepaket VHP (*Virtual Hot Press*) zeigt eine hinreichende qualitative Übereinstimmung für die Ausbildung des Rohdichteprofils sowohl während der Verdichtungs- als auch in der Haltephase.

Die vorgestellte Methode bietet die Möglichkeit, in weiteren systematischen Untersuchungen die Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs intensiver zu untersuchen und so einen wesentlichen Beitrag zur weiteren Entwicklung der Verfahrenstechnik für die Herstellung von Holzwerkstoffen zu leisten.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1
1.1 Problemstellung ... 2
1.2 Forschungsziele ... 3
2 Literaturübersicht ... 4
2.1 Vorgänge während des Heißpressprozesses ... 4
2.1.1 Kombinierter Wärme- und Stofftransport ... 6
2.1.2 Verdichtungsverhalten und rheologisches Verhalten der Holzwerkstoffmatte ... 10
2.1.3 Permeabilität von Holzwerkstoffmatten ... 16
2.1.4 Klebstoffaushärtung in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix ... 20
2.2 Das Rohdichteprofil ... 23
2.2.1 Entstehung des Rohdichteprofils ... 24
2.2.2 Zusammenhang von Rohdichteprofil und Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten ... 27
2.2.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung des Rohdichteprofils ... 29
2.3 Simulationsmethoden ... 33
2.4 Radiometrische Messmethoden zur Dichtebestimmung ... 35
2.4.1 Ionisierende Strahlung – Röntgenstrahlung ... 36
2.4.2 Schwächung ionisierender Strahlung ... 39
2.4.3 Massenschwächungskoeffizienten für Holz und Wasser ... 41
2.4.4 Anwendung von Röntgenstrahlung und Gammastrahlung ... 44
3 Material und Methoden ... 54
3.1 Material ... 54
3.1.1 Fasermaterial ... 54
3.1.2 Klebstoff ... 55
3.1.3 Laborplatten ... 55
3.2 Methoden ... 57
3.2.1 Röntgenscanner ... 57
3.2.2 Laborverdichtungseinheit ... 63
3.2.3 Kalibrierung des Röntgenscanners ... 73
3.2.4 Verfolgung der Rohdichteentwicklung während des Heißpressvorgangs ... 83
4 Ergebnisse und Diskussion ... 92
4.1 Massenschwächungskoeffizienten ... 92

4.1.1 Massenschwächungskoeffizienten für das Energieniveau 55kV und 40mA 94
4.1.2 Massenschwächungskoeffizienten für das Energieniveau 50kV und 40mA 98
4.1.3 Diskussion der Massenschwächungskoeffizienten 101
4.2 Beobachtung der Verdichtung und der Rohdichteprofilentwicklung 102
4.2.1 Übersicht über die Messdaten zur Rohdichteprofilentwicklung 105
4.2.2 Rohdichte- und Temperaturentwicklung in einzelnen Schichten der Fasermatte 109
4.2.3 Beschreibung der Rohdichteprofilentwicklung im Heißpressvorgang 115
4.2.4 Verallgemeinerte Modellvorstellung zur Masseverschiebungen während des Heißpressvorgangs 130
4.2.5 Diskussion der Rohdichteprofilentwicklung während des Heißpressvorgangs ... 139
4.3 Systematische Untersuchungen zur Rohdichteprofilentwicklung 143
4.3.1 Verfahrensparameter und Versuchsumfang 144
4.3.2 Beschreibungsmethodik für die Rohdichteprofilentwicklung durch charakteristische Werte 146
4.3.3 Standardisierte Auswertung der systematischen Versuche 154
4.3.4 Rohdichteprofilentwicklung während der ersten Haltephase 159
4.3.5 Nachverdichtungsschritt 196
4.3.6 Rohdichteprofil am Ende der zweiten Haltephase 201
4.4 Berechnung des Feuchteprofils am Ende des Heißpressvorgangs 216
5 Vergleich der Messdaten mit Simulationsdaten aus Virtual Hot Press (VHP).. 218
5.1 Temperatur- und Pressdruckverlauf der Messdaten und der Simulationsdaten. 220
5.2 Rohdichteprofilentwicklung der Messdaten und der Simulationsdaten 224
6 Schlussfolgerungen 233
6.1 Methodische Schlussfolgerungen 233
6.2 Verfahrenstechnische Schlussfolgerungen 236
7 Ausblick 239
8 Zusammenfassung 243

Abbildungsverzeichnis 245
Tabellenverzeichnis 251
Normenverzeichnis 252
Literaturverzeichnis 253
Danksagung 265

Formelzeichen, Begriffe und Abkürzungen

Bei den Formelzeichen wurden gleiche Zeichen mit unterschiedlichem Index wiederholt aufgeführt, da diese Formelzeichen zum Teil eine erheblich unterschiedliche Bedeutung haben.

Formelzeichen

lateinische Formelzeichen

a	Abstand von der Röntgenquelle zur optischen Ebene der Probe [m]
A	Fläche (area) [mm^2]
b	Abstand der optischen Ebene der Probe zum Detektor [m]
c_1	effektive Pixelgröße in der optischen Ebene [µm]
c_2	Pixelgröße der Zeilenkamera im Detektor [µm]
d	geometrische Ausdehnung des Brennflecks der Röntgenröhre [m]
dp/dx	Gasdruckgradient [Pa m^{-1}]
D	Durchmesser [m]
e	Elementarladung [C]
E	Energie [eV]
f	Frequenz [Hz]
F	Kraft (force) [N]
i	Laufindex
I	Durchgangsintensität [ ]
I_0	Ausgangsintensität [ ]
K	spezifische Permeabilität [m^3]
ln (I_0/I)	Logarithmus des Verhältnisses von Durchgangsstrahlung zu Ausgangsstrahlung
l	Länge [mm]
Δl	Längenänderung [mm]
m’’	Flächenmasse [mm]
p	Druck (pressure) [N mm^{-2}]
$p_0 \ldots p_4$	Regressionskoeffizienten
P	Penumbra-Effekt
$P_{y,t}$	Pixel am räumlichen Punkt y zur Zeit t
$\dot{Q}$	Volumenstrom [m^3 s^{-1}]
t	Zeit [s]

t_0	Startzeitpunkt des Heißpressvorgangs [s]
t_s	Schließzeit im Heißpressvorgang [s]
t_e	Endzeitpunkt des Heißpressvorgangs [s]
u	Holzfeuchte [%]
U	elektrische Spannung [kV]
w_i	Massenanteil der i-ten Komponente eines Stoffgemisches [ ]
x, y, z	Koordinaten der räumlichen Richtungen

griechische Formelzeichen

ε	Dehnung [ ]
η	dynamische Viskosität eines Fluids [Pa s]
φ	Luftfeuchte [%]
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Wellenlänge [m],
μ	linearer Schwächungskoeffizient [m^{-1}]
μ_m	Massenschwächungskoeffizient [m^2 kg^{-1}]
$\mu_{m,i}$	Massenschwächungskoeffizient der i-ten Komponenten eines Stoffgemisches [m^2 kg^{-1}]
ρ	Dichte [kg m^{-3}]
σ	mechanische Spannung [N mm^{-2}]

Abkürzungen und Begriffe

atro	absolut trocken
AB	aktiebolag, schwedische Bezeichnung für Aktiengesellschaft (AG)
AC	alternating current, Wechselstrom
ABES	Automated Bonding Evaluation System
^{241}Am	Americium, Isotop mit der Massenzahl 241
Bit	binary digit, digitaler Wert 0 oder 1
CD	Mittelschichtdichte
CL	Mittellinie
^{137}Cs	Cäsium, Isotop mit der Massenzahl 137
CT	Computertomographie
DC	direct current, Gleichstrom

DS	Deckschicht
GBq	Gigabecquerel, SI-Einheit für Radioaktivität
GF	Gradientfaktor
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik (Firmenname)
Hz	Hertz, SI-Einheit für die Frequenz
ipates	Integrated Pressing and Testing Systems
IM	Zwischenminimum
K_α, K_β	charakteristische Strahlung eines Elementes
Long Fine Focus	Formbezeichnung des Brennpunktes einer speziellen Röntgenröhre
MD	mittlere Dichte
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MS	Mittelschicht
MTS	Eigenname einer Messtechnikfirma
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff
MWBL	Mechanical Weak Boundary Layer
NaN	Not a Number, „keine Zahl“, ungültiger Wert einer Rechenoperation
OSB	Oriented Strand Board
PA	Fläche des Maximums
Pb	Basis des Maximums
^{210}Pb	Blei, Isotop mit der Massenzahl 210
Pdi	Abstand des Maximums
PD	Dichte des Maximums
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon, Hochleistungs- und Hochtemperaturkunststoff
PG	Profilgrund
Pixel	Bildpunkt eines digitalen Bildes
PRF	Phenol-Resorcinol-Formaldehyd-Klebstoff
PUR	Polyurethanklebstoff
REM	Rasterelektronenmikroskop
PMF	plastic and micro-fracture, Partikelbruch
ROI	Region of Interest, abgegrenzter Bereich einer Bilddatendatei von besonderem Interesse
RöV	Röntgenverordnung

^{144}Sm	Samarium, Isotop mit der Massenzahl 144
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
tiff	tagged image format, Format für Bilddateien
VHP	Virtual Hot Press, Simulationsprogramm zum Heißpressvorgang von Holzwerkstoffen
WBL	Weak Boundary Layer
Z	Ordnungszahl
α- Strahlung	Teilchenstrahlung beim radioaktiven Zerfall von Radioisotopen
β- Strahlung	Teilchenstrahlung beim radioaktiven Zerfall von Radioisotopen
γ- Strahlung	reine Photonenstrahlung

1 Einleitung

Das Rohdichteprofil von Holzwerkstoffen ist eine zentrale Eigenschaft und ein wesentliches Qualitätsmerkmal von plattenförmigen Holzwerkstoffen. Es entwickelt sich im Heißpressvorgang, der heute meist auf kontinuierlichen Heißpressen erfolgt, während der anfänglichen Verdichtung auf Solldistanz und der anschließenden Haltephase bis zum Ende des Heißpressvorgangs. Von Beginn der industriellen Holzwerkstoffherstellung stand das Rohdichteprofil der fertigen Holzwerkstoffplatte aufgrund der zentralen Bedeutung als Summenparameter für viele Eigenschaften im Fokus umfassender Untersuchungen. Dabei konnte jedoch nur das Rohdichteprofil der fertig gepressten Holzwerkstoffplatte untersucht werden, das durch Messung an kleinen Proben zunächst gravimetrisch bestimmt wurde und seit gut drei Jahrzehnten mittels Durchstrahlung mit Gamma- bzw. Röntgenstrahlen ermittelt wird. Eine *kontinuierliche* Messung der Ausbildung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs ist bisher weder im industriellen noch im Labormaßstab möglich. Daher wurden Modellvorstellungen zur Ausbildung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs entwickelt, die im Laufe der letzten Jahrzehnte unter Einbeziehung immer weiterer Teilaspekte verfeinert wurden (Gefahrt 1977; Bolton und Humphrey 1988; Humphrey 1994; Haas 1998). Heute sind mehrere rechnerbasierte physikalisch-analytische Modelle bekannt, in denen die thermodynamischen und rheologischen Prozesse in der Partikelmatte während des Heißpressvorgangs beschrieben werden (Thömen 2000; Zombori 2001). Damit kann mit guter Näherung auf die Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs geschlossen werden. Von großem Interesse sind weitere Verdichtungsschritte während des Heißpressvorgangs nach dem ersten Verdichtungsschritt, die nach dem Entgasen der Matte in den Heißpressvorgang integriert sind. Das ist besonders für den Heißpressvorgang von Mitteldichten Faserplatten (MDF) wichtig.

1.1 Problemstellung

Der sehr kostenintensive Herstellungsschritt der Heißpressung, in dem die wesentlichen Eigenschaften einer Holzwerkstoffplatte festgelegt werden, verhält sich oft noch wie eine „black box“. Mit der Messung der Temperatur, des Gasdruckes und der Dichte in einzelnen diskreten Schichten konnte auf die momentanen rheologischen Eigenschaften der Partikel durch die hydrothermische Plastifizierung in dieser Schicht und der damit einhergehenden Dichteentwicklung an dieser Stelle im Plattenquerschnitt geschlossen werden. Eine kontinuierliche und direkte Beobachtung der Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs der Holzwerkstoffmatte war bisher nur in sehr eingeschränktem Maße möglich, wobei in einigen wenigen Schichten der Matte die Veränderung der Dichte verfolgt wurde, ohne damit aber ein vollständiges Rohdichteprofil abbilden zu können (DePaula 1992; Winistorfer et al. 2000).

Vor dem Hintergrund der Bedeutung des Rohdichteprofils einer Holzwerkstoffplatte ist es deshalb notwendig, eine Methode zu entwickeln, mit der das Rohdichteprofil kontinuierlich während des gesamten Heißpressvorgangs – möglichst ununterbrochen – mitverfolgt werden kann. Dies kann mit Mitteln der zerstörungsfreien Messtechniken mittels Gamma- oder Röntgenstrahlung erreicht werden.

Zudem ist eine Auswertemethodik der gewonnenen zeitlichen Rohdichteprofildaten zu erstellen, die auf die Feuchtebewegung einerseits und auf die qualitative geometrische Beschreibung des Rohdichteprofils andererseits eingeht.

1.2 Forschungsziele

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist es, die Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs von Partikelmatten erstmals kontinuierlich mitzuverfolgen. Mit dieser Möglichkeit der messtechnischen Erfassung des Heißpressvorgangs können die bestehenden physikalisch-analytischen Modelle verifiziert und die allgemeinen Modellvorstellungen zum Verdichtungsvorgang präzisiert und erweitert werden.
Zur systematischen Lösung werden die folgenden Teilziele definiert:

- Entwicklung, Bau und Erprobung einer Miniaturverdichtungseinheit für einen Labordichtescanner
- Erstellung einer holzfeuchteabhängigen Kalibrierfunktion für den Labordichtescanner
- Beobachtung der Rohdichteprofilentwicklung während des Heißpressvorgangs
- Evaluierung der Feuchtebewegung in der Partikelmatte während des Heißpressvorgangs
- Ermittlung des Einflusses von ausgewählten Pressparametern (Verdichtungszeit und Nachverdichtungsschritte) auf die Rohdichteprofilausbildung
- Vergleich der Messwerte aus den Verdichtungsversuchen mit Simulationsdaten
- Erarbeitung von Ansätzen zur Weiterentwicklung von Pressprogrammen

Die Baugröße des Probenraums des Labordichtescanners sowie die zur Verfügung stehende Energie der Photonen bedingen eine sehr kleinräumige Verdichtungseinheit. Die Untersuchungen zur Rohdichteprofilentwicklung wurden auf MDF-Platten beschränkt, da MDF-Platten durch die homogene Streuung und die kleine Partikelstruktur eine besondere Sensitivität für die Ausprägung des Rohdichteprofils aufweisen.

2 Literaturübersicht

Voraussetzung für die messtechnische Erfassung und prozesstechnische Beeinflussung der Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten während des Heißpressens sind die Kenntnis und das Verständnis möglichst aller thermodynamischen und elastomechanischen Vorgänge in den verdichteten Partikelmatten. Im Vordergrund steht dabei das sogenannte Rohdichteprofil der fertigen Holzwerkstoffplatte (vertikale Dichteverteilung, Dichteprofil senkrecht zur Plattenebene). Es ist als erstes „Qualitätsmerkmal“ direkt hinter der heute meist verwendeten kontinuierlichen Presse online und zerstörungsfrei messbar und steht quasi als Summenparameter für viele Eigenschaften der fertigen Holzwerkstoffplatte. Mit Beginn der industriellen Herstellung von Holzwerkstoffplatten, vor allem von Spanplatten, wurden einzelne physikalische und elastomechanische Eigenschaften der Platten untersucht. Kelly (1997) fasst die bis dahin bekannten Ergebnisse vieler Einzeluntersuchungen systematisch zusammen. Mit dem Aufkommen der jüngeren plattenförmigen Holzwerkstoffe wie OSB- und MDF-Platten wurden diese ebenfalls untersucht. Der folgende Abschnitt umreißt die physikalischen Vorgänge in der Holzwerkstoffpartikelmatte während des Heißpressvorgangs sowie den bisherigen Kenntnisstand zur Entwicklung der Produkteigenschaften durch die gezielte Beeinflussung der Parameter und Abläufe während des Heißpressvorgangs. Auf die physikalischen Grundlagen der verwendeten Messverfahren (Densitometrie) wird eingegangen und ebenso verwandte Methoden zu der in dieser Arbeit entwickelten Methode aufgezeigt.

2.1 Vorgänge während des Heißpressprozesses

Während des Heißpressprozesses laufen in der Partikelmatte mehrere physikalische und elastomechanische Prozesse in den Holzwerkstoffpartikeln und chemisch-physikalische Vorgänge im Klebstoff parallel zueinander ab, die sich gegenseitig in komplexer Weise beeinflussen. Bolton und Humphrey (1988) gaben hierzu bereits einen umfassenden Überblick. Ausgehend von dieser systematischen Analyse der Vorgänge entwickelte Humphrey (1994) erstmals eine weitreichende Modellvorstellung der Einzelvorgänge und deren gegenseitigen Wechselwirkungen. Er unterscheidet dabei die übergreifenden Prozesse:

- kombinierter Wärme- und Stofftransport
- rheologisches Verhalten der Holzpartikel
- Festigkeitsentwicklung in der Holzpartikelmatte

die letztendlich zu den Produkteigenschaften der fertigen Platte führen. Abb. 2.1 gibt einen anschaulichen Überblick der Mechanismen und ihrer Abhängigkeiten untereinander während des Heißpressvorgangs.

Die angeführten physikalischen Vorgänge während der Heißpressung von Holzwerkstoffmatten werden bei den verschiedenen Holzwerkstoffen durch die Partikelgröße der jeweiligen Holzwerkstofftypen (OSB, Spanplatte, MDF) beeinflusst.

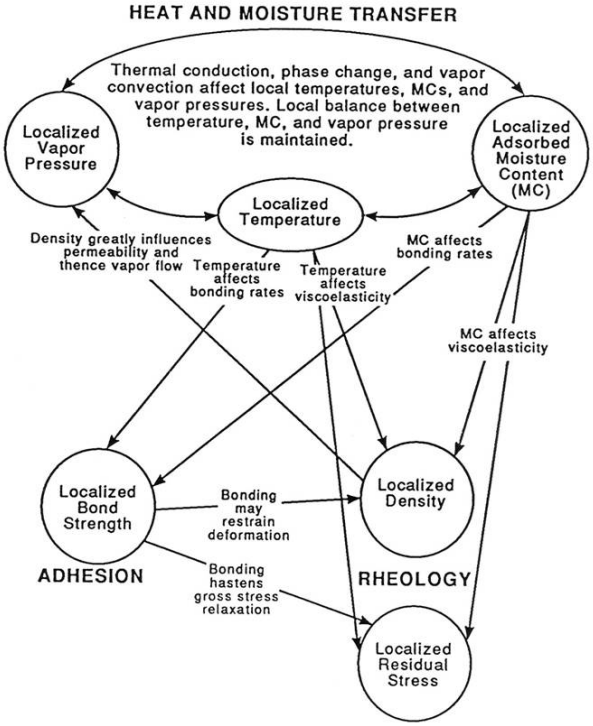


Abb. 2.1: Übersicht physikalischer Vorgänge während des Heißpressvorgangs und deren Interaktionen (Humphrey 1994)

Je nach Partikelgröße sind diese Vorgänge mehr oder weniger stark ausgeprägt und beeinflussen signifikant die Entstehung der Eigenschaften der Holzwerkstoffplatte während des Heißpressvorgangs. Erste grundlegende verfahrenstechnische Untersuchungen zur Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffen wurden im wesentlichen an Spanplatten durchgeführt, so z. B. von Rackwitz (1954), Klauditz (1956) und Strickler (1959). Umfassende Untersuchungen zu den elastomechanischen Eigenschaften von Spanplatten führte erstmals Keylwerth (1958) durch.

Mit der Einführung und zunehmenden Bedeutung zunächst von MDF- und später dann auch OSB-Platten als Holzwerkstoffe wurden diese systematisch untersucht. Es ist daher bei den in diesem Abschnitt angeführten Untersuchungen jeweils auf die Art der Partikel, aus denen der Holzwerkstoff hergestellt wurde, bzw. auf die Partikelgröße, an denen die Untersuchungen durchgeführt worden sind, zu achten. Viele Untersuchungen an Holzwerkstoffen werden und

wurden an Laborplatten in diskontinuierlich arbeitenden, kleinen Einetagenlaborpressen durchgeführt. Heute werden in der Industrie, zumindest in Europa, zum überwiegenden Teil kontinuierliche Doppelbandpressen mit umlaufenden Stahlbändern als Pressbleche verwendet. Der Unterschied zur diskontinuierlichen Labortechnologie ist bei allen Untersuchungen und publizierten Ergebnissen immer zu beachten. Die Begriffe Pressblech bzw. Pressplatte fassen die in diskontinuierlichen Etagenpressen und Laborpressen und die in kontinuierlichen Pressen verwendeten, umlaufenden Stahlbänder im weiteren Verlauf dieser Arbeit zusammen.

2.1.1 Kombinierter Wärme- und Stofftransport

Zur Aushärtung der Klebstoffe und der damit einhergehenden Ausbildung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in der verdichteten Partikelmatte muss diese aufgeheizt werden. Die Wärmeübertragung innerhalb der Matte erfolgt durch Konduktion, als Wärmeübertragung durch Kontakt, durch Konvektion, als Wärmetransport durch ein fluides Medium und durch Strahlung. Beim Heißpressvorgang von Holzwerkstoffen sind im Wesentlichen Konduktion und Konvektion von Bedeutung. Humphrey und Bolton (1989) messen der Wärmeübertragung durch Strahlung während des Heißpressvorgangs in ihren Modellannahmen keine Bedeutung zu. Erst ab Temperaturen deutlich über 200 °C wird die Strahlung in Relation zu den beiden anderen Wärmeübertragungsmechanismen als bedeutungsvoll angesehen (Humphrey und Bolton 1989).

Beim Kontakt der *feuchten Partikelmatte* mit der heißen Pressplatte wird diese konduktiv erwärmt (Gefahrt 1977; Kamke und Casey 1988; Humphrey und Bolton 1989; Thömen 2000); es entsteht ein Temperaturgradient senkrecht zur Ebene der gleichzeitig verdichteten Partikelmatte und damit ein konduktiver Wärmestrom (Rackwitz 1954; Thömen 2000). Zusätzlich zur konduktiven Wärmeübertragung über die Partikelkontakte entsteht ein konvektiver Wärmestrom, der durch den Gesamtgasdruckgradienten angeregt wird. Die Verdampfung der in der Partikelmatte vorliegenden Feuchte und die Erwärmung der Luft erfolgten in der Schicht, die der Pressplatte zugewandt ist (Maku et al. 1959; Gefahrt 1977; Kamke und Casey 1988). Klauditz (1956) führt in diesem Zusammenhang den Begriff des „Dampfstoßeffektes“ ein, der die Konvektion in der Partikelmatte durch höhere Befeuchtung der oberflächennahen Zonen beschleunigen soll. Die Besprühung der Mattenoberflächen mit Wasser vor dem Heißpressvorgang ist heute Stand der Technik.

Der Gesamtdruck des Gasgemisches aus trockener Luft und Wasserdampf in der Partikelmatte setzt sich aus den Partialdrücken der Einzelkomponenten zusammen. Zum Gesamtgasdruck kommt noch ein sehr geringer Anteil an Partialdrücken von flüchtigen Holzinhaltsstoffen hinzu. Die gesamte Feuchte in der Partikelmatte setzt sich aus dem Wasser in den

Holzpartikeln und dem Wasser der Leimflotte sowie dem bei der Kondensationsreaktion des Klebstoffes frei werdenden Wassers zusammen (Haas 1998; Dai und Yu 2004). Die Konvektion der feuchten Luft in der Hohlraumstruktur der Partikelmatte, angetrieben durch den Gesamtdruckgradienten über dem Mattenquerschnitt und die im Wesentlichen im Wasserdampf gespeicherten Energie, erzeugt den *kombinierten Wärme- und Stofftransport* in der Partikelmatte. Die während der während des Heißpressvorgangs Verdichtung innerhalb der Matte zeitlich und örtlich veränderliche Permeabilität beeinflusst die Konvektion der feuchten Luft (Haas 1998; Heinemann 1999; Hanvongjirawat 2003; Thömen und Klüppel 2008). Der Einfluss der Rohdichte der Partikelmatte auf die Permeabilität wird ausführlich in Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Die Feuchte, die während des Heißpressens in den äußeren Schichten der Partikelmatte verdampft – Gefahrt (1977) spricht hier von einer sogenannten Siedefront – wird durch die Gesamtgasdruckdifferenz vorwiegend in vertikaler Richtung hin zu der noch kühleren Mitte der Partikelmatte gedrückt und kondensiert dort wieder an den noch kühleren Partikeloberflächen. Diese Schicht wird im Wesentlichen durch die Kondensationswärme aus dem Wasserdampf auf die lokale Siedetemperatur der Feuchte erwärmt, zusätzlich kommt ein Anteil an konduktiver Erwärmung hinzu. Nicht kondensierter Wasserdampf sammelt sich in der Hohlraumstruktur dieser Schicht der Partikelmatte und bildet dort eine Dampffront mit der lokalen Siedetemperatur der Feuchte aus. Diesen gesamten Wärme- und Stofftransportmechanismus hat Gefahrt (1977) als Siedewelle bezeichnet. Thömen (2000) hat mithilfe der Simulationsrechnung (siehe Kap. 2.3) den Wärmestrom in einer Fasermatte während des Heißpressvorgangs in einen konduktiven und einen konvektiven Wärmestrom unterteilt.

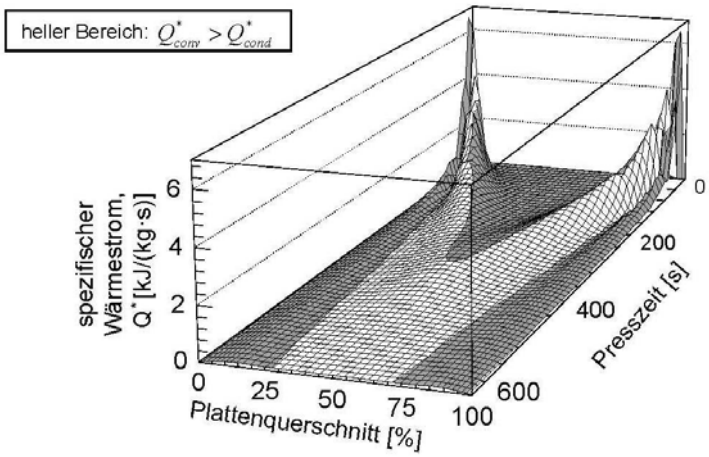


Abb. 2.2: Spezifischer Wärmestrom zur Temperaturerhöhung im Zentrum einer Laborfaserplatte (Plattendicke 39 mm). In den hellen Bereichen ist der konvektive Wärmestrom größer als der konduktive Wärmestrom (Thömen 2000)

Abb. 2.2 zeigt die Simulationsdaten. Der hohe Anteil des konvektiven Wärmestroms nahe der Mattenoberfläche kurz nach Beginn des Heißpressvorgangs ist auffallend. Ebenso ist bemerkenswert, dass nach dem Zusammenlaufen der Zonen des konvektiven Wärmestroms der konduktive Wärmestrom in den äußeren Schichten der Matten wieder an Bedeutung gewinnt.

Die Temperatur- und Feuchtebeziehungen zwischen feuchten Holzpartikeln in der Partikelmatte und Wasserdampfdruck sowie der Temperatur im Hohlraumvolumen der Matte werden von Kamke und Wolcott (1991) sowie von v. Haas (1998) beschrieben. Von besonderem Interesse beim Heißpressvorgang sind die Holzfeuchten bei Druck-und Temperaturzuständen des Wassers, die größer sind als der Atmosphärendruck und Temperaturen oberhalb der dazugehörenden Siedetemperatur. Lenth und Kamke (2001a) stellen dazu Untersuchungen bis zu Temperaturen von 160 °C vor. V. Haas (1998) erweitert die Modellvorstellung der Siedewelle um die Beziehungen zwischen dem in der Hohlraumstruktur der Partikelmatte enthaltenen Wasserdampf und der Holzfeuchte der umgebenden Partikel sowie um die Temperaturbeziehung zwischen der feuchten Luft, die die Partikel umgibt, und der Durchwärmung der Partikel selbst. Das Sorptionsverhalten der Partikel im Bereich der Siedewelle und das Gleichgewicht zwischen den lokalen Umgebungsbedingungen in Bezug auf die Temperatur und Gasfeuchte und der Feuchte der Partikel ist weiterhin nicht eindeutig geklärt (Haas 1998; Thömen 2000; Carvalho et al. 2003). Ansätze zur Bestimmung der Sorptionsgeschwindigkeit von Holzpartikeln liefert v. Haas (Haas und Frühwald 1999), Phasen einer temporären annähernden Temperaturkonstanz in einer Schicht auf dem Niveau der lokalen Siedetemperatur des Wassers während der Erwärmung der Partikelmatte führt v. Haas (1998) auf das Vorhandensein von freiem Wasser zurück. Die Temperatur kann erst weiter ansteigen, wenn gebundenes Wasser aus der Holzsubstanz entfernt und verdampft ist, da durch die frei werdende Sorptionswärme des ehemals in den Partikeln gebundenen Wassers Temperaturen von über 100 °C erreicht werden müssen. V. Haas (1998) berücksichtigt bei seinen Überlegungen auch, dass es zu einem geringen Temperaturgefälle durch eine kleine permeabilitätsbedingte Druckdifferenz innerhalb der Siedewelle kommt. Daher ist auch in der Zone der fortschreitenden Siedewelle mit einem geringen Maß an Konduktion zu rechnen.

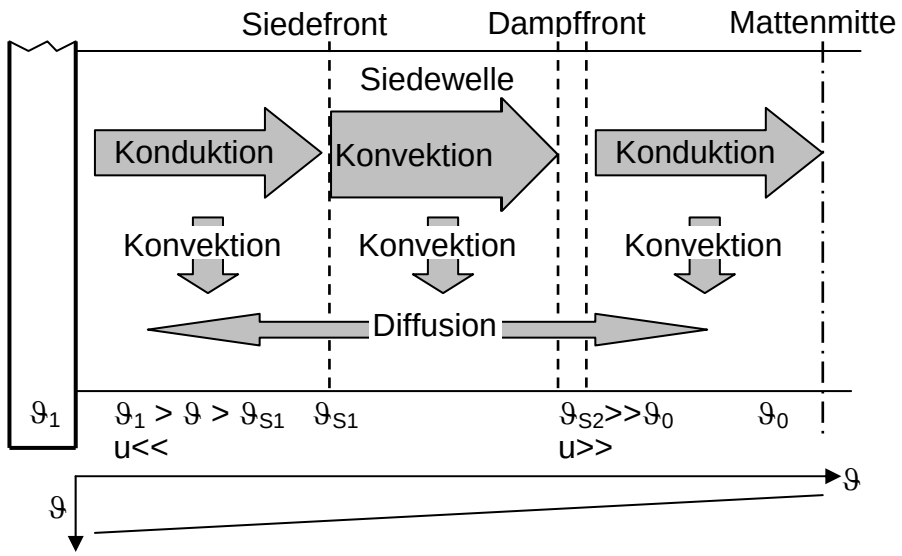


Abb. 2.3: Modellvorstellung der Siedewelle nach Gefahrt (1977) und v. Haas (1998), modifiziert ϑ_1 = Pressplattentemperatur, ϑ_S = Temperatur der Siedefront, ϑ_{S2} = Temperatur der Dampffront, ϑ_0 = Temperatur in der Mattenmitte, u = Holzfeuchte

Die nahezu konstante Temperatur in der Schicht der Siedewelle ist umso ausgeprägter, je weiter die Schichten zur Mattenmitte hin liegen, da entsprechend dem sich ausprägenden Feuchteprofil hier mehr Wasserdampf vorliegt. Den schematischen Verlauf der Siedewelle zeigt Abb. 2.3. Vor der Siedewelle, in Richtung Mitte der Partikelmatte gesehen, überwiegt Konduktion als Wärmeübertragungsmechanismus, wie aus Abb. 2.2 zu erkennen ist. Hinter der Siedewelle ist die sich verdichtende Partikelmatte soweit ausgetrocknet, dass nur noch wenig Feuchte vorhanden ist, die zur konvektiven Wärmeleitung beitragen kann, sodass dort die Wärmeübertragung im Wesentlichen durch Konduktion erfolgt (Gefahrt 1977; Haas 1998; Thömen 2000). Diese Restfeuchte von bis zu 4 % wird durch die Wärmetönung der Desorption bei niedrigen Feuchten erst bei Temperaturen von über 100 °C aus dem Holz verdampft. Diese hohen Temperaturen werden in den äußeren Schichten der Partikelmatte erreicht, sodass dort die Holzfeuchte noch geringer sein kann. V. Haas (1998) folgert aus den hier dargestellten Vorgängen, dass die Holzfeuchte in einer Schicht der Partikelmatte aus der Temperatur und dem lokalen Dampfdruck abgeschätzt werden kann.

Partialdruckunterschiede, die sich vor allem für den Wasserdampf ausbilden, führen zusätzlich zu Diffusionsvorgängen in den Hohlräumen zwischen den Partikeln wie auch in der Holzsubstanz der Partikel. Letztere ist jedoch zu vernachlässigen. Bei einer analytischen Gesamtbetrachtung der Vorgänge innerhalb der Partikelmatte sind zusätzlich Diffusionsvorgänge zu berücksichtigen. Diese laufen jedoch in Relation zu Konvektionsvorgängen sehr langsam ab. Thömen (2000) unterstreicht die Notwendigkeit der Beachtung von Diffusionsvorgängen bei

der Simulation des Heißpressvorganges, da diese zur Stabilität der Modellberechnungen beitragen. V. Haas (1998) misst der Diffusion bei niedrigen Temperaturen der Partikelmatte eine erhöhte Bedeutung zu.

Es bildet sich somit für jeden Zeitpunkt während des Heißpressvorgangs ein Temperatur- und Feuchteprofil über den Mattenquerschnitt aus (siehe Abb. 2.4) (Rackwitz 1954).

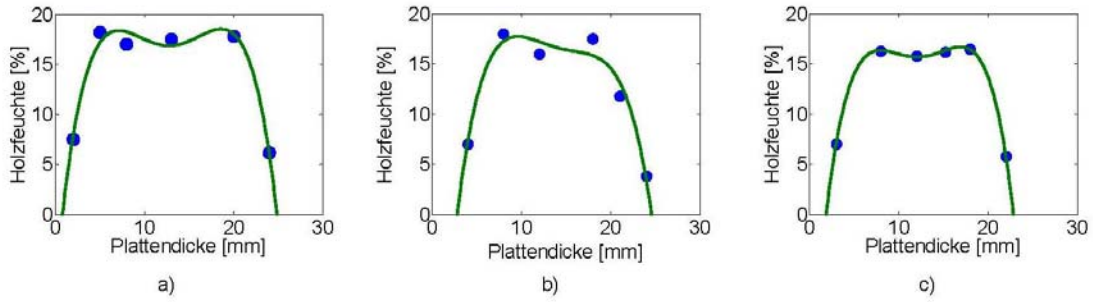


Abb. 2.4: Feuchtigkeitsprofile in einer 25-mm-Spanplatte nach a) 10 min Presszeit, b) 12,5 min Presszeit c) 15 min Presszeit, modifiziert nach Rackwitz (1954)

Die mit zunehmender Pressdauer steigende Temperatur der Partikel sowie die besonders hohe Feuchte der Partikel im Bereich der Siedewelle und Dampffront führen zu einer hydrothermischen Plastifizierung der Partikel, was sich wiederum auf das rheologische Verhalten der jeweiligen Schicht der Partikelmatte auswirkt (Haas und Frühwald 2000b; Haas und Frühwald 2000a; Lenth und Kamke 2001b; Houts et al. 2003).

2.1.2 Verdichtungsverhalten und rheologisches Verhalten der Holzwerkstoffmatte

Während der Verdichtung und der anschließenden Haltephase sowie bei möglichen Zwischen- bzw. Nachverdichtungsschritten von Holzwerkstoffmatten laufen verschiedene rheologische Prozesse ab. Die zeitlichen Veränderungen von Spannungen und Dehnungen kennzeichnen das rheologische Verhalten der Partikel innerhalb der Holzwerkstoffmatte und der sich ausbildenden Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Zur mathematischen Beschreibung der rheologischen Prozesse in Vollholz schlägt Kollmann (1961) die Verwendung des *4-Elemente-Burger-Modell* vor. Er regt in diesem Zusammenhang auch die Anwendung des Modells auf Holzwerkstoffplatten an.

Zusätzlich werden in dieser Arbeit auch die Vorgänge, die während der Verdichtung ablaufen, mit dem Begriff Rheologie im erweiterten Sinne erfasst. Die Spannungen und Dehnungen des Partikelmaterials werden durch die Heißpresse während der Verdichtung der Partikelmatte aufgeprägt. Im Wesentlichen ist von einer Kompression der Partikelmatten, das heißt einer negativen Dehnung, auszugehen. Während der anschließenden Haltephase wird, je nach Steuermodus der Presse – isochor („Wegsteuerung“) oder isobar („Drucksteuerung“) – die

Dehnung oder Spannung der Partikelmatte aufrechterhalten. Schon während der Verdichtung beginnen sich die Spannungen durch rheologische Prozesse abzubauen (Thömen 2000; Dai 2001). Der wesentliche Teil des Spannungsabbaus (Relaxation) durch die während der Verdichtung auf die Partikel ausgeübte Dehnung erfolgt jedoch durch rheologische Vorgänge während der anschließenden Haltephase im Heißpressvorgang (Dai 2001; Houts et al. 2003). Bei isobarem Steuermodus der Presse muss formal richtig von einer Retardation der Holzwerkstoffmatte gesprochen werden, da sich die Kompression der Matte durch den von außen aufgebrachten konstanten Pressdruck ändert.

In der Literatur wird der Spannungsaufbau während des Verdichtungsvorgangs unabhängig von den überwiegend rheologischen Vorgängen in der anschließenden Haltephase betrachtet und mit empirisch ermittelten Gleichungen beschrieben (Haas und Frühwald 2000b; Haas und Frühwald 2000a). Verschiedene Modelle zur Partikelverteilung und -deformation und des daraus resultierenden Spannungsaufbaus wurden ebenso entwickelt (Dai und Steiner 1993; Lang und Wolcott 1996; Neagu et al. 2006; Zhou et al. 2008). In diesem Zusammenhang sind die beiden Ansätze zu erwähnen, mit denen das rheologische Verhalten von Partikelmatten beschrieben werden kann: Einerseits das Gesamtverhalten der Partikelmatte integriert über viele Partikel im betrachteten Querschnitt und andererseits das Verhalten der Einzelpartikel untereinander in der Partikel-Klebstoff-Matrix bzw. dem Partikelnetzwerk.

Ein integratives Modell, das sowohl die Vorgänge während der Verdichtungs- als auch während der anschließenden Haltephase beschreibt, führte Ren (1991) ein. Er erweitert dazu das *4-Elemente-Burger-Modell* mit einem Partikelbruchelement, das das inelastische Verhalten der Partikelmatte beschreibt (siehe Abb. 2.5). Diese inelastischen und irreversiblen Verformungen der Holzpartikel erfolgen durch spontan-plastische Verformungen (**p**lastic and **m**icro-**f**racture) infolge von Mikrobrüchen in der Struktur der Partikel. Inelastizitäten in der Partikelmatte treten vor allem bei der Verdichtung der Partikelmatte auf (Kunesh 1961; Dai und Steiner 1993; Dai 2001).

Zur mathematischen Beschreibung bzw. Modellierung der rheologischen Eigenschaften werden Feder- und Dämpfungselemente und deren Kombinationen verwendet. Ein Federelement beschreibt dabei das rein elastische Verhalten eines Materials nach dem Hooke'schen Gesetz. Ein Dämpfungselement (*Reibungstopf* bzw. *dash pot*) erklärt das viskose Verhalten des Materials. Formänderungen der Partikelmatte (positive Dehnung entsprechend Entspannung und negative Dehnung entsprechend Kompression) durch viskoses Verhalten sind nicht reversibel.

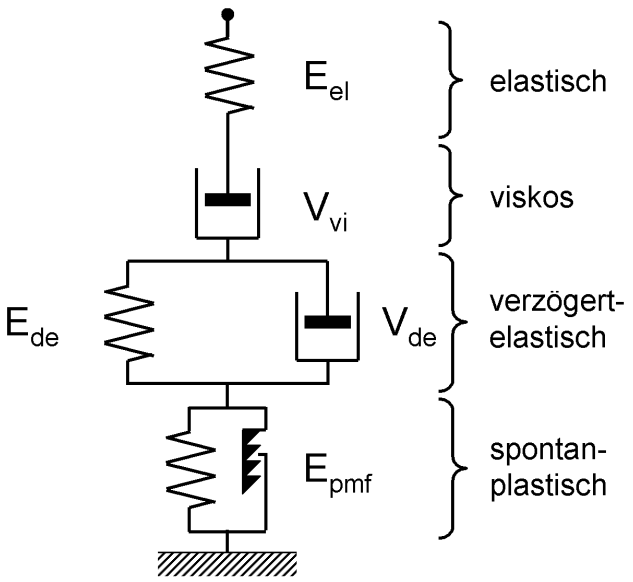


Abb. 2.5: Von Humphrey erweitertes 4-Elemente-Burger-Modell (*5-Elemente-Humphrey-Burger-Modell*) zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Holzwerkstoffpartikelmatten (Thömen 2000)

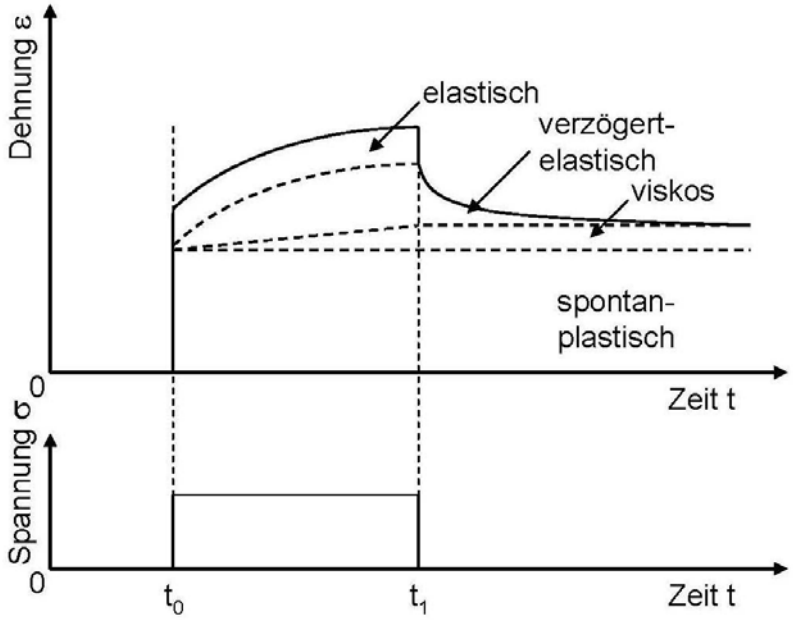


Abb. 2.6: Rheologisches Verhalten von Partikeln in einer Holzwerkstoffpartikelmatte durch die Aufprägung einer Spannung im Zeitintervall von t_0 bis t_1 (Thömen 2000)

Die parallele Kombination eines Feder- und eines Dämpfungselements (*Voigt-Kelvin-Modell*) beschreibt das verzögert-elastische Verhalten. Das Partikelbruchelement von Ren (1991) besteht aus einer Parallelschaltung einer Feder und einer *Raste*, die die irreversiblen Verformungen darstellt und in der Lage ist, die verbliebenen Restspannungen in Abhängigkeit von

Temperatur, Feuchte und Dichte aufzunehmen, die durch die Feder realisiert werden. Aus diesen Elementen setzt sich das *5-Elemente-Humphrey-Burger-Modell* zusammensetzen, mit dem das elastische und das nicht elastische Verhalten von Holzwerkstoffpartikelmatten hinreichend beschrieben werden können (Thömen 2000). Die Formänderung (Dehnung und Kompression) der gesamten Holzwerkstoffmatte zum Zeitpunkt t, aber auch nur einer endlich inkrementalen Schicht in dieser, lässt sich damit durch Gleichung (1) ausdrücken.

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{vi} + \varepsilon_{de} + \varepsilon_{pmf} \qquad \text{Gleichung (1)}$$

Abb. 2.6 stellt den zeitlichen Einfluss der einzelnen Dehnungsanteile des 5-Elemente-Humphrey-Burger-Modells an der gesamten Dehnung von Holzwerkstoffpartikeln und deren Retardation graphisch dar. Der integrative Ansatz zur Beschreibung der Rheologie der Partikelmatte in einem Modell ist vor allem für die Modellierung des Heißpressvorganges sinnvoll (Thömen 2000; Thömen et al. 2006). Das betrachtete Volumenelement der Partikelmatte sollte bei diesem Ansatz in Relation zu den einzeln Holzwerkstoffpartikeln sehr groß sein (Thömen und Humphrey 2003).

Während des Heißpressvorganges wird zu Beginn der Verdichtung im Wesentlichen das Hohlraumvolumen der vorverdichteten, aber noch lockeren Partikelmatte verringert (Dai und Steiner 1993; Wolcott et al. 1994; Lenth und Kamke 1996). Während dieser Phase sind die aufgebauten Spannungen gering, Lenth und Kamke (1996) sprechen hier von einem Spannungsplateau zu Beginn der Verdichtung. Zunehmend kommen die Partikel in einen engeren Kontakt zueinander, der zu einer deutlichen Kraftübertragung zwischen den Partikeln führt. Zu diesem Zeitpunkt wird von einer Biegebeanspruchung der Partikel zwischen deren Kreuzungs- und Überlappungspunkten bei der Verdichtung ausgegangen (Rackwitz 1954; Wolcott et al. 1994; Dai 2001; Neagu et al. 2006). An diesen Stellen kommt es dabei zu lokal sehr hohen Drücken, da die Fläche dieser Kreuzungs- und Überlappungspunkte in Relation zur Fläche der Pressplatten, über die die Kraft eingetragen wird, sehr gering ist. Das Zellgefüge der Partikel wird dadurch zusätzlich komprimiert (Lenth und Kamke 1996). Das führt zu einem inelastischen, nicht linearen Verdichtungsverhalten (Kunesh 1961; Dai und Steiner 1993; Lenth und Kamke 1996; Dai 2001). Bei Spänen und Strands, die vorzugsweise parallel zur Plattenebene ausgerichtet sind, baut sich ein Druck senkrecht zur Faserrichtung der Partikel auf (Dai und Steiner 1993; Walther 2003). Vor allem bei der Verdichtung von OSB-Matten kann es bei lokal sehr häufigen Überlappungsstellen zu extremen örtlichen Druckspitzen kommen (Kruse et al. 2000). Bei Fasermatten stellt sich diese Problematik nicht so

deutlich dar (Neagu et al. 2006). Die mechanische Belastung der Partikel während der Verdichtung kann zur Ausprägung eines *Mechanical Weak Boundary Layer* (MWBL) an der Partikeloberfläche führen. Stehr (1999) führt den Begriff des *Mechanical Weak Boundary Layer* auf Basis der Ergebnisse von Bikerman (1968) ein, der eine allgemeine Theorie zum *Weak Boundary Layer* (WBL) aufgestellt hat für das Verhalten von Holzoberflächen bei der Verklebung. Der *Mechanical Weak Boundary Layer* ist eine Lockerzone auf der Oberfläche des Substrats, deren Festigkeit durch die vorherige meist mechanische Bearbeitung geschwächt ist. Es ist aber auch eine Schwächung durch Verwitterung und Alterung der zu verklebenden Holzoberfläche möglich. Der Bruch einer Klebeverbindung kann dadurch teilweise im Substrat, auf dem geklebt wird, erfolgen. Die mechanische Belastung der Partikel während der Partikelherstellung und die Verdichtung der Matte können zu der Entstehung einer MWBL auf der Partikeloberfläche beitragen.

V. Haas (1998) leitet analytisch eine komplexe Funktion (siehe Gleichung (1)) aus dem Spannungsverhalten von Haufwerken bei deren Verdichtung her, mit der die Spannung σ [N mm^{-2}] in einer Partikelmatte während der Verdichtung beschrieben werden kann. Die Einflüsse der Feuchte u [%], der Temperatur ϑ [°C] und der Rohdichte ρ [kg m^{-3}] werden in dieser Funktion berücksichtigt.

$$\sigma = e^{\alpha u + \beta \vartheta + \chi} \cdot \rho^{\alpha_m u + \beta_m u + \chi_m} \qquad \text{Gleichung (2)}$$

Mit den Regressionskoeffizienten α, β und χ für die Verdichtungsspannung bzw. mit α_m, β_m und χ_m für den Rohdichteeinfluss auf die Verdichtungsspannung wird die Funktion nach Gleichung (1) auf die unterschiedlichen Partikelgrößen der jeweiligen Holzwerkstoffe angepasst. Regressionskoeffizienten wurden von v. Haas (1998) für Fasern, Deckschichtspäne, Mittelschichtspäne und Strands ermittelt.

Thömen (2000; 2006) misst dem Partikelbruchelement während der Verdichtung, besonders in den frühen Phasen, den bedeutendsten Anteil an der Dehnung der Partikelmatte zu. Aus der Gleichung (1) leitet Thömen (2000) den E-Modul (E_{pmf}) für das nicht elastische Verhalten der Partikelmatte ab. Für die Anwendung des Partikelbruchfaktors ist eine Fallunterscheidung zu treffen, ob die momentane Spannung kleiner oder größer ist als die Spannung, die durch elastische oder verzögert-elastische Verformungen aufgenommen werden kann. Für den Fall, dass die Spannung größer ist, wird eine inelastische Verformung durch den Partikelbruch im *5-Elemente-Humphrey-Burger Modell* berücksichtigt.

Zudem stellte v. Haas (1998) auch fest, dass Zweitverdichtungen sowie ausgehärteter Klebstoff auf den Partikeln keinen nennenswerten Einfluss auf die sich ausbildenden Spannungen in der Partikelmatte haben. Unter Zweitverdichtung ist nochmalige Verdichtung einer Partikelmatte nach vorheriger Entspannung zu verstehen. Eine Ausnahme für die Spannungen bei der Zweitverdichtung bilden Fasermatten, für die die Spannungen bei der Zweitverdichtung deutlich geringer sind als bei der Erstverdichtung.

Die wesentlichen Einflüsse auf die sich aufbauenden Spannungen bei der Verdichtung der Partikelmatte sind die Feuchte der Partikel und deren Temperatur sowie deren Dichte. Untersuchungen hierzu wurden schon früh an Spanplatten durchgeführt (Rackwitz 1954; Fahrni 1956). Der wesentliche Grund für verringerte Spannungen bei erhöhter Feuchte und Temperatur der Partikel ist die schon erwähnte hydrothermische Plastifizierung der Holzkomponenten – im Wesentlichen des Lignins –, die zur einer deutlichen Spannungsreduzierung führen (Goring 1971; Stevens und Wienhaus 1984; Kelley et al. 1987). V. Houts (2003) stellt fest, dass eine Temperaturerhöhung einen größeren Einfluss auf Fasern für MDF-Platten hat als eine Erhöhung der Feuchte. Da die Partikelmatte durch den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen kombinierten Wärme- und Stofftransport nicht gleichmäßig erwärmt wird, können sich in den verschiedenen Schichten der Matte unterschiedlich hohe Spannungen gegen den von den Pressplatten aufgeprägten Pressdruck aufbauen, sodass es zu unterschiedlichen Kompressionen (negative Dehnung) der einzelnen Schichten kommt. Das findet in der Ausprägung des Rohdichteprofils senkrecht zur Partikelmatte seinen Ausdruck, das in Abschnitt 2.2 näher erläutert wird.

Die verschiedenen Dehnungsanteile einer endlich inkrementalen Schicht einer Partikelmatte wirken sich durch die hydrothermische Plastifizierung der Partikel, die zu einem unterschiedlichen Spannungsabbau in einzelnen Schichten der Partikelmatte im zeitlichen Fortschreiten des Heißpressvorgangs führt, auf alle weiteren Schichten der Partikelmatte aus. So können sich durch lokale Kompression (negative Dehnung) einer Schicht infolge eines Spannungsabbaus andere Schichten durch elastische Verformung oder Reste der verzögert-elastischen Verformung, die zu diesem Zeitpunkt noch in der Schicht gespeichert sind, zurückdehnen (positive Dehnung). Damit befindet sich die Partikelmatte in einem ständigen Ungleichgewicht der inneren Spannungen einzelner Schichten, die zu kleinen Dichteverschiebungen durch Entspannen einzelner Schichten und weiteren Verdichtungen (Kompression) anderer Schichten führt (Wang et al. 2004). Insgesamt kommt es jedoch durch das mit der hydrothermischen Plastifizierung zunehmende viskos-elastische Verhalten der Partikel zu einem Spannungsabbau in der Holzwerkstoffmatte (Neagu et al. 2006). Am Ende des Heißpressvorgangs sollte

die Summe der Spannungen aus verbliebenen Restspannungen der Partikel und dem Gasdruck so gering sein, dass die schon ausgebildete Festigkeit der Klebharzbrücken in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix diese Spannungen aufnehmen kann. Dabei ist jedoch zur berücksichtigen, dass die „in-situ-Festigkeit“ einer gerade gepressten Platte im Vergleich zu der an einer ausgekühlten Platte gemessenen Festigkeit deutlich niedriger ist. Auch zeigt die fertige Holzwerkstoffplatte nach dem Verlassen der Presse eine leichte Rückdehnung bzw. Rückfederung, die durch die verbliebenen Restspannungen erzeugt wird. Diese Erscheinung wird als *spring-back-Effekt* bezeichnet.

2.1.3 Permeabilität von Holzwerkstoffmatten

Die Permeabilität von Partikelmatten und fertigen Holzwerkstoffplatten ist eine wichtige Eigenschaft während des Heißpressvorgangs, da diese sich kontinuierlich verändert und zu verschiedenen Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs unterschiedliche Werte annimmt. Dabei ist zwischen den beiden Hauptrichtungen der Holzwerkstoffmatte zu unterscheiden: (i) senkrecht zur Plattenebene („vertikale Permeabilität“) und (ii) parallel zur Plattenebene („horizontale Permeabilität“). Zu verschiedenen Zeitpunkten des Heißpressvorgangs sind beide Permeabilitäten von unterschiedlicher Bedeutung. Die vertikale Permeabilität ist, wie im Abschnitt 2.1.1 beschrieben, Grundlage für den konvektiven Wärme- und Stofftransport senkrecht zur Plattenebene. Die horizontale Permeabilität beeinflusst die Entlüftung der Platte während der anfänglichen Verdichtung und besonders im Einlaufmaul von kontinuierlichen Pressen (Hanvongjirawat 2003; Thömen und Humphrey 2003). Sie ist der bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten limitierende Faktor. Dies gilt vor allem für dünne Fasermatten, die mit sehr hoher Geschwindigkeit in kontinuierliche Pressen einlaufen. Im Bereich des Einlaufmauls kann es durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des in diesem Bereich der Matte befindlichen Luft-Dampf-Gemischs entgegengesetzt der Bewegung der Matte (also aus dem Einlaufmaul heraus) dazu kommen, dass wenig verfilzte Faseragglomerate aus der obersten Lage der vorverdichteten Fasermatte herausgerissen werden und so das Gefüge der Matte zerstören. Dieses Phänomen nennt sich Ausbläser. Bei Faserplatten mit hoher mittlerer Rohdichte werden während des Heißpressvorgangs gezielt Entgasungsphasen für die Matte in das Pressprogramm integriert, um die horizontale Permeabilität für das Luft-Dampf-Gemisch zu erhöhen, das bei der Verdichtung der Fasermatte durch die abnehmende Permeabilität der Matte schwer entweichen kann und somit mit komprimiert werden würde. Auch der sich vor allem zum Ende des Pressvorgangs ausbildenden Dampfdruck kann dadurch in Grenzen gehalten werden.

Die Permeabilität wird in Holzwerkstoffmatten hinreichend genau durch das Gesetz von Darcy für laminare Strömungen beschrieben, welches allgemein für eindimensionale Strömungsvorgänge durch Gleichung (3) dargestellt wird. Hanvongjirawat (2003) vermutet aufgrund seiner Ergebnisse aus Messungen und Simulationen allerdings eine nicht vollkommen laminare Strömung in den von ihm untersuchten Holzwerkstoffmatten.

$$K = -\frac{\eta}{A}\dot{Q}\frac{dx}{dp} \qquad \text{Gleichung (3)}$$

In Gleichung (3) sind:

K	spezifische Permeabilität in [m^3]
η	dynamische Viskosität des Fluids in [Pa s]
A	durchströmter Querschnitt in [m^2]
$\dot{Q}$	Volumenstrom in [$m^3\ s^{-1}$]
dp/dx	Gasdruckgradient in [Pa m^{-1}]

Das Gesetz von Darcy ist nur für kleine Volumenströme, laminare Strömung im Porenvolumen und stationäres Strömungsverhalten gültig. Erste Untersuchungen zur Permeabilität an Holzwerkstoffmatten führten Denisov et al. (1975) an Spanmatten im Rohdichtebereich von 300 kg m^{-3} bis 900 kg m^{-3} durch, die aus definierten Spänen bestanden. Hata et al. (1993) untersuchten Spanplatten, die durch das Dampfinjektionsverfahren hergestellt wurden. Systematische Untersuchungen der Permeabilität der verschiedenen Partikel für Holzwerkstoffe wurden in den letzten Jahren durchgeführt. In diesem Zusammenhang sind die aufeinander aufbauenden Arbeiten von Haselein (1998), v. Haas (1998), Heinemann (1999), Hanvongjirawat (2003) und Thömen und Klüppel (2008) zu nennen. Gemeinsames Ziel aller dieser Untersuchungen war die Erstellung von Permeabilitätsdaten für die Simulation des Heißpressvorganges in mathematisch-analytischen Modellen.

Haselein (1998) misst die horizontale und vertikale Permeabilität an kalt verdichteten Fasermatten bei verschiedenen Rohdichten, wobei diese Matten zwischen den Messungen weiter verdichtet werden. Die Methodik von v. Haas (1998) basiert auf der eindimensionalen Messung der Permeabilität an zylindrischen Probenkörpern, die aus einer Holzwerkstoffplatte mit homogenem Rohdichteprofil hergestellt werden. Heinemann (1999) nutzt die Methodik von v. Haas (1998) für die Messung der Permeabilität bei verschiedenen Fluidtemperaturen. Hanvongjirawat (2003) stellt die Untersuchungsmethoden von Haselein (1998) und v. Haas (1998) kritisch einander gegenüber und diskutiert deren Vor- und Nachteile. Wesentlicher

Aspekt ist hier, dass die Untersuchungen von Haselein (1998) und v. Haas (1998) nicht nur unterschiedliche Ergebnisse bringen, sondern auch komplett unterschiedliche Tendenzen für die Rohdichteabhängigkeit aufweisen. Aus beiden Ansätzen entwickelt Hanvongjirawat (2003) zwei eigene Methoden zur Bestimmung der Permeabilität von Partikelmatten, mit denen er die Vorteile der methodischen Ansätze von Haselein (1998) und v. Haas (1998) zu vereinen versucht. Die erste von Hanvongjirawat (2003) erwickelte Methode ermöglicht die eindimensionale Messung der Permeabilität von Partikelmatten entweder in horizontaler oder vertikaler Richtung. Die Partikelmatten werden in der Versuchsvorrichtung kalt auf die für die Messung gewünschte Rohdichte verdichtetet. So können an einer Probe, die zwischen den Messungen weiter verdichtet wird, Schritt für Schritt die Permeabilitätsdaten in einem weiten Rohdichtebereich erstellt werden. Infolge ihrer Baugröße ist diese Versuchseinrichtung allerdings nur für Fasern und Späne geeignet, weniger hingegen für OSB-Strands. Die zweite Methode ist für alle Partikelgrößen geeignet und ermöglicht die gleichzeitige, zweidimensionale Messung der Permeabilität an einer Probe bei verschiedenen Rohdichten. Die Permeabilitätswerte für jede der beiden Richtungen werden durch zwei Berechungsmodelle ermittelt, mit denen die zweidimensionalen Strömungsgleichungen nach dem Gesetz von Darcy numerisch gelöst werden. Abb. 2.7 und Abb. 2.8 zeigen die horizontalen und die vertikalen Permeabilitätswerte für Fasermatten, die in den verschiedenen Versuchsmethoden ermittelt worden sind. Die Permeabilitätswerte nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Rohdichte der Partikelmatte ab. Die Matte wird für fluide Medien immer unwegsamer. Die vertikale Permeabilität ist etwas geringer als die in horizontaler Richtung (Abb. 2.9). Das gilt im Wesentlichen für alle Partikelmaterialien. Die Mess- und Auswertemethoden von Hanvongjirawat (2003) bestätigen in der Größenordnung und Tendenz die Werte von v. Haas (1998).

Thömen und Klüppel (2008) untersuchen den Einfluss der Partikelgröße auf die horizontale Permeabilität von Partikelmatten. Sie stellen fest, dass für Fasermatten die Partikelgröße im Vergleich zur anatomischen Struktur der verwendeten Holzart eine untergeordnete Rolle spielt.

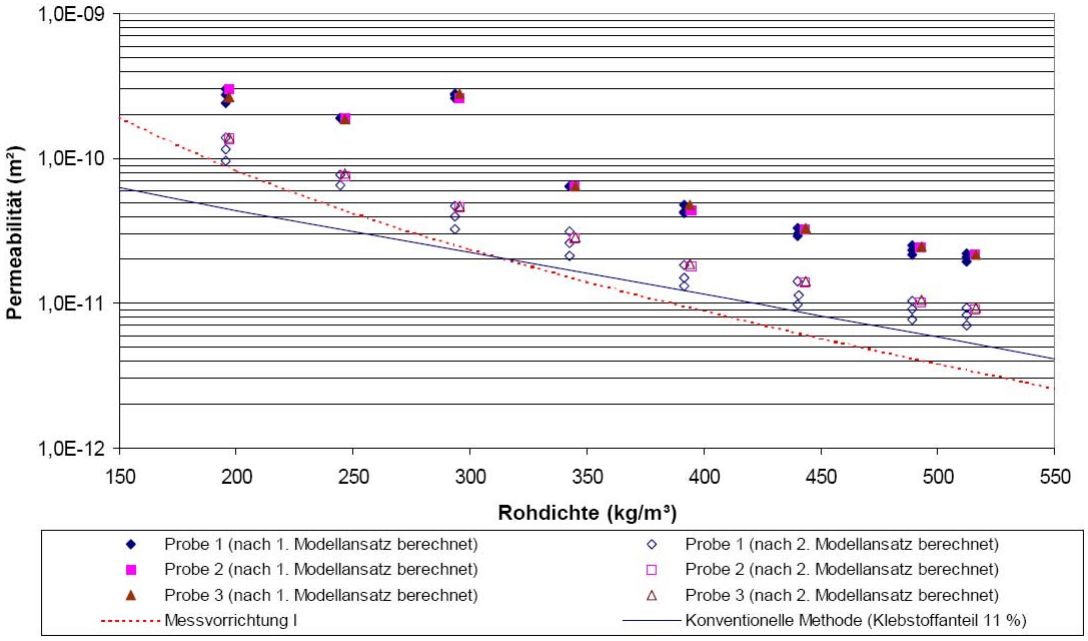


Abb. 2.7: Horizontale Permeabilitätswerte von Fasermatten in Abhängigkeit der Rohdichte (berechnete Werte nach dem jeweils angegebenem Ansatz aus den Messwerten der zweidimensionale Messmethode von Hanvongjirawat (2003)). Vergleichend dargestellt sind die Ergebnisse der ersten Messmethode (Messvorrichtung I, gestrichelte Linie) und der Methode von v. Haas (1998) (konventionelle Methode, durchgezogene Linie). Messwerte: Datenpunkte (◊, □, Δ)

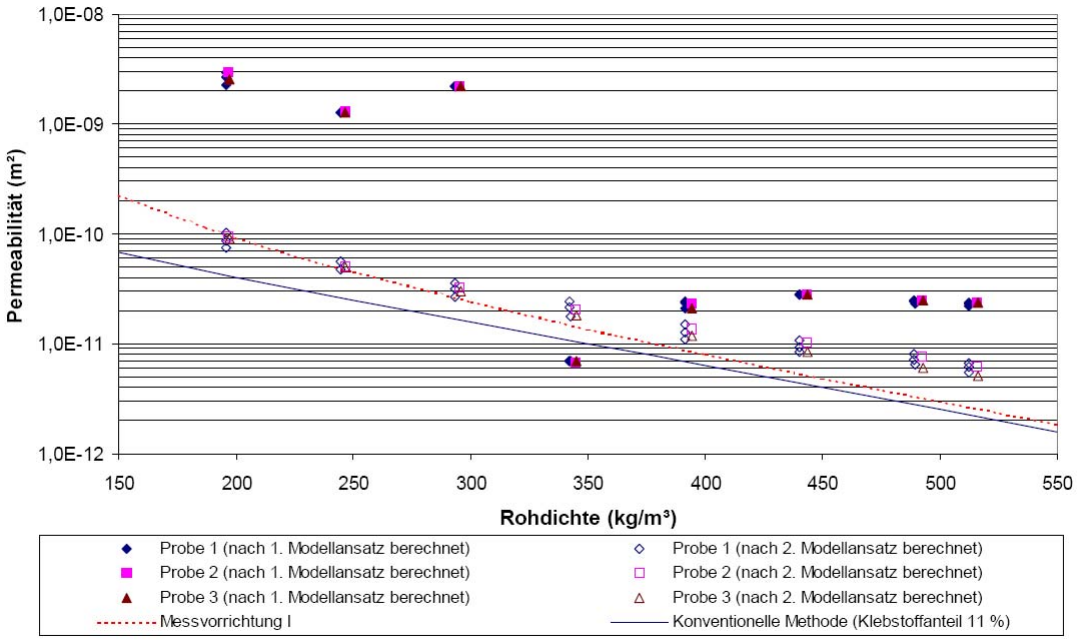


Abb. 2.8: Vertikale Permeabilitätswerte von Fasermatten in Abhängigkeit der Rohdichte (berechnete Werte nach dem jeweils angegebenem Ansatz aus den Messwerten der zweidimensionale Messmethode von Hanvongjirawat (2003)). Vergleichend dargestellt sind die Ergebnisse der ersten Messmethode (Messvorrichtung I, gestrichelte Linie), und der Methode von v. Haas (1998) (konventionelle Methode, durchgezogene Linie). Messwerte: Datenpunkte (◊, □, Δ)

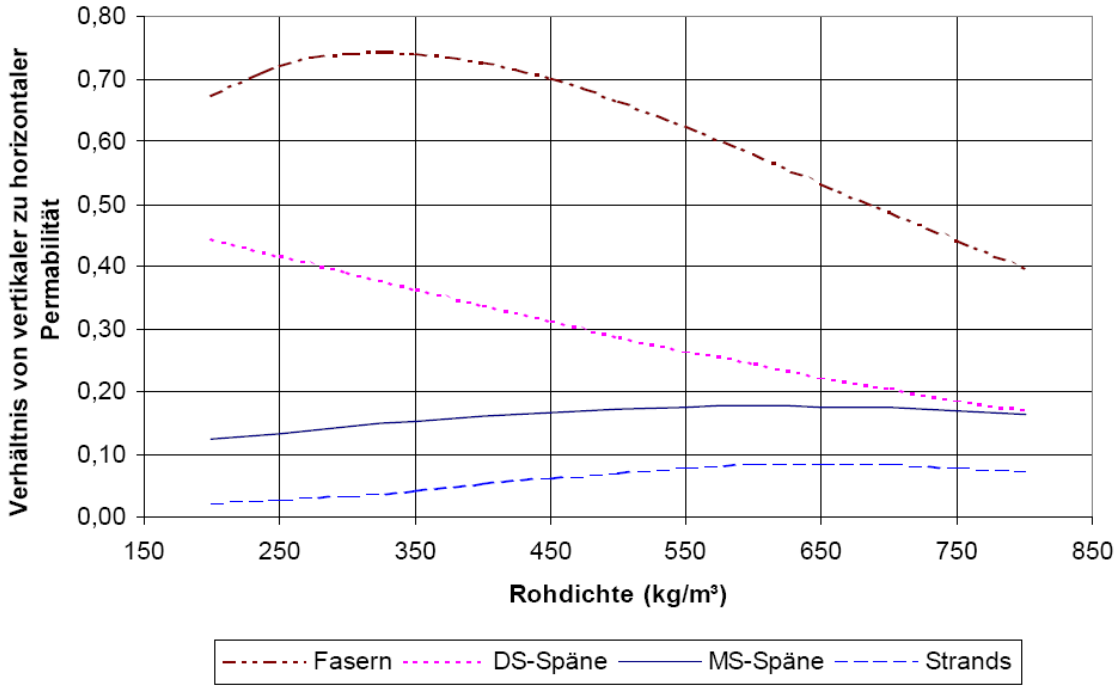


Abb. 2.9: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität verschiedener Partikelmaterialien in Abhängigkeit der Rohdichte, erfasst mit der zweidimensionalen Messeinrichtung von Hanvongjirawat (2003)

2.1.4 Klebstoffaushärtung in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix

Die Fixierung der einzelnen Holzpartikel untereinander erfolgt im Heißpressvorgang durch den Klebstoff, der durch die zugeführte Wärme aktiviert wird. Bei hinreichender Wärmezufuhr über einen gewissen Zeitraum bildet sich die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix innerhalb der Partikelmatte aus. Es wird davon ausgegangen, dass die Aushärtungsreaktion bei den überwiegend eingesetzten Kondensationsharzen, die für die Holzwerkstoffherstellung verwendet werden, bei ca. 100 °C einsetzt (Suchsland 1967). Die Klebeverbindung in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix lässt sich in zwei Bereiche einteilen: Die Adhäsion im Bereich des Holz-Klebstoff-Überganges und die Kohäsion innerhalb des Klebstoffes. Nach Dunky und Niemz (2002) ist die Klebstoffaushärtung abhängig von Temperatur, pH-Wert und Feuchte. Heinemann (2004) diskutiert ausführlich die möglichen Theorien zur Ausbildung der Adhäsionsfestigkeit. Den Adsorptionskräften durch elektrostatische Kräfte wird bei der Verklebung von Holz eine hohe Bedeutung zugemessen. Nach Marra (1992) kommt es auch zu einer mechanischen Verankerung des Klebstoffes an bzw. in der rauen Oberfläche der Holzpartikel.

Konnerth et al. (2008) stellen an Vollholzverleimungen fest, dass Phenol-Resorcinol-Formaldehyd-Klebstoff (PRF) im Gegensatz zu Polyurethanklebstoff (PUR) in das Zellwandgefüge eindringt.

Walther (2006) untersucht Versagensmuster von Querzugproben an REM-Aufnahmen. Es werden keine Brüche innerhalb des Klebstoffes beschrieben, sondern als typische Bruchfläche der Bereich zwischen Sekundärwand 1 und Mittellamelle innerhalb der Zellwand angegeben. Diese Beobachtungen bestätigen die Annahme, dass es kaum zu einer mechanischen Verankerung des Klebharzes in der Zellwand oder gar den Zell-Lumina der Holzpartikel kommt. In diesem Zusammenhang unterstreicht Walther (2006) die Eignung von UF-Klebharzen für die Herstellung von Faserplatten, trifft aber keine Aussage über die Eindringtiefe des verwendeten Klebstoffes in die Zellwand.

Weiterhin zeigt Walther (2006) REM-Aufnahmen von unbeleimten und beleimten Fasern. Die Oberflächenrauhigkeit der Fasern und mögliche mechanische Verankerungspunkte sind erkennbar. Die beleimten Fasern weisen einen unterbrochenen, aber flächigen Klebstofffilm auf. Anhand von TEM-Aufnahmen wurden Klebstoffbrückendicken bestimmt, die in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades zwischen 50 nm und 186 nm liegen. Weiter beschreibt Walther (2006) eine eindeutige Meniskus-Bildung im Zwickel von zwei benachbarten Fasern, in die kleine Blasen eingelagert sind. Diese werden auf verdampfendes Wasser aus dem Klebstoff während des Heißpressvorganges zurückgeführt, das im Klebstoff eingeschlossen bleibt.

Heinemann (2004) führte systematische Untersuchungen zur Aushärtung von Aminoplastharzen mit verschiedenen Methoden durch. Dabei zeigte sich bei Zugscherversuchen ein linearer Zusammenhang von Presszeit und Klebstofffestigkeit, während sich bei der Querzugprüfung ein logarithmischer Zusammenhang darstellte. Für die Querzugprüfungen direkt im Anschluss an den Heißpressvorgang kam die von Roos (2000) vorgestellte Laborpresse zum Einsatz. Die Zugscherversuche wurden mit dem ABES (**A**utomated **B**onding **E**valuation **S**ystem) durchgeführt, das Humphrey und Zavala (1989) erstmals vorstellten. Die unterschiedlichen Abhängigkeiten – linear und logarithmisch – führt Heinemann (2004) auf die verschiedenen methodischen Ansätze in der Versuchsdurchführung zurück. Im Falle der Querzugprüfung fließen nach seinen Vermutungen zusätzlich die zum Prüfzeitpunkt in der Matte noch gespeicherten Rückstellkräfte aus den Partikeln mit ein. Das hat besonders starke Auswirkungen bei kurzen Presszeiten. Heinemann (2004) bildet zum Vergleich von unmittelbar nach dem Heißpressvorgang auf Querzug geprüften Proben und nach einer Klimatisierung geprüften Proben einen sog. Querzugskoeffizienten von zwei unter vergleichbaren Bedingungen hergestellten Proben. Dieser Querzugskoeffizient steigt erwartungsgemäß in Abhängigkeit von Presstemperatur und Rohdichte an.

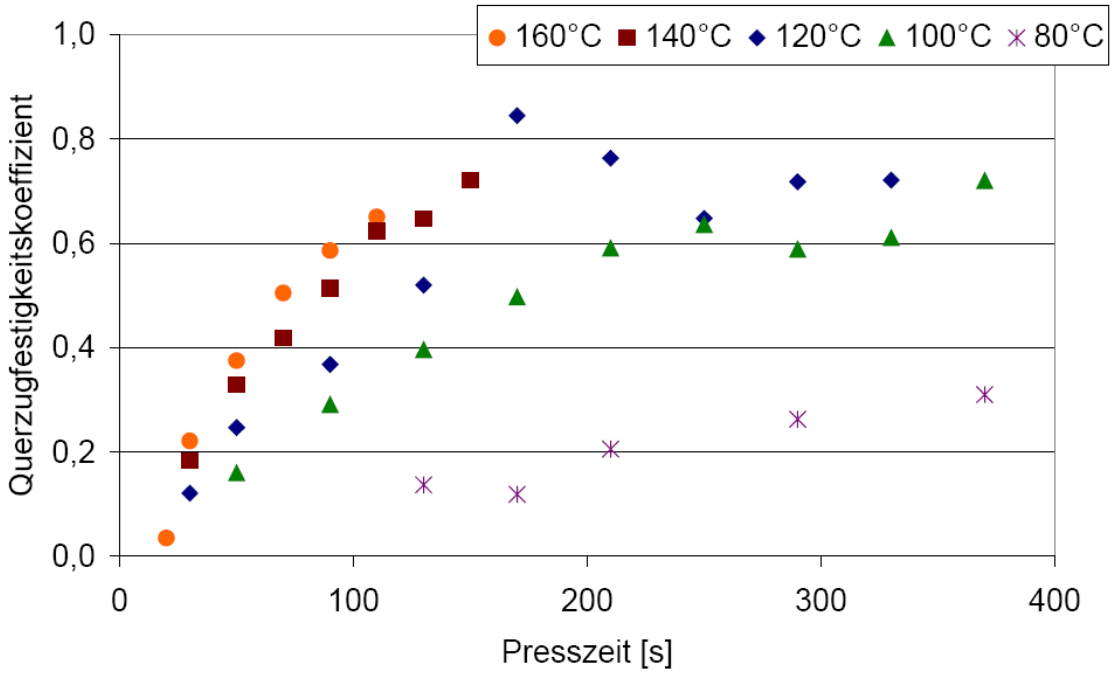


Abb. 2.10: Querzugfestigkeitskoeffizienten für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit von Presszeit und Presstemperatur bei einer Rohdichte von $\rho = 650$ kg m^{-3} (Heinemann 2004)

Abb. 2.10 zeigt die Entwicklung eines solchen Querzugskoeffizienten für Faserplatten bei einer Rohdichte von $\rho = 650$ kg m^{-3}. Heinemann (2004) leitet daraus unter anderem ein Nachhärtungspotenzial für den Klebstoff nach Beendigung des Heißpressvorgangs ab, wenn auch erst bei längerer Presszeit. Bei Haltephasen bzw. bei Entlüftungs- und Nachverdichtungsschritten muss infolge der fortlaufenden rheologischen Prozesse und der Massebewegungen in der Partikelmatte (siehe Abschnitt 2.1.2) sichergestellt werden, dass die sich ausbildende Holzpartikel-Klebstoff-Matrix nicht gestört wird und es damit zum Bruch von sich in der Aushärtung befindenden Klebstoffbrücken kommt (Jahic 2000; Wang und Winistorfer 2000b). Meyer (2007) hat bei seinen Untersuchungen zu pressenkonstruktionsabhängigen Druckschwankungen während des Heißpressvorgangs solche Auswirkungen nicht festgestellt. Zum Ende des Pressvorgangs muss der Klebstoff, der zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig ausgehärtet ist, eine ausreichende Festigkeit entwickelt haben, sodass dadurch die Rückstellkräfte, die in den einzelnen Schichten der Partikelmatte noch vorhanden sind, kompensiert werden können.

2.2 Das Rohdichteprofil

Das Rohdichteprofil ist eine der wesentlichen Eigenschaften einer Holzwerkstoffplatte: Es bildet sich während des Verdichtungsvorganges und in der anschließenden Haltephase auf Solldicke aus und wird durch die sich gegenseitigenseitig beeinflussenden Prozesse des kombinierten Wärme- und Stofftransports, der Permeabilität der Holzwerkstoffmatte, der rheologischen Vorgänge in der Matte und der Klebstoffaushärtung bestimmt. Das Rohdichteprofil beschreibt die Dichteverteilung über den Plattenquerschnitt (siehe Abb. 2.11). Grob lässt sich die Platte in die oberflächennahen Deckschichten und die Mittelschicht einteilen. Viele Eigenschaften korrelieren eng mit dem Rohdichteprofil, daher wird es zu einer ersten Charakterisierung von Holzwerkstoffplatten herangezogen (Boehme 1991; Schröder 1994; Kruse et al. 1996; Schulte und Frühwald 1996a; Schulte und Frühwald 1996b). Je nach Plattenart wird das Rohdichteprofil durch die Partikeleigenschaften sowie deren Größe und Struktur unterschiedlich stark ausgeprägt. Idealerweise ist das Rohdichteprofil symmetrisch und weist beidseitig dicht unterhalb der Plattenoberfläche in den Deckschichten jeweils ein Dichtemaximum auf. Zur Mittelschicht fällt die Rohdichte deutlich ab. Zwischenmaxima in diesem Bereich des Rohdichteabfalls zur Mittelschicht sind nicht erwünscht. Ein Zwischenmaximum bedingt auch ein Zwischenminimum im Bereich zwischen Deckschichtmaximum und Zwischenmaximum. Die Vorstufe für die Zwischenmaxima ist ein Bereich konstanter Dichte in dieser Zone des Rohdichteabfalls zur Mittelschicht hin. Ein solches Rohdichteprofil wird auch als Schulterprofil bezeichnet. Ein Schulterprofil entsteht, wenn zum Zeitpunkt eines Nachverdichtungsschrittes eben diese Zwischenschichten soweit plastifiziert sind, dass diese durch die weitere Verdichtung auf eine nahezu konstante Dichte in diesem Bereich des Rohdichteprofils verdichtet werden. Die äußeren Schichten weisen durch die höhere Dichte eine höhere Steifigkeit aus, die weiter innen liegenden Schichten sind hydrothermisch noch weniger stark plastifiziert und daher steifer. Wird weiter verdichtet, prägen sich anstatt der Zonen konstanter Dichte im Schulterprofil Zwischenmaxima aus. Die Ausprägung und Form des Rohdichteprofils ist ein qualitatives, nicht genormtes Merkmal, das eine große Bedeutung für Gebrauchseigenschaften der fertigen Platte hat (Kelly 1997). Quantifizierbare Größen sind die Position der Rohdichtemaxima in den Deckschichten, die Lage des Rohdichteminimums und die mittlere Rohdichte (Schröder 1994). Einen weiteren Ansatz zur quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils geben Wong el al. (1998) (siehe Abb. 2.13).

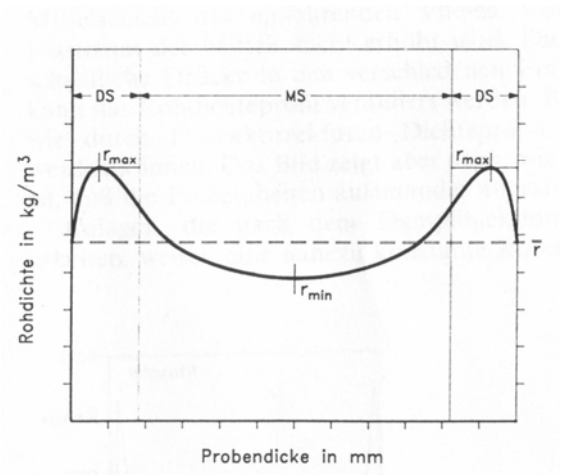


Abb. 2.11: Idealisiertes Rohdichteprofil für eine MDF-Platte nach Boehme (1992), DS: Deckschichten, MS: Mittelschichten, r_{max}: maximale Rohdichte, r_{min}: minimale Rohdichte

Als ein ausgeprägtes Rohdichteprofil soll in dieser Arbeit eine vertikale, symmetrische Dichteverteilung mit deutlichen Maxima dicht unterhalb der Plattenoberflächen und einem Dichtegradienten zur Grenze zwischen Deck- und Mittelschicht hin verstanden werden. Dabei kann die Mittelschicht mit einer annähernd homogenen Dichte (im Gegensatz zur „U"-förmigen mittleren Schicht in Abb. 2.11) unterschiedlich breit sein. Eine breite, homogene Mittelschicht soll als ausgeprägt verstanden werden. Nach dieser qualitativen Beschreibung ist das Rohdichteprofil in Abb. 2.11 als ausgeprägt, jedoch nicht als deutlich ausgeprägt anzusehen.
Für hier betrachteten MDF-Platten ist das Rohdichteprofil von hoher Bedeutung, weil keine Beeinflussung des Profils durch unterschiedliche Partikel gegeben ist; die eingesetzten Fasern (und gegebenenfalls vorhandenen Faserbündel) sind in den beiden Außenzonen („Deckschicht") und in der inneren Zone („Mittelschicht") identisch (Boehme 1992; Deppe und Ernst 1996).

2.2.1 Entstehung des Rohdichteprofils

Das Rohdichteprofil entsteht während des Heißpressvorgangs in der Verdichtungs- und in der Haltephase. Die geformte und vorverdichtete Partikelmatte kommt beim Einlauf in die Heißpresse mit den heißen Pressplatten in Kontakt. Dabei verdampft das in den oberflächennahen Schichten (Deckschichten) vorhandene Wasser. Es bildet sich der kombinierte Wärme- und Stofftransport (die Siedewelle), der von den Deckschichten aus das Matteninnere erwärmt und befeuchtet und dabei die Partikel hydrothermisch plastifiziert. Durch konduktive Wärmeleitung werden die äußeren Schichten der Platte weiter erwärmt und entfeuchtet, sodass sich eine Temperatur über der Siedetemperatur des Wassers ausbildet und die Feuchte in Form von Wasserdampf so vor sich her schiebt. Parallel zum Vordringen der Wärme und Feuchte in Richtung der Mittelschicht wird die Partikelmatte verdichtet. Zu Beginn der Verdichtung sind

nur die äußeren Schichten plastifiziert, die inneren weisen eine deutlich höhere Steifigkeit auf. Dadurch werden die äußeren Schichten höher verdichtet. Mit dem Fortschreiten der Plastifizierung zur Mittelschicht hin werden auch die mittleren Schichten verdichtet, jedoch nicht so hoch wie die Deckschichten der Holzwerkstoffplatte. Mit der Durchwärmung der Partikelmatte durch den kombinierten Wärme- und Stofftransport beginnt auch der Klebstoff auszuhärten und kann so die Steifigkeit der einzelnen Schichten der sich bildenden Holzpartikel-Klebstoff-Matrix erhöhen.

Wang und Winistorfer (2000b) unterteilen die Entwicklung des Rohdichteprofils in zwei Phasen und fünf Abschnitte (Abb. 2.12). Die erste Phase reicht vom Beginn des Heißpressvorgangs bis zum Erreichen der Solldistanz der Presse; der erste Abschnitt ist durch eine gleichmäßige Verdichtung der Partikelmatte geprägt, wobei das Hohlraumvolumen zwischen den Partikeln reduziert wird. Im zweiten Abschnitt beginnen sich die Partikel in den Schichten über den Mattenquerschnitt durch den entstehenden Temperaturgradienten und die damit einhergehende hydrothermische Plastifizierung der äußeren Schichten ungleichmäßig zu verdichten. Die oberflächennahen Schichten verdichten sich stärker. In der zweiten Phase, nach Erreichen der Solldistanz der Presse, beginnen sich im Abschnitt drei die Deckschichtmaxima zu formen mit einem Rohdichteabfall zu den Oberflächen der Matte und einer noch relativ gleichmäßigen Rohdichte in der Plattenmitte. Der Rohdichteabfall von den Rohdichtemaxima in den Deckschichten zu den Plattenoberflächen wird von Wang und Winistorfer (2000b) durch ein Austrocknen der Matten begründet. Die Mittelschicht der Matten dehnt sich durch noch nicht relaxierte Spannungen in diesen Schichten zurück und verdichtet dabei die Deckschichten. Dieser dritte Abschnitt ist beendet, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Deckschicht und Mittelschicht maximal ist. Im vierten Abschnitt wird die Mittelschicht plastifiziert und durch noch mögliche Rückdehnung der Deckschichten weiter verdichtet. Die fünfte Phase ist durch noch nicht relaxierte Restspannungen über den gesamten Querschnitt der fast fertigen Partikelmatte gekennzeichnet. Das erzeugt zusammen mit dem Dampfdruck den *spring-back-Effekt*, der bei der Öffnung der Presse bzw. beim Verlassen einer endlosen Platte aus der kontinuierlichen Presse auftritt. Wang und Winistorfer (2000b) weisen auf den nicht gleichmäßigen *spring-back-Effekt* der einzelnen Plattenschichten hin.

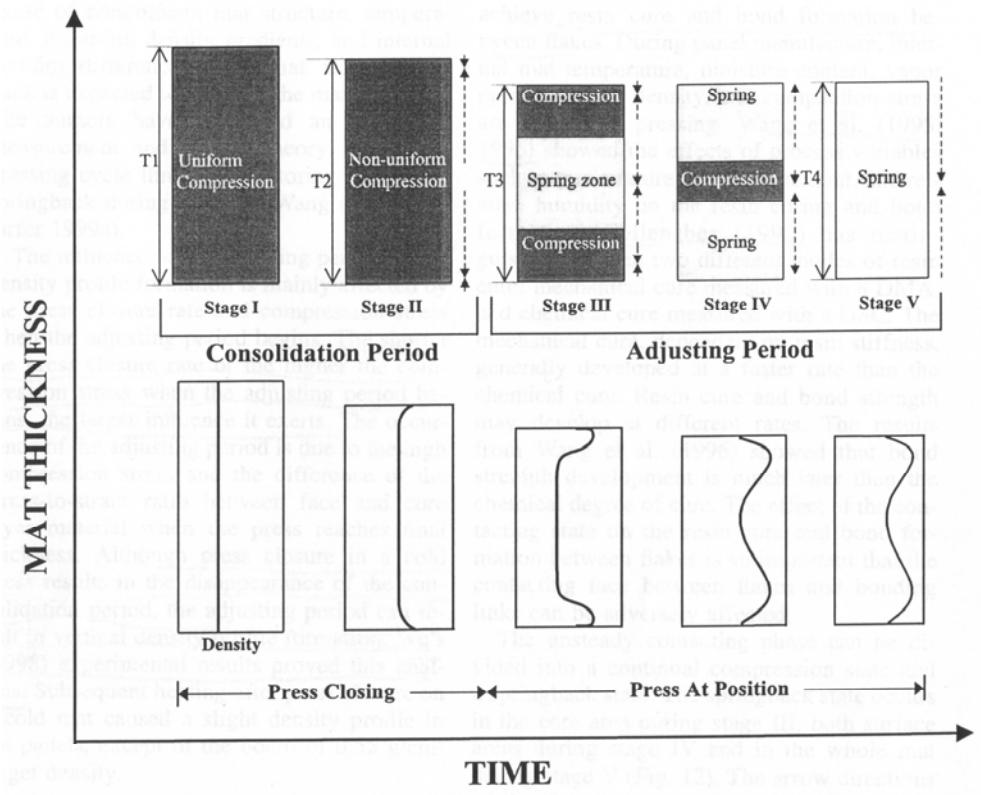


Abb. 2.12: Prinzipielle Entstehung des Rohdichteprofils nach der Modellvorstellung von Wang und Winistorfer (2000b), T1 und T2 sind die Dicke der Matte während der Verdichtung, T3 ist die Solldicke der Matte, T4 die Dicke der Matte bei Pressenöffnung

Hänsel et al. (1988) weisen in ihren Modellbetrachtungen zur Ausbildung des Rohdichteprofils darauf hin, dass zu jedem Zeitpunkt während des Pressvorgangs der Massenerhaltungssatz für die absolute trockene Partikelmasse gilt. Die gesamte Feuchtemasse, die in den Partikeln enthalten ist, kann sich durch eine mögliche Austrocknung der Partikelmatte während des Heißpressvorgangs verringern bei jedoch zunehmendem Dampfdruck in der Mattenmitte.

Boehme (1992) merkt ausdrücklich die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Messung des Rohdichteprofils für MDF-Platten an.

2.2.2 Zusammenhang von Rohdichteprofil und Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten

Das Rohdichteprofil von Holzwerkstoffen ist ein Merkmal für viele Gebrauchseigenschaften von Holzwerkstoffen. Es beeinflusst die mechanischen und physikalischen Eigenschaften wie Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul (E-Modul), Querzugfestigkeit, Scherfestigkeit, Abhebefestigkeit und Dickenquellung ebenso wie die Verarbeitungseigenschaften und Gebrauchseigenschaften durch die Kantenbearbeitbarkeit und Oberflächenqualität (Plath 1971; Boehme 1992; Schröder 1994; Winistorfer et al. 1996; Kelly 1997). Die Bedeutung des Rohdichteprofils für MDF-Platten durch ihre homogene Partikelstruktur betonen Boehme (1992), Deppe und Ernst (1996) und Wang et al. (2001a).

Plath und Schnitzler (1974) sehen die mittlere Rohdichte einer Holzwerkstoffplatte als nicht ausreichendes Qualitätsmerkmal an und untersuchten aus diesen Überlegungen heraus die Querzugfestigkeit einzelner Schichten an Industriespanplatten und einer „mittelharten Faserplatte“. Es wurde ein klarer Zusammenhang zwischen der schichtweisen Querzugfestigkeit und dem Rohdichteprofil gefunden, der auf die Rohdichte der jeweiligen Schicht und die ausgebildeten Leimbrücken zurückgeführt wurde. Den Zusammenhang von Querzugfestigkeit und mittlerer Rohdichte bei Spanplatten bestätigt auch May (1983).

Die Bedeutung eines ausgeprägten Rohdichteprofils für die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten betont Plath (1971) anhand theoretischer Betrachtung der elastischen Eigenschaften eines Schichtmodells für Spanplatten, welches den mehrschichtigen Aufbau der Spanplatten aus Deck- und Mittelschichtmaterial beschreibt.

Ganev et al. (2005b) entwickeln ein mechanisches Modell zur Beschreibung der Form- und Dimensionsstabilität von MDF-Platten in den drei Hauptebenen unter Feuchteeinfluss. Dazu werden die E-Moduln in den beiden Hauptebenen der Platte sowie der G-Modul experimentell bestimmt, die alle mit der Rohdichte zunehmen und mit der Feuchte abnehmen.

Nach Boehme (1992) können die an Spanplatten gewonnenen Erkenntnisse auch auf MDF-Platten übertragen werden; durch eine gezielte Steuerung des Pressprogrammes konnte die Biegefestigkeit von MDF-Platten um bis zu 45 % gesteigert werden. Boehme (1992) mutmaßt in diesem Zusammenhang, dass eine bessere Leimverteilung bei MDF-Platten zu einer Verbesserung des Kriechverhaltens führt.

Schulte und Frühwald (1996a; 1996b) finden im Gegensatz zu den Untersuchungen von Plath und Schnitzler (1974) an Spanplatten und der Annahme von Boehme (1992) keinen Zusammenhang zwischen der minimalen Rohdichte und der Versagensschicht von Querzugproben an MDF. Die geprüften Proben versagten zu 69 % in einem Bereich von 15 bis 35 % und 65 bis 85 % der Plattendicke, also außerhalb der eigentlich innersten Schicht. In diesen

Bereichen war jedoch nicht die minimale Rohdichte vorhanden. Schulte und Frühwald (1996a) ziehen daraus den Schluss, dass jeder Plattentyp individuell untersucht werden muss.
Wong et al. (1999) untersuchten den E-Modul, die Biegefestigkeit und die Querzugfestigkeit von Laborspanplatten mit unterschiedlichem Rohdichteprofil, das durch eine Variation der Partikelfeuchte und Feuchteverteilung sowie der Verdichtungsgeschwindigkeit beeinflusst wurde. Die Platten, die mit höheren Deckschichtfeuchten und höheren Verdichtungsgeschwindigkeiten erzeugt wurden und ein Rohdichteprofil mit höheren Rohdichtespitzen in den Deckschichten und einem breiteren Bereich niedrigerer Dichte in der Mittelschicht bei sonst gleicher mittlerer Dichte aufwiesen, zeigten ein besseres Verhalten bei Biegebeanspruchung. Für die Querzugfestigkeit war ein deutlicher Einfluss der variierten Parameter nicht erkennbar. Eine weitere Versuchsreihe an Laborfaserplatten stellen Wong et al. (2000) vor. Die Herstellungsmethoden der Faserplatten waren nahezu identisch zu den Spanplatten, die Wong et al. (1999) hergestellt hatten – es wurden ebenfalles Feuchteverteilung und Verdichtungsgeschwindigkeit variiert –, nur dass die Laborpresse für diese Versuche distanzgesteuert war und die Plattenstärke nicht über Distanzleisten eingestellt wurde. Weiterhin wurden zusätzlich Pressprogramme mit einem Nachverdichtungsschritt angewendet. Das Rohdichteprofil war hierbei noch deutlicher ausgeprägt, die Rohdichtespitzen in den Deckschichten waren höher, zudem bildeten sich Zwischenmaxima aus. Je höher die Deckschichtdichten waren und je näher die Deckschichtmaxima zur Plattenoberfläche lagen, umso höher waren der E-Modul und die Biegefestigkeit (vgl. Beplankungseffekt, Keylwerth (1958)).
Schröder (1994) beschreibt die physikalisch-technologischen Eigenschaften von industriell gefertigten MDF-Platten verschiedener Hersteller anhand von Kennwerten des Rohdichteprofils. Die von Schröder (1994) entwickelten Kenngrößen leiten sich aus dem Flächenträgheitsmoment, das in der Mechanik verwendet wird, ab und beziehen die Form des Rohdichteprofils mit ein, ähnlich dem Ansatz von Plath (1971). Schröder (1994) stellt dabei eine gute Korrelation der mittleren Rohdichte mit der Biegefestigkeit unabhängig vom Hersteller fest. Der Biege-E-Modul korrelierte sehr gut mit einem Kennwert, der die Ausbildung des Rohdichteprofils darstellt. Für die Querzugfestigkeit fand Schröder (1994) keinen deutlichen Zusammenhang mit Rohdichteprofilkennwerten.
Xu et al. (1996) untersuchten die Dickenquellung und die schichtweise Wasseraufnahme von MDF-, Span- und OSB-Platten mit einer radiometrischen Methode. Zur Rekonstruktion einzelner Schichten der nach einer Wasserlagerung von 24 h bzw. 168 h gequollenen Probe entwickelten sie einen Algorithmus. Es zeigte sich, dass für die MDF-Platten die Dickenquellung einzelner Schichten deutlich dichteabhängig ist. Die Wasseraufnahme spiegelte in

der Form klar das Rohdichteprofil wider. In den hoch verdichteten Deckschichten wurden zwischen 60 bis 90 % Holzfeuchte gemessen, in der Mittelschicht lediglich ca. 40 bis 50 %. Bei OSB-Platten ist dieser Trend nicht ganz so deutlich. Bei Spanplatten wird nach 168 h eine homogene Verteilung der Feuchte über den Plattenquerschnitt beobachtet.

Die Untersuchungsergebnisse von Xu et al. (1996) werden von Ganev (2005a) bestätigt, der an MDF-Platten mit homogenem Rohdichteprofil die Dickenquellung untersuchte und eine Zunahme mit der Rohdichte feststellte.

Boehme (1993) berichtet über einige Weiterverarbeitungseigenschaften von MDF-Platten. Die Untersuchungen zeigen ein unterschiedliches Verschleißverhalten von Schneiden über die Plattendicke bei der Schmalflächenbearbeitung von MDF-Platten. Im Bereich der hoch verdichteten Deckschichten war ein deutlich höherer Verschleiß erkennbar. Weiterhin wurde beobachtet, dass es beim Lackieren von Schmalflächen zur Rissbildung im Bereich der Mittelschicht kam, die jedoch nicht mit den Dichtegradienten im Rohdichteprofil erklärt wird. Alle angeführten Untersuchungen machen deutlich, wie die Eigenschaften von Holzwerkstoffen von der mittleren Rohdichte und besonders vom Rohdichteprofil abhängen. Bei MDF-Platten ist das besonders deutlich zu erkennen.

2.2.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung des Rohdichteprofils

Das Rohdichteprofil kann durch eine Vielzahl von Rohstoff- und Prozessparametern beeinflusst werden. Es kann hier nur ein Überblick über die Vielzahl der Publikationen gegeben werden, die zu diesem Themenbereich veröffentlich worden sind, da das Rohdichteprofil von Beginn der Holzwerkstoffforschung im Fokus des Interesses stand. Die angeführten Literaturstellen konzentrieren sich daher auch im Wesentlichen auf die Beeinflussbarkeit des Rohdichteprofils von MDF-Platten, da diese im Mittelpunkt der eigenen Untersuchungen stehen. Das Rohdichteprofil wird neben der Partikelgröße, -form und -gestalt durch die Behandlung der Partikel wie Partikelherstellung, die Beleimung und die Streuung vor dem Heißpressvorgang mitbestimmt (Suchsland und Woodson 1991; Deppe und Ernst 1996; Krug und Kehr 2001). Viele Einflussgrößen können vor dem Heißpressvorgang festgelegt werden. Wang und Winistorfer (2000b) nennen hier als wichtigste Einflussgrößen die Partikelfeuchte, die Partikelmattenstruktur und das Pressprogramm.

Auf die folgenden Einflussgrößen auf das Rohdichteprofil wird im Weiteren näher eingegangen:

- Feuchte der Partikelmatte
- Feuchteverteilung in der Partikelmatte
- Verdichtungsgeschwindigkeit
- Presstemperatur
- Entlüftungs- und Nachverdichtungsschritte
- Pressentechnologie

Strickler (1959) zeigt an Spanplatten den Einfluss der Partikelfeuchte und der Feuchteverteilung auf das Rohdichteprofil bei verschiedenen Pressdiagrammen und einem Rohdichtebereich von 650 kg m^{-3} bis 850 kg m^{-3}. Die Pressdiagramme mit einer gleichbleibenden Zeitdauer von 12 Minuten weisen eine konstante Zeit bis zum Erreichen des maximalen Drucks der Laborpresse auf, der nicht dem maximal notwendigem Pressdruck zum Erreichen der Solldicke entspricht und unterschiedlich lang gehalten wird. Es ist aufgrund der Angaben davon auszugehen, dass mit Distanzleisten gearbeitet wurde. Von daher ist das Pressdiagramm in einen anfänglichen isobaren und einen (nach Erreichen der durch die Distanzleisten vorgegebenen Solldicke) isochoren Anteil zu unterteilen. Das Rohdichteprofil wurde durch die gravimetrische Dichtebestimmung einzelner Schichten erstellt, sodass für heutige Verhältnisse ein Rohdichteprofil mit nur wenigen Messpunkten und weiten Interpolationsbereichen entsteht: die Einflüsse der Feuchte- und Rohdichtevariation und der Pressdiagramme sind in den Tendenzen auf das Rohdichteprofil jedoch klar ersichtlich. Strickler (1959) weist mit zunehmender Feuchte in der Partikelmatte ein höheres Verhältnis von Deckschicht- zu Mittelschichtdichte nach. Eine steigende mittlere Rohdichte der Platten verstärkt diesen Effekt. Einen weniger klar erkennbaren Effekt auf die Rohdichteentwicklung einzelner Schichten des Rohdichteprofils weist die Zeitdauer auf, während der der Pressdruck konstant gehalten wurde.

Boehme (1992) beobachtete bei orientierenden Untersuchungen an MDF-Platten, dass langsame Verdichtungsgeschwindigkeiten zu einem flacheren Rohdichteprofil führen.

Wong et al. (1998) stellen Kenngrößen, die in Abb. 2.13 ersichtlich sind, zur quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils vor. Anhand dieser Kenngrößen untersuchen Wong et al. (1998; 1999) den Einfluss von Verdichtungsgeschwindigkeit und Partikelfeuchte auf einschichtig gestreute Spanplatten, die in einer Laborpresse mit Distanzleisten hergestellt worden sind. Als Klebstoff wurde Isocyanat verwendet. Die Deckschicht- und die Mittelschichtdichte (PD und CD im Diagramm) zeigen keine wesentlichen Unterschiede für

verschiedene Partikelfeuchten. Die Feuchteverteilung weist einen deutlichen Einfluss auf die Ausbildung des Rohdichteprofils. Die Rohdichtemaxima in den Deckschichten wurden steiler und schlanker und lagen näher an der Plattenoberfläche, beschrieben durch die Werte GF, Pb und Pdi. Diese Effekte wurden mit steigender Verdichtungsgeschwindigkeit noch verstärkt.

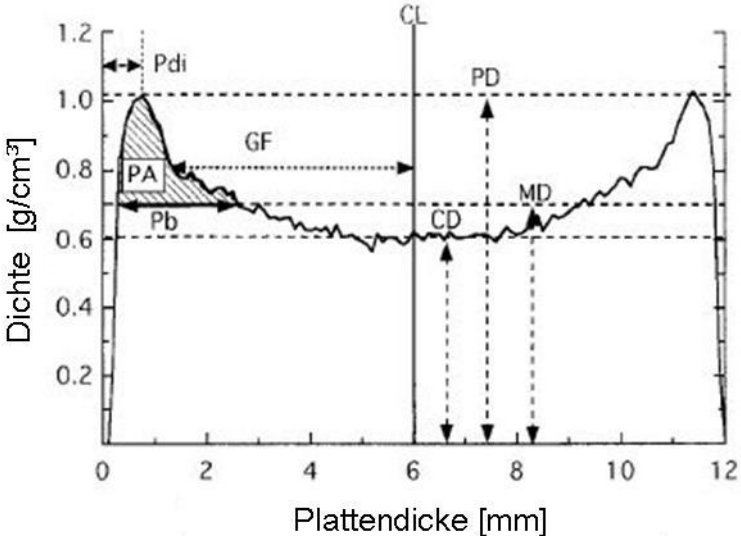


Abb. 2.13: Definitionen von quantitativen Kenngrößen an einem Rohdichteprofil; MD: mittlere Dichte, PD: Dichte des Maximums, CD: Mittelschichtdichte, PA: Fläche des Maximums, CL: Mittellinie, GF: „Gradientfaktor“*, Pdi: Abstand des Maximums von der Oberfläche*, Pb: Breite der Basis des Maximums*; (Wong et al. 1998). Definition GF: Abstand der Rohdichteflanke von der Mittellinie (CL) auf dem halben Dichtewert zwischen Mittelschichtdichte (CD) und Deckschichtdichte (PD)[1]
*ausgedrückt in Prozent der Plattendicke

In diesem Zusammenhang müssen auch die Folgeuntersuchen von Wong et al. (2000) gesehen werden, in denen an Faserplatten mit den gleichen Werten zur quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils (PD, CD, PA, CL, GF und Pdi) ähnliche Ergebnisse erzielt wurden. Abweichend von den Untersuchungen an Spanplatten wurde die Laborpresse für Faserplatten distanzgesteuert. Insgesamt zeigten sich deutlich ausgeprägtere Rohdichteprofile mit deutlich höheren Rohdichtemaxima in den Deckschichten. Zusätzlich produzierten Wong et al. (2000) Faserplatten mit einem Erstverdichtungsschritt, in dem die Fasermatten unter Solldistanz verdichtet wurden. Dabei ergaben sich klare Auswirkungen auf die Lage der Dichtemaxima in den Deckschichten. Die Dichte des Maximums in den Deckschichten (PD) stieg durch die Zwischenverdichtungsschritte an, während sich der Abstand des Maximums zur Plattenoberfläche (Pdi) verringerte, ebenso verringerte sich die Basis (Pb) des Maximums. Aus diesen methodisch vergleichbar durchgeführten Versuchen an Spanplatten und Faserplatten lässt sich

[1] Pdi: Peak distance, PA: Peak Area, Pb: Peak base CD: Core density, CL: Center line.
MD: Mean density, PD: Peak density; GF: Gradient factor.

die Bedeutung der Partikelfeuchte und des Pressprogramms auf die Ausbildung des Rohdichteprofils von MDF-Platten ableiten.

Andrews et al. (2001) weisen einen deutlichen Einfluss der Partikelfeuchte auf alle Schichten des Rohdichteprofils bei Untersuchungen an OSB-Platten nach. Am deutlichsten ist der Einfluss der Partikelfeuchte auf die Dichte der Schichten zwischen Deckschicht und Mittelschicht. Zur besseren qualitativen Beschreibung der Rohdichteprofile werden diese in fünf Schichten unterteilt, die spiegelsymmetrisch zur dritten Schicht, der Mittelschicht, aufgebaut sind. Die Schichten eins und fünf beschreiben die Deckschichten und die Schichten zwei und vier die beiden Zonen zwischen den Deckschichten und der Mittelschicht. Der Effekt der Verdichtungsgeschwindigkeit wurde von Andrews et al. (2001) ebenfalls betrachtet. Diese zeigte einen deutlichen Einfluss auf die Höhe und Position der Dichte in den Deckschichten. Je schneller verdichtet wurde, umso weiter wanderten die Dichtemaxima nach außen und umso höher wurde die maximale Rohdichte in diesen. Die Beobachtungen wurden mit einem höheren Wärmestrom in die Deckschichten der Partikelmatte und einer damit verbundenen schnelleren Plastifizierung dieser Schichten erklärt.

Wang et al. (2001a) beschreiben Veränderungen am Rohdichteprofil von MDF-Platten durch schrittweises Verdichten auf Solldichte. Die Dichteveränderungen während des Heißpressvorgangs werden dabei mit der in Abschnitt 2.4.4 vorgestellten Methodik in den Schichten 22,5 %, 50 % und 77,5 % verfolgt. Die verwendeten Schließzeiten von bis zu 200 s sind, bezogen auf die industrielle Plattenfertigung, allerdings sehr lang. Generell führen kurze Schließzeiten zu hohen Deckschichtdichten und niedrigen Mittelschichtdichten. Wang et al. (2001a) vergleichen die Rohdichteprofile der erzeugten MDF-Platten mit denen von unter gleichen Pressbedingungen hergestellten OSB-Platten aus einer vorherigen Untersuchung von Wang und Winistorfer (2000) und stellen dabei Rohdichteprofile an MDF-Platten fest, die höhere Rohdichtemaxima in den Deckschichten und geringere Mittelschichtdichten wie auch eine breitere Mittelschicht hatten. Pressprogramme für MDF-Matten mit Zwischenverdichtungsschritten führten zu Rohdichteprofilen mit einer geringeren Dichte in den Deckschichtmaxima und einer weniger breiten Mittelschicht mit gleichmäßiger Dichte. Zusätzlich kann es bei Pressprogrammen mit Zwischenverdichtungsschritten auch zu unerwünschten Zwischenmaxima kommen. Die Ausbildung der Zwischenmaxima wird von Wang et al. (2001a) mit der zum Zeitpunkt des Zwischenverdichtungsschrittes gegebenen Mittelschichttemperatur und dem daraus resultierendem Pressdruck begründet. Eine hohe Schließgeschwindigkeit des ersten Verdichtungsschrittes verlagert die Dichtemaxima in den Deckschichten nach außen. Die Schließgeschwindigkeit der Presse während der folgenden Zwischenverdichtungsschritte hat

keine wesentlichen Auswirkungen auf die Dichtemaxima in der Deckschicht, zeigt jedoch deutliche Auswirkungen auf die Zwischenmaxima in tiefer gelegenen Schichten. Wang und Winistorfer (2000b) haben zusätzlich den Einfluss des Klebstoffes auf das Entstehen von Zwischenmaxima betont. Sie weisen in ihren Untersuchungen an OSB-Platten eine fortwährende Bewegung auch nach dem Erreichen der Solldicke nach und folgern daraus, dass sich die Leimbrücken nicht ungestört ausbilden können.

Ruf (2003) untersuchte die Einflüsse der Schließzeit, des Erstverdichtungsniveaus und der Dauer des Erstverdichtungsvorganges auf die Ausbildung des Rohdichteprofils. Dazu wurden einerseits in einer Laborpresse und andererseits in der von Roos (2000) vorgestellten Presse Platten erzeugt. Die von Roos (2000) entwickelte Presse hat runde Pressplatten und einen durch eine Presshülse abgeschlossenen Verdichtungsraum. Während des Heißpressvorganges wurden die Temperaturen in den Schichten 25 % und 50 % der Mattendicke in beiden Versuchsserien aufgezeichnet. Zur Vergleichbarkeit normierte Ruf (2003) die Rohdichtewerte in Bezug auf die mittlere Rohdichte und auf die Plattendicken. Das Rohdichtemaximum in der Deckschicht erhöhte sich mit zunehmender Schließzeit. Dieses abweichende Ergebnis von dem in der Literatur dargestellten Einfluss der Schließzeit auf das Rohdichtemaximum in der Deckschicht begründet Ruf (2003) mit sehr hohen, industrienahen Verdichtungsgeschwindigkeiten, die in den Versuchen angewendet worden sind. Das Rohdichtemaximum verschob sich dabei in Richtung der Mittelschicht. Dieses Ergebnis wird auch von Wang et al. (2001a) bestätigt. Gleiche Pressprogramme auf den beiden verwendeten Laborpressen zeigen dabei jedoch nicht gleiche Rohdichteprofilausprägungen. Dieses Phänomen führt Ruf (2003) auf unterschiedliche Stärken der verwendeten Pressbleche zurück. Anders verhält sich eine zeitliche Verlängerung des ersten Verdichtungsniveaus; durch diese werden die Rohdichtemaxima in den Deckschichten in beiden verwendeten Laborpressen erhöht.

2.3 Simulationsmethoden

Die allgemein anerkannte Bedeutung des Rohdichteprofils für die Eigenschaften von Holzwerkstoffen hat zu verschiedenen Ansätzen geführt, die Ausbildung des Rohdichteprofils während des Heißpressens durch mathematisch-physikalische Modelle zu beschreiben und zu simulieren. Steffen (1996) gibt eine Übersicht zum damaligen Stand der Modellierung und zeigt den weiteren Forschungsbedarf auf. Aufgrund der Komplexität der während des Heißpressvorgangs ablaufenden physikalischen Vorgänge und deren gegenseitiger Beeinflussung wurden in den frühen Modellierungen oft nur Einzelaspekte, wie die Verdichtung *oder* der gekoppelte Wärme- und Stofftransport in der verdichteten Matte berücksichtigt. Eine

ausführlichere grundlegende Analyse der physikalischen Vorgänge während des Heißpressvorgangs und deren komplexe Wechselwirkungen führten Bolton und Humphrey (1988) durch. Darauf aufbauend entwickelten Humphrey und Bolton ein mathematisch-analytisches Modell, mit dem der kombinierte Wärme- und Stofftransport sowie die Mattenfeuchte simulierbar waren (Bolton et al. 1989; Humphrey und Bolton 1989). Weitere Modellvorstellungen zum kombinierten Wärme- und Stofftransport beschreiben Dai und Yu (2004), Dai et al. (2004; 2005) sowie (Zombori et al. 2004). Zombori et al. (2004) regen weitere Analysen der Mattenstruktur an zur genaueren Beschreibung des konduktiven Wärmestroms und der Permeabilität von Holzwerkstoffmatten. Derartige Untersuchungen stellen Thömen et al. (2008) anhand von Simulationsrechnungen für MDF-Matten vor. Die Strukturanalyse erfolgte mithilfe von Mikrotomographieuntersuchungen und Auswertungsansätzen, die von Walther (2006) erarbeitet wurden.

Das Verdichtungsverhalten von Holzwerkstoffpartikelmatten unter Vernachlässigung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports wurde ebenso als Teilproblem der Heißpressvorgangs dargestellt (Dai und Steiner 1993; Lang und Wolcott 1996; Lenth und Kamke 1996; Zhou et al. 2008).

Einen ersten umfassenden Ansatz zur Modellierung des Dichteprofils, der sowohl die mechanischen Vorgänge als auch die Prozesse des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports berücksichtigt, hatten bereits Harless et al. (1987) präsentiert. Die Modellierungsrechnung wurde damals jedoch nicht über den gesamten Heißpressvorgang durchgeführt, sondern nur bis zum Erreichen der Solldicke der Platte. Selbstkritisch merken Harless et al. (1987) an, dass damit Relaxationsvorgänge, die nach dem Erreichen der Solldistanz durch die fortschreitende hydrothermische Plastifizierung der Partikel in der Matte ablaufen, nicht berücksichtigt werden.

Suo und Bowyer (1994) entwickelten ebenfalls einen Modellansatz, der zeitlich veränderliche Feuchte- und Temperaturprofile in der Matte während des Heißpressvorgangs berücksichtigt.

Carvalho et al. (2001) stellen ein Modell vor, in dem alle wesentlichen Prozesse während des Heißpressvorgangs berücksichtigt werden. Zur Vereinfachung des dreidimensionalen räumlichen Problems der Modellierung wird die Modellplatte auf eine zylindrische Platte reduziert, ähnlich dem von Humphrey und Bolton (1989) gewählten Ansatz. Hervorzuheben ist, dass dieses Modell auch die Klebstoffaushärtung mitberücksichtigt.

Zombori (2001) beschriebt ein Modell, das neben dem Heißpressvorgang auch die Partikelmattenbildung einschließt. Die Klebstoffaushärtung wird in seiner Modellierung des Heißpressvorgang allerdings nicht beachtet.

Das bisher umfangreichste Modell präsentiert Thömen (2000). Neben allen relevanten physikalischen Vorgängen des gekoppelten Wärme- und Stofftransports und der Rheologie der Partikel bietet seine Modellierung auch die Möglichkeit, den gesamten Heißpressvorgang sowohl in kontinuierlichen als auch in Taktpressen von der anfänglichen Verdichtung der Matte bis zur Pressenöffnung bzw. bis zum Pressenauslauf bei kontinuierlichen Pressen dazustellen. Das Simulationsprogramm *Virtual Hot Press* (VHP) von Thömen (2000) setzt weitestgehend den von Steffen (1996) aufgezeigten weiteren Forschungsbedarf um. Durch die Arbeiten von Heinemann (2004) und Meyer (2007) war es Thömen möglich, die Entwicklung der Querzugfestigkeit während des Heißpressvorgangs in das Simulationsmodell zu integrieren, ebenso die Beeinträchtigung der Festigkeitsentwicklung durch Entlüftungs- und Nachverdichtungsschritte (Thömen et al. 2004). Eindrucksvoll wird die komplette Entwicklung des Rohdichteprofils über die gesamte Presszeit bzw. über den gesamten Weg der durch eine kontinuierliche Heißpresse hindurchlaufenden Matte dargestellt. Abb. 2.14 zeigt exemplarisch die Entwicklung des Rohdichteprofils in einer kontinuierlichen Presse; das Pressprogramm enthält hier einen zusätzlichen Nachverdichtungsschritt.

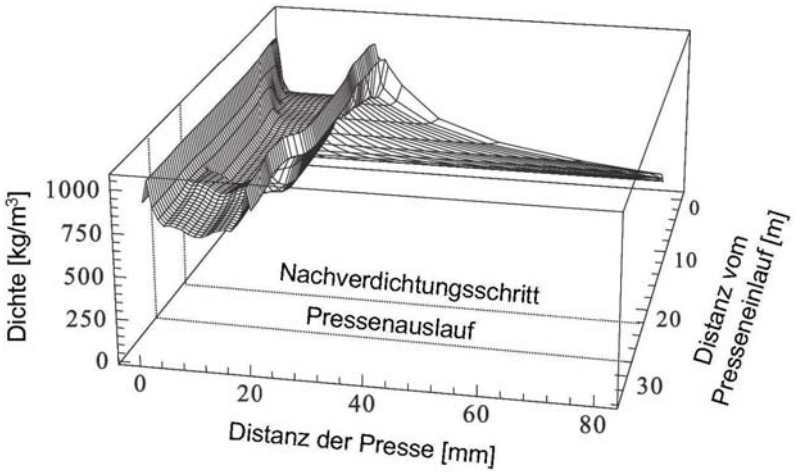


Abb. 2.14: Simulation der Rohdichteprofilentstehung in einer 28 m langen kontinuierlichen Presse nach Thömen (2006): die Eingabedaten für die Simulation sind an die Parameter angepasst, die von Steffen et al. (1999) präsentiert wurden

2.4 Radiometrische Messmethoden zur Dichtebestimmung

Radiometrische Dichtebestimmungsverfahren werden in vielen Bereichen der Technik und Medizin eingesetzt, wobei das Material mit ionisierender Strahlung, d. h. Röntgen- oder Gammastrahlung untersucht wird. Die wesentlichen Einflussgrößen sind dabei die Energie der verwendeten Strahlung und die elementare Zusammensetzung des die Strahlung

schwächenden Materials. Die folgenden Abschnitte fassen die dabei ablaufenden Mechanismen zusammen.

2.4.1 Ionisierende Strahlung – Röntgenstrahlung

Ionisierende Strahlung wird im Wesentlichen in Röntgenröhren, in Teilchenbeschleunigern oder durch radioaktiven Zerfall erzeugt. Die Entstehung der Strahlung hat wesentliche Bedeutung für deren weitere Anwendung und gefahrlose Handhabung. In Abb. 2.15 wird die ionisierende Strahlung in das Frequenzspektrum der elektromagnetischen Strahlung eingeordnet, zusätzlich wird die Wellenlänge λ [m], die Frequenz f [Hz] und die Energie E [eV] der Strahlung angegeben. Die Wellenlänge gibt Auskunft über die maximale Strukturgröße, die mit der Strahlung dargestellt werden kann. Die Strahlungsenergie ist ein Maß dafür, wie tief die Strahlung in ein Medium bzw. Material in Abhängigkeit von dessen Ordnungszahl eindringen kann, bevor sie absorbiert wird bzw. wie gut oder schlecht die Strahlung ein Material durchdringen kann.

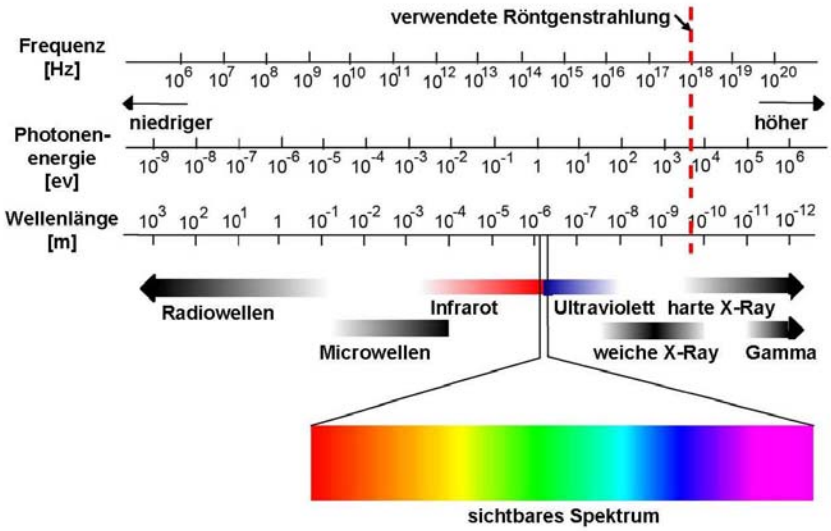


Abb. 2.15: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums unter besonderer Berücksichtigung der ionisierenden Strahlung modifiziert nach Anonymus (2007). Die in dieser Arbeit verwendete Röntgenstrahlung ist in das Spektrum eingeordnet

Gammastrahlung (γ-Strahlung) entsteht neben α- und β-Strahlung beim radioaktiven Zerfall von Radioisotopen von Elementen in zwei oder mehrere Elemente mit niedrigerer Ordnungszahl Z. α- und β-Strahlung sind Teilchenstrahlungen und haben nur eine geringe Reichweite und Eindringtiefe. Die bei jedem radioaktiven Zerfall frei werdende Gammastrahlung ist keine Teilchenstrahlung, sondern Photonenstrahlung; sie hat für jeden Zerfall eine charakteristische Energie. Gammastrahlung stellt damit eine nahezu monochromatische Strahlung mit

einer charakteristischen Energie für jedes Radioisotop dar. Ein großer Nachteil bei der technischen Anwendung von Radioisotopen ist ihre konstante Strahlungsabgabe, auch wenn diese Strahlung nicht für Messzwecke genutzt wird. Dies erfordert einen großen Aufwand zur Abschirmung der Strahlung. Typische, in der Holztechnologie verwendete Radioisotope sind Americium (^{241}Am) und Cäsium (^{137}Cs).

Röntgenstrahlung kann auf unterschiedliche Art und Weise erzeugt werden. Die am weitesten verbreitete und technisch und medizinisch oft angewendete Methode ist die Röntgenröhre (siehe Abb. 2.16). Die Röntgenstrahlung wird in einer evakuierten Röhre erzeugt, indem in einem elektrischen Feld mit der Spannung U [kV] beschleunigte Elektronen in einem Material aus einem bestimmten Element, der Anode, stark abgebremst werden. Nahezu die gesamte kinetische Energie der Elektronen wird dabei in Wärme umgesetzt; daher müssen Röntgenröhren gut gekühlt werden. Der verbleibende kleine Restanteil der Energie von ca. 1 % wird als Frequenzspektrum aus dem Brennfleck der Anode, an dem die Elektronen fokussiert auf das Anodenmaterial treffen, abgestrahlt. Das Frequenzspektrum setzt sich zusammen aus der Bremsstrahlung, die durch das Eindringen der beschleunigten Elektronen in die Atomhüllen der Atome des Anodenmaterials entsteht, und der charakteristischen Strahlung des Anodenmaterials. Die charakteristische Strahlung wird erzeugt, wenn ein beschleunigtes Elektron auf ein Elektron auf einer kernnahen Schale eines Atoms des Anodenmaterials trifft und dieses aus seiner Position verdrängt. Die entstandene Lücke wird von einem Elektron aus einer weiter außen liegenden Schale ersetzt, dabei wird ein Photon einer für das Anodenmaterial bestimmten und charakteristischen Frequenz abgegeben.

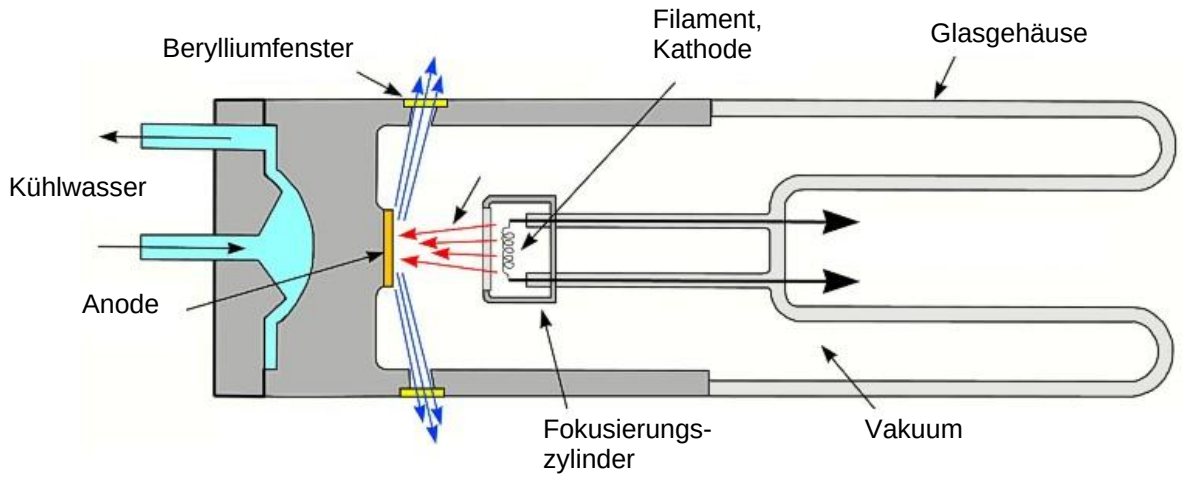


Abb. 2.16: Prinzipieller Aufbau einer Röntgenröhre, modifiziert nach Poppe et al. (2001)

Die maximale Energie der Photonen einer Röntgenröhre wird durch die maximale Beschleunigungsspannung der Elektronen im elektrischen Feld nach der Gleichung $E_\gamma = e \bullet U$ bestimmt, e ist die Größe der Elementarladung in Coulomb [C], U ist die Beschleunigungsspannung in [kV]. Die Begriffe Welle und Photon (Teilchen) können durch den Welle-Teilchen-Dualismus synonym verwendet werden. Das Spektrum einer Röntgenröhre ist polychromatisch, d. h. es besteht aus einem Gemisch unterschiedlicher Wellenlängen bzw. Photonen mit unterschiedlichen Energien. Ein Beispiel für das Spektrum einer Röntgenröhre zeigt Abb. 2.17. Röntgenröhren weisen typischerweise Beschleunigungsspannungen bis 200 kV auf, die verwendeten Anodenmaterialien sind im Wesentlichen Wolfram und Kupfer. Es können, je nach Anwendungsfall, aber auch andere Anodenmaterialien eingesetzt werden. Der große Vorteil bei der Verwendung von in Röntgenröhren erzeugter Strahlung ist, dass diese nur in dem Zeitraum aktiviert werden müssen, wenn die Strahlung benötigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich mit Röntgenstrahlung aus einer Röntgenröhre mit Silberanode (Ag-Anode) gearbeitet.

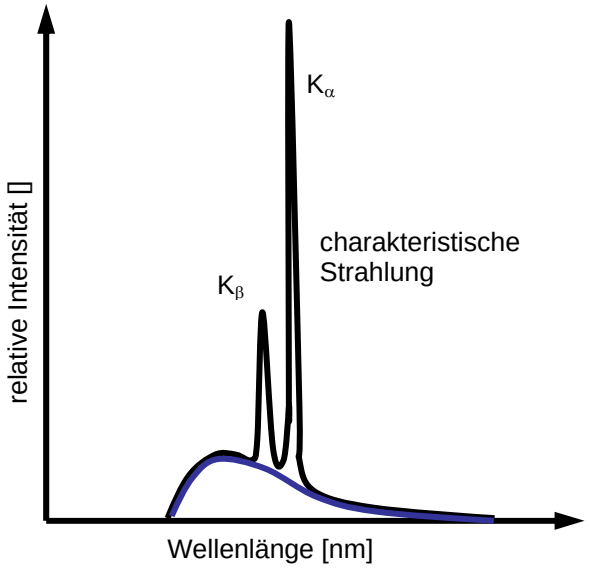


Abb. 2.17: Prinzipbild der Intensitätsverteilung eines Spektrums aus einer Röntgenröhre bestehend aus Bremsstrahlung (blaue Linie) und charakteristischer Strahlung (K_α, K_β), modifiziert nach Nave (2005)

Röntgenstrahlen besonders hoher Energie, entsprechend einer sehr kleinen Wellenlänge, können in einem Teilchenbeschleuniger oder Synchrotron erzeugt werden. In diesen meist großtechnischen Einrichtungen werden die auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen (Elektronen oder Protonen) durch äußere Kräfte von ihrer Bahn abgelenkt. Dabei entsteht sehr hochenergetische polychromatische Röntgenstrahlung, aus der durch entsprechende Filter monochromatische Strahlung gewonnen werden kann. Das ist für viele Anwendungen in diesem Bereich der Forschung im Nanobereich notwenig.

2.4.2 Schwächung ionisierender Strahlung

Die Grundlage aller radiometrischen Messmethoden ist, ob mit Gammastrahlung oder mit Röntgenstrahlung, dass diese Strahlung unter einer bestimmten Abschwächung die verschiedensten Materialien durchdringt und dabei an Intensität verliert. Die Schwächung der Photonen erfolgt je nach Strahlungsenergie durch drei unterschiedlich Effekte: den photoelektrischen Effekt, die Compton-Streuung und die Paarbildung.

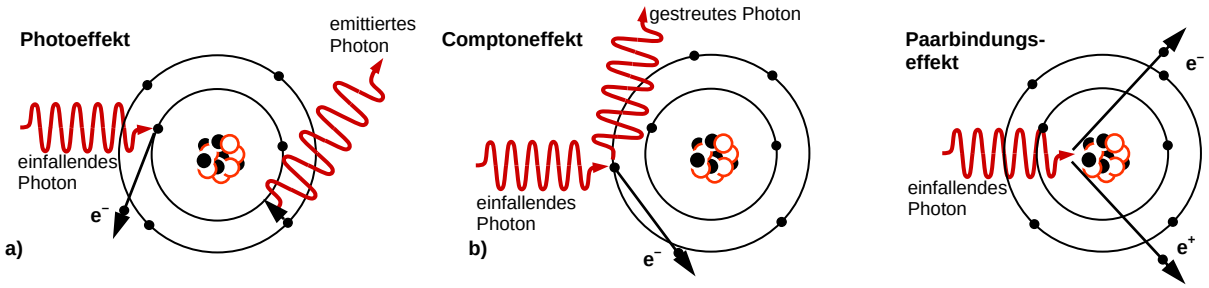


Abb. 2.18: Schwächungseffekte der elektromagnetischen Strahlung a) Photoeffekt, b) Comptoneffekt, c) Paarbildung

Der **photoelektrische Effekt** ist für Photonenenergien unter 200 keV der dominierende Effekt. Er hat zudem auch bei Elementen mit hoher Ordnungszahl (Z) eine gewisse Bedeutung. Beim **photoelektrischen Effekt** wird durch ein Photon aus der ionisierenden Strahlung ein Elektron aus einer inneren Schale eines Atoms des schwächenden Materials herausgeschlagen. In die vorhandene Lücke springt ein energiereicheres Elektron aus einer weiter außen gelegenen Schale unter Ausstrahlung eines Photons, das die Energie der Differenz der Energien zwischen den beiden Schalen hat.

Die **Compton-Streuung** wird durch ein Photon aus der ionisierenden Strahlung verursacht, das durch die Kollision mit einem Elektron eines Atoms des schwächenden Materials, unter Energieabgabe ablenkt – „gestreut“ – wird und somit sein Flugbahn und Energie ändert. Das Elektron wird unter Energieaufnahme aus seiner Position durch die Kollision verdrängt. Die Compton-Streuung wird auch als inkohärente Streuung bezeichnet, da die Energien der gestreuten Photonen sehr unterschiedlich sein können.

Die **Paarbildung** tritt erst ab einer Photonenenergie auf, die größer ist als ca. 1,2 MeV und gewinnt für Elemente hoher Ordnungszahl (Z) und Photonenenergie ab 10 MeV an Bedeutung. Die Paarbildung ist als Schwächungsmechanismus in dieser Arbeit nicht von Bedeutung, da hier mit wesentlich geringeren Photonenenergien gearbeitet wird.

Je nach dem Material, in dem die Strahlung geschwächt wird, und der Energie der Strahlung kann diese vollständig absorbiert werden oder nur teilweise absorbiert werden, sodass eine Reststrahlung hinter dem Material gemessen werden kann.
Die Schwächung der Strahlung wird durch das Beer'sche Gesetz beschrieben.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \qquad \text{Gleichung (4)}$$

Dabei ist I_0 die Intensität der Ausgangsstrahlung, I(x) die Intensität an Stelle x, x der zurückgelegte Weg in [m] der Strahlung in dem Material, das die Strahlung schwächt, und μ der lineare Schwächungskoeffizient des Materials in [m^{-1}]. Die Linearität des Gesetzes gilt nur für eine Wellenlänge, das heißt für monochromatische Strahlung.
Für ein Gemisch aus verschiedenen Wellenlängen müssen die verschiedenen linearen Schwächungskoeffizienten für jede einzelne Wellenlänge berücksichtigt werden (Tsai und Cho 1976). Das Beer'sche Gesetz aus Gleichung (4) erweitert sich dann wie folgt

$$I(x) = \int_0^{E_{\max}} I_0(E) e^{-\mu(E)x} dE \qquad \text{Gleichung (5)}$$

unter der Berücksichtigung der verschiedenen Energien (E) der abgeschwächten Photonen. Es liegt damit keine lineare Absorption mehr vor, sondern ein Absorptionsspektrum über die verschiedenen Wellenlängen der verwendeten ionisierenden Strahlung.
Der Exponent kann um die Dichte des schwächenden Materials im Exponenten erweitert werden. Zieht man nach Gleichung (5) den Quotienten aus linearem Schwächungskoeffizienten und Dichte zusammen, so ergibt sich

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \qquad \text{Gleichung (6)}$$

μ_m ist der Massenschwächungskoeffizient des Materials in [$m^2\,kg^{-1}$] und der Dichte ρ in [$kg\,m^{-3}$]. Der Massenschwächungskoeffizient ist eine Materialkenngröße. Somit kann ein expliziter Zusammenhang zwischen Massenschwächungskoeffizienten und Dichte des Materials dargestellt werden.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \qquad \text{Gleichung (7)}$$

An dieser Stelle soll ausdrücklich auf die Unterschiede zwischen linearem Schwächungskoeffizienten und Massenschwächungskoeffizienten, die in Gleichung (4) und Gleichung (7) ersichtlich sind, hingewiesen werden, ebenso auch auf die Abhängigkeit der genannten Schwächungskoeffizienten von der Energie der Strahlung.
Hubbel und Seltzer (1996) geben für ein Material, das ein Gemisch aus Elementen ist, den resultierenden Massenschwächungskoeffizienten nach folgender Gleichung an.

$$\mu_m = \sum_i \left(w_i \cdot \mu_{m,i} \right) \qquad \text{Gleichung (8).}$$

Dabei ist μ_m der Massenschwächungskoeffizient des Gemisches, w_i die Gewichtsfraktion der i-ten elementaren Komponente des Gemisches und $\mu_{m,i}$ der Massenschwächungskoeffizient für die i-te Komponente.

2.4.3 Massenschwächungskoeffizienten für Holz und Wasser

Für die Anwendung ionisierender Strahlung zur Dichtebestimmung von Holz- und Holzwerkstoffen ist nach Gleichung (7) die Kenntnis des Massenschwächungskoeffizienten für Holz und Wasser notwendig. Der Massenschwächungskoeffizient ist für Wasser bei Betrachtungen des Holzes, die die Holzfeuchte mit einbeziehen, zu berücksichtigen.

2.4.3.1 Holz

Grundlegende Arbeiten zum Massenschwächungskoeffizienten für Holz haben Olson und Arganbright (1981) durchgeführt. Sie geben die aus einer Elementaranalyse errechneten Massenschwächungskoeffizienten für darrtrockenes Holz für einen Energiebereich der Photonen von 10 keV bis 1,5 MeV für Kiefer und Lärche an. Einen Ausschnitt der errechneten Werte zeigt Tabelle 1. Die botanischen Namen der für die Berechnungen verwendeten Holzarten werden nicht genannt. Weiterhin stellen sie fest, dass der Aschgehalt des Holzes bei Photonenenergien oberhalb von 40 keV für den Massenschwächungskoeffizienten vernachlässigt werden kann. Olson und Arganbright (1981) vergleichen die errechneten Werte mit verfügbaren Messwerten. Der errechnete Massenschwächungskoeffizient war dabei generell niedriger als der experimentell ermittelte. Die Differenz betrug bis zu 8,8 %. Sie führen die Fehler zurück auf Probleme mit der Abschirmung der Strahlenquellen und des Detektors sowie auf die Kollimierung des Strahls und auf Streueffekte. Durch letztere entsteht eine höhere Durchgangsstrahlung (I), die einen niedrigeren Massenschwächungskoeffizienten zur Folge hat. Weitere Angaben zu Massenschwächungskoeffizienten finden sich bei Laufenberg (1986),

Malan und Marais (1992) und Macedo et al. (2002). Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die ermittelten Werte und die verwendete Strahlungsquelle. Die Wiedergabe aller Werte würde den Rahmen der Arbeit übersteigen. Es werden deshalb hier für verschiedene Strahlungsenergien ausgewählte Werte angegeben.

Tabelle 1: Errechnete Massenschwächungskoeffizienten auf Basis der elementaren Zusammensetzung der in der Tabelle genannten Hölzer (Olson und Arganbright 1981)

Energie	Massenschwächungskoeffizienten [m^2 kg^{-1}]			
[keV]	Kiefernsplintholz	Kiefernkernholz	Lärchensplintholz	Lärchenkernholz
10	0,369	0,353	0,372	0,371
15	0,118	0,130	0,119	0,118
20	0,0598	0,0581	0,0601	0,0600
30	0,0310	0,0305	0,0311	0,0311
40	0,0237	0,0235	0,0237	0,0237
50	0,0206	0,0205	0,0206	0,0206
60	0,0193	0,0192	0,0192	0,0192

Tabelle 2: Massenschwächungskoeffizienten von verschiedenen Holzarten bei unterschiedlichen Strahlungsenergien

Material	Energie (Strahlenquelle)	Dichte [kg m^{-3}]	Massenschwächungs-koeffizient [m^2 kg^{-1}]	Quelle
Sugar Pine (*Pinus lambertinana* Dougl.)	38 keV (^{144}Sm)	k. A.	0,0234	(Parrish 1960)
Yellow Poplar Splint (*Liriodendron tulioifera L.*)	47 keV (^{210}Pb)	k. A.	0,0215	(Loos 1961)
Pine*	1250 keV (^{60}Co)	k. A.	$5{,}58 \cdot 10^{-3}$	(Jurasek und Jokel 1962)
Eucalyptus (*Eucalyptus dunnii* Maid.)	28,3 keV (Röntgenstrahlung)	740	0,0441	(Macedo et al. 2002)
Eucalyptus (*Eucalyptus dunnii* Maid.)	59,5 keV(^{241}Am)	740	0,0178	(Macedo et al. 2002)
Eucalyptus (*Eucalyptus dunnii* Maid.)	662 keV (^{137}Cs)	740	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$	(Macedo et al. 2002)
Eiche*	59,5 keV (^{241}Am)	736	0,0176	(Malan und Marais 1992)
Eiche*	662 keV (^{137}Cs)	736	$7{,}26 \cdot 10^{-3}$	(Malan und Marais 1992)

* botanischer Name nicht angegeben bzw. aus den Angaben nicht eindeutig zu ermitteln

2.4.3.2 Wasser

Hubbell und Seltzer (1996) geben die Massenschwächungskoeffizienten für viele in der Medizin relevante organische Materialien an. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch der Massenschwächungskoeffizient von Wasser, der in Tabelle 3 für den in dieser Arbeit angewendeten Bereich angegeben ist.

Tabelle 3: Errechnete Massenschwächungskoeffizienten auf Basis der elementaren Zusammensetzung für Wasser (Hubbell und Seltzer 1996)

Energie [keV]	Massenschwächungskoeffizienten [m^2 kg^{-1}]
10	0,5329
15	0,1673
20	0,08096
30	0,03756
40	0,02683
50	0,02269
60	0,02059

2.4.4 Anwendung von Röntgenstrahlung und Gammastrahlung

In vielen Bereichen der Holz bearbeitenden und Holz verarbeitenden Industrie sowie in der Forschung wird die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mittels ionisierender Strahlung durchgeführt. Es ist dabei zwischen qualitativen und quantitativen Verfahren zu unterscheiden. Qualitative Verfahren liefern in erster Linie Bilddaten, die keinen direkten Bezug zu einer quantifizierbaren Holzeigenschaft haben, wie z. B. der Rohdichte. Quantitative Untersuchungen stellen einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen einer Holzeigenschaft und den ermittelten Messwerten her, meist wird ein Bezug zur Rohdichte des Holzes hergestellt. Es wird daher auch von Densitometrie bzw. Radiometrie gesprochen. Der für quantitative Untersuchungen notwendige Materialwert ist der Massenschwächungskoeffizient, der oben in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurde. Erste Untersuchungen galten der zerstörungsfreien Dichtemessung von Vollholz (Loos 1961). Frühe Arbeiten wurden meist mit der Gammastrahlung durchgeführt, die beim radioaktiven Zerfall von Radioisotopen frei wird. Die am meisten verwendeten Radioisotope sind ^{241}Am und ^{137}Cs mit einer Photonenenergie von 59,5 keV bzw. 662 keV. Radioisotope haben den gravierenden Nachteil, dass diese durch den kontinuierlichen Zerfall Strahlung abgeben und diese durch die Halbwertszeit der entsprechenden Isotope in ihrer Intensität über die Zeit nicht konstant ist. Zunehmend wird für qualitative Untersuchungen Röntgenstrahlung eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass Röntgenröhren ein kontinuierliches, polychromatisches Photonenspektrum emittieren. Das erschwert die Berechnung der Dichte mit nur einem konstanten Massenschwächungskoeffizienten. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über densitometrische Untersuchungen an Vollholz und Holzwerkstoffen gegeben. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Berücksichtigung der

Holzfeuchte bzw. der Feuchtebewegung bei dynamischen Prozessen gelegt. Vermehrt kommen für die räumliche Betrachtung auch Computertomographen (CT) zum Einsatz. Erste Untersuchungen wurden meist mit Geräten aus der Medizintechnik durchführt (Lindgren 1991) und gehen eher in die Richtung der groben Strukturanalyse (Oja und Temnerud 1999; Sepúlveda et al. 2003; Rojas et al. 2006), Festigkeitsvorhersage (Oja et al. 2000; Schajer 2000) und Schadenanalyse (Macchioni et al. 2007). Tomographie und Strukturanalyse sind nicht Gegenstand der Arbeit, sollen hier aber zur Abgrenzung von verwandten Arbeitsgebieten genannt sein (Shaler 1997; Groom et al. 1999; Sugimori und Lam 1999; Faessel et al. 2003; Faessel et al. 2005).

2.4.4.1 Dichtemessung an Holz und Holzwerkstoffen mittels ionisierender Strahlung, insbesondere Röntgenstrahlung und Gammastrahlung

Loos (1961) berichtet über die zerstörungsfreie Dichtebestimmung von Vollholz. Dazu verwendet er als Strahlungsquelle ^{210}Pb, ein Radioisotop des Bleis, und als Holzproben Splintholz von Yellow Poplar *(Liriodendron tulioifera L.)* mit einer Kantenlänge von 6 cm in Durchstrahlungsrichtung. Es wird eine gute Übereinstimmung von gravimetrisch bestimmter Dichte und radiographisch bestimmter Dichte festgestellt für Proben, die bei 9 % und 18 % Feuchte gemessen wurden.

Über die Anwendung eines Computertomographen (CT-Scanner) zur zerstörungsfreien Bestimmung der Rohdichte von Vollholz und der Holzfeuchte berichtet Lindgren (1991). Er verwendete einen axialen CT-Scanner aus der Medizintechnik, der mit einer durchschnittlichen Photonenenergie von 73 keV arbeitet. Die Ortsauflösung des verwendeten Gerätes beträgt $0{,}2 \cdot 0{,}2$ mm^2 für jede gemessene Schicht. Die Kalibrierung der Daten erfolgt mit CT-Nummern, die auch als Hounsfield-Nummern bekannt sind. Die gemessenen linearen Absorptionskoeffizienten für jedes Volumenelement (Voxel) werden dabei auf die bekannten linearen Schwächungskoeffizienten von Wasser bezogen. So ergibt sich eine Skalierung der Werte (Jackson und Thomas 2004). Lindgren (1991) berechnet nach den grundlegenden Untersuchungen zum Absorptionsverhalten an biologischen Materialien von Tsai und Cho (1976) die linearen Absorptionskoeffizienten von Vollholz, indem er durchschnittliche Summenformeln für die elementare Zusammensetzung der drei Holzkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin nach den Volumenanteilen an der gesamten Holzmasse gewichtet. Die Genauigkeit dieser Methode für den verwendeten CT-Scanner gibt Lindgren (1991) mit ±4 kg m^{-3} für darrtrockenes Holz mit einem Vertrauensintervall von 95 % an. Für feuchtes Holz in einem Feuchtebereich von 6 % bis 117 % stellt er eine Genauigkeit von ±13,4 kg m^{-3} im Vertrauensintervall von 95 % mit einer Standardabweichung von ±6,7 kg m^{-3} fest. Er weist

ausdrücklich darauf hin, dass die angegebenen Werte nur für den von ihm verwendeten CT-Scanner gelten. Des Weiteren entwickelte Lindgren (1991) ein Modell zur Berücksichtigung der Holzfeuchte für die von ihm gemessenen Proben.

Tiitta et al. (1993) stellen Untersuchungen zur Dichteverteilung und Feuchtemessung an L-förmigen Proben vor. Die Proben waren in der Ecke verzinkt. Angaben über die verwendete Holzart werden nicht gemacht. Für die Untersuchungen wurde ein ^{241}Am-Strahler verwendet, der auf 8 mm kollimiert war. Die Proben wurden auf einem Transportband in x- und y-Richtung bewegt. Zur Berücksichtigung der Holzfeuchte stellen Tiitta et al. (1993) eine Näherungsgleichung für den Massenschwächungskoeffizienten auf.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_k = w_v\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_v + w_p\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_p \qquad \text{Gleichung (9)}$$

Dabei ist nach der Nomenklatur von Tiitta et al. (1993) $(\mu/\rho)_v$ der Massenschwächungskoeffizient von Wasser, w_v die Gewichtsfraktion des Wassers an der gesamten Probe und $(\mu/\rho)_p$ der Massenschwächungskoeffizient von darrtrockenem Holz und w_p die Gewichtsfraktion des darrtrockenen Holzes. Die in der Arbeit von Tiitta et al. (1993) verwendete Nomenklatur weicht von der hier benutzten Schreibweise ab. Die durchgeführten Messungen von Tiitta et al. (1993) weisen für die Holzfeuchte einen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0{,}999$ für einen Holzfeuchtebereich von 7 % bis 196 % auf. Für darrtrockene Proben weisen sie einen Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0{,}986$ nach für einen Rohdichtebereich von 340 bis 456 kg m^{-3}.

Lu und Lam (1999) messen die Überlappung von Strands in OSB-Platten mithilfe von Röntgenstrahlung und vergleichen die Messungen mit Simulationsrechnungen für die horizontale Dichteverteilung in OSB-Platten. Genaue Angaben über die verwendete Röntgeneinrichtung werden nicht gemacht. Zur Kalibrierung ihres System verwenden sie einerseits eine Funktion dritter Ordnung und berechnen andererseits die Massenschwächungskoeffizienten nach dem Modell von Tsai und Cho (1976). Die radiographischen Messdaten glätten sie mit einem binominalen Bilddatenfilter, dessen Filtermaskengröße sie auf 3 · 3 Pixel festlegen. Die gemessenen horizontalen Dichteverteilungen und simulierten horizontalen Dichteverteilungen nach dem Modell von Dai und Steiner (1993) werden verglichen. Zusammenfassend stellen sie einen engen Zusammenhang zwischen gemessenen Überlappungen der Strands und den Simulationsrechnungen fest, merken aber auch an, dass die zur Kalibrierung verwendeten Materialien einen Einfluss auf die beobachteten Überlappungen der Strands haben.

In der Holztrocknung gewinnt die Beobachtung der Holzfeuchtebewegung im Trocknungsgut durch radiographische und radiometrische Methoden zunehmend an Bedeutung (Wiberg und Morén 1999; Baettig et al. 2006; Eriksson et al. 2006). Alkan et al. (2005) stellen Untersuchungen zum Feuchteverlauf über den Holzquerschnitt während der Schnittholztrocknung von Subalpine fir (*Abies lasiocarpa* [Hook] *Nutt*) vor. Die Untersuchungen wurden in einem CT-Scanner für industrielle Anwendungen durchgeführt, zur Skalierung der Daten wurde die Holzfeuchte zu Beginn und zum Ende der Messungen mittels Darrproben bestimmt. Deutliche Feuchtebewegungen sind auf den nach Trocknungszeit, Probenbreite und CT-Signal grob skalierten Achsen der Abbildungen bei Alkan (2005) zu erkennen.

Lehman et al. (2001) stellen die Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften vor. Dabei stellen sie die besondere Empfindlichkeit von Neutronenstrahlung gegenüber Wasserstoff heraus. Der Massenanteil des Wasserstoffes von 6 % an der Holzsubstanz hat eine Reaktionswahrscheinlichkeit von 84 % gegenüber den durchdringenden Neutronen. Neben dem in der Holzsubstanz gebunden Wasserstoff wird auch der in der Holzfeuchtigkeit enthaltene Wasserstoff nachgewiesen. Niemz et al. (2002) und Niemz et al. (2004) stellen Anwendungsmöglichkeiten für die Messmethode der Neutronenradiographie vor. An Eckverbindungen aus Vollholz untersuchen Niemz et al. (2002) das Eindringverhalten von Wasser. Niemz et al. (2004) nutzen die Methode zur Beschreibung des Eindringverhaltens von verschiedenen Klebstoffen in Holz. In beiden Anwendungsfällen der Neutronenradiographie werden neben qualitativen Aussagen durch Grauwertbilder auch quantitative Auswertungen anhand der Grauwerte gemacht. Da sie tomographische Methoden bei der Neutronenradiographie der Proben anwenden, sind auch räumliche Aussagen zur Klebstoffverteilung an der Grenzfläche Klebstoff/Holz und bei Eindringen in das Holz an dieser Fläche möglich. Anzumerken ist der sehr hohe apparative Aufwand für die Neutronenradiographie, der von Lehmann et al. (2001) beschrieben wird.

2.4.4.2 Rohdichteprofilmessung an Holzwerkstoffen

Ranta und May (1978) stellen erstmals ein zerstörungsfreies Verfahren zur Messung des Dichteprofils von Holzwerkstoffen unter Verwendung eines ^{241}Am-Strahlers vor. Die plattenförmigen Holzwerkstoffproben wurden in Schichten parallel zur Plattenoberfläche der Proben mit einer Schrittweite von 0,1 cm gemessen. Die Abmessung der Proben in Durchstrahlungsrichtung betrug 5 cm. Ausführlich gehen sie auf die Dauer der Messzeit pro Messschritt ein, die bei der Verwendung eines Radioisotops durch leichte statistisch verteilte Schwankungen der Ausgangsintensität des Gammastrahlers von Bedeutung ist. Sie geben einen Fehler von ±3 % bis ±5 % bei einer Messzeit von zwei Sekunden pro Messschritt und ±1,5 % bis ±2,5 % für eine Messzeit von acht Sekunden pro Messschritt an. Ausdrücklich stellen sie das Potenzial dieser zerstörungsfreien Messmethode dar und regen eine weitere Verfeinerung dieser Methode an.

Bis heute ist das methodische Vorgehen von Ranta und May (1978) die Standarduntersuchungsmethode zur Bestimmung des Rohdichteprofils von Holzwerkstoffen in der Industrie und in der Forschung: die Probenabmessungen von 5·5 cm^2 leiten sich von den Querzugproben nach ISO 16 984:2003 ab, an denen meist vor der zerstörenden Querzugprüfung das Rohdichteprofil bestimmt wird. Die heute eingesetzten Geräte arbeiten zumeist mit einer Röntgenröhre als Strahlenquelle, weniger häufig mit einem ^{241}Am-Strahler.

Eine kontinuierliche Online-Messmethode zur Bestimmung des Rohdichteprofils von Holzwerkstoffen direkt hinter kontinuierlich arbeitenden Heißpressen entwickelte Dueholm (1995). Die fertige, in Transportrichtung laufende Holzwerkstoffplatte wird dabei von oben in einem Winkel von 45° von einem Röntgenstrahl durchstrahlt. Zwei Detektoren erfassen die Strahlung auf der Plattenunterseite, einer die Durchgangsstrahlung, ein zweiter die Streustrahlung durch den Compton-Effekt senkrecht zur Ebene des Primärstrahls. Dieser Detektor ist beweglich auf einer Ebene parallel zum primären Röntgenstrahl angeordnet, sodass einzelne Volumenelemente im Plattenquerschnitt durch das Verfahren des zweiten Detektors fokussiert werden können. Das Gerät ist als *Stenograph* bekannt. Eine genaue Anordnung der Röntgenröhre und der Detektoren zeigt Abb. 2.19.

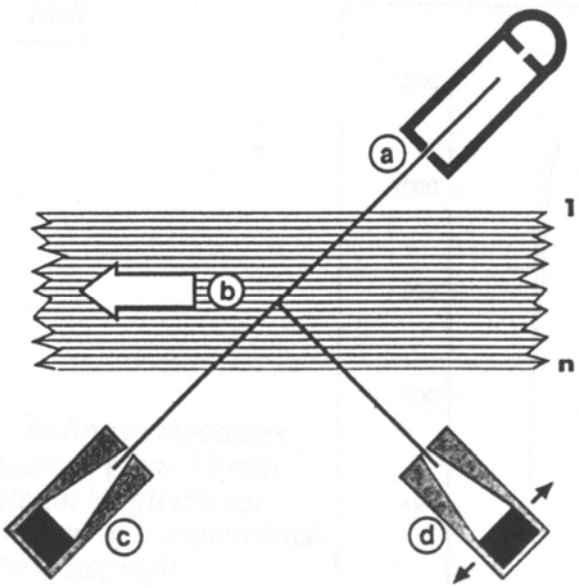


Abb. 2.19: Aufbauprinzip des Stenographen, a) Röntgenquelle, b) Holzwerkstoffplatte mit Produktionsrichtung, c) Detektor für die Durchgangsstrahlung, d) beweglicher Detektor für die Streustrahlung, die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung an (Dueholm 1995)

Mit diesem Online-Messgerät ist erstmals eine nahezu verzögerungsfreie Messung des Rohdichteprofils direkt im Anschluss an die Heißpresse möglich. Anzumerken ist, dass das Rohdichteprofil bei dieser Messmethode nicht an einer einzigen, lokal eng begrenzten Stelle der Platte gemessen wird, sondern über eine bestimmte Strecke in der Platte in Produktionsrichtung.

DePaula (1992) entwickelte die bis heute einzige Messeinrichtung, mit der während des Heißpressvorganges die Rohdichteentwicklung an drei Stellen in der Holzwerkstoffmatte nachvollzogen werden kann. Bei den Untersuchungen wird eine Laborpresse mit einer Pressflächengröße von 2'·2', entsprechend $0{,}6098 \cdot 0{,}6098\ m^2$, verwendet, an die seitlich drei ^{137}Cs-Strahler angebracht werden. Auf der gegenüberliegenden Seite der Laborpresse sind die entsprechenden Detektoren angebracht. Die Verwendung von ^{137}Cs als Strahlungsquelle mit einer sehr hohen Photonenenergie ist notwendig, um die große Messlänge von ca. 0,6 m der Holzwerkstoffplatten in der Presse durchdringen zu können. Die Messebenen zur Verfolgung der Rohdichteentwicklung während der Heißpressung liegen bei 25 %, 50 % und 75 % der Plattendicke. Diese bewegen sich beim Schließvorgang der Presse auf der Messebene simultan, ähnlich einer Mehretagenpresse. In Abb. 2.20 wird das Prinzip der Presse verdeutlicht. Die Positionierung der Strahler ist aus geometrischen Gründen nicht an einer Stelle am Querschnitt der Platte möglich, sondern muss über die Breite der Platte versetzt erfolgen. Aufbauend auf der Konstruktion von DePaula (1992) beschreiben Winistorfer und Moschler (1996) die Komplexität bei der Inbetriebnahme und beim Betrieb der Laborpresse. Die notwenige

Aktivität der Strahler, die erforderlich ist, um die bei einer erwarteten Messfrequenz von 4 Hz und bei der statistischen Schwankung der Intensität von Radioisotopen ein ausreichend gesichertes Messsignal zu bekommen, beträgt 1/3 Curie für jede der drei Messstellen. Demzufolge wird mit einer Gesamtaktivität von 1 Curie, das entspricht 37 GBq, gearbeitet!

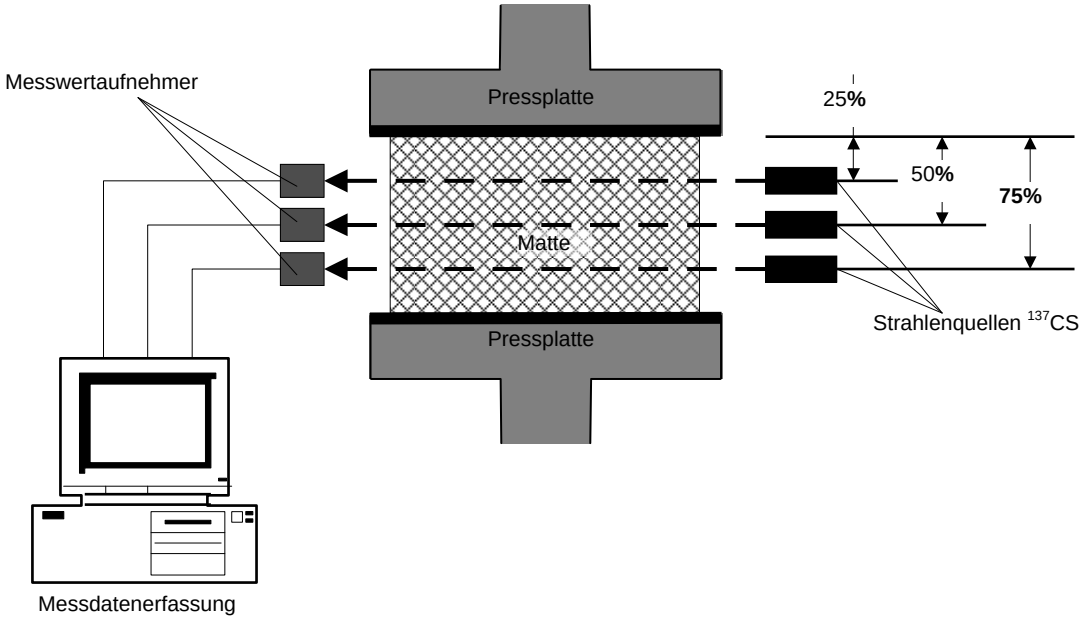


Abb. 2.20: Prinzipskizze der in-situ-Messeinrichtung von DePaula (1992)

Auf die Notwendigkeit einer aufwendigen Abschirmung und bruchsicheren Einhausung der Strahler, gerade bei einer Anwendung an einer hydraulischen Laborpresse, wird ausführlich hingewiesen. Die Strahler werden nur für Versuche in die Laborpresse eingebaut: daraus resultieren hohe Anforderungen der Aufnahmen für die umhausten Strahler bezüglich der Repositionierbarkeit. Die Abmessungen des Strahls werden mit 0,16 cm am Schutzgehäuse der Radioisotope angegeben. Weitere Herausforderungen – neben dem Strahlenschutz – waren die Ausrichtung der einzelnen Strahler auf den jeweiligen Detektor, die beim Einsetzen der Strahlungsquellen vor den Versuchsreihen auftraten, sowie die notwendige synchrone Bewegung von Detektor zu Strahlungsquelle auf einer Ebene während des Pressvorgangs, Streustrahlungsprobleme zwischen den Detektoren sowie Driftproblem der verwendeten Detektoren. Über die nicht zu vermeidende Querdehnung der Holzwerkstoffmatten auch in Durchstrahlungsrichtung werden von allen Autoren keine Aussagen gemacht.

Winistorfer und Moschler (1996) beschreiben auch den Kalibriervorgang der einzelnen ^{137}Cs-Strahler, der mit fünf verschieden dicken Streifen zuerst aus Polyethylen, dann aus Fichte (*Spruce*) durchgeführt wird. Ein Massenschwächungskoeffizient für die Photonenenergie der

^{137}Cs-Radioisotope, der in der Größenordung der von Olson und Arganbright (1981) liegt, wird ermittelt.

Diese grundlegende Konstruktion der Versuchspresse mit den verwendeten ^{137}Cs-Strahlern wurde für viele weitere Untersuchungen genutzt (Wang und Winistorfer 2000b; Wang et al. 2001a; Wang et al. 2001b; Zombori 2001; Wang und Winistorfer 2002; Wang et al. 2004). Die Versuchseinrichtung von DePaula (1992) lieferte wichtige Ansätze für die Entwicklung der eigenen Versuchsmethodik in dem hier durchgeführten Projekt.

Winistorfer et al. (2000) präsentieren erste Versuchsergebnisse, die mit der Versuchspresse von DePaula (1992) bei der Herstellung von OSB-Platten erzielt worden sind. Umfassend beschäftigen sich Winistorfer et al. (2000) mit dem Einfluss der gemessenen Dichte als Anzeichen für die Feuchtebewegung in der Platte. Dazu wurden konditionierte Platten in einem Press- und Messzyklus ohne Temperatureinwirkung untersucht. Im anschließenden Presszyklus, in dem die gleichen Proben unter Temperatureinwirkung wie im Heißpressvorgang verwendet werden, zeigt sich ein deutlicher Dichteanstieg an den Messstellen bei 25 % und 75 % zu Beginn des Messzyklus, gefolgt von einem langsamen Abfall der Dichte zum Ende hin. Etwas verzögert stellt sich eine Dichteerhöhung in der Mittelschicht an der Messstelle bei 50 % ein. Auch dort kommt es zu einem Dichteabfall in der Mittelschicht, der nach Winistorfer et al. (2000) durch eine Austrocknung der Platte zu begründen ist.

Anhand von Versuchen, die mit dieser Laborpresse durchgeführt wurden, erarbeiten Wang und Winistorfer (2000b) die Modellvorstellung für die Entstehung des Rohdichteprofils, die in Abschnitt 2.2.1 bereits vorgestellt wurde. Ein typisches Pressendiagramm, das bei der Herstellung von MDF-Platten mit mehreren Verdichtungsschritten aufgenommen wurde, zeigt Abb. 2.21. Zur weiteren geometrischen Beschreibung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs variieren Wang und Winistorfer (2000a) die Position der drei ^{137}Cs-Strahler. Dazu werden die drei Strahler in drei verschiedenen Kombinationen positioniert: (i) 16,3 %, 50 % und 83,7 %; (ii) 29,3 %, 58,7 % und 88 %; (iii) 20,6 %, 50 % und 79,3 %. Mit diesen unterschiedlichen Anordnungen kann in drei unabhängigen Versuchen an acht Positionen verteilt über den Mattenquerschnitt die Dichteentwicklung während des Heißpressvorgangs gemessen werden. Als Partikel für diese Versuche werden OSB-Strands verwendet, die mit 3 % Phenol-Formaldehyd-Klebstoff beleimt sind und deren Feuchte 9,8 % beträgt. Die graphische Darstellung der Messwerte zeigen die Abbildungen 2.22 und 2.23. Eine differenzierte Beschreibung und Auswertung der Abbildungen 2.22 und 2.23 erfolgt durch Wang und Winistorfer (2000a) nicht. Zu bemerken ist, dass die Daten für die Darstellungen nach den

Abbildungen 2.22 und 2.23 aus mindestens drei unabhängigen Versuchen zusammengestellt sind.

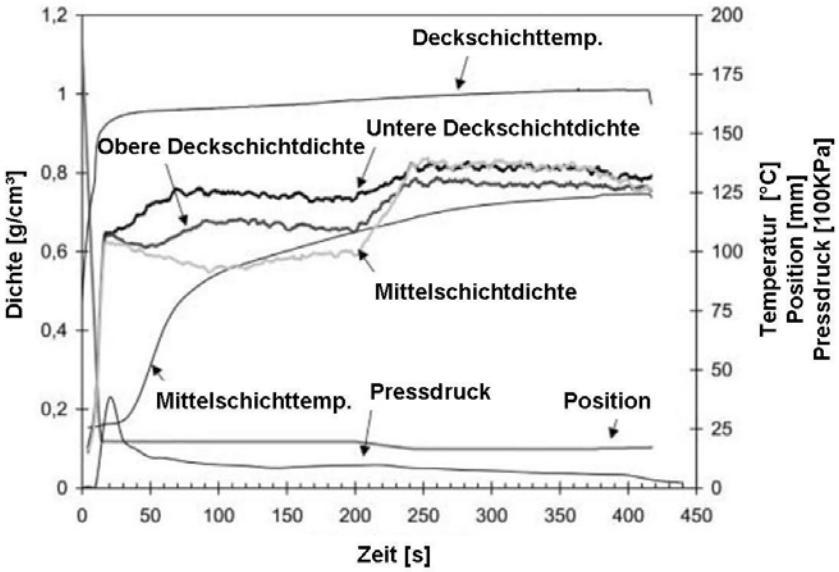


Abb. 2.21: Pressendiagramm für eine MDF-Platte mit einem Nachverdichtungsschritt von 120 % auf 100 % Plattendicke nach 185 s: gesamte Presszeit 400 s, Schließzeit 15 s (Wang et al. 2004)

Die Ergebnisse aus den Messungen von Wang und Winistorfer (2000b) und die Auswirkungen auf das Rohdichteprofil werden ausführlich in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt.

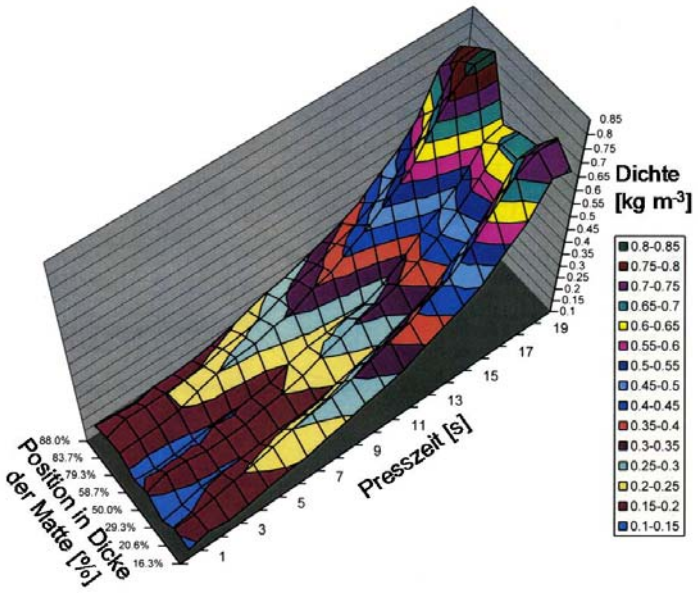


Abb. 2.22: Rohdichteprofilentwicklung an einer OSB-Platte während der Verdichtung bei einer Schließzeit von 20 Sekunden. Die dargestellten Datenpunkte sind auf 0,7 s gemittelt aus einer Messrate von 8 Hz (Wang und Winistorfer 2000a)

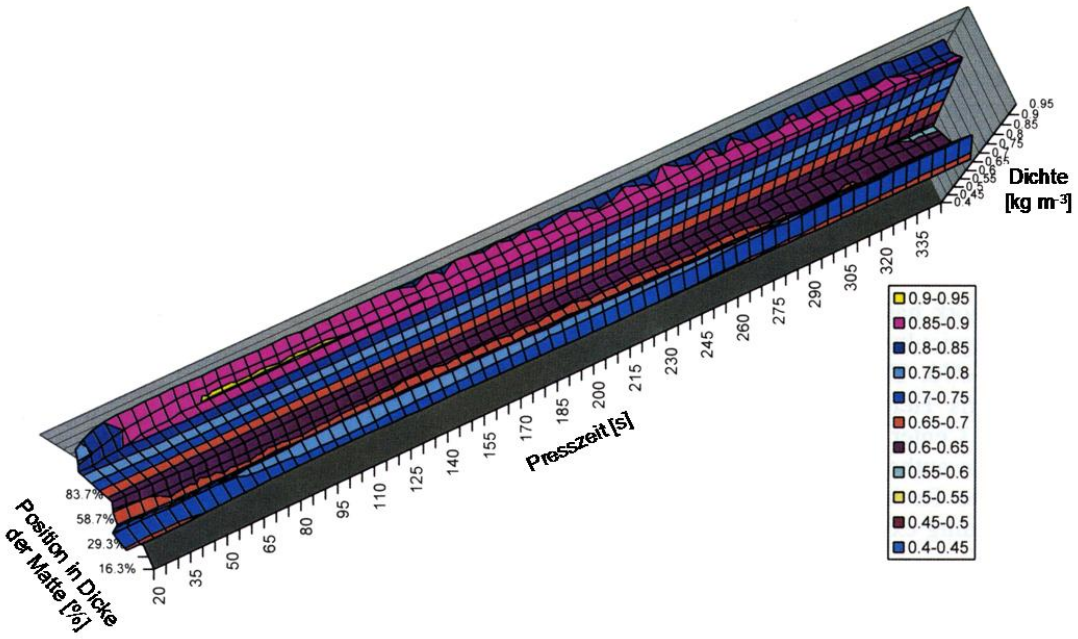


Abb. 2.23: Rohdichteprofilentwicklung an einer OSB-Platte während der Haltephase. Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus einem Intervall von 5 s dar (Wang und Winistorfer 2000a)

3 Material und Methoden

Einführend stellt dieses Kapitel die für die Versuche verwendeten Ausgangsstoffe und die daraus hergestellten Laborplatten und Proben mit den jeweiligen Anforderungen für die entsprechende Versuchsreihe dar. Die Untersuchungen werden durchgängig an MDF-Platten durchgeführt, da die Größe der Verdichtungseinheit durch die Abmessungen des Probenraums im Labordichtescanner begrenzt ist. Der Methodenteil stellt die Verdichtungseinheit vor.
Der zweite große Abschnitt dieses Kapitels geht ausführlich auf die Herleitung der eingesetzten Methode, die verwendeten Geräte und die Konstruktion der Laborverdichtungseinheit ein. Zudem wird die notwendige Kalibrierung der Messdatenbilder dargestellt, die im Röntgenscanner erzeugt werden. Abschließend wird die Erfassung, Vorauswertung und Kalibrierung der Rohdaten erläutert.

3.1 Material

Als Ausgangsmaterial für die Versuche wurde möglichst nur eine Charge für jedes Material verwendet, um den Einfluss auf den Massenschwächungskoeffizienten möglichst zu minimieren.

3.1.1 Fasermaterial

Das für alle Versuchsplatten verwendete Fasermaterial stammt aus einem europäischen MDF-Werk. Nach Herstellerangaben sind die Fasern nicht beleimt und enthalten kein Hydrophobierungsmittel (Paraffin). Es ist jedoch davon auszugehen, dass es nicht absolut möglich ist, die Blowline-Beleimung vollständig abzustellen, ebenso die Wachszufuhr, die i. d. R. im Refiner erfolgt. Die Fasern wurden nahezu zu 100 % aus Kiefer *(Pinus sylvestris)* hergestellt. Ein kleiner Restanteil von bis zu 2 % kann nach Firmenangaben aus Laubhölzern wie Pappel, Erle und Robinie bestehen. Altholz wurde für die Hackschnitzelherstellung nicht verwendet. Genauere Angaben waren vom Hersteller der Fasern nicht zu erhalten. Bei der Entnahme wurden die Fasern nach dem Stromrohrtrockner aus dem Rohrleitungssystem ausgeschleust und aus einem offenen Silo manuell in PE-Säcke abgefüllt. Die Feuchte der Fasern betrug bei der Abfüllung ca. 5–7 %.
Die genauere Analyse der Fasern erfolgte mit dem Fasergrößenmessgerät Qualscan der Firma McCarthy Products Company, Seattle (USA). Hierzu wurden die Fasern in Wasser zu einer Suspension aufgeschlagen und dadurch weitestgehend vereinzelt. Die so erstellte Suspension wird im Durchfluss von einer Digitalkamera erfasst und bildanalytisch ausgewertet. Diese

Messungen wurden fünfmal wiederholt und die Einteilung der Fasern in fünf Größenklassen von Staubanteil bis Grobanteil durch eine benutzerdefinierte Vorgabe vorgenommen. Die mittleren Faserabmessungen betragen für die Länge 2,05 mm und für die Breite 0,40 mm. Die Faserbreite lässt eher auf Faserbündel als auf Einzelfasern schließen. Die Messwerte sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da die Auflösung der Digitalkamera nicht so hoch ist, dass Einzelfasern und Faserbündel sicher unterschieden werden können. Zudem kann eine gekrümmte Faser als zwei Teilfasern erkannt werden, da solche Faserformen von der optischen Auflösung und der Software nicht sicher erkannt werden können. Die Verwendung des oben genannten Fasermessgerätes ist nicht unumstritten, da die Ergebnisse oft als nicht reproduzierbar angesehen werden. Dennoch können die hier aufgeführten Versuche Anhaltspunkte für die Faserqualität geben.

3.1.2 Klebstoff

Als Klebstoff wurde ein melaminverstärktes UF-Harz (MUF) eines deutschen Klebstoffherstellers verwendet. Nach Herstellerangaben beträgt der Festharzgehalt 69 ± 1 %; der pH-Wert 8–9 bei 20 °C. Feststoffanteil und pH-Wert werden bei der Herstellung der Laborplatten stichprobenartig überprüft.

3.1.3 Laborplatten

Für reproduzierbare Ergebnisse wurde bei der Herstellung der Laborplatten ausschließlich eine Grundrezeptur verwendet. Dies galt sowohl für die Laborplatten, die für die Kalibrierung des Itrax Woodscanners, als auch für alle Probenkörper, die in der in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Laborverdichtungseinheit hergestellt wurden. Eine ausführliche Beschreibung des Itrax Woodscanners findet sich in Abschnitt 3.2.1. Eine einheitliche Rezeptur ist notwendig, um die elementare Zusammensetzung der Probenkörper nicht zu ändern, weil von dieser nach den Erläuterungen in Abschnitt 2.4.3 der für die Berechnungen notwendige Massenschwächungskoeffizient abhängt; lediglich die Feuchte der beleimten Partikel wurde variiert.

3.1.3.1 Laborplatten zur Kalibrierung des Dichtescanners

Für die radiometrischen Untersuchungen im Dichtescanner (Itrax Woodscanner), der in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wird, ist eine speziell für das Gerät und die verwendete Röhreneinstellung ermittelte Kalibrierung notwendig. Die Herstellung der Laborplatten mit homogenem Dichteprofil erfolgte auf einer Laborpresse der Firma Siempelkamp (Krefeld). Als Material wurden die oben vorgestellten Fasern und der MUF-Klebstoff verwendet. Die Fasern wurden in einem Pflugscharmischer FM 300 D der Firma Lödige (Paderborn) beleimt. Die Faserfeuchte vor der Beleimung betrug 6 %, der Festharzanteil der Platten 8,0 %. Als Härter

wurde Ammoniumsulfat in einer 40 %-igen Lösung verwendet und mit 3,0 % Feststoff auf die atro Festharzmasse dosiert. Es wurde kein Hydrophobierungsmittel beigefügt. Die Leimflotte wurde in einer Zweistoffdüse über einen Druckbehälter innerhalb von maximal fünf Minuten eingedüst. Dazu wurde der Druckbehälter mit der Leimflotte mit 2 bar Druck beaufschlagt, die Luftdüse wurde mit 5 bar betrieben. Das Pflugscharmischwerk lief mit 120 min^{-1} Umdrehungen, das Schlagwerk war auf Stufe II (3000 min^{-1}) eingestellt. Die Eindüsung der Leimflotte in das Fasermaterial dauerte ca. 2–3 min. Nach der Beleimung wurde das Fasermaterial in einem Ventilator aufgelockert, um eventuelle Faseragglomerate aufzulösen. Die Feuchte der beleimten Fasern reduziert sich dabei um ca. 1 %. Zur Erzielung eines homogenen Rohdichteprofils wurde ein Pressprogramm angewendet, das v. Haas (1998) entwickelt hat. Es sieht eine Verdichtung der gestreuten Fasermatte auf Solldicke bei Raumtemperatur und eine anschließende Durchwärmung der verdichteten Matte mit einer Temperaturrampe von 0,9 °C pro Minute in den Heizplatten der Laborpresse vor, bis 105 °C in der Mattenmitte mittels eines an die Pressensteuerung angeschlossenen Thermoelements gemessen werden. Nach dieser Methode wurden Laborplatten der Größe 400 · 600 mm^2 mit einer Zielrohdichte von 900 kg m^{-3} hergestellt. Die angestrebte Dicke der Platten betrug 19 mm. Die Presszeit einer solchen Laborplatte beträgt ca. 90 min je nach Durchwärmungsgeschwindigkeit der verdichteten Matte.

3.1.3.2 Laborplatten für orientierende Versuche in der Verdichtungseinheit

Für die ersten orientierenden Versuche in der Verdichtungseinheit wurde als Mattenrezeptur die in Kap. 3.1.3 vorgestellte Zusammensetzung angewendet. Die Proben für Versuche in der Verdichtungseinheit weisen entsprechend der Hülse einen Durchmesser von 50 mm auf, die Dicke der Proben wurde auf 12 mm und die Zielrohdichte auf 750 kg m^{-3} festgelegt. Die Feuchte der Platten betrug jedoch abweichend von der Grundrezeptur 16 %. Diese hohe Feuchte wurde gewählt, um den Einfluss der Feuchtebewegung während des Pressvorgangs verifizieren zu können. Verfahrenstechnisch abweichend zu den in Abschnitt 3.1.3.1 beschriebenen und eingesetzten Geräten wurde die Beleimung der Fasern in einem Trommelmischer der Firma Drais-Werke (Mannheim) durchgeführt. Für ein gutes Beleimungsergebnis müssen ca. 500 g in einer Charge beleimt werden. Der Leimansatz wurde innerhalb von fünf Minuten eingedüst. Die Zweistoffdüse wurde dazu mit 2 bar Druck beaufschlagt, die Nadel, mit der die Leimzufuhr geregelt wird, wurde eine ¾ Umdrehung geöffnet. Nach dem Beleimen wurden die Fasern in einem Ventilator aufgelockert, um eventuelle Agglomerate aufzulösen. Das beleimte Fasermaterial wurde nahezu luftdicht vor und während der Versuchsdurchführung gelagert. Die Presstemperatur für die Proben in der Verdichtungseinheit betrug 180 °C: Diese

Temperatur wirkt bei diesen Versuchen von Beginn des Pressvorganges ein im Gegensatz zu den weiter oben beschriebenen Laborplatten mit homogenem Dichteprofil.

3.1.3.3 Laborplatten für systematische Versuche mit Nachverdichtungsschritt in der Verdichtungseinheit

Das beleimte Fasermaterial für diese systematischen Untersuchungen wurde entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 3.1.3.2 hergestellt. Die Zielfeuchte der fertigen Fasern wurde auf einen praxisnahen Wert von 8 % eingestellt. Eine Kontrollmessung durch Darren der beleimten Fasern nach ISO 16 979:2003 ergab eine Faserfeuchte von 7,4 % nach Auflockern der Fasern.

3.2 Methoden

Die Grundlage für die hier angewendete Messmethodik ist der im folgenden Abschnitt vorgestellte Röntgenscanner. Speziell auf die Abmessungen und messtechnischen Möglichkeiten dieses Messgerätes wird eine Laborverdichtungseinheit entwickelt, die die verfahrenstechnische Grundlage für die angestrebte Methode darstellt.

3.2.1 Röntgenscanner

Alle radiometrischen Untersuchungen wurden mit einem Röntgenscanner Typ Itrax der Firma Cox Analytical Systems AB (Göteborg, Schweden) durchgeführt. Der Scanner besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten:

- Hochspannungseinheit für die Röntgenröhre und das Röntgenröhrenschutzgehäuse mit Röntgenoptik
- Probensupport mit Schrittmotorsteuerung
- Zeilenkamera
- Steuerungsrechner

Als Röntgenquelle wird eine Long Fine Focus Röhre mit einer Silberanode (Ag) vom Typ Philips PW 2279/20 verwendet. Diese Röhre hat eine maximale Leistung von 2,2 kW und kann mit einer maximalen Beschleunigungsspannung von 60 kV und einem maximalen Anodenstrom von 40 mA betrieben werden. Die tatsächlichen Betriebsgrenzen im oberen Strom- und Spannungsbereich liegen jedoch etwas niedriger, da die maximale Leistung nicht überschritten werden darf. Die erzeugte Röntgenstrahlung wird nicht weiter zielgerichtet gefiltert, sodass eine polychromatische Strahlung aus charakteristischer Strahlung und Bremsstrahlung vorhanden ist. Das ist bei der Berechnung der Massenschwächungskoeffizienten für das Probenmaterial zu berücksichtigen. Die Röntgenröhre ist in einem Röhrenschutzgehäuse

montiert, an dem ein Auslassfenster für die Röntgenstrahlung mit einem automatischen Sicherheitsverschluss (Shutter) versehen ist. Der Shutter kann über die Software vom Steuerungsrechner aus betätigt werden. Zusätzlich ist der Shutter durch eine elektrische Sicherheitskette im Röntgenscanner verriegelt, sodass im normalen Betriebsmodus keine Strahlung austreten kann, wenn der Probenraum des Gerätes zugänglich ist. Dies ist gemäß Röntgenschutzverordnung (RöV 2003) vorgeschrieben. Für Einrichtungszwecke kann diese Sicherheitskette unter Beachtung weiterer persönlicher Schutzmaßnahmen für die am Röntgenscanner arbeitende Person deaktiviert werden. Der sehr feine, aber sehr breite Strahl mit den Abmessungen $0{,}4 \cdot 12\ \mathrm{mm}^2$, der am Brennpunkt der Anode erzeugt wird, wird mit einer speziellen Kapillaroptik weiter in der Dicke auf 0,1 mm fokussiert. Eine weitere Divergenz der Strahlung wird durch die Kapillaroptik verringert, jedoch nicht ganz verhindert. Die optische Auflösung des Röntgenscanners wird im Weiteren beschrieben.

Die Optik wird so justiert, dass ein Strahl gleichmäßiger Intensität, entsprechend einem gleichmäßigen Signalpegel, über die Breite des Detektors vorhanden ist. Die Justierung erfolgt mittels feiner Einstellschrauben direkt an der Optik. Das Detektorsignal ist dabei an der Steuerungssoftware beurteilbar. Der Detektor ist eine Zeilenkamera mit 1024 Dioden des Herstellers Hamamatsu (Hamamatsu City, Japan). Jede Diode entspricht einem Pixel. Die Dioden haben eine Größe von $25 \cdot 25\ \mu\mathrm{m}^2$, die gesamte Detektorlänge ist somit 25,25,6 mmine nähere Betrachtung der notwendigen Intensität und des damit verbundenen Photonenstroms liefert Bergsten (2001). Wenige Pixel am Rand des Detektors können aufgrund des Penumbra-Effektes (siehe Abb. 3.2) nicht genutzt werden; insgesamt sind ca. 900 bis 1000 Pixel effektiv nutzbar. Die verworfenen Pixel werden in der Steuerungssoftware des Scanners schon bei der Rohdatenaufbereitung nicht berücksichtigt. Die Messzeit, in der der Detektor die Strahlung aufnimmt, ist von 25 bis 100 ms in Schritten von 5 ms in der Steuerungssoftware einstellbar. Vor der Zeilenkamera ist ein Kollimatorsystem aus planparallelen Platten angebracht, die über skalierte Mikrometerschrauben eingestellt werden können. Damit kann der Röntgenstrahl, der von der Zeilenkamera aufgenommen wird, in Dicke und Breite begrenzt werden. Für eine gute optische Auflösung sollte der Strahl auf ca. 20 bis 25 µm Dicke reduziert werden. Seitlich wird der Strahl so begrenzt, dass die von der Kamera nicht nutzbaren Pixel ausgeblendet werden. Es ist bei der Kollimierung des Röntgenstrahls darauf zu achten, dass ein ausreichend hohes Signalniveau erhalten bleibt. Einflussgrößen auf das Signalniveau sind die an die Röhre angelegte Beschleunigungsspannung, der Anodenstrom, die Messzeit des Detektors (Expositionszeit) und die Spaltgröße, die mit dem Kollimator am Detektor eingestellt wird. Der Hersteller des Röntgenscanners gibt an, dass das

Strahlungsniveau durch die obere und untere Blende des Kollimators jeweils um ca. 25 % der gesamten, unkollimierten anfänglichen Strahlungsintensität pro Seite reduziert werden soll. Die Steuerungssoftware sieht eine Abgleichmöglichkeit für jedes einzelne Pixel der Zeilenkamera vor. Dadurch werden minimale, aber sichtbare Unterschiede im Signalniveau der einzelnen Pixel direkt nach der Messung in den Rohdaten ausgeglichen.

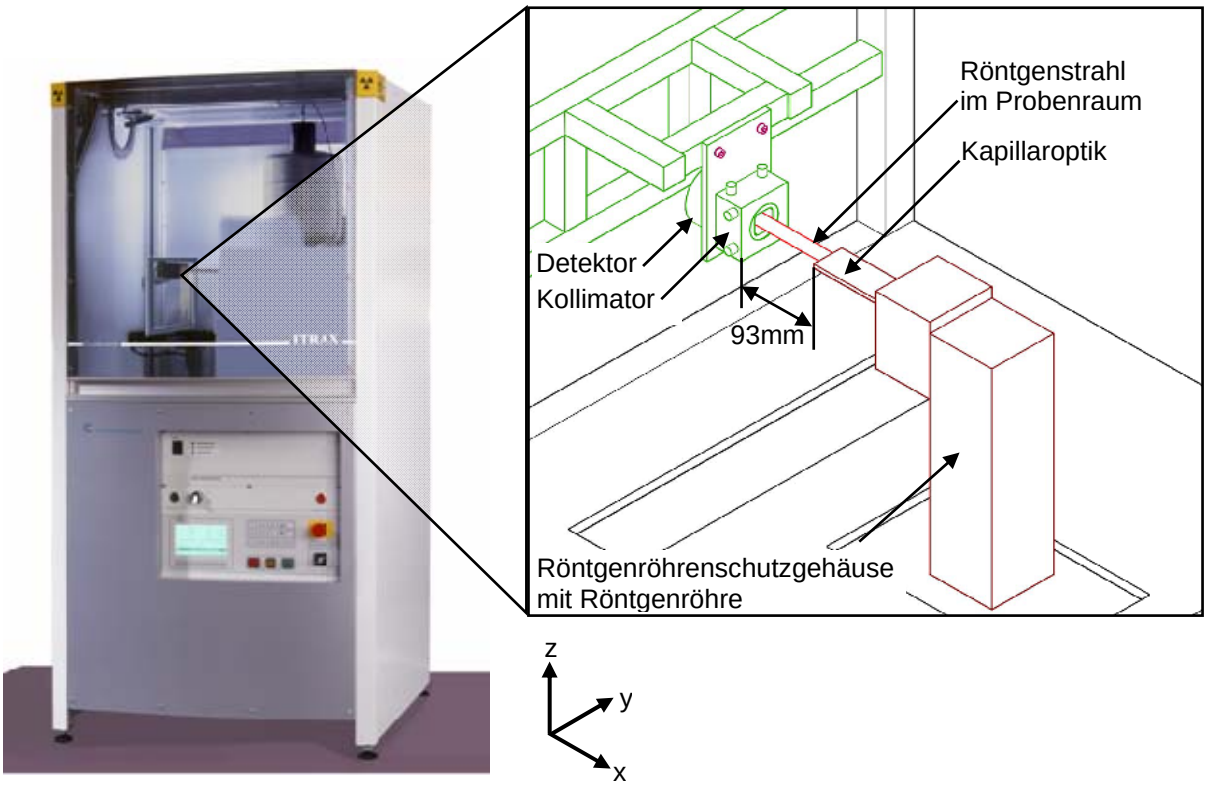


Abb. 3.1: Itrax Woodscanner (links; Quelle: Cox Analytical Systems AB, Schweden). Prinzipskizze des Probenraums im Itrax Woodscanner mit einigen wesentlichen Abmessungen und Koordinatensystem (rechts), der Probensupport ist aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht eingezeichnet

Zwischen der Röntgenröhre mit der Kapillaroptik auf der einen Seite des Scanners und dem Detektor auf der anderen Seite ist der Probensupport angebracht. Mit diesem können die Proben im Röntgenstrahl schrittweise in x- und y-Richtung bewegt werden. Aus den Linienbildern der Zeilenkamera setzt die Software anschließend zeilenweise ein Messwertbild der Probe zusammen. Ist der zu messende Bereich breiter als der Röntgenstrahl, werden mehrere Spalten mit Messwerten in x-Richtung nebeneinander angeordnet und zum Messwertbild zusammengefasst. Dabei entspricht der Wert eines jeden Pixels dem Verhältnis von Durchgangsintensität I zur Ausgangsintensität I_0 (Referenzsignal). Diese Gleitkommazahl (float) mit dem Wertebereich 0 bis 1 wird in eine vorzeichensensitive Integerzahl mit dem Wertebereich 0 bis 32 000 überführt. Das entspricht einer Datentiefe von 15 Bit. Mit der Software „Woodscan 6.02“ werden alle Funktionen des Röntgenscanners gesteuert und die Daten erfasst. Die Messwertbilder werden entweder mit 16 oder 8 Bit Informationstiefe als unkom-

primiertes tiff-Format (*Tagged Image Format*) abgespeichert. Der Wertebereich -2^{15} bis -1 wird dabei nicht genutzt.

Die Ausgangsintensität (I_0) wird vor jeder Messung als Referenzsignal aufgenommen. Die Software des Röntgenscanners ist so strukturiert, dass normalerweise keine Messung gestartet werden kann, ohne dass zuvor ein Referenzsignal aufgenommen wurde.

Für die Arbeiten in diesem Projekt wurde die Steuerungssoftware so erweitert, dass der Probensupport in seiner Position verharrt und die Zeilenkamera in einer gewünschten Zykluszeit, die mindestens 200 ms betragen muss, und einer gewünschten Expositionszeit Aufnahmen macht. Zusätzlich wurde am Röntgenscanner ein externer Triggerkontakt angebracht. So kann der Scanner nach der Parametrierung der Messaufgabe durch ein externes Signal gestartet und gestoppt werden. Der Triggerkontakt ist durch einen Optokoppler galvanisch vom Scanner getrennt, d. h., dass keine Störsignale des Startsignals auf die Elektronik des Röntgenscanners übertragen werden können.

Der oben erwähnte Penumbra-Effekt, der durch die nichtpunktförmige Röntgenstrahlungsquelle und die dadurch nicht absolut parallele Strahlung auftritt, ist bei allen weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen.

♦ Limitierende Effekte der optischen Auflösung

Die nicht ideal punktförmige Abmessung des Brennpunktes auf der Anode der Röntgenröhre sowie die geometrische Ausdehnung der zu untersuchenden Probe in Richtung des Röntgenstrahls erzeugen Effekte, die zu einer unscharfen Darstellung bzw. Verzerrung des Röntgenbildes führen. Als Einflussfaktoren sind hier zu nennen,

- der Penumbra-Effekt,
- die Länge der Probe in Richtung des Röntgenstrahls,
- vorwärtsgerichtete Streuung der Röntgenstrahlung.

In Abb. 3.2 ist der Penumbra-Effekt dargestellt. Durch die räumliche Ausdehnung des Brennflecks auf der Anode der Röntgenröhre werden von jedem Punkt des Brennfleckes Röntgenstrahlen in jede Richtung emittiert. Ein Punkt in der Probe wird dadurch nicht nur durch einen einzelnen Röntgenstrahl auf dem Detektor abgebildet, sondern durch eine Vielzahl von Röntgenstrahlen, die von räumlich unterschiedlichen Punkten emittiert werden. Mit den in Abb. 3.2 angegebenen Abmessungen berechnet sich die Größe des Penumbra-Effektes nach

$$P = \frac{b}{a} \cdot d \qquad \text{Gleichung (10)}$$

Dabei beschreibt a den Abstand vom Brennfleck der Anode zur optischen Ebene der Probe in [m], b den Abstand der optischen Ebene zum Detektor in [m] und d die Abmessung des Brennflecks senkrecht zur optischen Achse in [m], P ist die Größe des sich ergebenden Penumbra-Effektes.

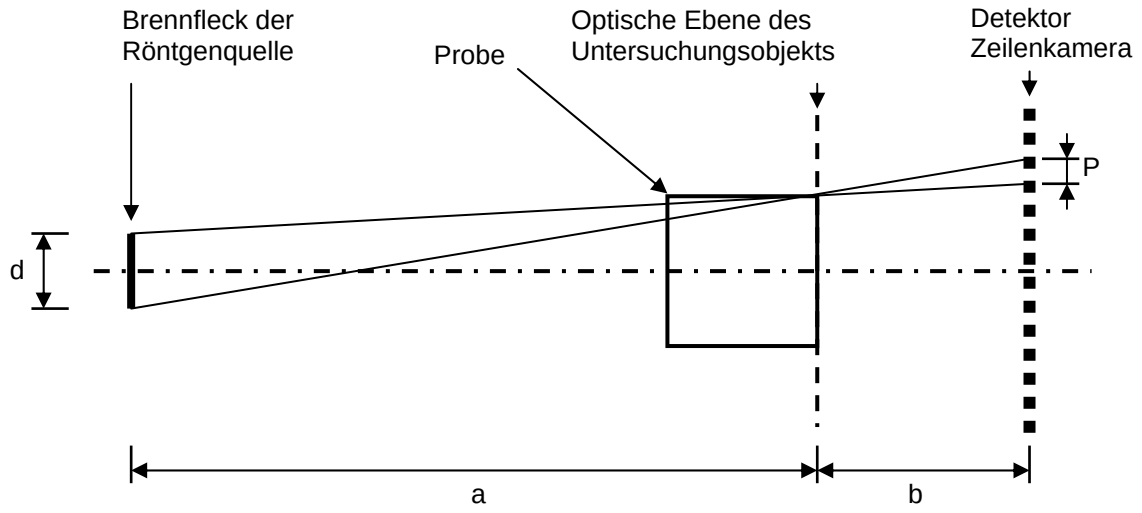


Abb. 3.2: Prinzipskizze zur Entstehung des Penumbra-Effektes in der Punktdarstellung von radiographischen Bildern, modifiziert nach Rindby (2003). Es sind nur die äußersten Strahlen eingezeichnet, durch die die maximale Größe des Penumbra-Effektes beschrieben wird. a, b: Abstände von der Röntgenquelle zur optischen Ebene der Probe und von dort zum Detektor in [m], d: geometrische Ausdehnung des Brennflecks der Röntgenröhre in [m], P: Penumbra in [m]

Ein weiterer Effekt, der zu Verzerrungen im Röntgenbild führt, wird durch die Ausdehnung des Objektes in Richtung des Röntgenstrahls hervorgerufen.

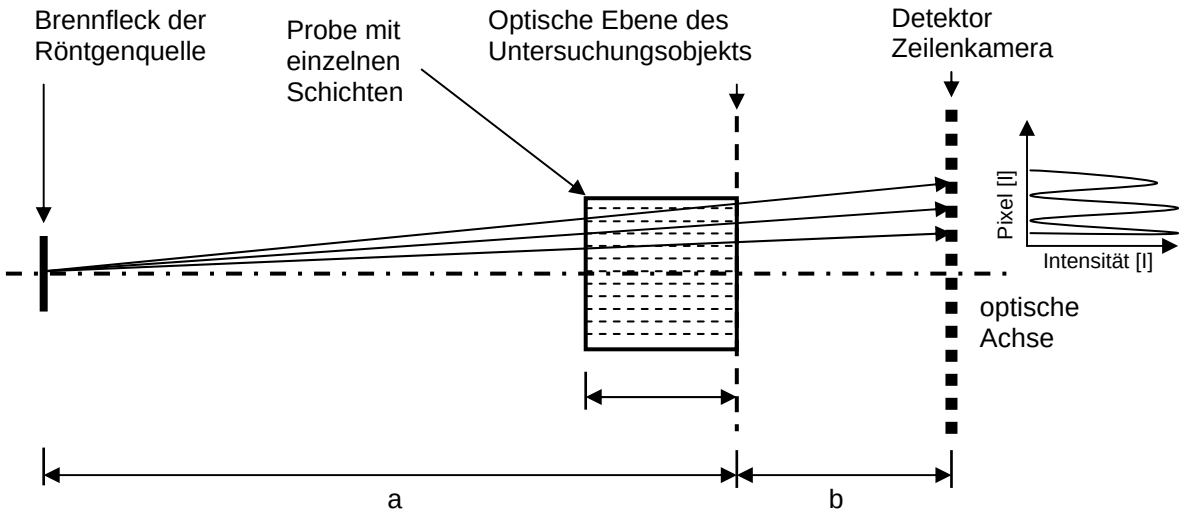


Abb. 3.3: Prinzipskizze der Verzerrung der Abbildung einer in Richtung des Röntgenstrahls ausgedehnten Probe, modifiziert nach Rindby (2003): Rechts ist die Veränderung der Intensität über die Pixel ersichtlich, x in [m] ist die Ausdehnung der Probe in Richtung des Röntgenstrahls

In Abb. 3.3 ist ersichtlich, dass ein Röntgenstrahl, der vom Mittelpunkt des Brennflecks auf der Anode der Röntgenröhre ausgeht, divergiert; je größer sein Winkel zur optischen Achse ist, um so mehr parallele Schichten der Probe durchläuft er. Das führt zu einer Mittelwertbildung der Dichten aller durchlaufenen Schichten und einer daraus resultierenden optischen Unschärfe, die die Intensität beeinflusst, die von den Pixeln der Zeilenkamera erfasst wird. Der Effekt ist nur schwer quantifizierbar.

Ein weiterer Effekt, der nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die vorwärts gerichtete Compton-Streuung, die, wenn diese auf der Ebene des Röntgenstrahls erfolgt und vom Detektor erfasst wird, zu einer Unschärfe führt und damit die optische Auflösung senkt. Rindby (2003) gibt die vorwärtsgerichtete Compton-Streuung mit 20 % für eine 4 mm starke durchstrahlte Holzprobe an. Die vorwärtsgerichtete Compton-Streuung kann durch eine sehr feine Einstellung der Kollimatoren vor der Zeilenkamera reduziert werden.

Die geometrische Anordnung, die den Effekt, der in Abb. 3.3 dargestellt ist, erzeugt, ist bei der Berechnung der effektiven Pixelgröße in der optischen Ebene zu der Probe zu berücksichtigen. Eine Übersicht der Größe zur Berechnung zeigt Abb. 3.4. Nach den Gesetzen des Strahlensatzes lässt sich auf die effektive Pixelgröße in der optische Ebene schließen.

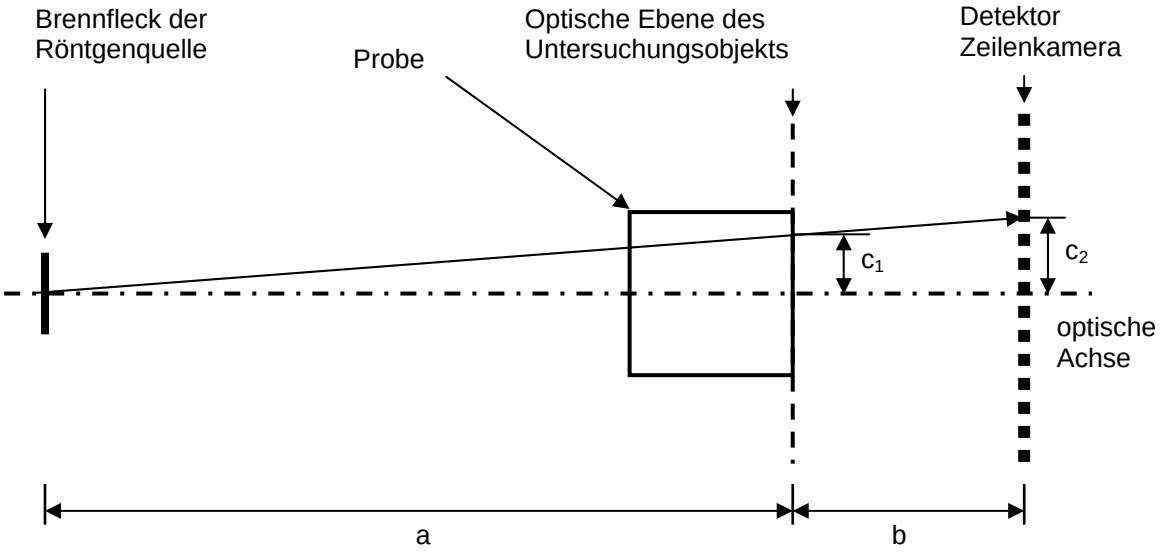


Abb. 3.4: Prinzipskizze zur Berechnung der effektiven Pixelgröße in der optischen Ebene der Probe. Die Abmessungen a und b sind in Abb. 3.2 beschrieben, c_1 ist die effektive Pixelgröße, c_2 die Pixelgröße der Zeilenkamera im Detektor

Die Kapillaroptik, mit der der Röntgenstrahl fokussiert wird, reduziert die angeführten Effekte mit Ausnahme der Compton-Streuung, verhindert diese jedoch nicht ganz. Eine Berücksichtigung der angeführten Effekte ist messtechnisch nicht möglich und kann nur mathematisch in den Messdaten erfolgen. Dazu sind aufwendige Korrekturen auf Basis des Klein-Nishina-

Wirkungsquerschnitts notwendig, mit dem der Streuwinkel der Photonen bei einem Stoß mit einem Elektron berechnet werden kann. Eine Vereinfachung des Klein-Nishina-Wirkungsquerschnitts für niedrige Photonenenergien ist der Thomson-Wirkungsquerschnitt (Nachtmann und Sexl 1992). Die Berücksichtigung dieser Korrekturen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

3.2.2 Laborverdichtungseinheit

Die Ziele dieser Arbeit, die in Abschnitt 1.2 genannt sind, sind nur mit einer speziell an die Aufgaben angepassten Versuchseinrichtung, einer Laborverdichtungseinheit, zu erreichen, die im oben beschriebenen Itrax Woodscanner eingesetzt werden kann. Die Laborverdichtungseinheit – eine kleine Heißpresse – wird im Folgenden auch kurz Verdichtungseinheit genannt. Diese wurde an die Dimensionen des Versuchsraums des Itrax Woodscanners angepasst und entsprechend ausgelegt. Mit der Konstruktion und dem Betrieb von kleinen Versuchspressen haben schon Frühwald et al. (1999) mit einer kleinen Dampfpresse und Heinemann (2004) anhand des **I**ntegrated **P**ressing **a**nd **Te**sting **S**ystems (ipates) gute Erfahrungen gesammelt. Diese wurden mit einer runden Pressfläche konstruiert, die Versuche in einem definierten und seitlich abgeschlossenen Probenraum erlaubte und so eine Hülse um die Pressflächen erforderte. Die runde Bauart war bei den geforderten Passungen konstruktiv wesentlich einfacher zu realisieren als eine Presse mit rechteckiger Probenform in der Fläche.

Die folgenden Ziele und Anforderungen sollen mit dem Konzept der Verdichtungseinheit erreicht werden:

- Versuchsdurchführung im räumlich begrenzten Versuchsraum des Röntgenscanners
- die Richtung der Verdichtung entspricht der Orientierung der Längenausrichtung der Zeilenkamera des Röntgenscanners
- Platten bis 16 mm sollen gepresst werden können bei einer Rohdichte bis zu maximal 1000 kg m^{-3}
- minimaler spezifischer Pressdruck von 5 N mm^{-2}
- Vermeidung von Längenschwankungen in Durchstrahlungsrichtung des Probenkörpers während der Messung
- möglichst einfacher Aufbau und einfache Fertigung der Komponenten
- Trennung von Justierung und Kraftaufnahme beim Pressvorgang
- Justierung der Komponenten der Verdichtungseinheit auf einer Grundplatte, kompakte Bauweise

- möglichst konstante Presstemperatur bis maximal 220 °C während des gesamten Pressvorgangs
- möglichst einfache Handhabung bei der Versuchsdurchführung und automatischer Versuchsablauf im abgeschlossenen Versuchsraum des Itrax Woodscanners
  - zur Einhaltung der Strahlenschutzbestimmungen nach Röntgenverordnung (RöV 2003)
  - zur möglichst guten Reproduzierbarkeit der Versuche

3.2.2.1 Konzeptionelle Auslegung der Verdichtungseinheit

Zur Erreichung der angeführten Ziele wurden die konstruktiven Merkmale der Presse wie folgt umgesetzt:

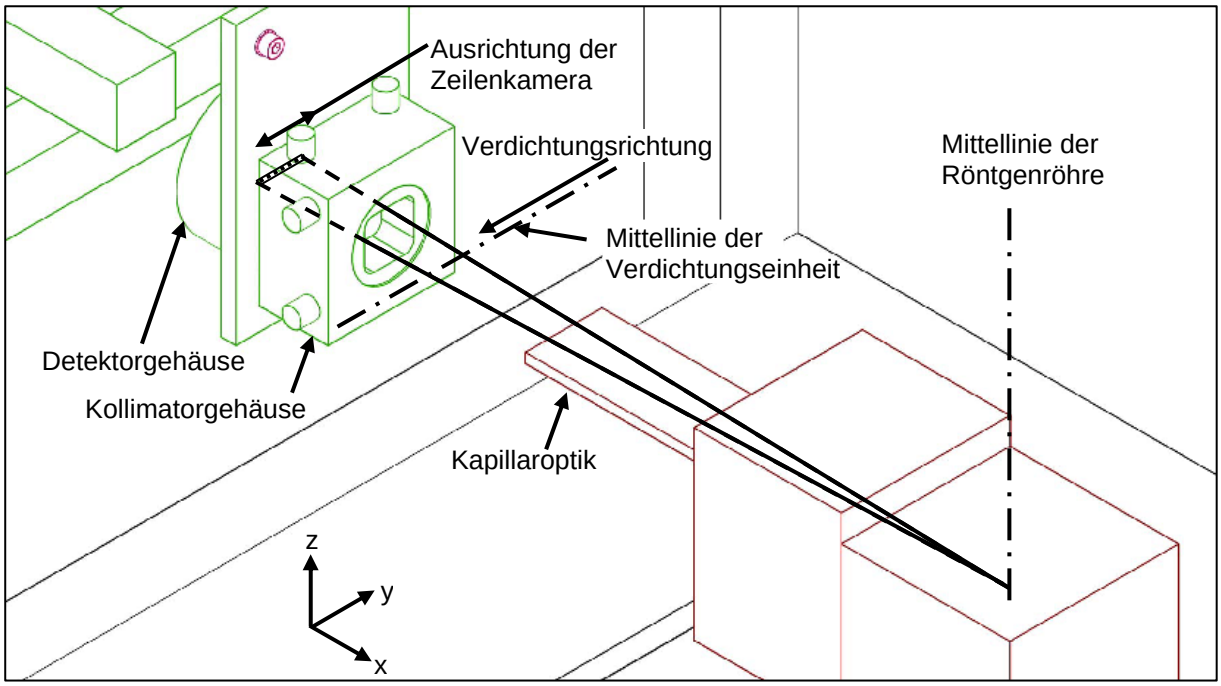


Abb. 3.5: Prinzipskizze des Probenraumes des Itrax Woodscanners und der Ausrichtung der Zeilenkamera

Es bot sich an, die Pressfläche der Verdichtungseinheit wie in den Versuchseinrichtungen der oben genannten Forschungsvorhaben rund auszulegen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Abmessungen wurde ein Probendurchmesser von 50 mm gewählt. Der Röntgenstrahl, mit dem die Proben untersucht werden, liegt auf einer Ebene durch den Mittelpunkt der Pressfläche. Damit entspricht der Durchmesser der Probe der maximal von den Röntgenstrahlen zu passierenden Materiallänge. Diese Länge von 50 mm ist auch von der zur Verfügung stehenden Strahlungsquelle bezüglich der Strahlungshärte und Strahlungsintensität bei guten Kontrastverhältnissen noch zu durchdringen, was Vorversuche beim Hersteller des Röntgenscanners ergeben haben.

Die Verdichtung in Richtung der y-Achse erfolgt horizontal in der Presse, da die Zeilenkamera im Detektor horizontal in dieser Achse ausgerichtet ist. Daraus folgt, dass auch die Verdichtungseinheit liegend auszulegen ist.

Die Fasermatte muss seitlich fixiert werden, da die Durchstrahlungslänge der Probe möglichst konstant sein muss, weil diese als Konstante in die Berechnung der Dichte mit einfließt (siehe Gleichung [7]). Zudem muss die Fasermatte durch den liegenden Einbau der Laborverdichtungseinheit in ihrer Form gehalten werden. Das erfordert den Einsatz einer Hülse, in der die Verdichtung abläuft, die im weiteren Verlauf der Arbeit Presshülse oder kurz Hülse genannt wird. Ähnliche Konstruktionsprinzipien finden sich bei v. Haas (1998) und Roos (2000).

Bei einer angestrebten maximalen mittleren Rohdichte der Versuchsplatten von 1000 kg m^{-3} und einer maximalen Dicke der Versuchsplatten von 16 mm ist bei einer angenommen Ausgangsrohdichte der kompakten gestreuten Fasermatte von ca. 150 kg m^{-3} eine Dicke der Fasermatte von 106,6 mm anzusetzen. Daraus resultiert eine Mindestlänge dieser Presshülse für diese Platten von ca. 120 mm, da die vorbereitete Matte sicher in der Presshülse liegen soll. Die Presshülse wurde mit einem Sicherheitszuschlag von ca. 30 % auf eine Länge von 140 mm ausgelegt.

Der fokussierte Röntgenstrahl von 0,1 mm Dicke und mit einer Breite von bis zu 25,6 mm muss diese Presshülse ohne Schwächung durchdringen können. Dazu wird diese auf einer Ebene durch den Mittelpunkt beidseitig mit einem feinen Schlitz versehen. Die Abmessungen dieser Öffnung müssen zwei Anforderungen genügen,

a) sie muss mindestens die Form und Abmessungen des fokussierten Röntgenstrahl haben und
b) sie muss so klein gehalten werden, damit sich möglichst keine Partikel während des Verdichtungsvorgangs in diese Öffnung hineindrücken können und damit die Durchstrahlungslänge verändern.

Dieser Schlitz konnte aus fertigungstechnischen Gründen 0,7 mm nicht unterschreiten und wurde 27 mm lang ausgeführt. Damit entspricht er den Abmessungen des Röntgenstrahls, ist aber noch hinreichend fein genug, dass nicht davon auszugehen ist, dass sich die verfilzten Fasern der Matte beim Verdichtungsvorgang in diesen Schlitz hineinpressen können. Es wurden während der Versuchsdurchführung keine nennenswerten Faserablagerungen im Schlitz für den Röntgenstrahl beobachtet. Dieser markierte sich jedoch leicht auf der Oberfläche der fertig gepressten Proben. Die Presshülse wird soweit auf den festen Presskolben aufgeschoben, dass ca. 2 mm der Breite des Schlitzes durch den festen Presskolben verdeckt werden.

Das ist notwendig, um sicherzustellen, dass der Röntgenstrahl nicht durch die vordere seitliche Begrenzung des Schlitzes abgeschnitten wird, sondern dass definitiv die Pressfläche des festen Presskolbens die Bezugsfläche darstellt.

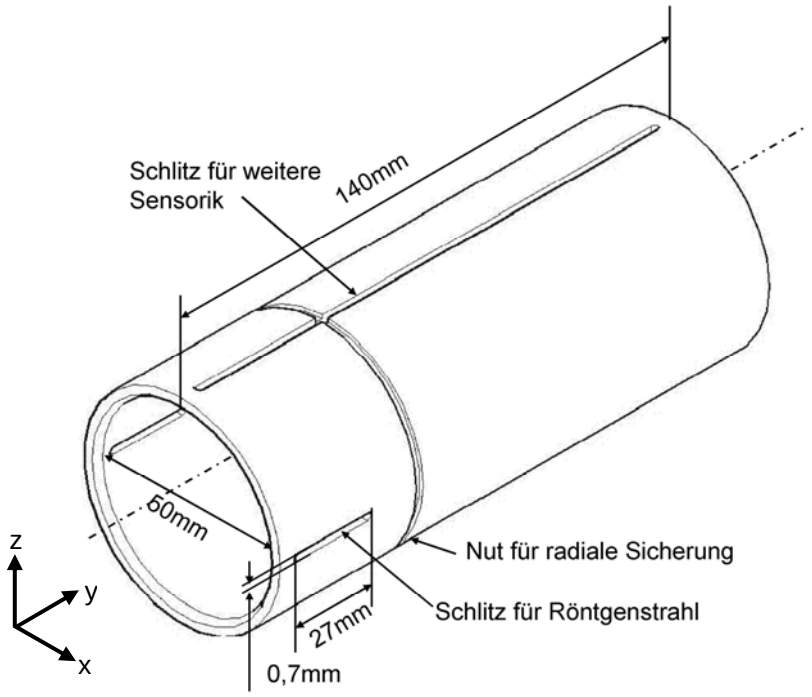


Abb. 3.6: Prinzipskizze der Presshülse mit den für die weitere Konstruktion wesentlichen Abmessungen und Konstruktionsdetails

Die Hülse sollte auf der Oberseite zusätzlich auch die Möglichkeit eines weiteren Zugangs zur Fasermatte ermöglichen, um während des Pressvorgangs weitere Sensoren in der Matte positionieren zu können. Der Innendurchmesser der Presshülse wurde auf eine Spielpassung relativ zu den Presskolben ausgelegt. Dabei war die thermische Ausdehnung der Presskolben bei max. 220 °C zu berücksichtigen. Der Innendurchmesser wird auf ein unteres Endmaß von exakt 50,00 mm und auf ein oberes Endmaß von 50,05 mm festgelegt. Die Außendurchmesser der Presskolben betragen minimal 49,735 mm und maximal 49,785 mm, damit ist auch beim durch die Erwärmung im Radius ausgedehnten Kolben und einem ungünstigsten Passungsverhältnis von größtem Kolbendurchmesser zu kleinstem Presshülsendurchmesser eine ausreichend große Spielpassung von 50 µm gewährleistet. Die Presshülse muss in einer entsprechenden Aufnahmevorrichtung sitzen, damit diese absolut passgenau und reproduzierbar mit dem Schlitz für den Röntgenstrahl auf der Ebene des Röntgenstrahls positioniert werden kann. Eine Sicherung in axialer und radialer Richtung wurde dazu vorgesehen. Die Wandstärke der Presshülse beträgt 3 mm.

Diese Einheit aus Presshülse und Aufnahme muss auf der Mittelachse der Verdichtungseinheit möglichst automatisiert verschiebbar sein. Zudem muss die Hülse auf den festen

Presskolben, der das Widerlager bildet, geschoben werden können. Diese Aufgabe erfüllt ein Pneumatikschlitten der Firma Festo, Typ SLT 16-10-PA, mit einem justierbaren Hub von ca. 10 mm. Auf diesem Schlitten sind auf einer Grundplatte, die die Bezugsebene darstellt, vier Aufnahmestifte angebracht, auf die die Presshülse mit ihren Halterungen aufgeschoben wird. Die genaue Endposition wird durch zwei Kugelverschlüsse gesichert. So ist eine Reproduzierbarkeit der Positionierung des Schlitzes für den Röntgenstrahl in der Presshülse auf der Ebene des Röntgenstrahls gewährleistet.

Die Pressfläche des festen Presskolbens wird als Bezugsfläche für die Ortsauflösung in y-Richtung gewählt (y = 0), da diese Fläche während des Verdichtungsvorgangs im Röntgenstrahl ruht.

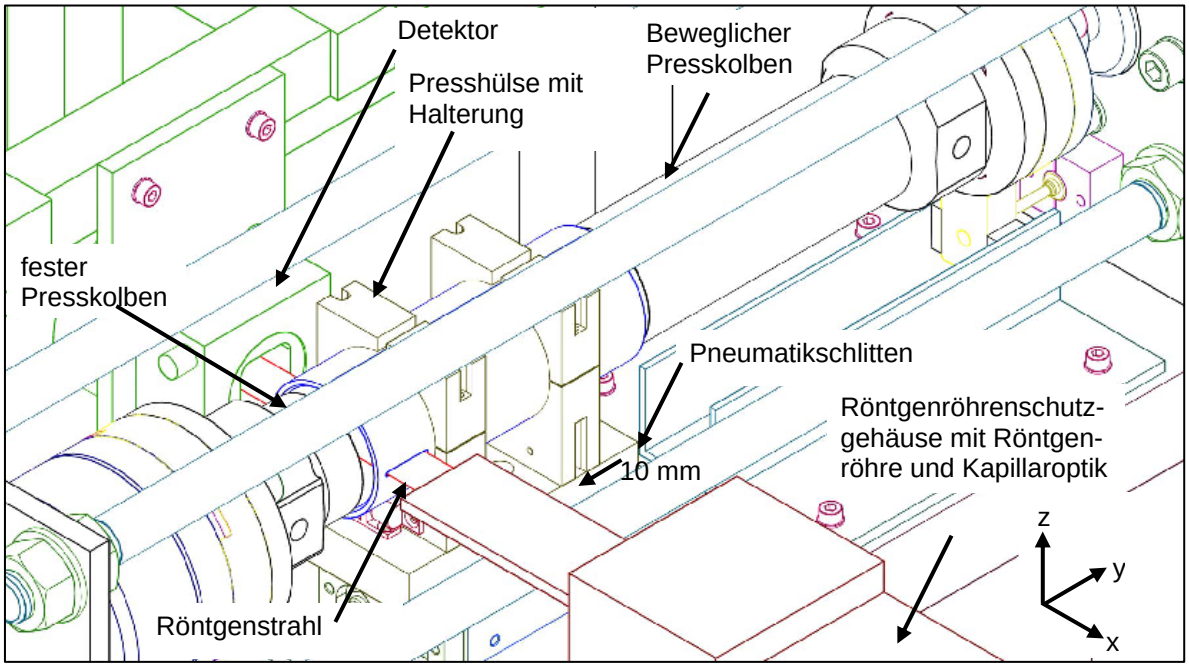


Abb. 3.7: Prinzipskizze zur Anordnung der Presshülse auf dem Röntgenstrahl und aller weiteren wesentlichen Konstruktionselemente im Probenraum des Itrax Woodscanners

Der bewegliche Presskolben wird durch einen Hydraulikkolben mit 150 mm Hub angetrieben. So bleiben bei der Länge der Presshülse von 140 mm ca. 5 mm Platz in der Länge auf jeder Seite, um die Presshülse bei der Versuchsdurchführung in ihrer Position aufzustecken. Der Einsatz von Hydraulik bietet den Vorteil der sehr einfachen Regelung über entsprechende Ventile und Regelungselektronik und stellt mit einem doppelt wirkenden Hydraulikzylinder eine kompakte, gut regelbare Kraftquelle dar (Czichos 1989).

Der feste Presskolben und der Hydraulikzylinder werden auf Edelstahlplatten (Grundplatten) mit 10 mm Stärke montiert. Diese Grundplatten bilden das vordere und hintere Widerlager für

die Presskolben und werden mit vier Edelstahlstangen mit einem Durchmesser von 20 mm zur Kraftübertragung verbunden.

Die kraftübertragenden Komponenten wurden aus Edelstahl gefertigt. Bauteile, die eine Funktion zur Justierung haben, wurden aus Aluminium gefertigt. Für Halterungen der Presshülsen wurde PEEK, ein Hochleistungskunststoff für Hochtemperatureinsatz, verwendet. Mit den Kunststoffhalterungen ist eine gute thermische Isolierung der Presshülse möglich und es entsteht keine zu große Temperatursenke während des Pressvorgangs, die die beheizten Presskolben zu stark abkühlt und dadurch die Ergebnisse verfälscht. Alle Komponenten wurden auf einem Aluminiumprofil montiert. Dadurch kann eine sehr einfach Justierung der einzelnen Komponenten zueinander erreicht werden. Die Kraftübertragung während des Pressvorgangs zwischen den Presskolben erfolgt über vier Edelstahlstangen.

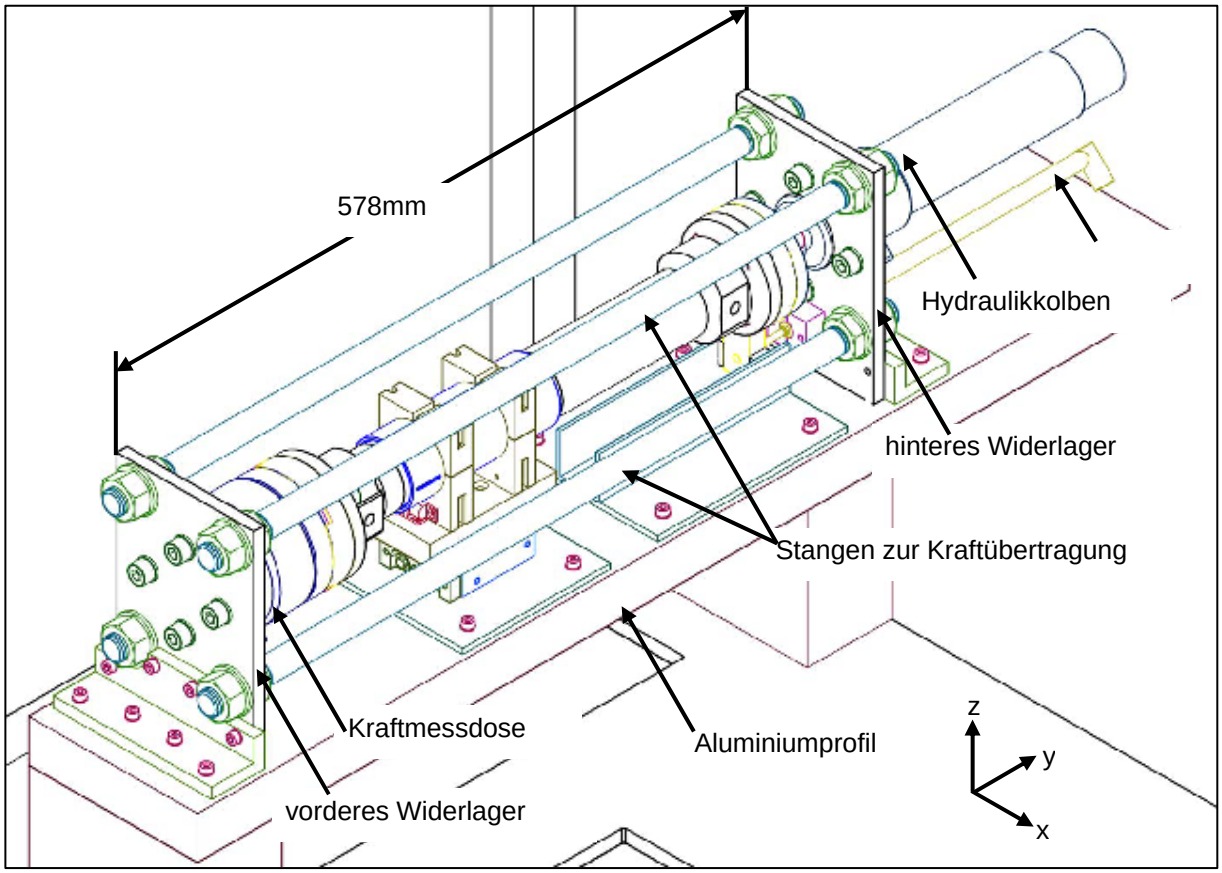


Abb. 3.8: Gesamtübersicht über die Konstruktion der Verdichtungseinheit. Die Komponenten des Itrax Woodscanners sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt

Als Hydraulikkolben wird ein doppelt wirkender Kolben, Typ NH30, der Firma LJM, Dänemark, mit einer Hublänge von 150 mm verwendet, der von einem Servoventil der Firma Moog, Typ G761-3017, angesteuert wird. Die Längenmessung erfolgt mit einem induktiven Wegaufnehmer, Typ WA/200 mm, von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), mit einer

Messlänge von 200 mm. Die Kraftmessung wird auf der Seite des festen Presskolbens mit einer Kraftmessdose von Hottinger Baldwin (HBM), Typ U3, mit einem Nennlastbereich von 20 kN durchgeführt. Das Anforderungsprofil an die Hydraulik sah eine maximale Kraft von 10 kN (siehe Kap. 3.2.2) und eine maximale Kolbengeschwindigkeit von 50 mm s^{-1} vor. Ein kleines Hydraulikaggregat liefert einen ausreichenden Volumenstrom von 8 l min^{-1} bei max. 120 bar. Ein minimaler Druck von 70 bar ist erforderlich, damit das Servoventil störungsfrei arbeitet. Die Anforderungen an den Heißpressvorgang, die Verdichtung mit industrienahen Verdichtungsgeschwindigkeiten durchzuführen, ist damit gewährleistet. Die tatsächliche Presskraft des Hydraulikzylinders beträgt ca. 15 kN. Als integriertes Hydraulikregelungs- und Messdatenerfassungssystem wird eine Prüfmaschinensteuerung vom Typ FlexTest SE der Firma MTS, Eden Prairie, verwendet.

Die Presskolben werden mit Thermoöl beheizt. Eine Thermoölheizung bietet den Vorteil, dass eine sehr große Wärmemenge in Form des Wärmeträgeröls in Relation zu dem sehr kleinen Prüfkörper vorhanden ist. Große Temperaturschwankungen können damit während des Pressvorgangs vermieden werden. Beim Pressvorgang befindet sich der bewegliche Presskolben zu großen Teilen in der relativ kalten Presshülse, die dadurch erwärmt wird. Es kann dadurch zu einer Temperaturabsenkung an beiden Pressplatten kommen. Die Presstemperatur während des Pressvorgangs könnte dadurch nicht ausreichend konstant gehalten werden, was nicht erwünscht ist. Die Erfahrungen mit der Verdichtungseinheit haben ergeben, dass die Temperaturdifferenz zwischen 10 und 15 °C am Ende des Pressvorgangs liegt. Diese Tatsache hatte jedoch nur untergeordneten Einfluss auf die Messergebnisse und ist als systematische Einflussgröße auf die Messergebnisse einzustufen. Als Thermoölversorgung wird ein Thermoölbad der Firma Lauda Dr. Wobser, Lauda-Königshofen, Typ NBSHT, 3,07 kW, mit 25 l Fassungsvermögen verwendet. Die Erwärmung des Thermoölbades erfolgt über zwei Heizstäbe mit insgesamt drei unabhängigen Heizkreisen. Einer der beiden Heizstäbe enthält einen doppelten Heizkreis. Die Regelung des Thermoölbades erfolgt über einen Digitalregler der Firma Jumo (Fulda), Typ Dicon 501. Die Istwertmessung der Temperatur geschieht aus Sicherheitsgründen zum einem im Thermoölbad und zum anderen in beiden Presskolben. In diese ist jeweils direkt in dem Thermoölstrom vor der Pressfläche ein Pt100-Widerstand eingebaut. Als Wärmeträgeröl wird ein Silikonöl, Typ Molyduval D50, verwendet, das einen Flammpunkt von 285 °C besitzt. Die äußeren 5 mm der Presskolbenfläche könnten durch die Presskolbenwandung, die eine Stärke von 5 mm hat, eine andere Temperatur aufweisen als die Mittel der Presskolbenfläche mit einem Durchmesser von 40 mm. Dieser Effekt wurde

nicht weiter untersucht, muss aber bei der Diskussion der Ergebnisse als möglicher Einflussparameter berücksichtigt werden.

3.2.2.2 Statische Auslegung

Für reproduzierbare Messergebnisse musste eine hinreichend steife Kraftübertragung zwischen dem Widerlager für den beweglichen Presskolben und dem Widerlager mit dem festen Presskolben und der Kraftmessdose geschaffen werden. Die Längenänderung der Kraft aufnehmenden Edelstahlstangen muss in Relation zur Länge und Steifigkeit des Prüfkörpers, der verdichteten Fasermatte, sehr gering und damit vernachlässigbar sein.
Die maximale Kraft der Presse errechnet sich nach:

$$F = p \cdot A \qquad \text{Gleichung (11)}$$

mit

$$A = \frac{D^2}{4} \cdot \pi \qquad \text{Gleichung (12)}$$

Für einen Pressendurchmesser von D = 50 mm und einen minimalen Pressdruck von $p = 5\ N\ mm^{-2}$ ergibt sich damit eine minimale Kraft von 9818 N ≈ 10 kN.
Bei einer angenommen Kraft von 10 kN ergab sich nach

$$\frac{F}{A \cdot E} = \varepsilon \qquad \text{Gleichung (13)}$$

und

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \qquad \text{Gleichung (14)}$$

für die vier als kraftübertragende Elemente angenommen Edelstahlstangen mit einem Durchmesser von 20 mm ein Dehnung von $\varepsilon = 3{,}98 \cdot 10^{-5}$ [ ]. Als Gesamtfläche für die Kraftübertragung wurden 1256 mm^2 (= $4 \cdot \pi \quad r^2 = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^2$) angesetzt. Für das Material wurde Edelstahl mit einem E-Modul von $200 \cdot 10^3\ N\ mm^{-2}$ angenommen (Dubbel und Beitz 1990). Die der Kraft ausgesetzte Länge der Edelstahlstangen ist mit 578 mm anzusetzen (siehe Abb. 3.8).

Die Dehnung der Edelstahlstangen beträgt bei den angenommenen Beanspruchungen 0,023 mm. Dieser Dehnungswert ist bei der Genauigkeit des Röntgenscanners von 25 µm noch zu akzeptieren. Kraft aufnehmende Elemente mit einem noch größeren Querschnitt sind aufgrund der beengten Einbauverhältnisse im Röntgenscanner nicht möglich (siehe Abb. 3.1).

3.2.2.3 Steuerung und Messdatenerfassung

Die Steuerung der Hydraulik und Messdatenerfassung erfolgt kombiniert in der Prüfmaschinensteuerung FlexTest SE von MTS (Berlin) über einen angeschlossenen PC. Zur Ablaufsteuerung und integrierten Messdatenerfassung der Versuchsdurchführung wird die Software MPT (Multi Purpose Testware) von MTS eingesetzt. Diese Software baut auf der Basic Testware von MTS auf, die für Einrichtungszwecke notwendig ist und verwendet wird. Die Prüfmaschinensteuerung verfügt über vier modular belegbare Steckplätze für die Ein- und Ausgabebaugruppen für notwendige Sensoren und Aktoren. Die verwendete Steuerung ist wie folgt ausgerüstet:

- zwei konfigurierbare AC/DC-Messverstärker für die Kraft- und Wegmessung
- eine A/D- Karte mit 6 Eingängen
- eine Baugruppe zur Ansteuerung des Servoventils

Zusätzlich verfügt die Steuerung standardmäßig über jeweils vier digitale Ein- bzw. Ausgänge, bei denen ein Optokoppler eine galvanische Trennung der von außen in die Steuerung gelangenden Signale vornimmt. Einer der beiden AC/DC-Messverstärker ist mit 5 kHz Trägerfrequenz besonders auf den Anschluss eines induktiven Wegaufnehmers von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) abgestimmt, der einen Nennfrequenzbereich von 4,8 kHz ± 1 % aufweist. Der Nullpunkt des induktiven Wegaufnehmers, der als Vollbrücke angeschlossen ist, wurde zusätzlich durch einen entsprechend angepassten Widerstand auf ca. 75 mm Auslenkung verschoben. Von den 200 mm Messlänge des Wegaufnehmers werden nur 150 mm genutzt und als 100 % des Messbereichs in der Prüfmaschinensteuerung mithilfe von geeichten Endmaßlehren aus Keramik kalibriert. Die Kraftmessdose wird als Vollbrücke am zweiten Messverstärker im DC-Modus betrieben. Die Kalibrierung der Kraftmessdose auf Druckbeanspruchung erfolgte mithilfe von zwei geeichten Kraftmessbügeln der Firma Johann Rhein, Kraftmessgeräte, Typ Fehe, mit einem Nennlastbereich bis 10 kN und 60 kN in einer hydraulischen Prüfmaschine der Firma Losenhausen mit einem Nennlastbereich bis 60 kN. Dabei wird besonders der Messbereich bis 10 kN berücksichtigt Das Servoventil am Hydraulikkolben formt als Stellglied den Steuerstrom von max. ± 25 mA aus der Prüfmaschinensteuerung in einen Volumenstrom des Hydrauliköls um. An die A/D-Karte, die Signale von

± 10 V aufnehmen kann, werden die auf ± 10 V konditionierten Signale aus einem Messverstärker Typ MGC Plus der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) übergeben. Von diesem Messverstärker werden die Temperaturen über Thermoelemente vom Typ T erfasst. Der Anschluss eines Drucksensors ist ebenfalls möglich. Ebenso werden zwei Temperaturwerte für den festen und beweglichen Presskolben, die aus der Thermoölregelung als ± 10 V-Signale bereitgestellt werden, an die analogen Eingänge der Prüfmaschinensteuerung angeschlossen. Der Sollwert für die Presstemperatur wird über ein ± 10 V-Spannungssignal, das an einem analogen Ausgang der Hydrauliksteuerung erzeugt wird, an die Temperaturregelung übergeben. So kann der Sollwert für Presstemperatur aus der Prüfmaschinensteuerung heraus bestimmt und die Istwerte zur Dokumentation erfasst werden. Über die digitalen Ausgänge werden der Röntgenscanner sowie das Ventil für den Pneumatikschlitten, auf dem sich die Probenhalterung befindet, angesteuert. Für das Magnetventil ist eine zusätzliche Spannungsversorgung vorgesehen. Der Nennstrom des Magnetventils überschreitet deutlich den Strom, der an den digitalen Ein- und Ausgängen von der Prüfmaschinensteuerung zur Verfügung gestellt wird. Das Magnetventil wird über einen zwischengeschalteten Hochleistungsoptokoppler betrieben. Die Verfahrgeschwindigkeit des Pneumatikschlittens wird über regelbare Durchflussbegrenzungsventile eingestellt. Das Ziel ist ein langsames Aufschieben der Presshülse auf den festen Presskolben vor Beginn des Pressvorganges, wozu ein sehr geringer Pressluft-Volumenstrom nötig ist. Die Rückbewegung erfolgt mit maximaler Geschwindigkeit, um den Prüfkörper möglichst schnell von den beiden heißen Presskolben zu trennen.

3.2.2.4 Einbau der Verdichtungseinheit in den Röntgenscanner

Die Komponenten der Verdichtungseinheit (fester und beweglicher Presskolben, Pneumatikschlitten mit der Presshülse) wurden auf dem Aluminiumprofil so zueinander ausgerichtet, dass alle Bauteile auf der Mittellinie der Presskolben lagen und die eingeplanten Spielpassungen im Radius zwischen Presskolben und Presshülse möglichst gleich verteilt waren. Die Presshülse musste kontaktfrei auf den festen vorderen Presskolben aufgeschoben werden, der hintere Presskolben musste reibungsfrei in der Presshülse laufen. Die so fertig ausgerichtete Verdichtungseinheit wurde in einem Stück auf einen Sockel im Röntgenscanner montiert.

Nach der grundlegenden Montage im Röntgenscanner und vor der Ausrichtung der Verdichtungseinheit war das System aus Detektor und Röntgenstrahl genau auszurichten und der Röntgenstrahl präzise gemäß den Angaben des Herstellers des Röntgenscanners zu kollimieren, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

Mit vier Justierschrauben wurde die gesamte Verdichtungseinheit auf den Röntgenstrahl ausgerichtet, sodass dieser möglichst exakt auf der Mittelpunktsebene der Presskolben liegt und störungsfrei durch den Schlitz in der Presshülse läuft. Die Bezugsebene am festen Presskolben wurde zwischen dem 10. bis 20. Pixel der Zeilenkamera in y-Richtung eingestellt. Die exakte Nummer des Pixels wurde in der Steuerungssoftware „Woodscan 6.02“ hinterlegt, um die Datenmenge gleich bei der Datenaufnahme während der Versuchsdurchführung zu reduzieren. Damit ist das erste aufgenommene Pixel mit dem Index y = 1 das Pixel an der Bezugsfläche des festen Presskolbens.

Bei der Montage der Thermoölzuführungen musste auf einen kraftfreien Anschluss der flexiblen Schläuche an den festen Presskolben geachtet werden. Das wurde durch einen radialen Anschluss der Schläuche sichergestellt. Die Schlauchzuführung am beweglichen Presskolben musste so angeordnet sein, dass die flexiblen Thermoölschläuche die Bewegung des Kolbens gemäß den technischen Auslegungsrichtlinien nachvollziehen konnten. Alle Schläuche wurden thermisch isoliert, um einerseits den Wärmeverlust an den Presskolben zu verringern und andererseits den Probenraum des Scanners und Bauteile der Verdichtungseinheit und des Röntgenscanners nicht unnötig zu erwärmen. Das hätte zu einer thermischen Beeinflussung der Messwerte führen können.

3.2.3 Kalibrierung des Röntgenscanners

Für die Kalibrierung des Röntgenscanners wurden aus den erstellten Laborplatten mit homogenem Rohdichteprofil Proben mit aufsteigender Länge von 5 mm bis 70 mm geschnitten. Die Abstufung erfolgt in 5 mm-Schritten. Der Querschnitt der Proben beträgt ca. $19 \cdot 50\ mm^2$. Auf diese Weise wurden insgesamt 70 Proben (fünf Probenkörperreihen à 14 Proben) vorbereitet. Ein Rand von 70 mm der Laborplatten wurde aufgrund des Rohdichteabfalls am Rand der Versuchsplatten verworfen und nicht für die Messungen verwendet (Heinemann 2004). Abb. 3.9 zeigt den Zuschnittplan der Laborversuchsplatten.

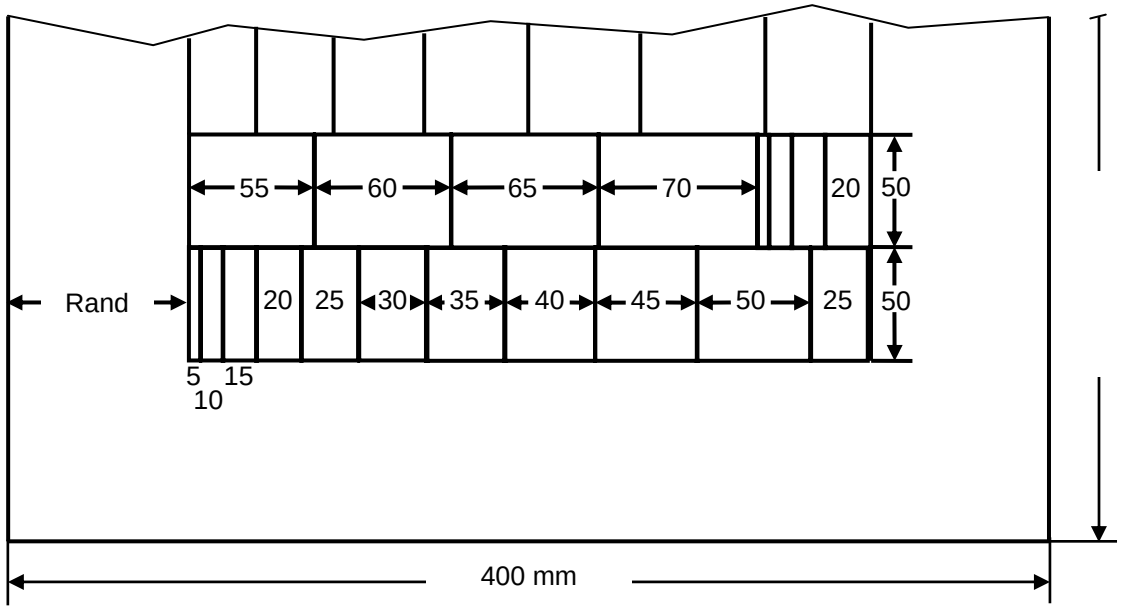


Abb. 3.9.: Prinzipieller Zuschnittplan für die Probenkörper zur Kalibrierung des Dichtescanners. Der Rand wurde mit ca. 70 mm bemessen. Die Probenbreite beträgt 50 mm, die Probenlänge ist ab einer Länge von 20 mm in Millimeter [mm] angegeben, die geringeren Probenlängen sind selbsterklärend

Mit diesen Probenkörpern, die eine unterschiedliche Flächenmasse (Fläche hier definiert als Probenbreite (50 mm) mal der Dicke der ursprünglichen Laborplatte (19 mm)) aufweisen, werden unterschiedliche Dichten simuliert (Bayer 2005; Kotwaliwale et al. 2007). Tabelle 4 zeigt die normierten Zielrohdichten der einzelnen Probenkörper. Das Produkt

$$m'' = \rho \cdot x \qquad \text{Gleichung (15)}$$

wird dabei als Flächenmasse bezeichnet in [kg m^{-2}]. Die Dichte der Probe wird mit ρ in kg m^{-3} und die Länge mit x in mm angegeben. Die rechte Seite der Gleichung (15) entspricht den beiden letzten Faktoren im Exponenten von Gleichung (7).

Tabelle 4: Normierte Rohdichte und Flächenmasse der zur Kalibrierung des Itrax Woodscanners verwendeten Proben, Ausgangsrohdichte 900 kg m^{-3} bei u = 0 %

Probenlänge in mm	Flächenmasse in kg m^{-2}	Dichte normiert auf 50 mm Probenlänge in kg m^{-3}	Proben-nummer
5	4,5	90	1, 15, 29, 43, 57
10	9	180	2, 16, 30, 44, 58
15	13,5	270	3, 17, 31, 45, 59
20	18	360	4, 18, 32, 46, 60
25	22,5	450	5, 19, 32, 47, 61
30	27	540	6, 20, 33, 48, 62
35	31,5	630	7, 21, 34, 49, 63
40	36	720	8, 22, 35, 50, 64
45	40,5	810	9, 23, 36, 51, 65
50	45	900	10, 24, 37, 52, 66
55	49,5	990	11, 25, 38, 53, 67
60	54	1080	12, 26, 39, 54, 68
65	58,5	1170	13, 27, 40, 55,69
70	63	1260	14, 28, 41, 56, 70

Steigender Wert $\ln(I_0/I)$

Die verwendeten Längen der Proben von 5 bis 70 mm decken über die auf eine Probenlänge von 50 mm normierte Rohdichte den gesamten zu erwartenden Bereich der Rohdichtewerte ab, die im Verdichtungsvorgang von≈ 100 kg m^{-3} bis ≈ 1200 kg m^{-3} auftreten können. Damit kann durch die Proportionalität von $\ln(I_0/I)$ und m'', wie aus Gleichung (7) bzw. Gleichung (16) ersichtlich wird, der Massenschwächungskoeffizient μ_m für eine Flächenmasse berechnet werden, wie weiter unten in diesem Abschnitt beschrieben wird. Die Normierung einer Probe auf 50 mm erfolgt, indem die Flächenmasse [kg m^{-2}] einer Probe durch die normierte Länge von 50 mm, die der Durchstrahlungslänge der Proben in der Verdichtungseinheit entspricht, dividiert wird. Damit können aus einer Laborplatte mit einheitlicher Dichte Proben verschiedener Länge erzeugt werden, die in der radiometrischen Messung durch die unterschiedlichen Flächengewichte verschiedene Dichten bei einer rechnerischen Normierung auf eine Normlänge, hier 50 mm, simulieren. Als Berechnungsbeispiel kann die Probe mit 30 mm Länge wie folgt beschrieben werden: Die Dichte der Laborplatte und damit der daraus geschnittenen Probe beträgt 900 kg m^{-3} (siehe Abschnitt 3.1.3.1): Daraus resultiert die Flächenmasse 900 kg m^{-3} · 0,03 m mit 27 kg m^{-2}, die bei einer Normierung auf 50 mm (27 kg m^{-2}/0,05 m) =

540 kg m^{-3} darstellt. Als Fläche der Probe wird in diesem Zusammenhang der Querschnitt der ursprünglichen Laborplatte verstanden. Die rohen und unbesäumten Laborplatten für die Kalibrierung wurden vor dem Zuschnitt bis zum Erreichen des Ausgleichszustandes im Normklima gelagert, die zugeschnittenen Proben wurden anschließend wiederum zwei Tage im Normklima gelagert, bevor diese gemessen wurden. Nach Abschluss einer Messreihe der 70 Proben für ein eingestelltes Klima wurden die Proben auf eine neue Ausgleichsfeuchte konditioniert. Die nacheinander verwendeten Klimata sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Klimabedingungen für die Konditionierung der Proben zur Kalibrierung des Itrax Woodscanners

Klima	Klimabedingungen
1 Normklima	$\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 65$ % (20/65)
2 Feuchtklima I	$\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 85$ % (20/85)
3 Feuchtklima II	$\vartheta = 20$ °C, $\varphi \approx 100$ % (20/100)
4 Darrzustand	$\vartheta = 103$ °C, $\varphi \approx 0$ % (0/103)

Das Normklima und das Feuchtklima I wurden in Klimakammern eingestellt. Dazu wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz nach etwa zwei Wochen gelagert. Für das Feuchtklima II wurden die Proben in einer Sorptionswanne direkt über der Wasseroberfläche gelagert. In diesem Klima wurden die Proben ebenfalls bis zur Gewichtskonstanz zwei Wochen lang gelagert. Die Luft in der Sorptionswanne wurde mit einem Propeller kontinuierlich umgewälzt. Zur Erreichung des Darrzustandes wurden die Proben nach ISO 16 979:2003 bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 103 °C gelagert.

Für die Messung im Labordichtescanner wurden jeweils sieben aufeinanderfolgende Proben aus dem entsprechenden Klima entnommen. Vor dem Einbau in den Probenhalter im Labordichtescanner wurden die Abmessungen der Proben auf 0,01 mm genau bestimmt und die Proben auf 0,01 g genau gewogen. Die Anordnung der Proben im Probenhalter zeigt Abb. 3.10. Ebenso wurden die Proben nach der Messung gewogen. Die gedarrten Proben wurden bis zum Einbau in den Probenhalter mindestens 30 min in einem Exsikkator aufbewahrt und dort abgekühlt. Für die Messungen wurden die in Tabelle 5 angegebenen Energieniveaus der Röntgenröhre ausgewählt.

Tabelle 6: Verwendete Energieniveaus der Röntgenröhre für die Kalibriermessungen

	Röntgenröhren-spannung	Anodenstrom
Einstellung 1	50 kV	40 mA
Einstellung 2	55 kV	40 mA

Abb. 3.10: Kalibrierproben für eine Messung im Probenhalter des Itrax Woodscanner eingebaut. Die Proben sind nach Tabelle 4 unterschiedlich lang in x-Richtung, wie in der Abbildung deutlich ersichtlich ist, da die Kalibrierproben an der der Zeilenkamera zugewandten Seite des Probenhalters ausgerichtet wurden

Die Röntgenröhre des Scanners wurde nach dem normalen Aufwärmprogramm für die eingestellte Leistung mindestens eine Stunde mit den für das Energieniveau vorgesehenen Einstellungen betrieben, sodass sich ein stabiles Strahlungsspektrum für diese Leistung einstellen konnte. Für beide Röntgenröhreneinstellungen wurden die Grundeinstellungen für die Bildauflösung und die Expositionszeit, die in Tabelle 7 aufgeführt sind, gewählt.

Tabelle 7: Grundeinstellungen des Itrax Woodscanners für alle Kalibriermessungen

Parameter	Einstellung
Expositionszeit	50 ms
Schrittgröße	50 µm
Bildbreite	6 cm
Bildhöhe	20 cm

Die Messwertbilder wurden im tiff-Format mit 16 Bit Datentiefe abgespeichert. Anschließend wurden die Bilder zeitnah mit der Software Vision Assistant, Version 7.1, von National Instruments ausgewertet. Dazu wurde das Messbild eingelesen und mit der Funktion „Grayscale >> Quantify“ bearbeitet. Diese Funktion errechnet für eine „Region of Interest“ (ROI) die Werte:

- prozentualer Anteil der ROI an der Gesamtfläche des Bildes
- Mittelwert aller eingeschlossenen Pixelwerte
- Standardabweichung aller eingeschlossenen Pixelwerte
- Minimalwert
- Maximalwert

Bei der manuellen Auswahl der rechteckigen ROI wurde vor allem bei dicken Proben darauf geachtet, dass die Regions of Interest nicht in den Schatten des Penumbra-Effektes gelegt wurden und dass die Spitzen der Schrauben, mit denen die Proben von der darüber liegenden Probenauflage gesichert wurden, nicht in die ROI mit einbezogen wurden. Zusätzlich haben die Proben durch Dicken- und Breitenschwankungen eine leicht unterschiedliche Größe. Es war bei der nicht absolut identischen Form der Proben besser, diese Regions of Interest mit der nötigen Sorgfalt manuell festzulegen, als ein automatisierte Anwendung zu erstellen, die diese Aufgabe durchführt. Die durchschnittliche anteilige Fläche der Regions of Interest am Gesamtbild, deren Standardabweichung und die Minimal- und Maximalwerte sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 8: Verteilung der Regions of Interest für die Proben mit 55 kV und 40 mA

Klima	Durchschnittliche Größe der ROI	Minimalwert	Maximalwert	Standard-abweichung
ϑ = 20 °C, φ = 65 %	7,06 %	6,48 %	7,33 %	0,2094
ϑ = 20 °C, φ = 85 %	6,86 %	6,44 %	7,16 %	0,1513
ϑ = 20 °C, φ ≈100 %	6,97 %	6,74 %	7,86 %	0,2603
ϑ = 103 °C, φ = 0 %	7,29 %	6,64 %	7,26 %	0,1560

Tabelle 9: Verteilung der Regions of Interest für die Proben mit 50 kV und 40 mA

Klima	Durchschnittliche Größe der ROI	Minimalwert	Maximalwert	Standard-abweichung
ϑ = 20 °C, φ = 65 %	6,51 %	5,10 %	6,96 %	0,2094
ϑ = 20 °C, φ = 85 %	6,80 %	6,45 %	7,23 %	0,1513
ϑ = 20 °C, φ ≈100 %	7,22 %	6,65 %	7,88 %	0,2603
ϑ = 103 °C, φ = 0 %	6,90 %	6,18 %	7,24 %	0,1560

Eine typische Anordnung der Proben und der dazugehörigen ROI auf einem Messdatenbild zeigt Abb. 3.11.

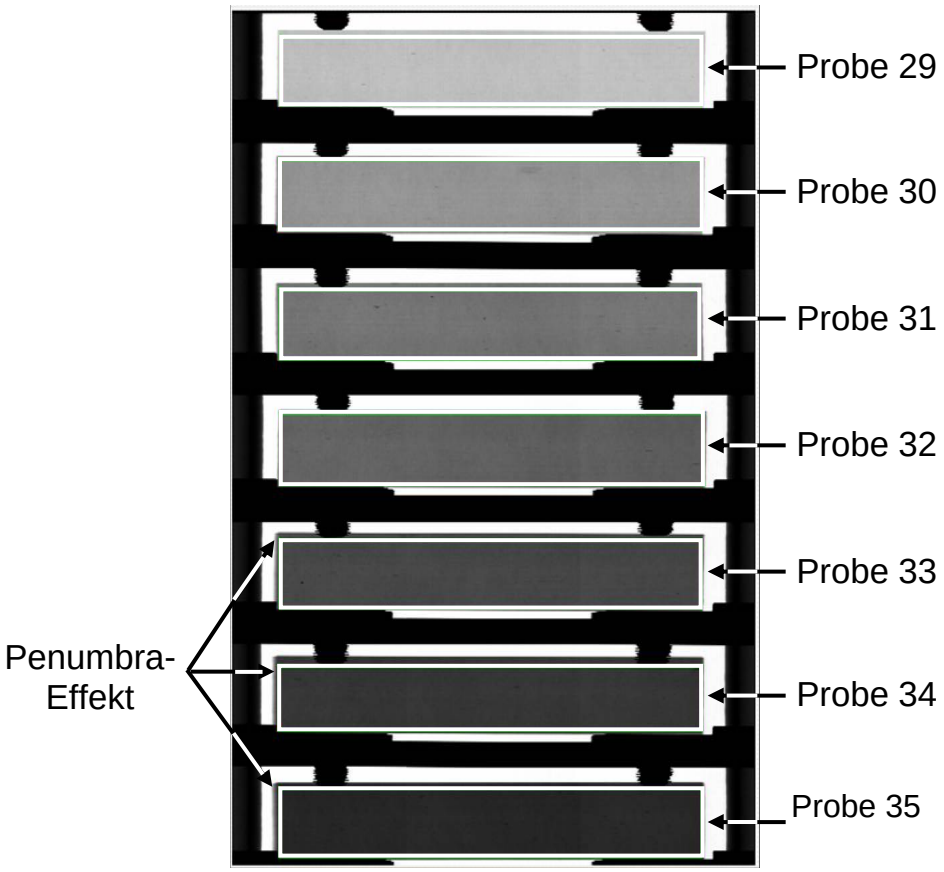


Abb. 3.11: Messdatenbild der Proben 29 bis 35 bei einer Feuchte, die dem Klima von $\vartheta = 20$ °C und $\varphi = 65$ % entspricht: weiß markiert sind die „Regions of Interest“ (ROI). Links und rechts neben den Proben 33 bis 35 ist der Penumbra-Effekt zu erkennen

Die aus den Regions of Interest gewonnen Daten wurden aus dem Vision Assistant in MS Excel® übertragen. In MS Excel® wurden die vor der radiographischen Messung bestimmten Abmessungen und Massen zu den Daten hinzugefügt.

Die Daten wurden soweit aufbereitet, dass Graphen erstellt werden konnten, die den errechneten Massenschwächungskoeffizienten μ_m über dem natürlichen Logarithmus der Ausgangsintensität zur Durchgangsintensität ($\ln(I_0/I)$) darstellen. Aus dem in Gleichung (7) angegebenen Beer’schen Gesetz und Gleichung (15) lässt sich der Zusammenhang zwischen $\ln(I_0/I)$ und der Flächenmasse m’’ für den Massenschwächungskoeffizienten μ_m in [m^2 kg^{-1}] ermitteln:

$$\mu_m = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{\rho \cdot x} \qquad \text{Gleichung (16)}$$

mit I_0 als Ausgangsintensität [ ], I als Durchgangsintensität [ ], ρ in [kg m^{-3}] als gravimetrisch ermittelte Dichte der Probe und x in [m] als gemessene durchstrahlte Länge der Probe. Gleichung (15) wurde in Gleichung (16) für die Flächenmasse m'' eingesetzt. Der Wert (I/I_0) wird bei der Rohdatenaufnahme in der Software des Itrax Woodscanners für jedes Pixel erzeugt und hat innerhalb der Software einen Wertebereich von 0 bis 1. Anschließend wird dieser Wert mit 32 000 multipliziert, damit dieser Verhältniswert im verwendeten 16-Bit-tiff-Format gespeichert werden kann. Die wieder eingelesenen 16-Bit-tiff-Messwertbilder haben nun einen verwendeten Wertebereich von 0 bis 2^{15}. Die einzelnen Pixelwerte müssen durch 32 000 dividiert werden, um diese auf einen Verhältniswert im Bereich $0 \leq (I/I_0) \leq 1$ zurückzuführen.

Für jede homogene Probe wurde ein mittlerer Massenschwächungskoeffizient errechnet, indem der Mittelwert aller Pixelwerte ($\ln(I_0/I)$), die in der ROI erfasst worden sind, zur Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten verwendet wurde. Dieser mittlere Massenschwächungskoeffizient für die Probe ist proportional zur mittleren Dichte der Probe. Daher wurden die Proben für die Kalibriermessungen mit möglichst homogenem Rohdichteprofil erzeugt. Es kann daher bei der Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten für jede Probe von einem „mittleren Massenschwächungskoeffizienten" für einen sehr kleinen Rohdichtebereich ausgegangen werden. Nach Herstellerangaben des Itrax Woodscanners folgt der durch die polychromatische Strahlung nicht konstante Massenschwächungskoeffizient für verschiedene Flächengewichte einer quadratischen Funktion:

$$\mu_m(\ln\frac{I_0}{I}) = a^2 \cdot (\ln\frac{I_0}{I})^2 + b \cdot (\ln\frac{I_0}{I}) + c \qquad \text{Gleichung (17)}$$

Diese Funktion wurde für jede eingestellte Feuchte der Proben und für beide Energieniveaus der Röntgenröhre berechnet. Eine zeitnahe Auswertung war notwendig, um eventuelle Messserien, die sich als Ausreißer aus der Grundgesamtheit der Messwerte darstellen, zu identifizieren. Diese Messungen wurden dann wiederholt, um die Ergebnisse der ersten Messung zu überprüfen und gegebenenfalls zu revidieren. Als mögliche Fehlerquellen wurden dabei eine zu kurze Betriebszeit der Röntgenröhre auf dem für die Messung gewählten Energieniveau und ein fehlerhaftes Referenzsignal mit der Ausgangsintensität I_0 identifiziert. Wenn die Daten auch nach einer Wiederholung der Messung nicht der Grundgesamtheit Messwerte aus den weiteren Messreihen entsprachen, wurden diese Daten verworfen.

Die in MS Excel® zusammengetragenen und vorausgewerteten Daten wurden nach Matlab® übertragen und dort zu einem Datensatz für ein Energieniveau zusammengefasst, in dem

sowohl die Daten für die verschiedenen Flächengewichte wie auch für die vier Feuchtestufen zusammengefasst wurden. Aus den in Abschnitt 2.4.4 dargestellten Überlegungen von Tiitta (1993) und Hubbell und Seltzer (1996) wird eine Näherungsfunktion für den Massenschwächungskoeffizienten entwickelt, die sowohl von der Rohdichte als von der Feuchte abhängig ist.

Werden die an sich sehr ähnlichen Massenschwächungskoeffizienten für die reine Holzsubstanz und Wasser zugrunde gelegt und der Wassergehalt x, der hier auf die Gesamtmasse des feuchten Holzes bezogen ist, als Gewichtsfraktionierung zwischen Holzmasse und Wassermasse angesetzt, so lässt sich für jeden Wassergehalt x des Holzes, der sich zur Holzfeuchte entsprechend Gleichung (18) verhält, nach Gleichung (19) ein Näherungswert für den Massenschwächungskoeffizienten berechnen.

$$x = \frac{u}{1+u} \qquad \text{Gleichung (18)}$$

$$\mu_m \approx \mu_{Holz} \cdot \left(1 - \frac{u}{1+u}\right) + \mu_{H_2O} \cdot \left(\frac{u}{1+u}\right) \qquad \text{Gleichung (19)}$$

Dabei ist die Holzfeuchte als Dezimalbruch dimensionslos anzugeben. Entsprechend den Angaben aus Abschnitt 2.4.3 ist der Massenschwächungskoeffizient für Wasser bei den beiden Energieniveaus von 50 bzw. 55 kV ca. 10 % größer als der der reinen Holzsubstanz. Daraus resultiert, dass Wasser nach Gleichung (7) die verwendete Röntgenstrahlung etwas stärker absorbiert als reine Holzsubstanz.

Gleichung (17) und Gleichung (19) werden durch das Superpositionsprinzip in einer Gleichung zusammengeführt, die sowohl die Rohdichteabhängigkeit als auch die Holzfeuchteabhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten berücksichtigt.

$$\mu_m(\rho,u) \approx p_0 \cdot \left(1 - \frac{u}{1+u}\right)^2 \cdot (\ln\frac{I_0}{I})^2 + p_1 \cdot \left(\frac{u}{1+u}\right)^2 \cdot (\ln\frac{I_0}{I})^2 + \ldots \qquad \text{Gleichung (20)}$$
$$\ldots + p_2 \cdot \left(1 - \frac{u}{1+u}\right) \cdot \ln(\frac{I_0}{I}) + p_3 \cdot \left(\frac{u}{1+u}\right) \cdot \ln\frac{I_0}{I} + p_4$$

Die Koeffizienten p_0 bis p_4 dieser Funktion werden nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate in Matlab® an die Daten aus den Versuchen für die Massenschwächungskoeffizienten angenähert.

3.2.4 Verfolgung der Rohdichteentwicklung während des Heißpressvorgangs

Die folgenden Abschnitte stellen das methodische Vorgehen bei Verdichtungsversuchen dar, die mit der Verdichtungseinheit, die im Röntgenscanner eingebaut und einjustiert war, durchgeführt worden sind. Es wird dabei auf die getrennte Datenaufnahme in den zwei Steuerungs- und Messdatenerfassungssystemen, dem Itrax Woodscanner und der MTS-Hydrauliksteuerung, eingegangen, ebenso wie auf die anschließende Datenaufbereitung. Die leichten Abweichungen von der in Kap. 3.1 beschriebenen Herstellungsmethode für die Laborplatten zur Kalibrierung des Dichtescanners bei der Herstellung der Verdichtungsproben werden ebenfalls erläutert.

3.2.4.1 Versuchsablauf und Datenaufnahme

Vor einer Versuchsreihe benötigt die Verdichtungseinheit ungefähr eine Stunde zum Aufheizen. Der Röntgenscanner wurde auf dem Energieniveau, das in Tabelle 10 angegeben ist, mindestens eine Stunde vor einem Versuch betrieben, um ein stabiles Röntgenspektrum zu erhalten. Am Röntgenscanner wurden vor der Versuchsdurchführung die Einstellungen für die Messung vorgenommen, die in Tabelle 10 aufgeführt sind.

Tabelle 10: Grundeinstellungen des Röntgenscanners für alle in-situ-Röntgenscans während des Verdichtungsvorgangs

Scannereinstellungen	Einstellungen
Beschleunigungsspannung	55 kV
Anodenstrom	40 mA
Belichtungszeit (exposure time)	50 ms
Scanzyklus (cycle time)	200 ms

Vor jedem Versuch (Scan) wurde ein Nullsignal bzw. Abgleichsignal des Röntgenstrahls genommen. Die Messdaten im Röntgenscanner wurden, wie schon die Daten für die Kalibrierung, im16-Bit-tiff-Format abgelegt.

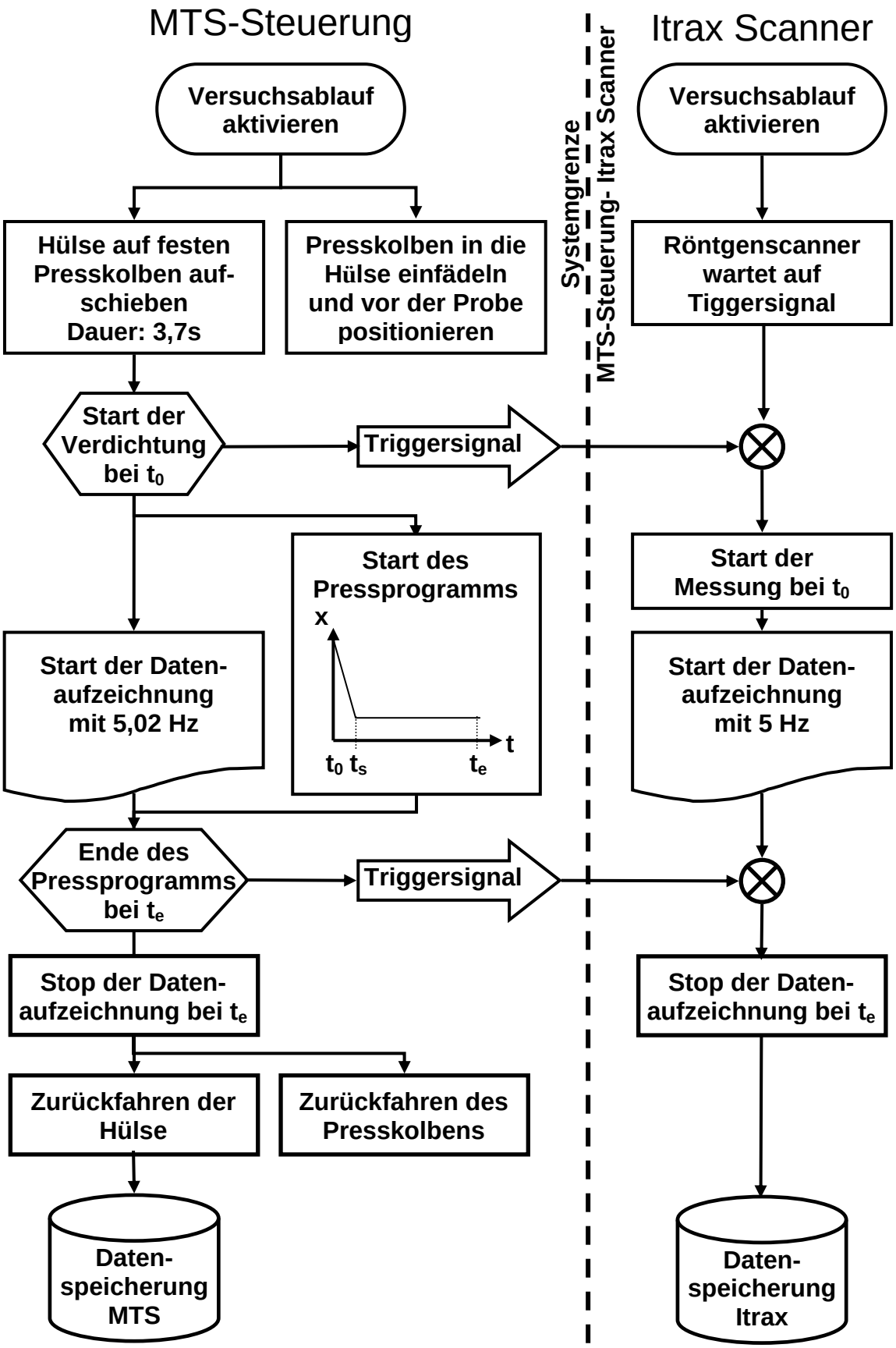


Abb. 3.12: Grundprogramm für einen Versuchsablauf mit parallelen Strukturen und getrennter Datenerfassung zwischen Itrax und MTS-Steuerung. Die Zeitpunkte, an denen der Röntgenscanner durch die MTS-Steuerung gestartet bzw. gestoppt wird, sind t_0 bzw. t_e, t_s ist die Schließzeit

Für alle Versuche wurde ein grundlegendes Ablaufprogramm entwickelt, in dem das Pressdiagramm der jeweiligen MDF-Platte angepasst werden kann (siehe Abb. 3.12). Die zwei Steuerungs- und Messdatenerfassungssysteme, die MTS-Steuerung für die Verdichtungseinheit und die Steuerung des Itrax-Röntgenscanners, müssen dabei während der Zeit der Messdatenerfassung absolut zeitgleich laufen, sodass die aufgezeichneten Datenpunkte aus beiden Systemen in einem synchronen Zeitsystem ermittelt werden. Zum synchronen Start der Messdatenerfassung dient der Triggerkontakt am Röntgenscanner, mit dem dieser aus der MTS-Steuerung extern zum Zeitpunkt t_0 des Pressprogramms gestartet wird. Vor dem Start des eigentlichen Pressprogramms wird die Presshülse, die auf dem Pneumatikschlitten manuell aufgesteckt ist, in einem Schritt des Ablaufprogramms auf den festen Presskolben aufgeschoben: Die Geschwindigkeit ist über ein pneumatisches Drosselventil am Pneumatikschlitten fest auf 3,7 s bis zum Erreichen des Endpunkts, an dem der Triggerkontakt auslöst wird, eingestellt. Ist der Triggerkontakt ausgelöst, beginnen der Messvorgang im Itrax Röntgenscanner sowie das Pressprogramm und die Datenaufzeichnung in der MTS-Steuerung.

Es werden, wie in Abb. 3.12 ersichtlich, zwei Dateien mit den Versuchsdaten angelegt: Zum einen ein Grauwertebild wie in Abb. 3.13 und zum anderen die in der MTS-Steuerung aufgezeichneten Daten. Dabei ist die leicht unterschiedliche Datenaufzeichnungsrate zwischen Röntgenscanner, der mit exakt 200 ms Zykluszeit arbeitet, und der MTS-Steuerung zu beachten. Die MTS-Steuerung kann aufgrund der Taktfrequenz des in der Steuerung verwendeten Prozessors nicht exakt 200 ms Datenaufzeichnungsrate realisieren. Daher wurden die Daten mit der nächsthöheren Datenaufzeichnungsrate als 5 Hz, das sind 5,02 Hz, erfasst. Damit liegen zur Auswertung zwei Dateien vor, die einen synchronen Startpunkt, jedoch bei gleicher Pressprogrammdauer von t_0 bis t_e eine leicht unterschiedliche Anzahl an Datenpunkten im zeitlichen Verlauf haben.

Ein typisches Messdatenbild aus dem Dichtescanner gibt Abb. 3.13 wieder. Ein Pixel $P_{t,y}$ gibt den Grauwert an der Stelle y der Zeilenkamera zum Zeitpunkt t an. Das Pixel mit dem y-Index 1 ist dabei das erste Pixel vor dem festen Presskolben. Bei der Datenaufzeichnung im Röntgenscanner wurden 931 Pixel für die orientierenden Versuche und 1001 Pixel für die systematischen Versuche mit Nachverdichtungsschritt in der Zeilenkamera (y-Achse in Abb. 3.13) berücksichtigt. Über die effektive Pixelgröße, die in Abb. 3.4 beschrieben ist, kann das Messdatenbild in der y-Achse kalibriert werden. Die Größe eines Messdatenbildes auf der t-Achse ergibt sich aus der Datenaufzeichnungsrate des Röntgenscanners, hier 5 Hz (200 ms). Kurz vor dem Zeitpunkt t_s ist links am oberen Bildrand zu erkennen, wie der bewegliche Presskolben in das Bild kommt. Da der bewegliche Presskolben aus Edelstahl für die

verwendete Röntgenstrahlung nicht zu durchdringen ist, erscheint diese Fläche sehr dunkel, weil nur das Hintergrundrauschen in den entsprechenden Pixeln der Zeilenkamera detektiert wird. Ab dem Zeitpunkt t_s verharrt der bewegliche Presskolben exakt an der Solldistanz der Matte bis zum Ende des Pressvorgangs. Deutlich zu erkennen sind die Grauwerteunterschiede während der Verdichtungs- und der Haltephase: Während der Haltephase sieht man auch die leichten Unterschiede in den Grauwerten zwischen der Mittelschicht und den Deckschichten. Ebenso fällt der Randabfall vor dem beweglichen Presskolben auf. Der Grauwert jedes einzelnen im 16-Bit-tiff-Format abgelegten Pixels (siehe Abschnitt 3.2.1) wird anhand von Gleichung (7) und Gleichung (20) in einen Dichtwert umgerechnet. Die Datenaufbereitung und Umrechnung wird in Abschnitt 3.2.4.3 näher dargestellt.

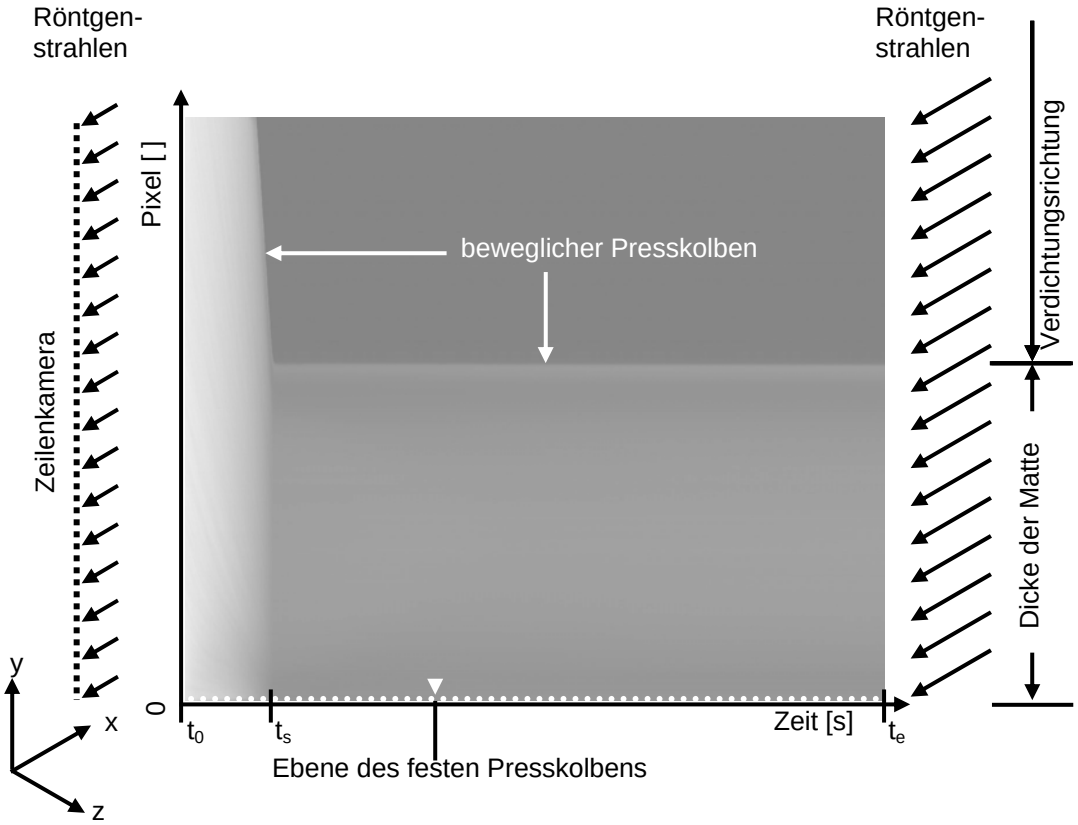


Abb. 3.13: Übersicht zur örtlichen und zeitlichen Anordnung der Pixel in einem Messdatenbild eines Verdichtungsvorgangs. Die linke unter Ecke ist der Bezugspunkt $P_{0,1}$ zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s und in der Ebene ein Pixel vor dem festen Presskolben (y = 1). Die Ortsauflösung ist auf der Ordinate (y-Achse) des Röntgenbilds aufgetragen. Zur räumlichen Einordnung der Ortsauflösung in die Verdichtungseinheit und den Röntgenscanner ist links unten ein Koordinatensystem eingezeichnet. Als vierte Dimension kommt die Zeit, die im Röntgenbild auf der Abszisse (t-Achse) aufgetragen ist, hinzu

3.2.4.2 Versuchsdurchführung

Zur Verfolgung des Verdichtungsverhaltens wurden in der Verdichtungseinheit runde MDF-Platten mit dem durch die Hülse vorgegebenen Durchmesser von 50 mm, einer Zielrohdichte von 750 kg m^{-3} und einer Stärke von 12 mm hergestellt. Die Feuchte des beleimten Fasermaterials betrug für die orientierenden Versuche 16 % und für die systematischen Versuche mit Nachverdichtungsschritt 8 %. Diese hohe Feuchte für die orientierenden Versuche wurde gewählt, um den Einfluss der Feuchtebewegung während des Pressvorgangs verifizieren zu können. Als Mattenrezeptur wurde die in Abschnitt 3.1.3.2 vorgestellte Zusammensetzung gewählt. Für die angestrebte Zielrohdichte war eine Einwaage von 20,50 g beleimter Fasern pro Platte für die orientierenden Versuche und von 19,44 g beleimter Fasern für die systematischen Versuche erforderlich. Die Matte wurde in einem speziell dazu angefertigten Rohr manuell gestreut und mit einem Stempel auf ca. 60 mm manuell vorverdichtet. Anschließend wurde die so vorbereitete Matte in die Presshülse geschoben. Dazu wurde das Rohr auf die Presshülse aufgesetzt und die Matte mit dem Stempel in die Hülse überführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Matte so genau wie möglich an der Nullposition am Schlitz in der Hülse für den Röntgenstrahl positioniert wurde. Es musste dazu die konvexe Rückfederung der Matte in der Mitte berücksichtigt werden, die durch die leichte Reibung an den Wänden der Hülse hervorgerufen wurde.

Wenn Temperaturmessungen in der Matte durchgeführt wurden, wurden durch den oberen Schlitz der Hülse, der für weitere Sensorik vorgesehen ist, Thermoelemente vom Typ T (Kupfer-Konstantan) der Firma Omega (Stanford, USA) mit einem Durchmesser von 0,08 mm für jeden der beiden Drähte in der Matte positioniert.

3.2.4.3 Datenaufbereitung

Die beiden erstellten Datendateien eines Versuchs wurden in Matlab® eingelesen. Zusätzlich wurden in dem Auswertealgorithmus die weiteren Einstellungen des Versuchsablaufes manuell eingegeben:

- Partikelfeuchte
- effektive Pixelgröße
- Datenerfassungsrate

Die Daten aus der MTS-Steuerung, die eine etwas zu geringe Zyklusgeschwindigkeit durch die geringfügig höhere Datenerfassungsrate von 0,002 Hz aufwiesen, wurden mit einem Inter-

polationsalgorithmus auf die Datenerfassungsrate des Dichtescanners linear innerhalb eines Zeitschrittes interpoliert.
Aus diesen Daten und dem systematisch verwendeten Dateinamen (siehe Abb. 4.29), in dem die wesentlichen Prozessparameter angegeben sind, wurden die Werte

- Schließzeit der Presse t_s
- gesamte Dauer des Verdichtungsvorgangs
- Dauer der erste Haltephase
- Zwischenverdichtungsschritt
- Dauer der zweiten Haltephase

ermittelt.

Das Röntgenbild wird im Auswertealgorithmus wie ein zweidimensionaler Datenarray behandelt, die Indizes y und t entsprechen dabei der örtlichen Auflösung an der Zeilenkamera und zeitlichen Auflösung während des Pressvorgangs, der Grauwert eines Pixels entspricht dem Dichtewert (siehe Abb. 3.13).
Der Datenarray des Messdatenbildes aus dem Pressvorgang wurde mit der Wiener-Filter-Funktion „wiener2“ aus der Funktionsbibliothek von Matlab® zur Reduzierung des Rauschens beruhigt. Der Wiener-Filter geht von einer stochastischen Verteilung des Rauschens über das Signal aus: das Fehlerkriterium des Filters ist die minimale quadratische Abweichung des Signalwertes von seinem Schätzwert, in diesem Fall des Pixelwertes. Die Funktion „wiener2“ von Matlab® nutzt die lokale Standardabweichung der Pixelwerte in einem definierten Bereich um das zu filternde Pixel, um den Wert dieses zu filternden Pixels zu schätzen. Der Bereich für die Ermittlung der Standardabweichung des Filters wurde auf fünf Nachbarschaftspixel in y-Richtung des zu filternden Pixels festgelegt. Das zu filternde Pixel lag dabei in der Mitte dieser fünf Pixel, sodass zu beiden Seiten jeweils zwei Pixel berücksichtigt worden sind. Fünf Pixel waren in Bezug auf die Verfälschung der Dichtewerte in Bereichen, in denen die Dichte real sehr stark veränderlich ist, wie z. B. im Bereich der Deckschichten, ein guter Kompromiss. In Richtung der Zeit t wurden die Daten während der Verdichtungsphasen nicht gefiltert, da das zu großen Verfälschungen der Werte geführt hätte. Die Filtermaske für ein Pixel $P_{y,t}$ hatte während der Verdichtungsphasen damit die Größe [5,1]. In der Haltephase wurde ein Filter von drei Pixeln in Zeitrichtung gewählt, die Filtermaske betrug damit [5,3] Pixel.
Aus den Rohdaten des Röntgenbildes wurde der Bereich des Presskolbens herausgerechnet: Dazu wurde die für jeden Zeitschritt aktuelle Distanz der Presskolben anhand des letzten Pixels in der Matte vor dem beweglichen Presskolben berechnet. Die errechnete Mattendicke

durch den y-Indexwert des letzten Pixels vor dem Presskolben und dem Distanzwert der Presskolben aus der MTS-Steuerung differierten, sodass die Distanz der Presskolben nicht direkt zur Berechnung des Grenzpixels herangezogen werden konnte. Das Grenzpixel hat die Eigenschaft eines lokalen Maximums in den Rohdaten durch den Randabfall der Rohdichte an den Pressplatten. Die Rohdaten verhalten sich in der Relation zueinander genau umgekehrt wie die schließlich errechneten Dichtedaten, wie in Abb. 3.14 und Gleichung (7) ersichtlich ist.

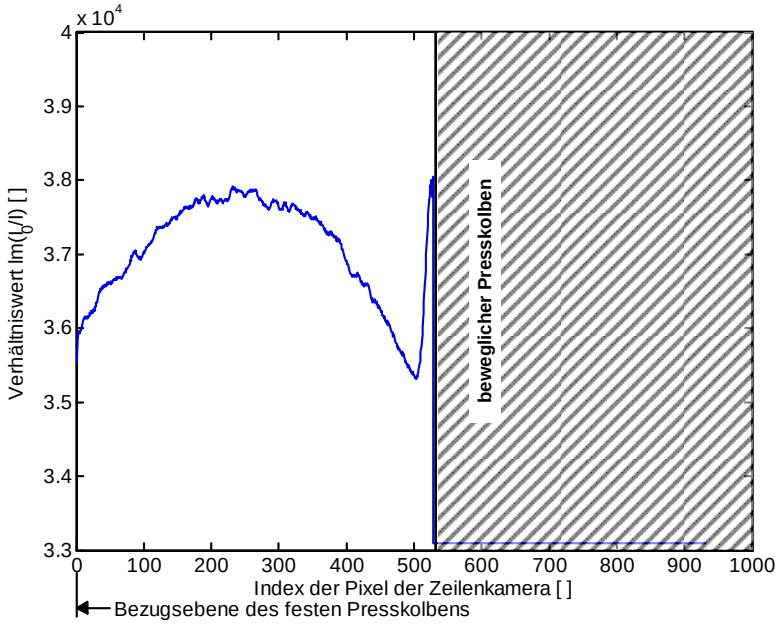


Abb. 3.14: Darstellung der Rohdaten eines Messdatenbildes zum Zeitschritt t = 500 Zeitschritte, entsprechend 100 s einer Probe mit 30 s Verdichtungszeit und 210 s Haltezeit: Deutlich ersichtlich sind das invertierte Rohdichteprofil und die Höhe des lokalen Maximums nahe des hinteren Presskolbens, das in der gleichen Größenordnung wie die Rohdatenwerte der Mittelschicht liegt. Der enge Wertebereich für die y-Achse mit $3{,}3 \cdot 10^4$ bis $4 \cdot 10^4$ ist zu beachten

Der y-Index der Pixel entspricht der Mattendicke, ausgedrückt in Pixeln. Der Umrechnungsfaktor zur Mattendicke in mm ist die effektive Pixelgröße in der bildgebenden Ebene. Für den Bereich der Haltephase wurde ein mittlerer Abstand berechnet, da der ermittelte Indexwert um zwei bis drei Pixel schwankte, was auf Streuungs- und Randeffekte der Röntgenstrahlung am Presskolben und auf die Streuung in der Datenerfassung der Zeilenkamera zurückzuführen ist. Einen Schwellenwert im Histogramm des Röntgenbildes der Rohdaten für die Dichte des Kolbens zu setzen war allerdings nicht möglich gewesen, weil die Pixelwerte in den Deckschichten eine ähnliche Größenordnung haben wie die ersten Pixelwerte, die direkt im Presskolben liegen. Das ist ebenfalls in Abb. 3.14 ersichtlich. Daher wurde aus den Ist-Distanzwerten der MTS-Steuerung eine Maske für das Messdatenbild errechnet, die die Lage des

beweglichen Presskolbens beschreibt. Diese Maske wurde mit den Grenzpixeln zeitlich verglichen. Für die so ermittelten Bereiche der Haltephasen wurde der Mittelwert der Grenzpixel berechnet und als feste Grenze für Dichtedaten aus dem beweglichen Presskolben definiert. In den Verdichtungsphasen, in denen der bewegliche Presskolben im Messdatenbild zu sehen ist, wurde, wie oben beschrieben, zeilenweise in Zeitrichtung verfahren, da sich die Distanz der Presskolben ja in jedem Zeitschritt ändert.

Die Pixelwerte werden von Matlab® abweichend vom abgelegten Format nicht als Werte -2^{15} Bit bis 2^{15} Bit eingelesen, sondern in einem Wertebereich von 0 bis 2^{16} Bit als Variable abgelegt: Das hat zur Folge, dass jeder Pixelwert in den Rohdaten um den Wert 2^{15} zu groß ist, da der negative Wertebereich beim Speichern der Daten im Scanner von diesem nicht genutzt wird. Das ist bei Berechnung der Dichte aus dem Grauwert eines Pixels zu berücksichtigen und in der Skalierung der y-Achse in Abb. 3.14 zu erkennen. Die maximalen Dichtewerte des Presskolbens beginnen bei ca. 33 000: das ist etwas über dem Wertebereich von 0 bis 2^{15} (32 768), der nicht genutzt wird. Das zeigt, dass bis auf ein minimales Hintergrundrauschen von der Zeilenkamera keine Durchgangsintensität (I) der Röntgenstrahlung im Bereich des Presskolbens erfasst wird, da der Verhältniswert (I_0/I), der auf der y-Achse dargestellt ist, nahezu null ist. Bei dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass der Wertebereich, den der Verhältniswert (I_0/I) von $0 < (I_0/I) < 1$ annehmen kann, auf 2^{15} skaliert wurde, damit entsprechen Rohdatenwerte von ca. 33 120 [ ] quasi null.

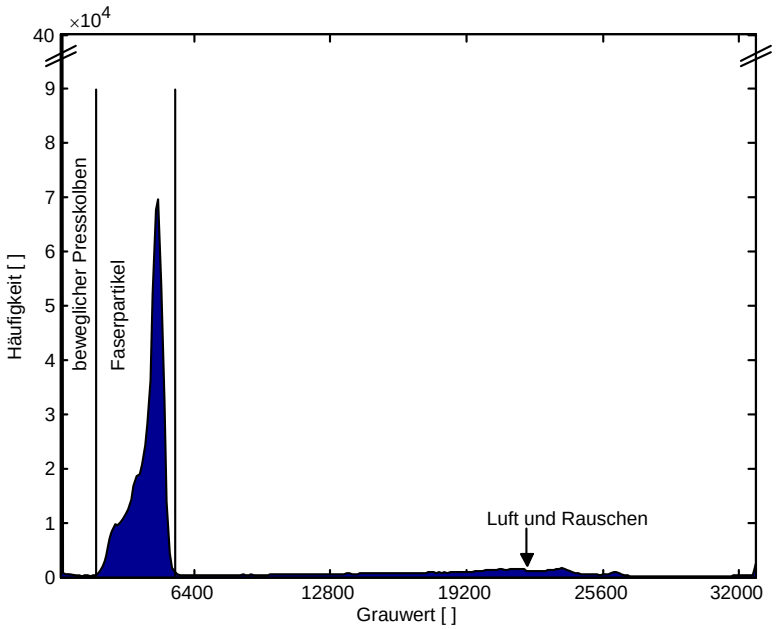


Abb. 3.15: Histogramm der Grauwertverteilung für eine Probe mit 30 s Verdichtungszeit und 210 s Haltezeit. Direkt an der y-Achse ist eine extreme Häufigkeit zu beachten: das ist der Bereich des beweglichen Presskolbens, der mit sehr geringen Häufigkeitswerten in die Verdichtungsprobe hineinragt. Der Bereich zwischen ca. 13 000 und 27 000 ist Luft und Rauschen zu Beginn des Verdichtungsvorgangs

Anhand des ermittelten Indexwertes ($P_{t,y}$) des Grenzpixels für jeden Zeitschritt während der Verdichtungs- und Haltephasen kann der Presskolben für die Darstellung der Dichtedaten herausgerechnet werden. Diese Indexwerte wirken wie eine Maske, die über das Messdatenbild gelegt wird: Pixel, die im Bereich des Presskolbens liegen, werden mit dem Wert „NaN“ (Not a Number) versehen, für die anderen Pixel wird der Dichtewert ermittelt. In diesem Berechnungsschritt wird mit der Funktion für die Kalibrierung (siehe Gleichung (20) und Gleichung (7)) vom gefilterten Rohdatenwert auf den realen Dichtewert umgerechnet, der als Gleitkommazahl in einem Datenarray dargestellt wird, der die gleiche Größe der Indizes wie der Rohdatenarray hat. Der Vorteil, die Pixelwerte, die den beweglichen Presskolben umfassen, als „NaN“-Werte abzulegen, besteht darin, dass der Wert „NaN“ bei graphischen Darstellungen nicht berücksichtigt wird und bei weiteren Auswertungen durch das Auswertungsprogramm leicht gefunden werden kann.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse und deren kritische Diskussion werden aufgrund der komplexen Zusammenhänge mit dem Ziel einer besseren Nachvollziehbarkeit bewusst zusammengefasst. Es sind die beiden Ergebnisblöcke der Kalibrierung und der Verdichtungsversuche zu unterscheiden. Die Ergebnisse – vor allem der verschiedenen Verdichtungsversuche – können so anschaulicher mit den Abhängigkeiten untereinander diskutiert werden.

4.1 Massenschwächungskoeffizienten

Die Massenschwächungskoeffizienten sind für die Bestimmung der Dichte aus der Schwächung der Röntgenstrahlen durch das durchdrungene Material notwendig. Bei Holz und Holzwerkstoffen ist die Feuchteabhängigkeit zusätzlich zu berücksichtigen. Daher wird der Massenschwächungskoeffizient sowohl als Funktion des Verhältnisses von Ausgangs- zur Durchgangsintensität als auch zur Feuchte dargestellt. Dazu wurde im Matlab® ein Algorithmus zur Auswertung erstellt. In diesem Algorithmus wurden auch grundlegende statistische Werte zur Beurteilung der gewählten Funktion bestimmt. Anhand der Diskussion der Werte und Abbildungen wird eine Entscheidung herbeigeführt, auf welchem Energieniveau (kV, mA) die weiteren Versuche in der Verdichtungseinheit durchgeführt werden. Alle 70 dazu gemessenen Proben stammen aus einer Laborplatte.

Die Feuchteverteilung der Proben bei den vier eingestellten Klimabedingungen zeigt Tabelle 11 in einer Übersicht. In Abb. 4.1 werden die Feuchtewerte der einzelnen Proben dargestellt. Diese gilt für die beiden angewendeten Energieniveaus. Die Feuchte wurde gravimetrisch direkt vor der jeweiligen Messung ermittelt. Die Darrmasse wurde nach ISO 16 979:2003 bestimmt.

Tabelle 11: Feuchteverteilung der Proben für die drei angewendeten Feuchteklimata

Klima	Durchschnittliche Feuchte	Minimale Feuchte	Maximale Feuchte	Standard-abweichung
$\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 65$ %	7,33 %	6,97 %	8,20 %	0,30 %
$\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 85$ %	9,94 %	9,22 %	11,42 %	0,48 %
$\vartheta = 20$ °C, $\varphi \approx 100$ %	18,69 %	14,94 %	27,81 %	2,54 %

Die Proben, die in den Klimata $\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 65$ % und $\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 85$ % konditioniert worden sind, zeigen eine sehr homogene Feuchteverteilung. Alle Werte liegen in einem Bereich von 1,3 % um den Mittelwert. Deutlich streuen die Werte für das Klima bei $\vartheta = 20$ °C, $\varphi \approx 100$ %. Die sehr dünnen Proben weisen eine sichtbar höhere Feuchte auf. Die Feuchte der Proben steigt kontinuierlich mit sinkender Probenlänge (also in Richtung dünnerer Proben), der Probenquerschnitt ist nahezu konstant. Bei diesen hohen Feuchten ist für Konditionierung ein sehr langer Zeitraum erforderlich, da, wie ersichtlich, die Probenlänge einen deutlichen Einfluss auf die Sorptionsgeschwindigkeit hat. Es ist daher nicht gerechtfertigt, für diese Probenserie eine Regressionsrechnung ohne Berücksichtigung der Feuchte durchzuführen.

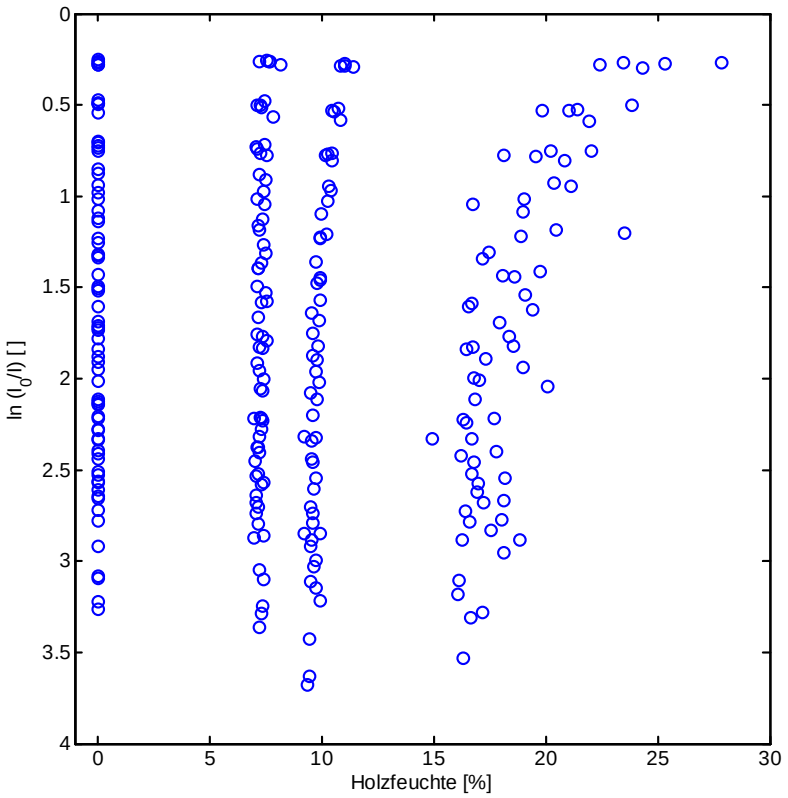


Abb. 4.1: Verteilung der Feuchtewerte der Kalibrierproben Die Feuchtewerte sind als Dezimalbruch angegeben. Die Darstellung ist eine Projektion auf die x/y-Ebene der Abb. 4.3 und Abb. 4.7. Die umgekehrte Skalierung der y-Achse resultiert aus der Darstellung der Abb. 4.3 und Abb. 4.7, damit diese mit der vorliegenden Abbildung vergleichbar sind

4.1.1 Massenschwächungskoeffizienten für das Energieniveau 55kV und 40mA

In die Berechnung der Massenschwächungskoeffizienten wurden für das Energieniveau 55 kV und 40 mA die in Tabelle 12 aufgeführten Proben nicht mit einbezogen. Die Werte dieser Proben fielen auch nach einer Wiederholungsmessung deutlich aus der Grundgesamtheit der restlichen Messwerte heraus (siehe Abb. 4.2) und wurden als Ausreißer bewertet. Zu bemerken ist, dass die Proben, die gestrichen wurden, nur für diese eine Feuchtigkeitsstufe nicht berücksichtigt worden sind.

Tabelle 12: Bei der Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten nicht berücksichtigte Werte für das Energieniveau 55 kV, 40mA

Feuchtigkeitsstufe	Gestrichene Proben
ϑ = 20 °C, φ = 85 %	Probe 1–14
ϑ = 20 °C, $\varphi \approx$ 100 %	Probe 66

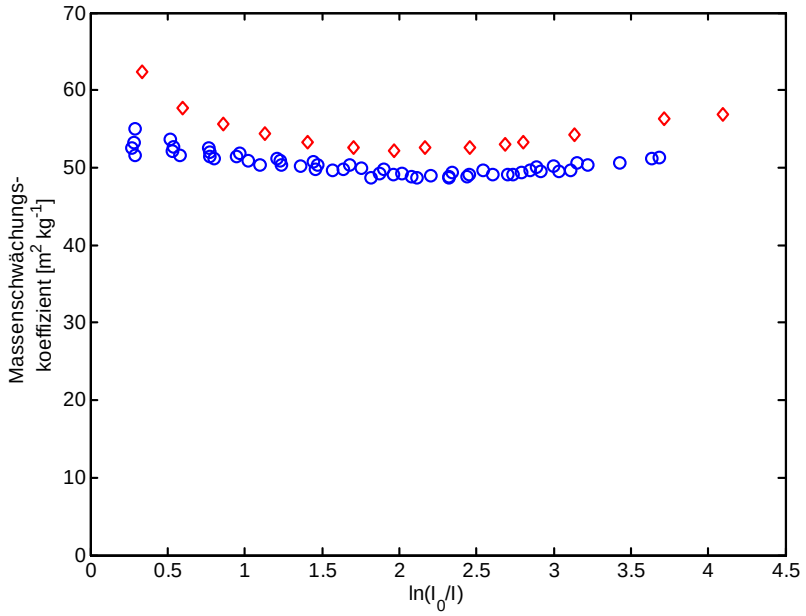


Abb. 4.2: Übersicht der für die weiteren Auswertungen berücksichtigten Werte (○) bzw. nicht berücksichtigten Ausreißerwerte (◊) für das Energieniveau 55 kV, 40 mA für die im Klima $\vartheta = 20$ °C und $\varphi = 85$ % konditionierten Proben

In Abb. 4.3 sind die aus den Messwerten berechneten Massenschwächungskoeffizienten in Abhängigkeit der Größe $\ln(I_0/I)$ sowie der Probenfeuchte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Massenschwächungskoeffizient für die vier verschiedenen Feuchten größenordnungsmäßig nicht deutlich unterscheidet. Erkennbar ist ein Anstieg des Massenschwächungskoeffizienten bei niedrigen Verhältnissen $\ln(I_0/I)$. Bayer (2005) und Kotwaliwale (2007) geben für die von ihnen verwendeten radiometrischen Messgeräte ähnliche Kurven für den Massenschwächungskoeffizienten über dem Verhältniswert (I_0/I) an, der proportional zur Probendicke ist.

Der Regressionskoeffizient für diese dreidimensionale Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten vom Verhältnis $\ln(I_0/I)$ und von der Holzfeuchte u nach Gleichung (20) beträgt $R^2 = 0{,}697$. Die Koeffizienten $p_0 \ldots p_4$ der allgemeinen Gleichung (20) wurden wie folgt ermittelt:

$p_0 = 0{,}0012$

$p_1 = -0{,}0035$

$p_2 = -0{,}0064$

$p_3 = 0{,}0046$

$p_4 = 0{,}055$

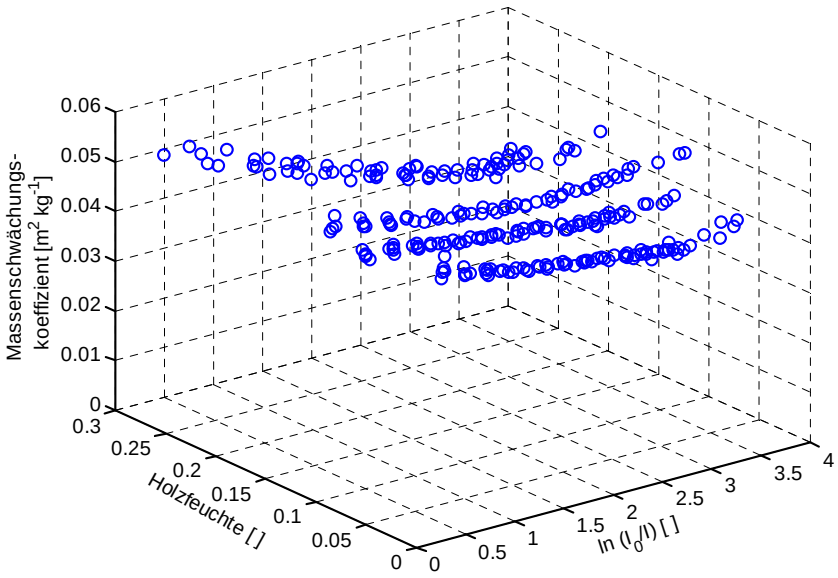


Abb. 4.3: Messwerte für den Massenschwächungskoeffizienten für ein Energieniveau von 55 kV und 40 mA in Abhängigkeit des Logarithmus des Verhältnisses von Ausgangs- zur Durchgangsintensität und der Holzfeuchte (hier als Dezimalbruch angegeben)

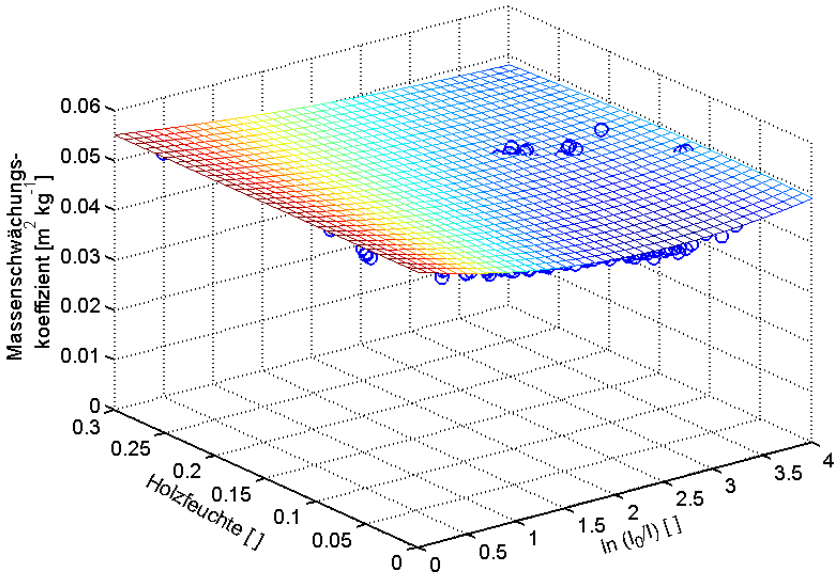


Abb. 4.4: Wie Abb. 4.3, aber mit zusätzlich eingefügter Ebene, die durch die Gleichung (20) beschrieben wird

Der Massenschwächungskoeffizient für das Energieniveau von 55 kV und 40 mA hat eine Größenordnung von $0{,}048 < \mu_m < 0{,}055$ im angegebenen Wertebereich von $0\,\% \leq u \leq 30\,\%$ Holzfeuchte und $0 \leq \ln(I_0/I) \leq 4$ als Verhältnis der Intensitäten.

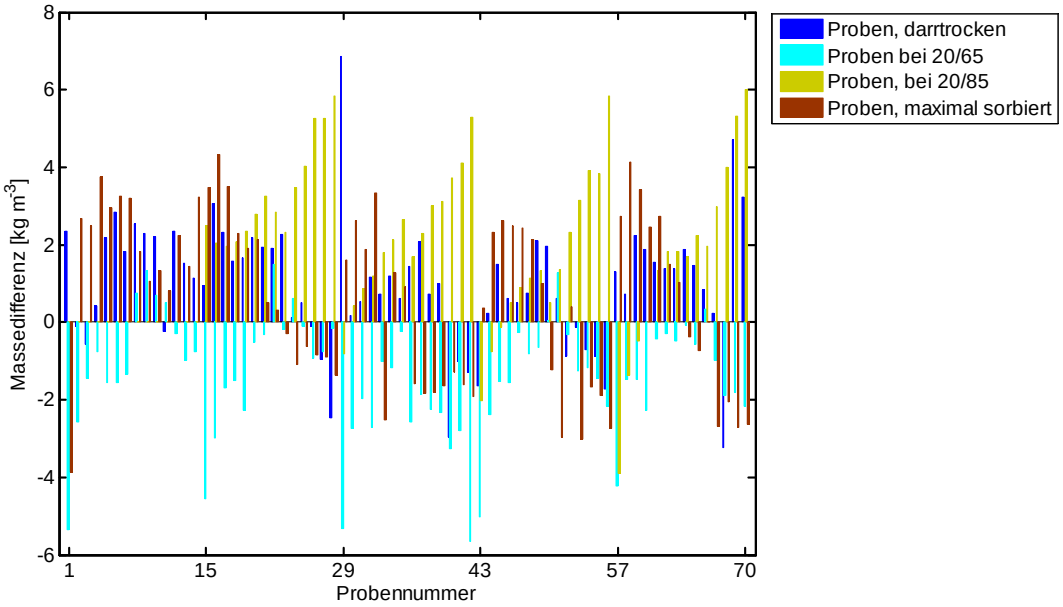


Abb. 4.5: Prozentuale Abweichungen zwischen gravimetrisch ermittelter Rohdichte und der aus der angeglichenen Funktion ermittelten Rohdichte für das Energieniveau 55kV und 40mA

Die prozentuale Abweichung der aus der angeglichenen Funktion errechneten Rohdichtewerte und den gravimetrisch bestimmten Werten zeigt Abb. 4.5. Bemerkenswert ist die maximale Abweichung von 6,8 %; der Durchschnitt der Abweichungen beträgt 0,51 % mit einer Standardabweichung von 2,24 %. Das Minimum ist mit 0,016 % zu vernachlässigen. Auffallend ist die als systematisch zu beurteilende Abweichung der Proben, die in einem Klima von $\vartheta = 20\,°C$, $\varphi = 85\,\%$ konditioniert wurden. Die Messreihe dieser Proben zeigt auch im Vergleich zu den Messreihen auf den weiteren Feuchteniveaus in Abb. 4.3 sichtlich höhere Werte für den Massenschwächungskoeffizienten. Die Proben, die mit einer Holzfeuchte bei $\vartheta = 20\,°C$, $\varphi = 65\,\%$ gemessen wurden, weisen tendenziell zu geringe Werte für die Rohdichte auf. Die genannten Abweichungen der eher zu hohen Werte für $\vartheta = 20\,°C$, $\varphi = 85\,\%$ bzw. der tendenziell niedrigeren Werte für $\vartheta = 20\,°C$, $\varphi = 65\,\%$, verbunden mit einer veränderten Krümmung der Interpolationskurve, lassen vermutlich die Abweichungen in Abb. 4.5 als systematisch erscheinen. Über eine Ursache lässt sich nur mutmaßen. Der

Einfluss des Nullsignals oder leichter Nachjustierungen in der Röntgenoptik könnte eine mögliche Ursache sein. Die Sensitivität der Messtechnik wird hier sehr deutlich.

4.1.2 Massenschwächungskoeffizienten für das Energieniveau 50kV und 40mA

Die gleichen Auswertungen wie für das Energieniveau 55 kV und 40 mA wurden auch für das Energieniveau 50 kV und 40 mA durchgeführt. In Tabelle 13 sind die für die Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten für das Energieniveau von 50 kV und 40 mA nicht berücksichtigten Werte angegeben. AusTabelle 4 ist ersichtlich, dass die Proben 15 bis 21, die nicht berücksichtigt werden, eine Probenlänge von 5 mm bis 35 mm abgestuft in 5 mm Schritten aufweisen. Es sind demnach Proben, die dünner sind als die in Normlänge von 50 mm. Die nicht berücksichtigten Werte sind in Abb. 4.6 dargestellt.

Tabelle 13: Bei der Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten nicht berücksichtigte Werte für das Energieniveau 50 kV, 40 mA

Feuchtigkeitsstufe	Gestrichene Proben
ϑ = 20 °C, φ = 65 %	Probe 15–21

Die Abweichungen der für die Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten berücksichtigten Werte sind in Abb. 4.6 ersichtlich. Es ist aus Abb. 4.7 erkennbar, dass auch für das hier

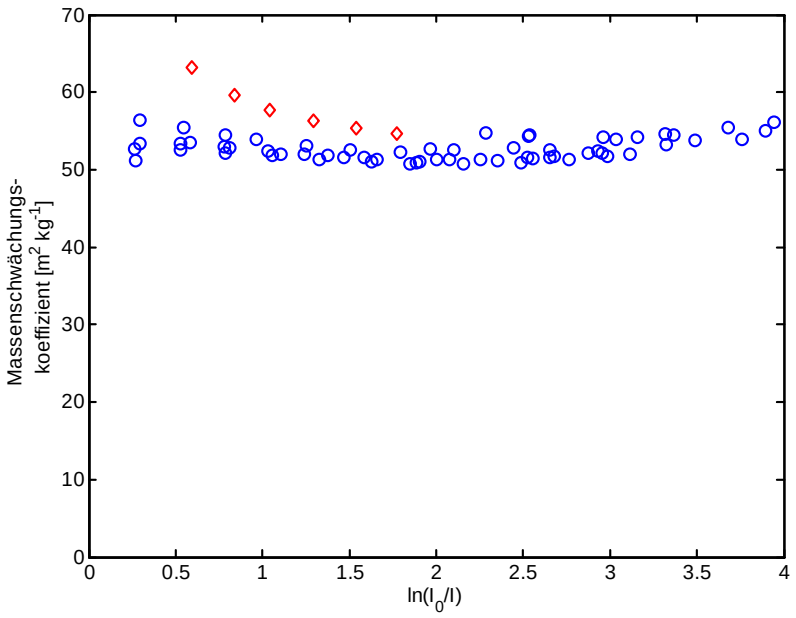


Abb. 4.6: Übersicht der für die weiteren Auswertungen berücksichtigten Werte (○) bzw. nicht berücksichtigten Ausreißerwerte (◊) für das Energieniveau 50 kV, 40 mA für die im Klima ϑ = 20 °C und φ = 65 % konditionierten Proben.

angewendete Energieniveau die Holzfeuchte einen untergeordneten Einfluss hat in Relation zu den unterschiedlichen simulierten Flächenmassen bei unterschiedlichen Probenlängen.
Der R^2-Wert für die nach Gleichung (20) an die Messwerte angeglichene Fläche beträgt R^2= 0,609. Die Koeffizienten p_0 bis p_4 für diese Gleichung wurden wie folgt bestimmt:

p_0 = 0,0013
p1 = -0,0168
p2 = -0,0062
p3 = 0,0149
p4 = 0,0570.

Die angeglichene Fläche ist in Abb. 4.8 ersichtlich.

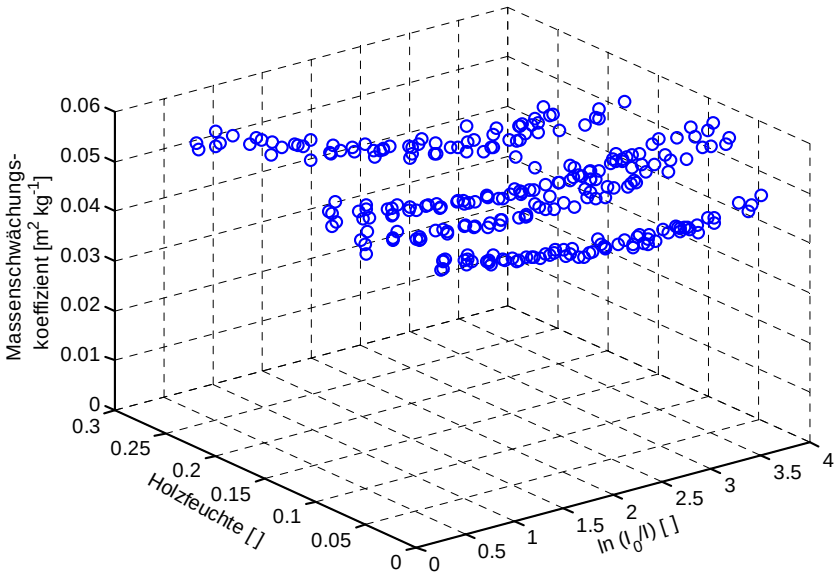


Abb. 4.7: Messwerte für den Massenschwächungskoeffizienten für ein Energieniveau von 50 kV und 40 mA in Abhängigkeit des Logarithmus des Verhältnisses von Ausgangs- zur Durchgangsintensität und der Holzfeuchte (hier als Dezimalbruch angegeben)

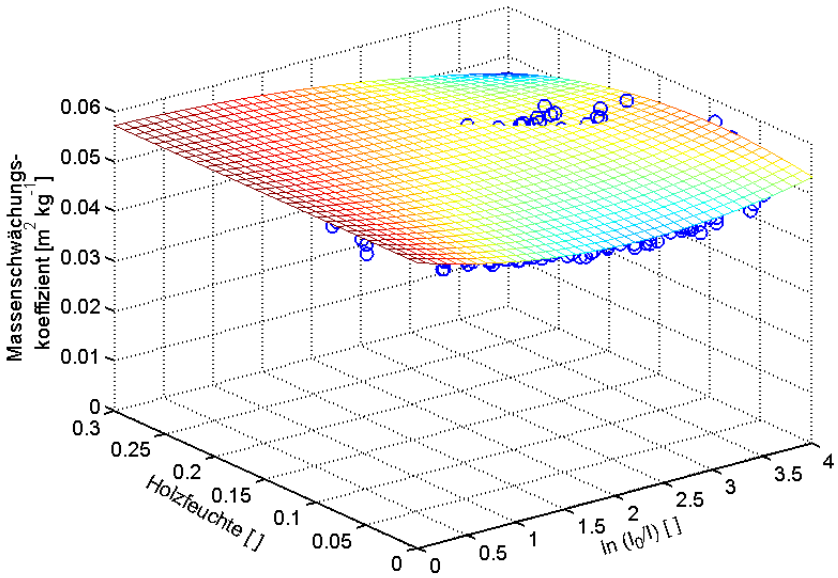


Abb. 4.8: Wie Abb. 4.7, aber mit zusätzlich eingefügter Ebene, die durch die Gleichung (20) beschrieben wird

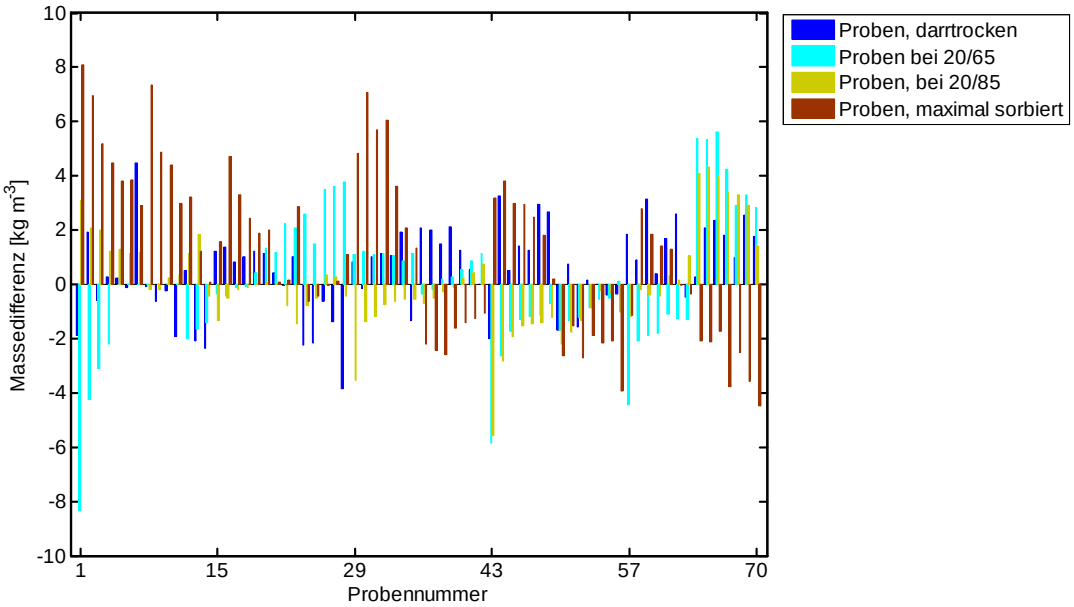


Abb. 4.9: Prozentuale Abweichungen zwischen gravimetrisch ermittelter Rohdichte und aus der angeglichenen Funktion ermittelten Rohdichte für das Energieniveau 50kV und 40mA

Der Massenschwächungskoeffizient weist einen Wertebereich von $0{,}0436 < \mu_m < 0{,}057$ in den Grenzen von $0\,\% \leq u \leq 30\,\%$ Holzfeuchte und $0 \leq \ln(I_0/I) \leq 4$ für das Verhältnis der Intensitäten auf. Die prozentualen Abweichungen aus den gravimetrisch ermittelten Rohdichtewerten und den aus der Gleichung (20) errechneten Werten zeigt Abb. 4.9. Die maximale

prozentuale Abweichung beträgt 8,2 %, die minimale prozentuale Abweichung 0,005 % mit einer Standardabweichung von 2,3 % über alle Werte. Die durchschnittliche Abweichung beträgt 0,42 %. Eine so klare systematische Abweichung der gravimetrisch ermittelten Werte von der angeglichenen Funktion wie für das Energieniveau von 55kV und 40mA zeigt sich für das Energieniveau von 50kV und 40mA nicht. Es ist jedoch zu bemerken, dass die maximalen prozentualen Abweichungen höher sind. Eine klare Tendenz für einzelne Messreihen ist nicht ersichtlich.

4.1.3 Diskussion der Massenschwächungskoeffizienten

Die für den Itrax Woodscanner für die beiden Energieniveaus ermittelten Massenschwächungskoeffizienten entsprechen in der Größenordnung den von Malan und Marais (1992) und Macedo et al. (2002) publizierten Werten für den Massenschwächungskoeffizienten von Holz. Die angegeben Literaturwerte wurden mit ^{241}Am- und ^{137}Cs- Strahlern ermittelt. Die wesentlich höherenergetische Strahlung der ^{137}Cs-Strahler ergibt dabei deutlich niedrigere Werte für den Massenschwächungskoeffizienten. Das ist auch für die in dieser Arbeit ermittelten Massenschwächungskoeffizienten der Fall. Die Abbildungen 4.2 und 4.6 stellen eine Projektion auf die y/z-Ebene der Abbildungen 4.3 und 4.7 dar und lassen so die leichte Abhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten vom $\ln(I_0/I)$, die mit Gleichung (17) berücksichtigt wird, erkennen. Proben mit einer geringen Flächenmasse (m") haben tendenziell einen höheren Massenschwächungskoeffizienten. Zudem werden in den beiden Abbildungen die Werte derjenigen Proben graphisch dargestellt, die nicht für die Berechnung des Massenschwächungskoeffizeinten herangezogen worden sind. Die in diesen Abbildungen deutlich sichtbare Abweichung der Werte dieser nicht berücksichtigten Proben rechtfertigt die Bewertung dieser Proben als Ausreißer. Ein statistisch basierter Ausreißertest wurde nicht durchgeführt. Eine Ursache für die Ausreißerwerte kann nur gemutmaßt werden. Da die Proben in anderen als den angegebenen Feuchteniveaus sich nicht aus der Grundgesamtheit aller Proben abheben, ist eine Veränderung des Nullsignals (I_0) bei der Messung in Betracht zu ziehen. Dagegen spricht jedoch das mehrmalige Abweichen der Proben trotz einer Wiederholungsmessung. Wünschenswert wäre eine Messwerteverteilung ohne Ausreißer gewesen, wie sie durch die letztendlich berücksichtigten Werte dargestellt wird.

Aus den Abbildung Abb. 4.1, Abb. 4.2 und Abb. 4.6 ist ersichtlich, dass die Feuchte nur einen sehr geringen und der Verhältniswert von Ausgangs- zu Durchgangsintensität $\ln(I_0/I)$ einen etwas größeren, aber dennoch ebenfalls geringen Einfluss auf den Massenschwächungskoeffizienten hat.

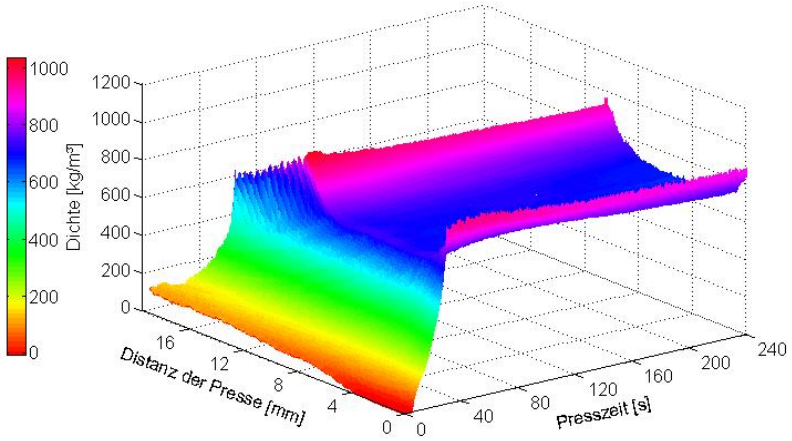
Der Wert für das Energieniveau 55 kV und 40 mA liegt geringfügig niedriger als der Wert für das Energieniveau von 50 kV und 40 mA. Es ist festzustellen, dass der Einfluss des Wassers zu vernachlässigen ist. Ein sehr deutlicher Einfluss der Holzfeuchte auf die Massenschwächungskoeffizienten war nach den vorliegenden Literaturwerten ohnedies nicht zu erwarten (Tiitta et al. 1993; Hubbell und Seltzer 1996). Daher wird bei den Berechnungen der Dichteentwicklung für die Rohdichteprofile eine konstante Feuchte angenommen (siehe Kap. 4.2.).
Anhand der Regressionskoeffizienten und der prozentualen Abweichungen sowie der Erfahrungen am Röntgenscanner wird für die weiteren Untersuchungen das Energieniveau von 55 kV und 40 mA gewählt. Es ist damit gewährleistet, dass ein ausreichend hohes Signalniveau bei den Messungen mit der Verdichtungseinheit vorliegt.

4.2 Beobachtung der Verdichtung und der Rohdichteprofilentwicklung

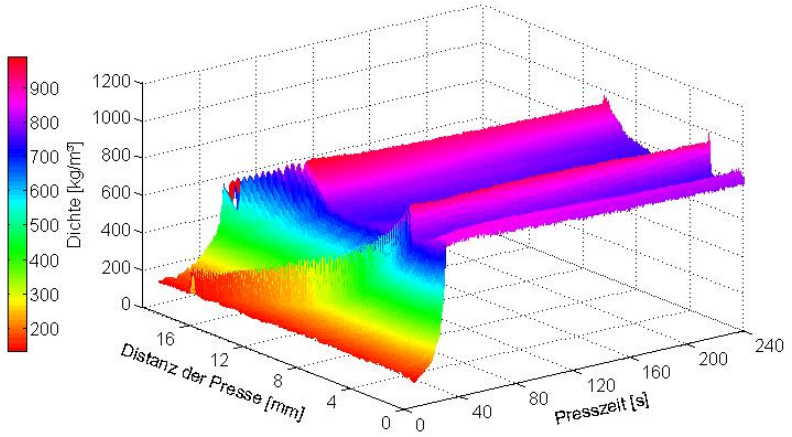
In diesem Abschnitt wird die Entwicklung des Rohdichteprofils an einer MDF-Partikelmatte während des Heißpressvorgangs vorgestellt, dazu wird die in Abschnitt 3.2.4.2 erläuterte Auswertemethodik verwendet. Eine konstante Feuchteverteilung der Partikel während des gesamten Verdichtungsvorgangs für die Berechnung der Dichte kann angenommen werden. Das erscheint nach den Ergebnissen aus Abschnitt 4.1 gerechtfertigt.

Tabelle 14: Beschreibung ausgewählter Proben der Verdichtungsversuche. Ein in der Ebene des Röntgenstrahls sichtbares Thermoelement ist mit der prozentualen Lage der Schicht angegeben

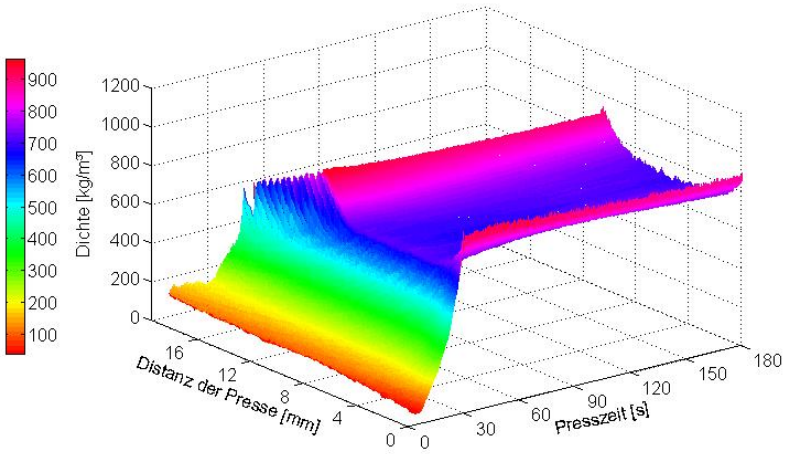
Platte	Schließzeit	Haltezeit	Bemerkung
Probe 1.1	30 s	210 s	kein Thermoelement sichtbar
Probe 1.2	30 s	210 s	Thermoelement bei ca. 25 % sichtbar
Probe 2.1	30 s	150 s	kein Thermoelement sichtbar
Probe 2.2	30 s	150 s	Thermoelement bei ca. 50 % sichtbar



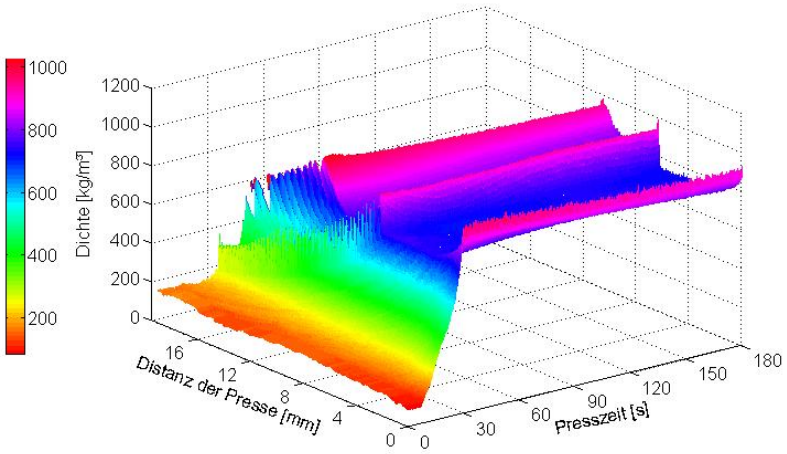
a) Probe 1.1



b) Probe 1.2



c) Probe 2.1



d) Probe 2.2

Abb. 4.10: Übersicht über die Wasserfalldiagramme der Proben aus Tabelle 14, a) Probe 1.1, b) Probe 1.2, c) Probe 2.1 d) Probe 2.2. In den Proben b) und d) ist deutlich das Thermoelement in der jeweiligen Probe zu erkennen

Die dreidimensionale Darstellung der Daten in Form des Rohdichteprofils (vgl. Wasserfalldiagramm, Abb. 4.10) lässt nur eine qualitative Beschreibung der gesamten Daten zu, daher werden im weiteren Verlauf aus den Gesamtdaten einzelne Teilaspekte der Verdichtung und der Rohdichteprofilentwicklung herausgelöst und diskutiert. Die Daten, die während des Heißpressvorgangs durch die MTS-Steuerung erfasst wurden, werden hier einbezogen.

Die Tabelle 14 beschreibt die Herstellung der Proben näher. Für alle Proben der orientierenden Versuche wurden 931 Pixel der Zeilenkamera in y-Richtung ausgewertet (vgl. Proben- bzw. Mattendicke). Die effektive Pixelgröße berechnet sich aus der Anordnung der Verdichtungseinheit im Röntgenstrahl nach Abb. 3.4, die Maße verhalten sich wie folgt:

$a = 305$ mm

$b = 60$ mm

$c_2 = 25$ µm

Damit ergibt sich eine effektive Pixelgröße von 20,9 µm.

4.2.1 Übersicht über die Messdaten zur Rohdichteprofilentwicklung

Abb. 4.11 zeigt exemplarisch die Entwicklung des Rohdichteprofils einer MDF-Matte (Probe 1.1, Verdichtungszeit 30, Haltezeit 210 s) und gibt die gesamten Rohdichtedaten während der Versuchsdurchführung wieder. Die Röntgenbildgröße beträgt 931 Pixel in y-Richtung der Zeilenkamera, das entspricht bei einer effektiven Pixelgröße von 20,9 µm einer gesamten Datenerfassungsbreite von 19,45 mm. An beiden Seiten des Röntgenstrahls mussten bei der Justierung des Röntgenstrahls und der Verdichtungseinheit einige Pixel am Rande verworfen werden, für die der Röntgenstrahl nicht sauber fokussiert werden konnte. Daher wurde von den 1024 zur Verfügung stehenden Pixeln nur die genannten 931 für die Messungen verwendet und im Messdatenbild abgelegt. Die Einjustierung des Röntgenstrahls und die Scannersoftware werden in Kap. 3.2.1 beschrieben. Die Entwicklung der Deckschicht am festen Presskolben, der bei der Plattendicke $y = 0$ mm liegt und die Bezugsebene für den Verdichtungsvorgang darstellt, ist durch die Perspektive der Darstellung nicht so deutlich zu erkennen. Die Rohdichte zu Beginn der Verdichtung beträgt ca. 160 kg m^{-3}. Das entspricht einer Vorverdichtung auf ca. 21 % der angestrebten mittleren Dichte von 750 kg m^{-3}. Zu Beginn des Schließvorganges der Verdichtungseinheit ist ein Bereich von 0 bis ca. 6,6 mm in der Distanz der Pressplatten und in einem Zeitintervall von 0 bis 10 s zu erkennen, in dem die Dichte zum Punkt (0,0) abfällt. In diesem Zeitabschnitt wurde die Probe, die sich beim Einschieben der Hülse konvex ausgebeult hatte, in der Hülse in y-Richtung auf den festen Presskolben aufgeschoben. Erst nach dem vollständigen Kontakt baut sich in dieser Phase ein über die gesamte Pressfläche gleichmäßiger und flächiger Pressdruck auf und der eigentliche Verdichtungsvorgang beginnt. Dieses Verhalten zeigt auch die Entwicklung des Pressdrucks in Abb. 4.12. Der verschobene Anfangspunkt der Verdichtung ist bei den weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen. Das konvexe Ausbeulen der Fasermatte resultiert aus der Rückfederung der Matte bei der kalten Vorverdichtung, die durch Reibung an den Rändern in der Presshülse vermindert wird (siehe Abschnitt 3.2.4.2).

Das Rohdichteprofil zum Zeitpunkt t = 10,2 s Sekunden wird als Startpunkt der Verdichtung definiert, da zu diesem Zeitpunkt im Verdichtungsvorgang die Pixel $P_{t,y}$ mit den y-Indizes 2 bis 11 einen gleichen oder höheren Mittelwert als die Pixel mit den y-Indizes 2 bis 500 haben, die Matte hat zu diesem Zeitpunkt eine Dicke von 55 mm (siehe Abb. 4.12). Der Abstand von 10 Pixeln wurde gewählt, da diese ersten 10 Pixel eine Mattendicke von ca. 0,2 mm an der Oberfläche definieren. Das wurde als guter Kompromiss zwischen beginnender Ausbildung der Deckschicht und unvollständigem Kontakt der Partikelmatte mit dem festen Presskolben angesehen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass ein kompletter flächiger Kontakt der Fasermatte zum festen Presskolben besteht, der die Bezugsfläche (y = 0 mm) für die weitere Verdichtung darstellt. Es kann weiter davon ausgegangen werden, dass der Kontakt der Matte am beweglichen Presskolben schon zum Zeitpunkt t = 0 s vorhanden war. Eine Zeitdifferenz von 10,2 s zwischen dem flächigen Kontakt an beiden Presskolben ist damit anzunehmen. In dieser Zeit baut sich die Dichte von Null bis zur gemessenen Dichte der vorverdichteten Matte auf. Genau genommen wäre der vorzeitige Kontakt der konvex ausgebeulten Mitte der Fasermatte bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, da an den Kontaktstellen bereits ein vorzeitiger konduktiver Wärmeeintrag in die Platte erfolgt.

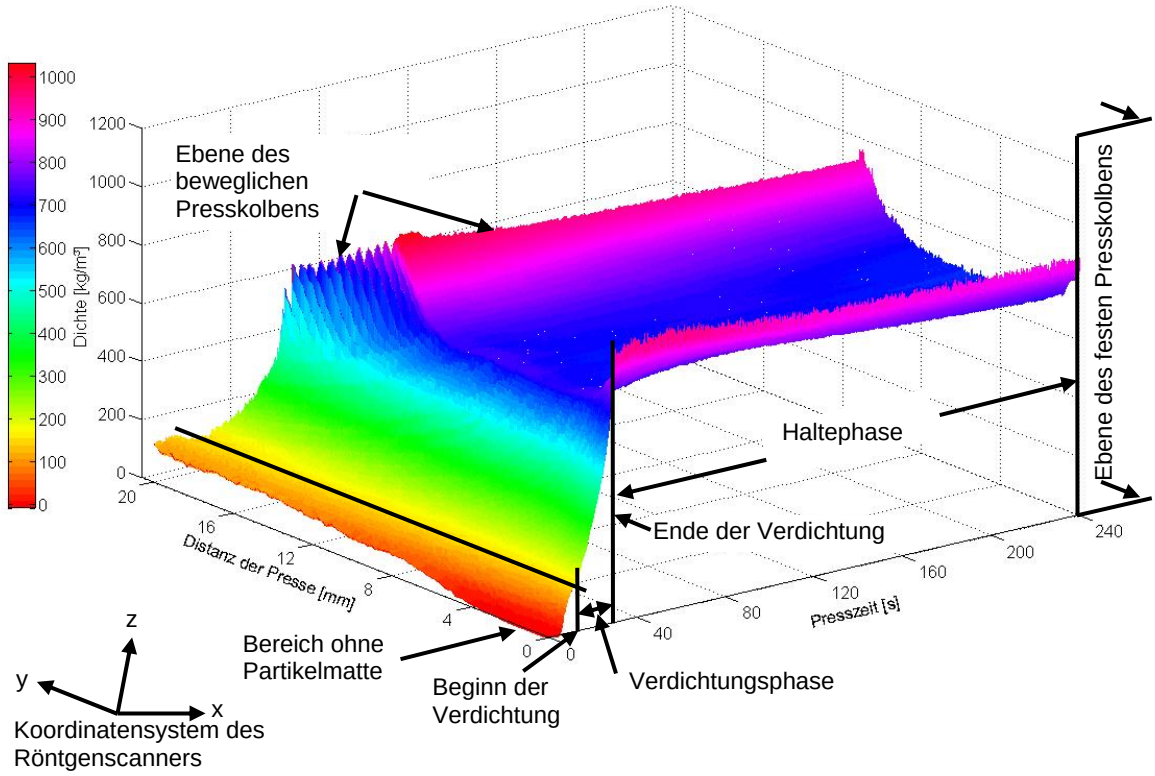


Abb. 4.11: Darstellung der Ausbildung des Rohdichteprofils an der Probe 1.1 mit 30 s Schließzeit und einer Haltezeit von 210 s. Die Farbskalierung zeigt die Dichtewerte; durch die Perspektive ist die Entwicklung der vorderen Deckschicht vor dem festen Presskolben (bei höheren Werten der Distanz der Presse) nicht so deutlich zu erkennen. Die Verdichtungs- und Haltephase sind im Diagramm speziell angegeben. Der Bereich, in dem anfänglich keine Partikelmatte vorlag, ist markiert (in diesem Bereich ist die Dichte 0 kg m^{-3}). Zur räumlichen Einordnung in die Verdichtungseinheit ist links unten das Koordinatensystem der Verdichtungseinheit und des Röntgenscanners eingezeichnet

Aus dem Pressdiagramm in Abb. 4.12 ist ersichtlich, dass es erst ab ca. 10 s Presszeit zu einem Pressdruckanstieg, der auf einen sich aufbauenden Gegendruck der Partikelmatte hindeutet, kommt. Das lässt auf einen flächigen Kontakt der Partikelmatte mit dem Presskolben erst zu diesem Zeitpunkt schließen. Die wahre Schließzeit, in der die Partikelmatte von der konstanten Anfangsdichte von 160 kg m^{-3} auf Enddicke verdichtet wird, beträgt 20 s. Die Mattendicke zu Beginn der eigentlichen Schließzeit ergibt sich aus der Distanz der Pressplatten, die zu diesem Zeitpunkt ca. 55 mm beträgt. Das entspricht auch der Distanz, die die Matte bei einer Rohdichte von 160 kg m^{-3} nach der Vorverdichtung für eine Zielrohdichte von 750 kg m^{-3} aufweisen muss.

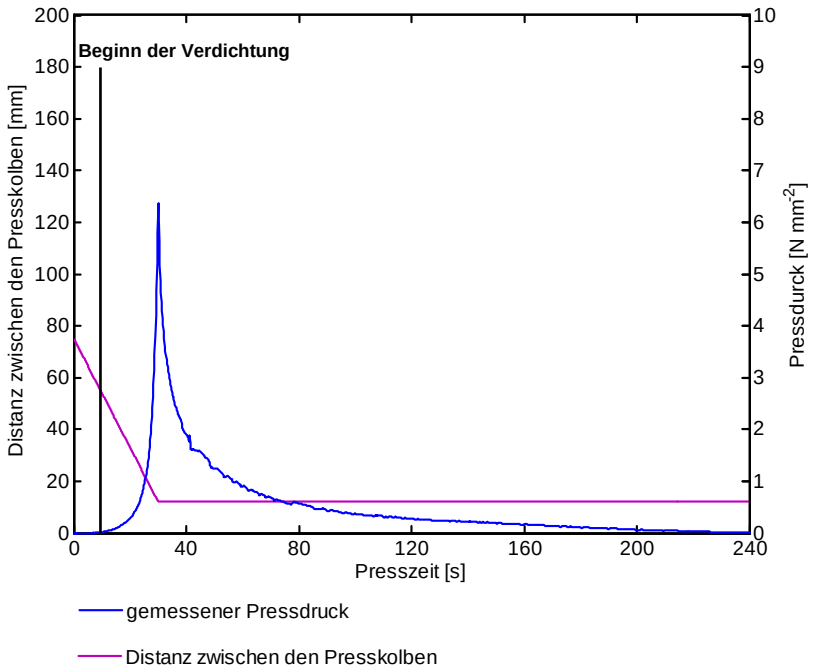


Abb. 4.12: Pressdiagramm für Probe 1.1, deren Rohdichteprofilentwicklung in Abb. 4.11 dargestellt ist. Zu Beginn der Verdichtung bei 10 s beginnt der Pressdruck zu steigen, die Mattendicke beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 55 mm. Das Ende der Verdichtung ist bei 30 s gegeben, gekennzeichnet durch den Beginn des horizontalen Verlaufs der Distanzkurve zwischen den Pressplatten mit einer Haltezeit von 210 s

Im Bereich des beweglichen Presskolbens ist ab einer Distanz der Pressplatten von etwa 16 mm eine deutlich steigende Rohdichte vor dem beweglichen Presskolben zu erkennen, da ab dem Zeitschritt bei 27 s der Abschnitt der Matte mit der Deckschicht vor dem beweglichen Presskolben in den Bereich der Zeilenkamera geschoben wird. In diesen Zeitschritten wird deutlich, wie sich das Maximum der Deckschichtdichte und die Dichte in der Mittelschicht kontinuierlich erhöhen. Rohdichteprofiländerungen während der Haltephase sind in dem Diagramm in Abb. 4.11 aufgrund der Perspektive nicht deutlich zu erkennen. Die Farbänderungen im Rohdichteprofil im Bereich von 30 s bis 160 s weisen auf eine Massebewegung hin, die durch Feuchte- und/oder Partikelbewegung verursacht sein kann.

Abb. 4.13. zeigt die mittlere Rohdichte nach Erreichen der Solldistanz: diese beträgt zu Beginn der Haltephase 762 kg m^{-3}. Die mittlere Rohdichte wurde durch eine Mittelwertbestimmung aller Pixel in der Probe, die von der Zeilenkamera in einem Zeitschritt erfasst wurden, bestimmt. Eine kontinuierliche gleichmäßige Dichteabnahme ab einem Zeitpunkt von 128 s fällt auf; bis zum Ende des Pressvorgangs hat sie 4,2 % der Anfangsdichte erreicht. Die Mittelschichttemperatur (50 % Mattendicke) beträgt zu diesem Zeitpunkt 103,1 °C. Die Mittelschichttemperatur steigt noch weiter auf einen Maximalwert von 105,7 °C bei 158,2 s und fällt dann zum Ende des Pressvorgangs wieder auf 103,6 °C (siehe Abb. 4.14). Die

wahrscheinliche Ursache hierfür ist ein Feuchteverlust durch Austrocknung der Probe während des Heißpressvorgangs. Das lässt sich auch gut mit der zum Ende des Pressvorgangs sinkenden Temperatur begründen. Ein möglicher minimaler Gasdruck wird abgebaut und führt so zu einer leichten Temperaturabnahme zum Ende des Pressvorgangs, das geht mit einer Austrocknung der Platte durch Ausdampfung einher. Die mittlere Rohdichte, die radiometrisch mit dem Röntgenscanner ermittelt wurde, korreliert somit recht gut mit der Einwaage der Fasermenge für die Versuchsplatten vor der Verdichtung, die für eine 12 mm starke Platte auf eine mittlere Rohdichte von 750 kg m^{-3} ausgerichtet war. Die Platte ist jedoch mit 10,97 mm etwas dünner als die angenommene Solldicke. Die korrigierte mittlere Rohdichte der Platte beträgt somit 776 kg m^{-3} Die Differenz beträgt 14 kg m^{-3} zur Dichte zu Beginn der Haltephase von 762 kg m^{-3}, das entspricht einer Abweichung von 1,8 %. Diese Toleranz liegt in dem Bereich der in Abschnitt 4.1.3 angegebenen Abweichungen.

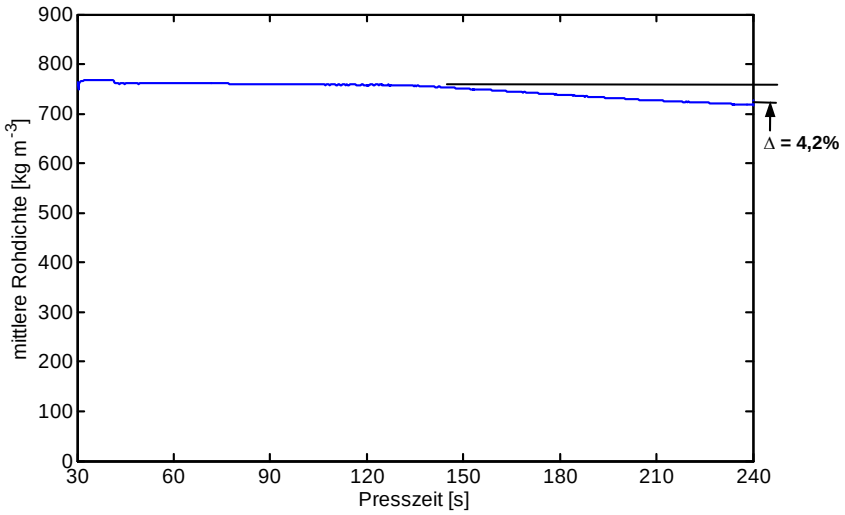


Abb. 4.13: Mittlere Rohdichte der Probe 1.1 während der Haltephase. Erkennbar ist die kontinuierliche Rohdichteabnahme ab einem Zeitpunkt von 128 s im Pressvorgang

Ein minimaler Verlust an Fasermaterial kann auch bei der Einwaage des Fasermaterials auftreten. Die Darrmasse der Probe als möglicher Vergleichswert konnte nicht herangezogen werden, da zwei Thermoelemente in der Matte verblieben sind.

4.2.2 Rohdichte- und Temperaturentwicklung in einzelnen Schichten der Fasermatte

Abb. 4.14 zeigt die Temperaturentwicklung in den Schichten 0 %, 25 % und 50 %, vom festen Presskolben gesehen, und die Pressdruckentwicklung in der Probe 1.1, die mit Thermoelementen an diesen Stellen bestimmt wurde. Die Temperaturen in den Presskolben wurden mit Pt100-Widerständen, die im Presskolben eingebaut sind, gemessen (siehe Abschnitt 3.2.2.1 und Abschnitt 3.2.2.3). Ein Temperaturwert in der 75 %-Schicht stand nicht

zur Verfügung, da das Thermoelement versagt hat. Der Pressdruck wurde aus dem an der Kraftmessdose ermittelten Messwert errechnet. Abb. 4.15 gibt die Rohdichteentwicklung in dieser Probe in den Schichten 2 %, 25 % und 50 % wieder. Dazu wurde an diesen Stellen das Pixel ausgewertet, das dem Rundungswert der prozentualen Position in der Dicke der Matte am nächsten lag. Somit repräsentieren die Dichtewerte in Abb. 4.15 exakt die Datenbreite von einem Pixel. Die Schicht bei 2 % unterhalb der Oberfläche wurde gewählt, um mögliche Randeffekte der Röntgenstrahlung im ersten Pixel direkt am Presskolben auszuschließen, aber dennoch eine Aussage über die Dichteentwicklung nahe der Oberfläche der Partikelmatte treffen zu können. Zudem kann die Oberflächentemperatur der Matte als Orientierung herangezogen werden, um die Temperatur in der Schicht 2 % unter der Oberfläche abschätzen zu können. Während der Haltephase hat das ausgewertete Pixel der 2 %-Schicht unterhalb der Oberfläche den y-Index 10 der Zeilenkamera.

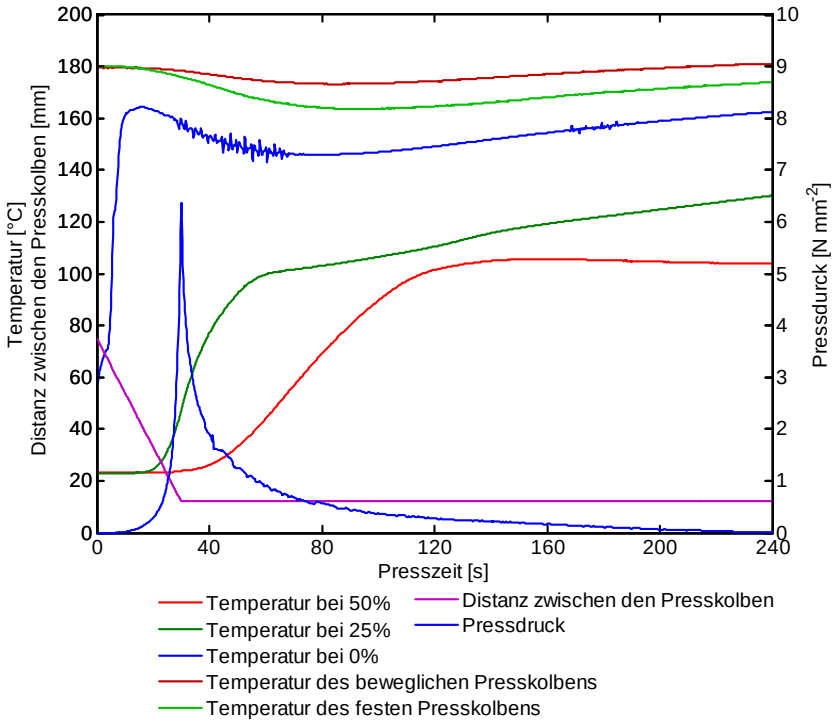


Abb. 4.14: Pressdiagramm der Probe 1.1 mit einer Schließzeit von 30 s und einer Haltezeit von 210 s. Die Temperaturentwicklung in den Schichten 0 % (vor dem festen Presskolben), 25 % und 50 % und die Pressplattentemperaturen sind angegeben. Die Temperaturen in den Schichten der Matte bei 0 %, 25 % und 50 % wurden mit in die Matte eingelegten Thermoelementen gemessen. Die Temperaturen der Presskolben wurden im Thermoöl erfasst. Als Pressenparameter sind der Pressdruck, die Distanz und die Temperaturen an den Presskolben angegeben. Der reale Verdichtungsbeginn bei ca. 10 s ist zu beachten. Das Rauschen zu einigen Zeitpunkten auf der Mattenoberflächentemperatur ist wahrscheinlich auf den Kontakt der unisolierten Thermoelementdrähte mit dem Metall des Presskolbens zurückzuführen

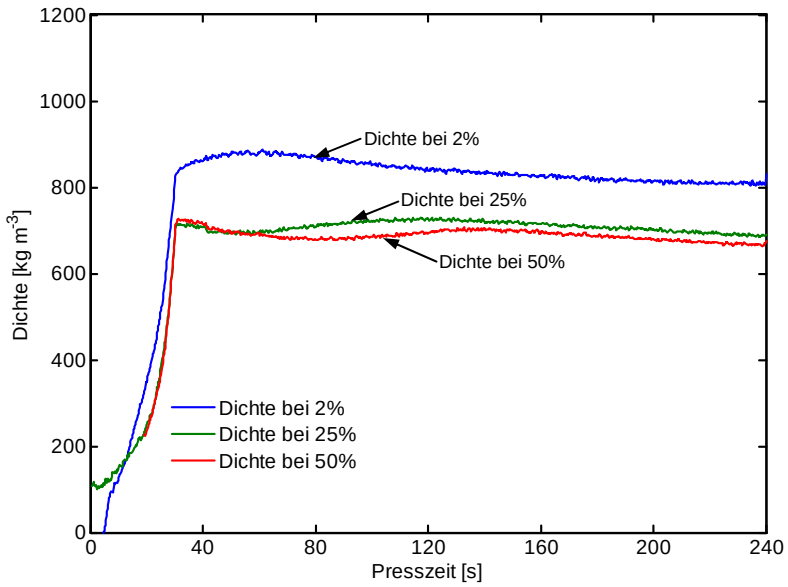


Abb. 4.15: Dichteentwicklung in den Schichten 2 %, 25 % und 50 % über der Presszeit für Probe 1.1 (Schließzeit von 30 s; Haltezeit von 210 s). Der Knick in den Kurven bei 30 s entspricht dem Ende der Verdichtungszeit und dem Beginn der Haltephase

Die Temperaturentwicklung in Abb. 4.14 ist in allen drei Schichten typisch für eine Partikelmatte während der Heißpressung von Laborplatten (Rauch 1984). Auffallend ist der deutliche Temperaturabfall an den Presskolben in den ersten 80 s des Heißpressvorgangs. Ein solcher Temperaturabfall ist häufig in Laborpressen zu beobachten, da die Wärmekapazität der Pressplatten und die Heizleistung oft nicht ausreichen, um den Wärmeabfluss in die Matte zu kompensieren, der zur Erwärmung der Matte und zur Verdampfung der Feuchte in den oberflächennahen Schichten notwendig ist. Thömen (2000) zeigt anhand von Simulationsrechnungen des Heißpressvorgangs, dass 50 % bis 60 % der Heizenergie in der Oberfläche der Matte für die anfängliche Verdampfung der Partikelfeuchte und für die Sorptionswärme aufgewendet werden müssen. Zusätzlich muss im vorliegenden Fall noch der Wärmeabfluss in die die Matte umschließende Presshülse berücksichtigt werden.

Während der Verdichtungsphase steigen die Dichten in den Schichten 25 % und 50 % nahezu deckungsgleich an. Das deutet auf eine gleichmäßige Verdichtung in diesen Bereichen hin. Abweichend davon zeigt die Dichteentwicklung in der Schicht 2 % unter der Oberfläche der Matte eine von Beginn an höhere Verdichtung, wie aus Abb. 4.15 zu entnehmen ist. Mit zunehmender Verdichtungsdauer nähern sich die Verläufe der Verdichtungen der 2 %-Schicht und der Schichten bei 25 % und 50 % an. Das Verhalten lässt sich aus den Steigungen der Rohdichtekurven während der Verdichtungsphase ableiten. Auffallend ist die nahezu gleiche Dichte am Ende der Verdichtung in den Schichten bei 25 % und 50 %. Das lässt auf eine

ähnliche Steifigkeit der Partikel in diesen Schichten schließen. Die Temperatur in der 25 %-Schicht beträgt 50 °C und in der 50 %-Schicht ca. 23 °C. Bei diesen Temperaturen ist noch nicht von einer Plastifizierung auszugehen. Wünschenswert wäre hier eine zusätzliche Temperatur in der 75 %-Schicht, um die Symmetrie des Temperaturverlaufes beurteilen zu können, die jedoch aufgrund des Ausfalls des Thermoelements nicht zur Verfügung steht. Bei weiteren Messungen wurde die Temperatur in der 75 %-Schicht gemessen und konnte entsprechend berücksichtigt werden.

Die Dichte in der 2 %-Schicht unter der Oberfläche der Matte steigt nach Erreichen der Solldistanz von 825 kg m^{-3} auf 887 kg m^{-3} bei ca. 55 s der Presszeit an. Das ist im Wesentlichen auf die temperaturbedingte Plastifizierung und die daraus folgende weitere Verdichtung dieser Schicht durch eine Rückdehnung der inneren, noch steiferen Schichten der Matte zurückzuführen. Ein wesentlicher Feuchtestrom aus der Partikelfeuchte, die zu diesem Zeitpunkt des Heißpressvorgangs konvektiv in weiter innen liegende Schichten transportiert wird, ist nicht anzunehmen. Eine so erhebliche Dichteerhöhung von 62 kg m^{-3} (entsprechend ca. 7,5 % der Rohdichte) in der 2 %-Schicht kann nicht durch Partikelfeuchte, die aus einer 0,2 mm starken Mattenschicht zwischen Oberfläche und 2 %-Schicht entweicht und sich exakt in der 2 %-Schicht sammelt, begründet sein. Zu beachten ist ab t = 30 s die gleichzeitige Dichteabnahme in den Schichten 25 % und 50 %, dieses Verhalten spricht für eine Rückdehnung dieser Schichten. Zeitgleich erfolgt die hydrothermische Plastifizierung der Oberflächenschicht und der in Richtung der Mattenmitte angrenzenden Schichten, die durch die Rückdehnung der Schichten von der Mattenmitte (50 %) bis mindestens 25 % Mattendicke weiter verdichtet werden. Daher ist hier eher von einer Partikelmassebewegung in der Matte auszugehen. Diese Annahme wird durch Untersuchungsergebnisse von Wang und Winistorfer (2000b) gestützt, die an OSB-Matten mit der Messeinrichtung von DePaula (1992) ein ähnliches Verhalten der Dichteentwicklung von den der Deckschicht nahen Schichten bei 18,7 % bzw. 81,3 % der Mattendicke feststellen. Wang und Winistorfer (2000b) schließen daraus ebenfalls auf eine weitere Verdichtung dieser Schichten und stützen die Aussage auf eine geringfügige Abnahme der Mittelschichtdichte in ihren Messwertaufzeichnungen zu diesem Zeitpunkt. Der anschließende Dichteabfall in der 2 %-Schicht ist wahrscheinlich zu Beginn auf eine Kombination von Partikelmasse- und Feuchtebewegung zurückzuführen, wobei die Feuchtebewegung überwiegen dürfte. Der weiter mäßige, kontinuierliche Dichteabfall ab t = 128 s im Presszyklus ist eher mit einer beginnenden Austrocknung der gesamten Matte und dem damit verbundenen Masseverlust zu begründen (siehe Abb. 4.13). Diese Annahme wird durch die gleichzeitige Dichteabnahme in den Schichten 25 % und 50 % ab diesem Zeitpunkt gestützt.

Die Temperaturentwicklung in der Zwischenschicht bei 25 % erfolgt verzögert mit einem deutlichen Anstieg zwischen 25 und 50 s der Presszeit. Der steile Anstieg der Temperatur in diesem Bereich ist auf die Kondensationswärme zurückzuführen, die aus dem Wasserdampf frei wird, der anfänglich durch den kombinierten Wärme- und Stofftransport (Dampfstoß) aus den äußeren Bereichen der Partikelmatte in diese Schicht transportiert wird und dort an den kühleren Partikeln kondensiert. Nach ca. 60 s der Presszeit sind 100 °C in der 25 %-Schicht erreicht. Der konduktive Wärmestrom erwärmt diese Schichten weiter und führt zu einem langsameren weiteren kontinuierlichen Anstieg der Temperatur. Auffallend ist ein kleiner, aber deutlicher Temperaturanstieg nach 110 s Presszeit um ca. 5 °C, der wahrscheinlich auf das Ende einer in diesem Fall nicht so ausgeprägten Temperaturkonstanz, die sich bei der lokalen Siedetemperatur der Feuchte in einer Schicht einstellt, zurückzuführen ist. Dafür spricht der Temperaturbereich von 100 bis 110 °C, in dem die Temperatur in der Schicht von 25 % in dem Zeitintervall von ca. 60 s bis 110 s verharrt.

Nahezu zeitgleich mit dem Erreichen von 100 °C in der 25 %-Schicht kehrt sich die Dichteabnahme in dieser Schicht um und es kommt zu einer langsamen Zunahme der Dichte. Die Entwicklung der Dichte in dieser Schicht ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Kombination von Feuchteansammlung durch die Kondensation von Wasserdampf an den kühleren Partikeln wie auch durch eine Verdichtung der Partikel in dieser Schicht zu begründen. Die Feuchte wird nach der Modellvorstellung der Siedewelle (siehe Abb. 2.3) aus dem Bereich der oberflächennahen Schichten kommen; das erklärt auch die Dichteabnahme in der dort liegenden 2 %-Schicht. Durch die Feuchteansammlung wird diese Schicht hydrothermisch plastifiziert. Ein weiterer Teil der Dichtezunahme wird aus den Schichten kommen, die eher der Mattenmitte zugewandt sind. Die Dichte in der Mitte der Matte, der 50 %-Schicht, nimmt weiter ab, das ist ein Hinweis auf eine Partikelmassenverschiebung in Richtung der 25 %-Schicht, die in der Mittelschicht liegt. Somit liegen hier die beiden Effekte Feuchteerhöhung und eine weitere Verdichtung der Partikelmasse vor. Diese beiden Effekte beeinflussen sich gegenseitig.

Der Anstieg der Temperatur in der Mitte bei 50 % der Partikelmatte ist erwartungsgemäß wesentlich flacher als für die beiden Temperaturen in den weiter außen liegenden Schichten. Die Dichteabnahme in dieser Schicht kehrt sich bei ca. 83 s nach Beginn des Heißpressvorgangs um und es kommt zu einer leichten Zunahme der Dichte von ca. 25 kg m^{-3} im Bereich von 83 s bis 133 s des Heißpressvorgangs. Zu Beginn der Dichtezunahme hat die Mittelschicht eine Temperatur von ca. 70 °C. Die Dichtezunahme setzt sich bis zum Erreichen von 100 °C in der Mittelschicht fort, das entspricht einem Temperaturbereich, in dem es zur

Plastifizierung der Partikel kommen kann. Die zuerst erweichende Holzkomponente ist das Lignin. Der Glasübergangspunkt für die Erweichung von Lignin wird von Stevens und Wienhaus (1984) in diesem Temperaturbereich für das von ihnen isolierte Lignin angegeben. Goring (1971) gibt in Abhängigkeit von Molekulargewicht und Feuchte Temperaturen für den Glasübergangspunkt von Lignin ab 90 °C an. Das würde für eine Erweichung der Partikel und deren weitere Verdichtung sprechen. Die Dichte in der Mitte der Matte am Ende des Heißpressvorgangs liegt jedoch ca. 25 kg m^{-3} unter der Dichte im Umkehrpunkt der Massebewegung in der Mattenmitte zum Zeitpunkt von 83 s, was auf eine Austrocknung der gesamten Matte zurückzuführen ist (vgl. Abb. 4.13). Daher ist anzunehmen, dass der zwischenzeitliche Dichteanstieg in der Mattenmitte im Wesentlichen durch einen temporären Feuchteanstieg hervorgerufen wird. Die Dichteabnahme von 25 kg m^{-3} entspricht einer Holzfeuchteabnahme von 4 % in diesem Bereich bei einer Dichte der feuchten Matte von 625 kg m^{-3}. Der leicht fallende Temperaturverlauf in der Mattenmitte ist ein Hinweis darauf, dass Dampf aus der entstehenden Platte entweichen kann. Die Maximaltemperatur in dieser Schicht beträgt nach 158,2 s Presszeit 105,7 °C, was einem Sattdampfdruck von Wasser von 1,239 bar entspricht. Thömen (2000) stellt dar, dass die Temperatur in einer Schicht der Matte in kleinen Laborpressen eine Grenze von 100 °C nur dann deutlich überschreiten kann, wenn es zu einer Reduzierung der Holzfeuchte und damit zu einer Trocknung kommt. Weiterhin führt Thömen (2000) aus, dass die Temperatur in einer Schicht bei lokalen Feuchtebedingungen von $\varphi > 90$ % und $\vartheta < 120$ °C maximal 3 °C von der lokalen Sattdampftemperatur abweichen kann, wenn kein nennenswerter Überdruck aufgebaut werden kann. Dieses Verhalten führt Thömen (2000) auf die geringe Distanz von der Mitte der Matte in horizontaler Richtung – in der hier verwendeten Verdichtungseinheit ist es durch den horizontalen Einbau die vertikale Richtung – zu den Mattenkanten zurück: Dadurch ist mit einem zügigen Gesamtdruckabbau trotz einer verringerten Permeabilität der verdichteten Matte zu rechnen. Der Wasserdampfdruck in der Mattenmitte wird daher den Sattdampfdruck nicht oder nur gering überschreiten. Dieses Verhalten ist in der Mittelschicht der Probe anzunehmen, der Wasserdampf wird ohne großen Dampfdruckaufbau über die Schmalflächen der Matte abgeführt, obwohl diese durch die Presshülse zu großen Teilen an den Schmalflächen verschlossen sind. Die drei kleinen Schlitze in der Presshülse und die Spielpassung zwischen Innendurchmesser der Presshülse und dem Außendurchmesser der Presskolben reichen demzufolge offensichtlich aus, um den Dampf rasch entweichen zu lassen.

4.2.3 Beschreibung der Rohdichteprofilentwicklung im Heißpressvorgang

Die Rohdichteprofilentwicklung allgemein und nach der Modellvorstellung von Wang und Winistorfer (2000b) kann in zwei Phasen eingeteilt werden:

- die Verdichtungsphase und
- die Haltephase mit eventuellen Nachverdichtungsschritten

An einzelnen ausgewählten Rohdichteprofilen zu bestimmten Zeitschritten aus den Gesamtdaten, die in Abb. 4.11 dargestellt sind, wird in diesem Abschnitt die Entwicklung des Rohdichteprofils in diesen beiden Phasen erläutert. Die verwendeten Begriffe Deckschicht und Mittelschicht beziehen sich dabei auf die äußeren, hoch verdichteten Zonen und inneren, weniger stark verdichteten Zonen des Rohdichteprofils. Die MDF-Matte wird homogen geformt und nicht, wie bei der Spanplattenherstellung üblich, mehrschichtig aufgebaut, sodass schon bei der Mattenformung von unterschiedlichen Schichten gesprochen werden kann.

4.2.3.1 Massebewegung während der Verdichtungsphase

Die Entwicklung des Rohdichteprofils in der Verdichtungsphase ist in Abb. 4.16 anhand von acht Rohdichteprofilen beispielhaft gezeigt. Die Zeitpunkte, zu denen in Abb. 4.16 die Rohdichteentwicklung dargestellt wird, wurde so gewählt, dass die sich während der Verdichtung kontinuierlich ändernde Dicke der Matte in ausreichend kleinen Schritten dargestellt wird und markante Entwicklungen im Rohdichteprofil abgebildet werden. Der Zeitschritt von 4 s hat sich dafür als sinnvoll erwiesen. Ein Zwischenschritt bei 28,2 s wurde eingefügt, um die rasante Veränderung des Rohdichteprofils in diesem Bereich zu verdeutlichen. Bis zu einem Zeitpunkt von 26,2 s ist die Partikelmatte während der Verdichtung noch dicker als die Messbreite der Zeilenkamera mit 931 Pixeln entsprechend 19,45 mm des Röntgenscanners. Daher werden die gemessenen Daten gespiegelt und das Rohdichteprofil vor dem beweglichen Presskolben symmetrisch dadurch ergänzt. Bis zu einem Zeitpunkt $t = 22{,}2$ s reicht diese Maßnahme nicht aus, da die Dicke der Fasermatte mehr als doppelt so groß ist wie die Messbreite des Röntgenscanners, die verbleibende Lücke im Rohdichteprofil wird durch eine Linie mit dem Dichtewert des letzten Pixels der Zeilenkamera vor der Lücke geschlossen.

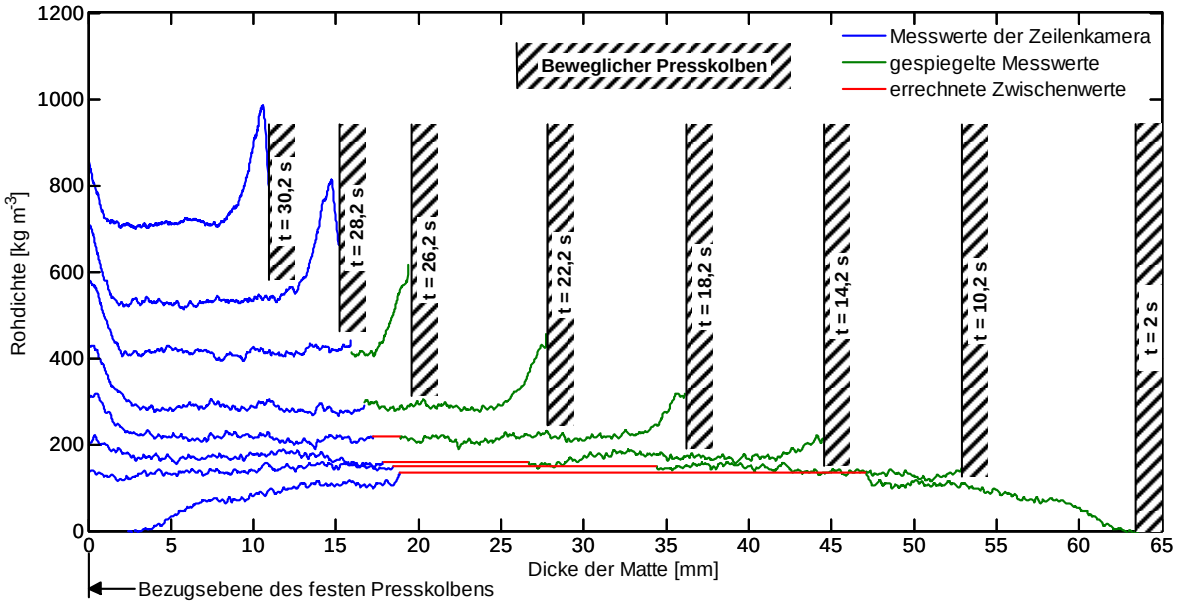


Abb. 4.16: Rohdichteprofile während der Verdichtungsphase von 30 s der Probe 1.1 zu den Zeitpunkten t = 2 s, 10,2 s, 14,2 s, 18,2 s, 22,2 s, 26,2 s und 28,2 s sowie das erste Rohdichteprofil in der Haltephase bei t = 30,2 s. Der deutliche Dichteabfall und fehlende Dichtewerte des Rohdichteprofils bei 2 s im Bereich von 0 bis ca. 12 mm sind auf den fehlenden Kontakt der Fasermatte zum festen Presskolben und die konvexe Ausbeulung der Probe in diesem Bereich zurückzuführen. Der Verdichtungsbeginn setzt ab t = 10,2 s ein. Blaue Linien: Messdaten, grüne Linien: gespiegelte Messdaten vor dem beweglichen Presskolben, rote Linien: Rohdichteprofil nach Annahme vervollständigt

Das vervollständigte Rohdichteprofil zu den sehr frühen Zeitpunkten im Verdichtungsvorgang gibt einen ungefähren qualitativen Eindruck des Rohdichteprofils über die gesamte Dicke der Fasermatte wieder. Es erweist sich als zulässig und sinnvoll, die Lücke zwischen den gespiegelten Rohdichteprofilen mit einer Linie konstanter Dichtewerte zu schließen, da in diesem Bereich des Rohdichteprofils ein konstanter Dichteverlauf zu erwarten ist. Das kann aus den Rohdichteprofilen zu den Zeitpunkten t = 22,2 s und t = 26,2 s abgeleitet werden. Für eine rein qualitative Beurteilung scheint diese Vorgehensweise also möglich, ohne die homogenen Dichteentwicklungen einzelner Abschnitte in der Lücke zu übersehen. Anhand der Rohdichteprofile zu den Zeitpunkten t =10,2 s, t = 22,2s und t = 30,2s wird die Rohdichteprofilentwicklung in der Verdichtungsphase unter Einbeziehung der Temperaturen beschrieben (siehe Abb. 4.17 bis Abb. 4.19). Die als senkrechte Striche in die genannten Diagramme eingezeichneten Temperaturen wurden mit Thermoelementen an den entsprechenden Stellen gemessen.

Die Fasermatte sollte zum Zeitpunkt t = 10,2 s einen vollflächigen Kontakt zu beiden Presskolben aufweisen: Ersichtlich ist eine homogene Dichteverteilung, abgesehen von geringfügigen lokalen Dichteschwankungen, die auf die Partikelstreuung und einen Restanteil

Rauschen der Messwerte zurückzuführen sind, wie in Abb. 4.17 zu ersehen ist. Die Temperatur an der Mattenoberfläche beträgt 161 °C: In der Zwischenschicht bei 25 % Mattendicke und in der Mittelschicht bei 50 % Mattendicke ist es noch nicht zu einem Temperaturanstieg gekommen, die Temperaturen weisen 23 °C auf. Die Ausbildung eines Temperaturgradienten durch im Wesentlichen konduktive Erwärmung kann daher nur in sehr oberflächennahen Schichten erfolgt sein. Eine feinere Differenzierung der Temperatur in Bereich von 0 % bis 25 % der Mattendicke durch weitere Messwerte wäre hier wünschenswert.

In den folgenden 12 s des Verdichtungsvorgangs bildet sich ein Dichtegradient in einem Bereich von 0 bis 3,1 mm der Plattendicke aus (siehe Abb. 4.18), der den Beginn der Entwicklung der Deckschicht widerspiegelt. Auffallend ist ein erkennbarer Dichteabfall zur Mattenoberfläche hin bis zu einem Zeitpunkt von 18,2 s in einem Bereich von 0 bis 0,26 mm. Dieser Effekt kann durch Grenzflächeneffekte des Röntgenstrahls am Metall des festen Presskolbens oder durch eine noch „raue“ Oberfläche der Matte zu diesem frühen Zeitpunkt der Verdichtung hervorgerufen werden. Ein möglicherweise noch teilweise unvollständiger Kontakt der Matte mit den Presskolben ist ebenfalls in Betracht zu ziehen, auch wenn zu diesem Zeitpunkt bereits ein Pressdruck aufgebaut ist. Es sind sowohl die Entwicklung der Deckschicht wie auch Grenzflächeneffekte des Röntgenstrahls am Metall des festen Presskolbens in den ersten erfassten Pixeln am Rande des Röntgenstrahls als wahrscheinliche Ursachen für den gemessenen Dichtegradienten anzunehmen. Diese Grenzflächeneffekte werden auch als Artefakte bezeichnet. Die unterschiedliche Plastifizierung der Partikel in den verschiedenen Schichten, die im Dichtegradienten von hohen Dichten an der Mattenoberfläche zu geringen Dichten hin zur Mattenmitte Ausdruck findet, ist auf die fortschreitende Durchwärmung und die Ausbildung eines Temperatur- und Feuchteprofils zurückzuführen. Das zeigt sich auch am langsamen Fortschreiten des Dichtegradienten in Richtung Mattenmitte. Ein Dichtemaximum von 435 kg m^{-3} in der Deckschicht bildet sich im Zeitraum von t = 10,2 s bis t = 22,2 s aus. Ein breiter Mittelbereich der Fasermatte wird gleichmäßig von ca. 160 kg m^{-3} bei t = 10,2 s auf ca. 280 kg m^{-3} bei t = 22,2 s verdichtet. Auf die unterschiedlichen Verdichtungsgeschwindigkeiten zwischen der Schicht bei 2 % und den Schichten bei 25 % und 50 % wurde in Abschnitt 4.2.2 schon hingewiesen. Aus der Entwicklung der Rohdichteprofile zeigt sich, dass dieses Verhalten auf die Entwicklung einer höheren Dichte in den Deckschichten zu Beginn des Verdichtungsvorgangs zurückzuführen ist. Die Temperaturentwicklung, die aus Abb. 4.18 zu entnehmen ist, unterstützt diese Entwicklung. Die Oberflächentemperatur bleibt mit 162 °C nahezu konstant, ebenso die Mittelschichttemperatur bei 50 % der Mattendicke mit 23 °C. In der Zwischenschicht bei 25 % der Mattendicke kommt es

zu einem leichten Anstieg der Temperatur um 3,4 °C auf 26,4 °C. Zu diesem Zeitpunkt ist von einer eher konduktiven Erwärmung der Fasermatte über die Presskolben auszugehen. Die Oberflächentemperatur von 162 °C bedingt, dass kein freies Wasser mehr in der Oberflächenschicht vorhanden sein kann, das für einen konvektiven Wärmestrom durch Wasserdampf zu Verfügung stünde. Ergebnisse aus Simulationsrechnungen von Thömen (2000) zum konduktiven und konvektiven Wärmestrom in einer Fasermatte bekräftigen diese Annahme. Thömen (2000) zeigt mit seinen Simulationsergebnissen, dass es erst etwas verzögert zu einer fortschreitenden konduktiven Erwärmung kommt, in deren Folge ein hohes Maß an Energie durch den konvektiven Wärmestrom übertragen wird. Der geringe Temperaturanstieg der Schicht bei 25 % lässt damit auf eine eher konduktive Erwärmung schließen. In den äußeren Schichten der Matte, in denen sich ein Dichtegradient ausbildet, ist von einer beginnenden konvektiven Erwärmung der Partikel auszugehen, durch die die Fasermatte in diesen Schichten unterschiedlich stark, je nach Fortschreiten des kombinierten Wärme- und Stofftransports, plastifiziert wird. Der Dichtegradient ist in zwei Bereiche zu unterteilen: Den Rohdichteabfall vom Maximum in der Deckschicht zur Mattenoberfläche und den Rohdichtegradienten vom Maximum in der Deckschicht zur Mattenmitte.

Der Rohdichteabfall vom Maximum in der Deckschicht zur Mattenoberfläche ist mit großer Wahrscheinlich auf eine Austrocknung der Fasern in diesen Schichten vom Maximum in der Deckschicht bis zur Mattenoberfläche und die beginnende Klebharzaushärtung zurückzuführen. Der Einfluss der Klebstoffaushärtung ist hier nicht eindeutig zu klären: Einerseits kann der Klebstoff durch den teileweise schon vorzeitigen Kontakt mit den Presskolben schon vorausgehärtet sein, andererseits benötigt die vollständige Aushärtung des Klebstoffs einen längeren Zeitraum als die zu diesem Zeitpunkt verstrichene Presszeit. Heinemann (2004) nimmt eine deutliche Entwicklung einer Querzugfestigkeit in den oberflächennahen Schichten einer mit Harnstoff-Formaldehydharz verklebten Platte erst ab 20 s nach Beginn des Pressvorganges aufgrund der aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Simulation der Querzugwerte an. Es bildet sich eine Schicht mit direktem Kontakt zu der Oberfläche der Pressplatten, in der der Klebstoff schon vor oder während des Beginns des Heißpressvorgangs aushärtet. Dadurch werden die Fasern versteift und es bildet sich eine nur wenig feste und weniger kompakte (das heißt mit geringerer Dichte) Holz-Partikel-Klebstoffmatrix direkt an der Oberfläche aus. Für die weiter innen in der Partikelmatte liegenden Schichten ist anzunehmen, dass sich die Steifigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix durch die beginnende Aushärtung des Klebstoffes ähnlich verhält wie die Querzugfestigkeit. In dieser frühen Phase des Verdichtungsvorgangs kann davon ausgegangen werden, dass die beginnende

Aushärtung des Klebstoffes in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in diesen Schichten noch keinen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung des Dichtegradienten in den weiter innen liegenden Schichten der Partikelmatte hat. Die zur Aktivierung der Aushärtung nötige Temperatur dürfte in diesen weiter innen liegenden Schichten zwar bereits überschritten sein, jedoch dürfte die Aushärtungsreaktion hier noch nicht so weit fortgeschritten sein, dass ein deutlicher Betrag zur Festigkeit der Matte bzw. umgekehrt zur Steifigkeit der Partikel zu erwarten ist. Wahrscheinlicher ist die Erhöhung der Steifigkeit der Partikel durch die Austrocknung dieser Schichten infolge des kombinierten Wärme- und Stofftransports (Haas 1998). Der größte Anteil der Feuchte wird in diesen oberflächennahen Schichten zügig durch den konvektiven Wärmestrom abgeführt (Thömen 2000).

Vom Zeitpunkt t = 22,2 s an zeigt die Deckschicht am festen Presskolben im Pixel y = 1 einen Anstieg der Dichte um 30 kg m^{-3}, der deutliche Dichteabfall am Presskolben verschwindet. Dieses Phänomen kann mehrere Ursachen haben:

- Es kann zu Grenzflächeneffekten der Röntgenstrahlung am Metall des Presskolbens kommen, die sich auf das oder die ersten Pixel der Matte hinter dem festen Presskolben auswirken.
- Durch den an sich geringen Pressdruck, der zu diesem Zeitpunkt 0,459 N mm^{-2} beträgt, das entspricht einer Kraft von 901 N, könnte eine leichte Verformung der Kraftmessdose erfolgen, sodass diese Partikelmatte um einige wenige Mikrometer (µm) aus dem Bereich der Zeilenkamera geschoben wird, der in der Software des Röntgenscanners berücksichtigt wird. Diese Möglichkeit erscheint aber aufgrund des genannten geringen Pressdrucks zu diesem Zeitpunkt eher als unwahrscheinlich. Dagegen spricht ebenfalls der Dichteanstieg im ersten Pixel.
- Es könnte zu Partikelablagerungen im Schlitz in der Presshülse für den Röntgenstrahl kommen. Das wurde jedoch nicht beobachtet.

Mit großer Wahrscheinlichkeit ist daher dieser Dichteanstieg vor dem festen Presskolben auf Grenzflächeneffekte der Röntgenstrahlen am Presskolben zurückzuführen. Bemerkenswert ist jedoch, dass dieser Effekt auf der Seite des beweglichen Presskolbens nicht beobachtet wird. Das ist möglicherweise auf den Winkel der Röntgenstrahlen, mit dem diese auf die Pressfläche des festen Presskolbens aufgrund des Penumbra-Effektes auftreffen, zurückzuführen. Vor dem beweglichen Presskolben laufen die Röntgenstrahlen bei Erreichen der Solldicke der Matte fast genau parallel zur Presskolbenfläche, da sich diese nahezu auf der Mittellinie des Röntgenstrahls befindet (siehe Abb. 3.2). Die Matte wird zuerst vom beweglichen Presskolben erfasst, wodurch dort auch frühzeitiger ein vollflächiger Kontakt gegeben ist. An der

Kolbenoberfläche des festen Presskolbens wird sich dieser Zustand durch eine unvermeidliche Reibung der Matte an der Innenwandung der Presshülse später einstellen.

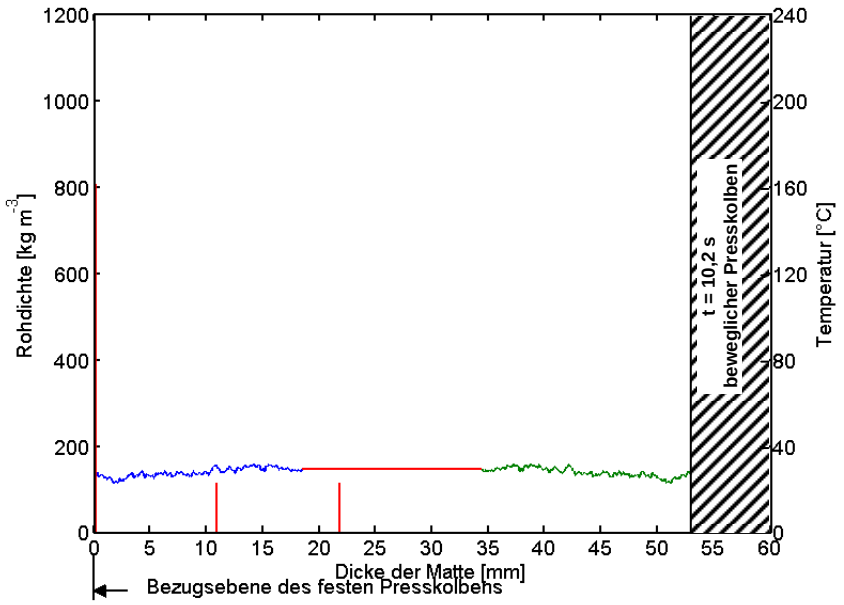


Abb. 4.17: Rohdichteprofil zu dem als Beginn der Verdichtung definierten Zeitpunkt bei t = 10,2 s. Die Temperaturen bei 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke sind als Striche an den entsprechenden Positionen eingezeichnet. Die blaue Linie sind Messdaten, die grüne Linie sind gespiegelte Messdaten, die verbleibende Lücke ist zur Verdeutlichung des Rohdichteprofils mit einer roten Linie geschlossen. Zur Verdeutlichung ist auch die Lage des beweglichen Presskolbens eingezeichnet

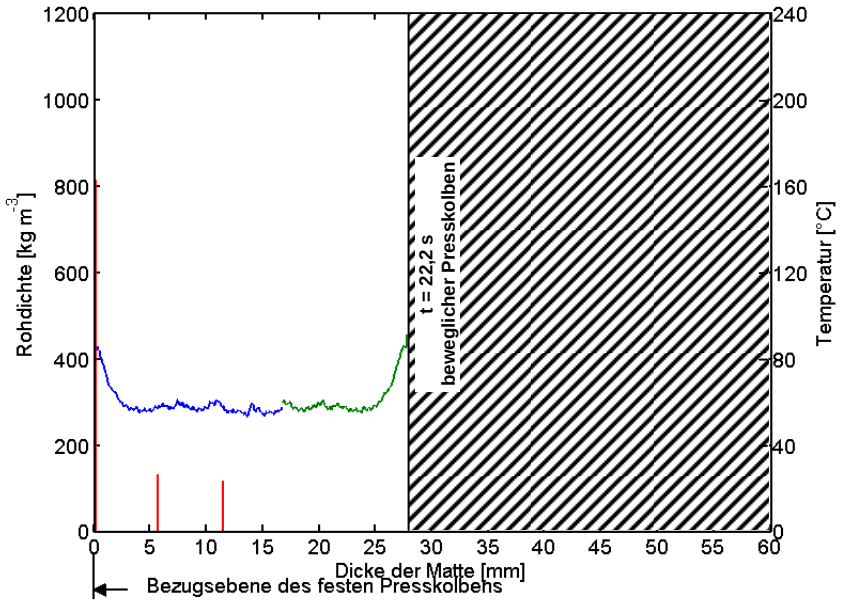


Abb. 4.18: Rohdichteprofil bei t = 22,2 s. Die Temperaturen bei 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke sind als Striche an den entsprechenden Positionen eingezeichnet. Die blaue Linie sind Messdaten, die grüne Linie sind gespiegelte Messdaten. Zur Verdeutlichung ist die Lage des beweglichen Presskolbens eingezeichnet. Die Abbildung zeigt ein Zwischenstadium bei der Verdichtung: Das Rohdichteprofil wurde durch Spiegelung einiger Daten ergänzt

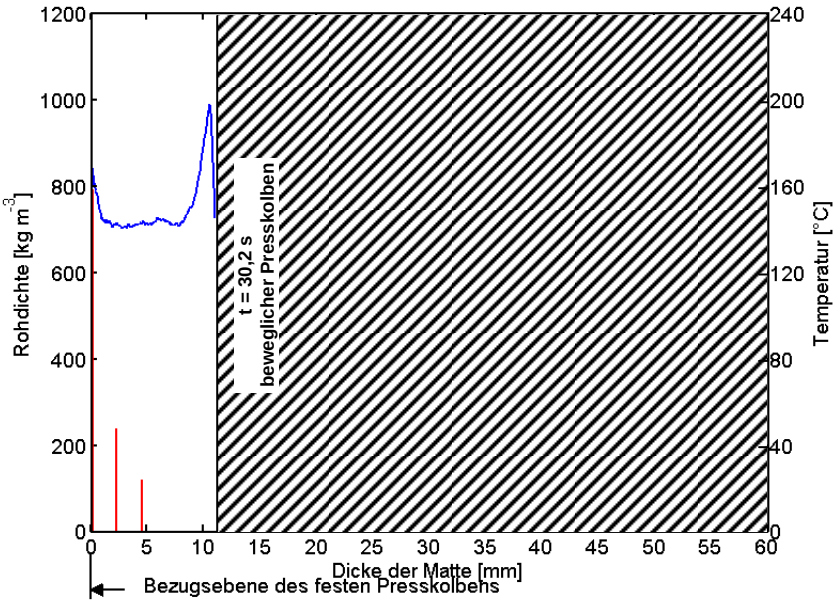


Abb. 4.19: Rohdichteprofil bei t = 30,2 s. Die Temperaturen bei 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke sind als Striche an den entsprechenden Positionen eingezeichnet. Zur Verdeutlichung ist die Lage des beweglichen Presskolbens eingezeichnet. Dieses Profil nach 30,2 s ist mit einem verändertem Abszissenmaßstab auch in Abb. 4.21 dargestellt

Das Rohdichteprofil zum Zeitpunkt t = 30,2 s weist erstmalig die Solldistanz der Presse auf, die Verdichtungsphase ist abgeschlossen. Die Plattendicke beträgt hier 11 mm. Am beweglichen Presskolben ist in Abb. 4.19 eine deutliche Ausbildung einer Deckschicht zu erkennen. Das Maximum der Deckschichtdichte (985 kg m^{-3}) liegt 0,4 mm unterhalb der Mattenoberfläche vor dem beweglichen Presskolben. Die Dichte exakt an der geometrischen Oberfläche (bei 100 % Plattendicke) beträgt 724 kg m^{-3}: Dieser Dichteabfall in der oberflächennahen Zone ist typisch für Platten aus Taktpressen (Soiné 1984). Bemerkenswert ist, dass dieser Dichteabfall erst in diesen letzten 10 s seit der vorherigen Rohdichteprofildarstellung zum Zeitpunkt t = 22,2 s aufgetreten ist. Das könnte dadurch erklärt werden, dass noch in dieser Verdichtungsphase bereits eine teilweise Voraushärtung der äußersten Deckschicht stattfindet und damit die Verdichtung dieser Schicht behindert wird.

Die Matte zeigt in der Mittelschicht im Bereich von 0,90 mm bis 8,33 mm eine nahezu homogene Dichte von durchschnittlich 712 kg m^{-3}, weil noch keine für die Plastifizierung der Partikel und damit weitergehende Verdichtung der Matte notwendige Temperatur in dieser Zone gegeben ist. Die Temperatur beträgt an der Plattenoberfläche am festen Presskolben 158 °C, bei 25 % Mattendicke ist die Temperatur auf 50 °C angestiegen. Die Mittelschichttemperatur bei 50 % Mattendicke beträgt nach wie vor lediglich 24 °C. Die Ausbildung eines

Temperaturprofils in der Matte ist zu diesem Zeitpunkt deutlich ersichtlich. Die Ausprägung der Deckschicht vor dem festen Presskolben im Bereich von 0 bis 0,95 mm, das entspricht einem Bereich von 0 bis 8,2 %, ist ein klares Zeichen für eine Plastifizierung und somit für einen deutlichen Temperaturanstieg. Zu berücksichtigen ist dabei der wahrscheinlich unterschiedliche erste Kontaktzeitpunkt der beiden Presskolben mit der Matte, der nach den Überlegungen in Abschnitt 4.2.1 maximal 10,2 s betragen kann. Bei einer linearen Interpolation der Temperaturen zwischen 0 % und 25 % Plattendicke würde sich bei 8,2 % eine Temperatur von 123 °C ergeben. Eine Interpolation mit einer quadratischen Funktion, die bei 50 % Mattendicke die Steigung „null“ hat – also horizontal verläuft –, ergibt eine Temperatur von 113 °C. Solche Annahmen sind mit Sicherheit nicht zulässig, weisen jedoch die Größenordnung der Temperatur in an dieser Stelle in der Matte in einem Bereich von ca. 110 bis 115 °C bis max. 123 °C auf. Dabei ist 123 °C als ein eher unrealistischer Wert anzunehmen. Tendenziell ist an diesem Punkt mit einer noch deutlich geringen Temperatur zu rechnen, da es bei der durch Interpolation ermittelten Temperatur mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Plastifizierung der Partikel zu einer weiteren Verdichtung gekommen wäre. Zudem wird auch ein Großteil der zugeführten Energie noch für die Verdampfung der Feuchte in diesem Bereich der Matte benötigt, sodass die Temperatur nur bis maximal 103 °C ansteigen kann (Thömen 2000). Zu diesem Zeitpunkt ist der maximale Pressdruck von 6,22 N mm^{-2} erreicht. Der hohe Pressdruck resultiert aus der homogenen Verdichtung der nicht oder nur wenig erwärmten und damit auch nicht oder nur geringfügig plastifizierten Bereiche der Mittelschicht.

Der am festen Presskolben nicht sichtbare Rohdichteabfall vom Deckschichtmaximum zur Mattenoberfläche an dieser Seite der Matte und der hohe Pressdruck könnte auch dadurch erklärt werden, dass an der Bezugsfläche der Matte am festen Presskolben einige wenige Pixel aus dem für die Datenaufnahme berücksichtigten Bereich der Zeilenkamera herausfallen. Diese Möglichkeit wurde zum Zeitpunkt t = 22 s aufgrund des geringen Pressdrucks nicht in Betracht gezogen. Insgesamt ist festzustellen, dass die Erfassung dieser äußersten Grenzschichten experimentell nur schwierig zugänglich ist.

Es zeigt sich, dass sich während der 20 s anhaltenden Verdichtungsphase von 55 mm auf 11 mm durch den kombinierten Wärme- und Stofftransport ein Temperaturprofil auszubilden beginnt, in dessen Folge sich ein Feuchteprofil durch den konvektiven Wärmestrom und die damit transportierte Feuchte entwickelt. Temperatur- und Feuchteprofil in diesem Zeitraum haben jedoch nur Auswirkungen auf die höhere Verdichtung der Partikelmatte in einem Bereich von 0 bis 8,6 % vor dem festen Presskolben bzw. von 75,9 % bis 100 % vor dem beweglichen Presskolben. Die beobachtete Asymmetrie in der Ausbildung der Deckschichten

des Rohdichteprofils ist höchstwahrscheinlich durch den unterschiedlichen Kontaktzeitpunkt der Presskolben mit der Fasermatte und dem damit verbundenen unterschiedlichen Erwärmungsbeginn der Fasermatte an den beiden Oberflächen zu begründen. Der Bereich dazwischen wird homogen verdichtet, es zeigen sich keine Dichtegradienten. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich ein hohes Maß an nicht relaxierten Spannungen durch das verzögert elasto-mechanische Verhalten der Faser aufgebaut wird. Das ergibt sich auch aus dem hohen Pressdruck von 6,2 N mm^{-2} zum Ende der Verdichtungsphase. Aus den Ergebnissen von Heinemann (2004) lässt sich ableiten, dass sich während der ersten Verdichtungsphase in der Mittelschicht der Matte kaum ein nennenswerter Einfluss der Klebstoffaushärtung auf die Steifigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix ergibt, da der Aushärteprozess des Klebstoffs noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Heinemann (2004) stellt im Gegenteil sogar dar, dass der Verdichtungswiderstand der Matte für beleimte Fasern sinkt. Dieses Phänomen führt er auf den noch flüssigen Klebstoff auf den Holzpartikeln zurück, der die Reibung zwischen den Partikeln vermindert.

4.2.3.2 Massebewegung während der Haltephase

Die weitere Entwicklung des Rohdichteprofils während der Haltephase des Heißpressvorgangs zeigt Abb. 4.20. Hier ist eine weitere deutliche Massebewegung im Rohdichteprofil zu erkennen.

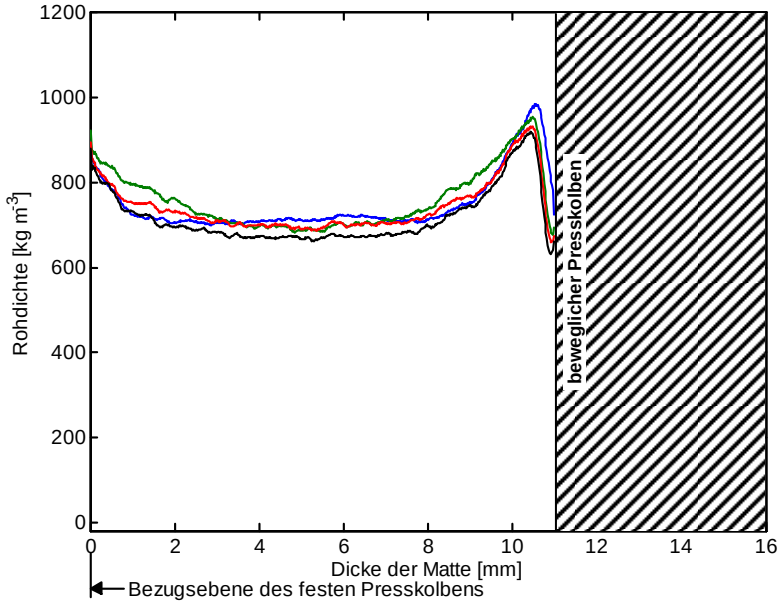


Abb. 4.20: Rohdichteprofile während der Haltephase zu den Zeitpunkten t = 30,2 s (blaue Linie), t = 100 s (grüne Linie), t = 170 s (rote Linie) und t = 240 s (schwarze Linie); zur Verdeutlichung ist auch der nunmehr in seiner Lage fixierte Presskolben eingezeichnet

Zur weiteren Erläuterung der Rohdichteprofile werden diese zu den Zeitschritten t = 30,2 s, t = 100 s, t = 170 s und t = 240 s in eigenen Graphen dargestellt (Abb. 4.21 bis Abb. 4.24), in denen zusätzlich die Temperaturen an der Mattenoberfläche am festen Presskolben und in den Schichten von 25 % und 50 % als Temperatursäulen (Striche) an der entsprechenden Stelle eingetragen sind. Der Zusammenhang zwischen der Ausbildung eines Temperaturprofils und der daraus resultierenden weiteren Entwicklung des Rohdichteprofils kann so deutlicher erläutert werden.

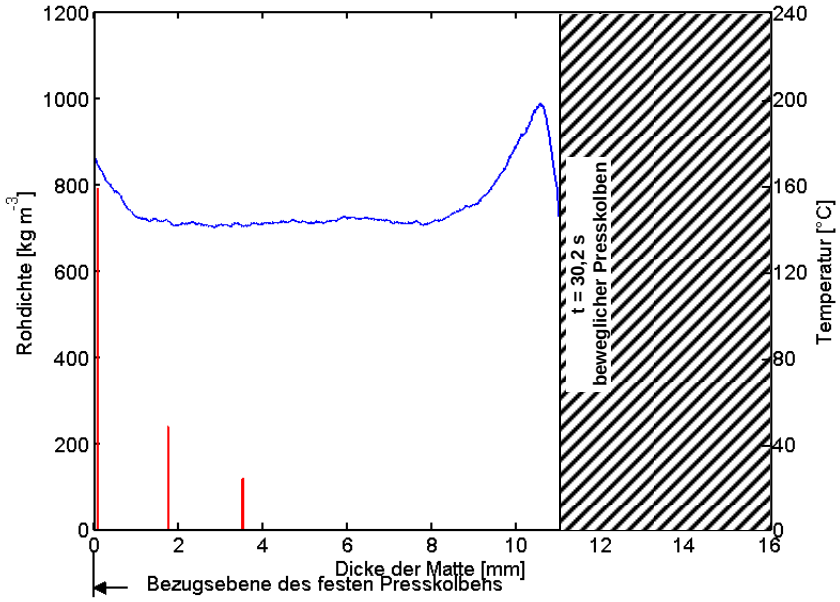


Abb. 4.21: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 30,2 s mit Temperaturmarkern an den Stellen 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke, $\vartheta_{0\,\%}$ = 158,1 °C, $\vartheta_{25\,\%}$ = 48,0 °C und $\vartheta_{50\,\%}$ = 23,9 °C; dargestellt als vertikale Striche. Schließzeit: 30 s, Presszeit: 240 s. Dieses Profil nach t = 30,2 s ist mit verändertem Abszissenmaßstab auch bereits in Abb. 4.19 dargestellt

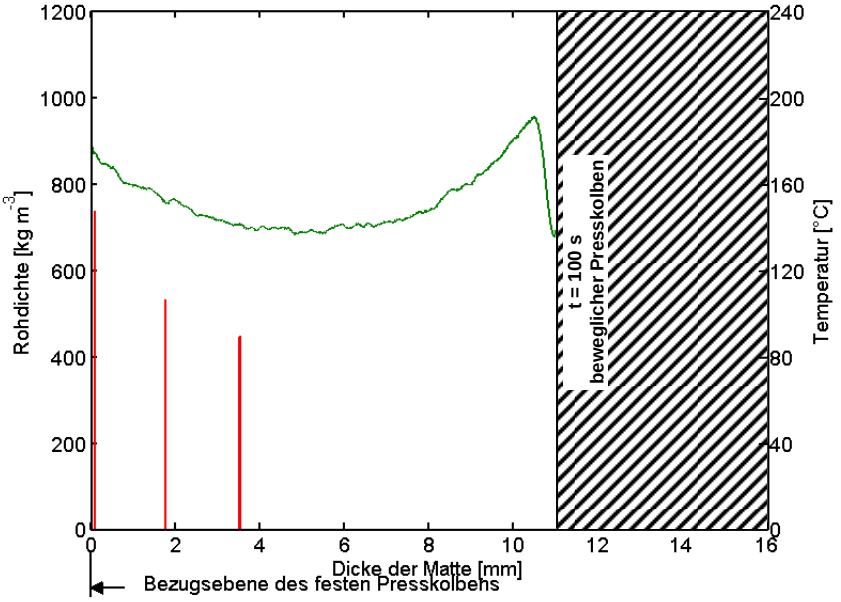


Abb. 4.22: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 100 s mit Temperaturmarkern an den Stellen 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke, $\vartheta_{0\,\%}$ = 146,9 °C, $\vartheta_{25\,\%}$ = 106,4 °C und $\vartheta_{50\,\%}$ = 89,5 °C; dargestellt als vertikale Striche. Schließzeit: 30 s, Presszeit: 240 s

Das Rohdichteprofil und das sich ausbildende Temperaturprofil zum Zeitpunkt t = 30,2 s wurde schon oben beschrieben. Zum nächsten Zeitpunkt bei t = 100 s hat sich das Rohdichteprofil deutlich verändert (siehe Abb. 4.22). Die bis dahin homogene Mittelschicht des Rohdichteprofils änderte ihre Gestalt in ein nahezu gleichmäßig ausgerundetes Profil. Das Rohdichtemaximum in der Deckschicht vor dem beweglichen Presskolben ist von 985 kg m^{-3} auf 955 kg m^{-3} gesunken und hat sich leicht um etwa 0,1 mm in Richtung Mattenmitte von 10,6 mm auf 10,5 mm verschoben. Die Mittelschichtdichte ist von 712 kg m^{-3} auf 685 kg m^{-3} gesunken. In einem Bereich von 0 bis 3,52 mm, das entspricht 0 % bis 32 % der Plattendicke, und in einem Bereich von 7,04 mm bis 10,3 mm, entsprechend 64 % bis 94 % Plattendicke, übersteigen die Dichtewerte zum Zeitpunkt t = 100 s die Werte des Dichteprofils direkt nach Erreichen der Solldicke zum Zeitpunkt t = 30,2 s. Der Bereich dazwischen ist durch eine Abnahme der Dichte gekennzeichnet. Die Dichtezunahme in den äußeren Schichten fällt in einen Bereich, in dem die Temperatur bei 25 % 106,4 °C erreicht hat. Die Partikel in diesem Bereich sind durch den kombinierten Wärme- und Stofftransport hydrothermisch plastifiziert. Die Dichtezunahme ist daher mutmaßlich sowohl auf eine Verdichtung der Fasermatte in diesem Bereich zurückzuführen als auch auf eine Verschiebung der Feuchte aus den äußeren Schichten in diese weiter innen liegenden Schichten. Im Bereich von 32 % bis 64 % Plattendicke, in dem eine Dichteabnahme zu beobachten ist, beträgt die Temperatur bei 50 % der Plattendicke 89,5 °C zum Zeitpunkt t =100 s, damit ist auch in diesem Bereich mit einer

beginnenden Plastifizierung zu rechnen. Es ist daher anzunehmen, dass ein wesentlicher Anteil der Rückdehnung der Mittelschicht zu einer Verringerung der Dichte im Platteninneren bereits zu frühen Zeitpunkten während der Haltephase erfolgt. Diese Vermutung wird durch den stark abfallenden spezifischen Pressdruck von 6,37 N mm^{-2} nach Erreichen der Solldistanz auf 0,38 N mm^{-2} zum Zeitpunkt t = 100 s gestützt. Heinemann (2004) gibt den notwendigen Pressdruck für eine Nachverdichtung von beleimten Fasern 60 s nach Pressbeginn mit etwas über 1,6 N mm^{-2} an, um eine Matte von 85 % auf 100 % der Sollrohdichte weiter zu verdichten. Den notwendigen Pressdruck bei Nachverdichtungsschritten untersuchte auch Meyer (2007) in Abhängigkeit von der Presszeit für beleimte Faser- und Spanpartikel. Nach einem deutlichen Abfall des Pressdrucks steigt dieser für einen Nachverdichtungsschritt ab einem Zeitpunkt von 30 bis 40 s nach Pressbeginn für 5 mm dicke Faserplatten wieder leicht an. Dieses Verhalten führt Meyer (2007) auf die beginnende Aushärtung des Klebstoffs in der Mittelschicht zurück. Diese Beobachtungen lassen auf eine Behinderung der Partikelmassenverschiebung über den Plattenquerschnitt mit zunehmender Presszeit schließen. Zu Beginn des Heißpressvorgangs ist die Behinderung der Partikelmassenbewegung durch die beginnende Aushärtung des Klebstoffes als gering einzuschätzen. Zu diesen Zeitpunkten dürfte eher die Versteifung der Partikelmatte durch die Austrocknung der Partikel eine Rolle spielen (Haas 1998). Die aus einer Rückdehnung einzelner Schichten in der Matte resultierenden Spannungen können nicht größer sein als der aktuelle Druck, der von der Heißpresse auf die Matte aufgeprägt wird. Damit wird der Pressdruck, den steifere Schichten auf bereits stärker plastifizierte Bereiche ausüben können, limitiert. Der aktuelle Pressdruck ist somit eine Größe, die auf die Möglichkeit von Partikelmassenverschiebungen über den Querschnitt zum Zeitpunkt t = 100 s hinweist. Daher dürften Partikelmasseverschiebungen nur noch eine untergeordnete Bedeutung für die Dichteänderungen in der Matte haben, da der Pressdruck zu diesem Zeitpunkt nur noch 0,38 N mm^{-2} beträgt.

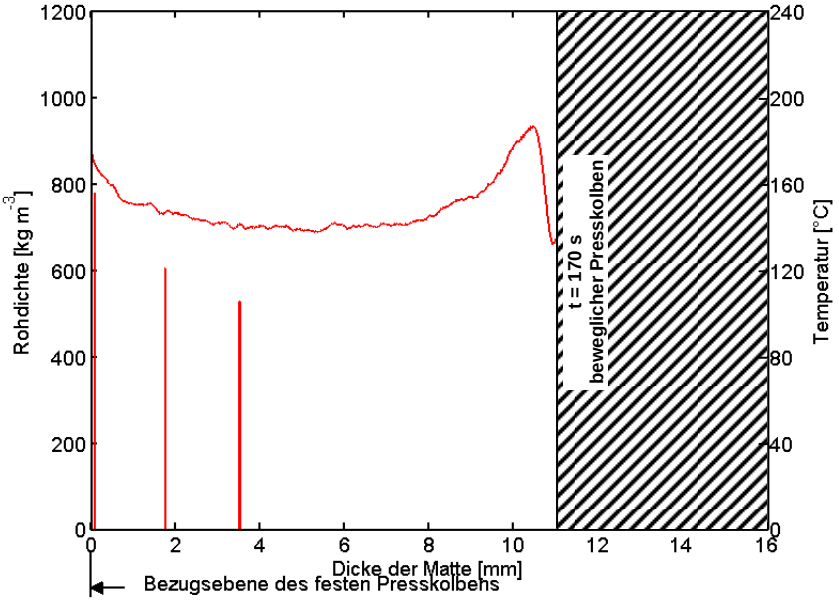


Abb. 4.23: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 170 s mit Temperaturmarkern an den Stellen 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke, $\vartheta_{0\,\%}$ = 155,5 °C, $\vartheta_{25\,\%}$ = 120,7 °C und $\vartheta_{50\,\%}$ = 105,4 °C; dargestellt als vertikale Striche. Schließzeit: 30 s, Presszeit: 240 s

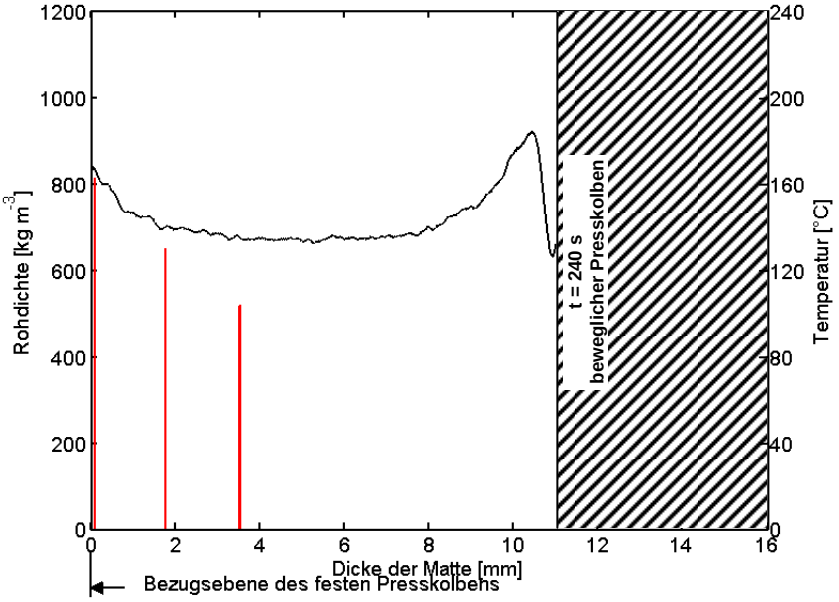


Abb. 4.24: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Ende der Presszeit beim Zeitpunkt t = 240 s mit Temperaturmarkern an den Stellen 0 %, 25 % und 50 % Plattendicke, $\vartheta_{0\,\%}$ = 162,4 °C, $\vartheta_{25\,\%}$ = 130,1 °C und $\vartheta_{50\,\%}$ = 103,9 °C; dargestellt als vertikale Striche. Schließzeit: 30 s, Presszeit: 240 s

Zum Zeitpunkt t = 170 s hat sich das Rohdichteprofil eher wieder an die Form wie nach 30,2 s angenähert; die höheren Dichten im Bereich der Übergangszonen zwischen Deckschicht und Mittelschicht, die noch zum Zeitpunkt t = 100 s vorlagen, sind wieder verschwunden. Die maximale Deckschichtdichte vor dem beweglichen Presskolben beträgt 932 kg m^{-3} bei

10,47 mm. Das Maximum ist damit um weitere um 23 kg m^{-3} gesunken, das entspricht 2,5 % bezogen auf die ursprüngliche Dichte und hat sich um zwei Pixel geringfügig weiter in Richtung Plattenmitte verschoben. Die Verschiebung in einer Größenordnung von zwei Pixeln kann aber auch auf eine Streuung der Messwerte zurückzuführen sein. Die Dichte in der Mittelschicht ist tendenziell konstant geblieben. Das Temperaturprofil hat sich weiter aufgebaut, die Mittelschicht bei 50 % weist eine Temperatur von 105,4 °C auf, die Zwischenschicht eine Temperatur von 120,7 °C und die Mattenoberfläche bei 0 % zeigt eine Temperatur von 155,5 °C. Die konstante Dichte in der Mittelschicht und die tendenziell sinkende Rohdichte in den Zwischenschichten verdeutlichen, dass keine Massenkonstanz in der Partikelmatte vorhanden ist. Das lässt auf eine zunehmende Austrocknung der Platte schließen, die auch durch das Verhalten der mittleren Rohdichte, wie in Abb. 4.13 dargestellt, begründet wird. Diese Annahme wird durch die weitere Entwicklung des Rohdichteprofils bis zum Zeitpunkt t = 240 s unterstützt. Die Form des Rohdichteprofils bleibt qualitativ gleich, insgesamt sinkt die Dichte jedoch weiter ab. Eine nahezu gleichmäßige Dichtereduzierung ist in der Mittelschicht zu beobachten: Dort verringert sich die Dichte auf 671 kg m^{-3}, das entspricht einer Reduzierung um 3,2 % in Relation zum Zeitpunkt bei t = 170 s. In den Deckschichten bleibt die Dichte nahezu gleich. Dies deutet insbesondere auf eine Austrocknung der Fasermatte besonders in der Mittelschicht hin. Die geringen Plattenabmessungen und der damit nur sehr geringe mögliche Dampfdruck, der sich, wie oben beschrieben, ausbilden kann, legen die Vermutung eines Feuchtigkeitsverlustes über die Schmalfläche der Platte und weiter über die schmalen Öffnungen in der Presshülse nahe.

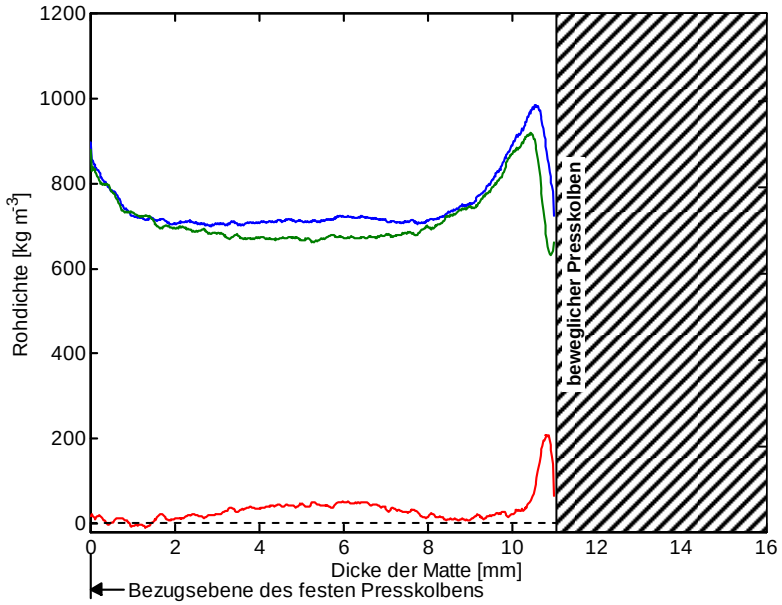


Abb. 4.25: Vergleich der Rohdichteprofile zu den Zeitpunkten t = 30,2 (blaue Linie) und t = 240 s (grüne Linie) und deren Differenz an der Probe 1.1 mit einer Verdichtungszeit von 30 s und einer Presszeit von 240 s

Bemerkenswert ist der Vergleich der Rohdichteprofile direkt nach Erreichen der Solldistanz bei t = 30,2 s und zum Ende des Pressvorgangs bei t = 240 s, wie in Abb. 4.25 dargestellt. Die Profile sind von der Form her sehr ähnlich. Das Rohdichteprofil zum Zeitpunkt t = 240 weist eine geringe Dichte von 717,6 kg m^{-3} im Vergleich zum Rohdichteprofil zum Zeitpunkt t = 30,2 s mit einer mittleren Rohdichte von 748,0 kg m^{-3} auf. Erstaunlich ist der nahezu gleiche Dichteverlauf in den Randbereichen der Platte (0 % bis 18 % bzw. 77 % bis 90 % der Mattendicke), in dem es nur eine sehr geringe Dichtedifferenz gibt (siehe Abb. 4.25). Diese Beobachtung legt die Annahme nahe, dass der ausgeprägte Dichtezuwachs zum Zeitpunkt t = 100 s in diesen Schichten der Matte mehr durch eine Feuchtebewegung von den äußeren Schichten in Richtung der Mattenmitte als durch eine Partikelmassenbewegung verursacht wird. Diese Vermutung wird durch das abgefallene Dichtemaximum von 985 kg m^{-3} bei t = 30,2 s auf 955 kg m^{-3} bei t = 100 s vor dem beweglichem Presskolben bestätigt. Dabei ist bei den Rohdichteprofilen zu den Zeitpunkten t = 30,2 s und t = 240 s zu berücksichtigen, dass die kaum vorhandene Dichtedifferenz in den Randbereichen (0 % bis 18 % und 77 % bis 90 % der Mattendicke) bei sonst nahezu gleichmäßiger Dichteabnahme über die Dicke der Matte auf eine Partikelmassenverschiebung zurückzuführen sein kann. Diese kann sich nur in sehr geringen Dichteänderungen widerspiegeln. Festzuhalten bleibt jedoch, dass bei dieser sehr ausgeprägten Dichtezunahme zum Zeitpunkt t =100 s in den Bereichen 0 % bis 32 % und

64 % bis 100 % die Ansammlung von Feuchte in diesen Bereichen deutlich zur Rohdichteerhöhung beiträgt. Dadurch ist natürlich ebenso die hydrothermische Plastifizierung der Fasern erhöht, sodass es parallel dazu zu einer Partikelmassenverschiebung durch weitere Verdichtung der Partikelmatte – besonders in diesen Bereichen – aufgrund der Rückdehnung von Schichten in der noch nahezu kalten Mittelschicht kommt. Diese äußert sich in der sehr geringen Dichtezunahme dieser Schichten. Die in Abb. 4.25 dargestellte Differenz zwischen den Rohdichteprofilen zum Zeitpunkt t = 30,2 s und t = 240 s kann vorsichtig als ein Anteil Feuchteansammlung in der Mitte der Matte interpretiert werden, wenn zu Beginn der Haltephase von einer noch fast homogenen Feuchteverteilung ausgegangen wird. Diese Annahme ist mit Sicherheit aus theoretischer Sicht des Heißpressvorgangs nicht absolut korrekt, gibt aber einen Anhaltspunkt für die Beurteilung der Rohdichteprofile direkt zu Beginn und zum Ende der Haltephase. Auffallend an der Differenz der Rohdichteprofile ist die sehr hohe Differenz der Werte vor dem beweglichen Presskolben. Diese ist auf das Absinken der Dichte und die leichte Verschiebung des Rohdichtemaximums in Richtung Mattenmitte von 10,6 mm auf 10,47 mm vor dem beweglichen Presskolben zurückzuführen und ist also eher ein Artefakt. Die einfache Differenzbildung der y-Werte berücksichtigt diese Veränderungen nicht.

4.2.4 Verallgemeinerte Modellvorstellung zur Masseverschiebungen während des Heißpressvorgangs

Die Änderung der Form des Rohdichteprofils während der Haltephase im Heißpressvorgang wird in den beiden vorherigen Abschnitten deutlich. Abschnitt 4.2.3.2 beschreibt explizit die Rohdichteprofilentwicklung: Die Presszeit wird in diskreten Zeitabständen, in denen sich das Rohdichteprofil deutlich geändert hat, berücksichtigt. Der Abschnitt 4.2.2 ist auf die Entwicklung einzelner Schichten über die Mattendicke im Rohdichteprofil über den Presszeitverlauf eingegangen. Dazu wird die Rohdichteentwicklung dieser einzelnen Schichten in der ρ-t-Ebene dargestellt. Dabei können nur einzelne diskrete Schichten berücksichtigt werden. Die Komplexität der Beschreibung und Diskussion der Rohdichteprofilentstehung liegt in der Dreidimensionalität aus einem räumlichen und einem zeitlichen Wert sowie dem Eigenschaftswert, der Rohdichte, da in den aus der Literatur bekannten Darstellungen immer nur zwei Werte kontinuierlich betrachtet werden und der dritte Wert in einzelnen Schritten, z. B. 2 %-, 25 %- und 50 %-Schicht, berücksichtigt wird. Eine klare Veranschaulichung der Dichteentwicklung in Abhängigkeit der Mattendicke und der Presszeit ist in einem zweidimensionalen Diagramm anschaulich nicht möglich.

Anhand von charakteristischen Dichtewerten einer Schicht wird in diesem Abschnitt eine Modellvorstellung zur Masseverschiebung während der Haltephase entwickelt. Dabei wird

auf Grundlage der Messwerte versucht, zonenweise die Masseverschiebungen in Partikelmasseverschiebung und Feuchtebewegung zu differenzieren. Die Partikelmassebewegung erfolgt durch nicht relaxierte Spannungen, die durch Rückdehnung andere hydrothermisch plastifizierte Schichten weiter verdichten können. Die Modellvorstellung der Siedewelle, die in Abb. 2.3 dargestellt ist, beschreibt die Feuchtebewegung in der Partikelmatte.

Die entwickelte Modellvorstellung basiert auf den Beschreibungen und der Diskussion der Dichteentwicklung während der Haltephase in den präsentierten und diskutierten Schichten von 2 %, 25 % und 50 % Mattendicke. In diesen Schichten fällt ein deutliches Maximum auf, das sich im Laufe der Haltephase mit zunehmender Presszeit immer weiter in die Mattenmitte verschiebt. In der 25 %- und der 50 %-Schicht ist zusätzlich ein Minimum zu erkennen (siehe Abb. 4.15). Die Entstehung dieser beiden charakteristischen Werte (Minimum und Maximum) der Rohdichteentwicklung im Presszeitverlauf wird auf der Basis der empirischen Erfahrung über rheologische und thermodynamische Prozesse während des Heißpressvorgangs erläutert. Diese Beobachtungen der Maxima und Minima in den verschiedenen Schichten im Verlauf der Presszeit beschreiben und diskutieren Wang und Winistorfer (2000b) ebenso bei ihren Versuchen.

Jede im Messdatenbild während der Haltephase erfasste Schicht zeigt dieses Verhalten. Die Probe 1.1 mit 11 mm Dicke wird während der Haltephase mit einer Auflösung von 526 Pixeln über die Dicke der Probe dargestellt. Je nach Lage der Schichten über dem Querschnitt der Matte, ob in Deck-, Zwischen- oder Mittelschicht, lassen sich die Massenzunahmen und Massenabnahmen mit rheologischen und thermodynamischen Vorgängen erklären. Als weitere bekannte Werte werden die gemessenen Temperaturwerte aus den einzelnen Schichten und die Druckwerte aus der Pressdruckkurve in die Beschreibung und Diskussion einbezogen.

Ein Algorithmus im Auswerteprogramm in Matlab® ermittelt die zeitliche Lage des Minimums und des Maximums für jede Schicht der Matte während der Haltephase im Heißpressvorgang. Im ersten Schritt wird das Minimum gesucht, anschließend wird in den folgenden Zeitschritten das Maximum für diese Schicht ermittelt. Weist eine Schicht kein Minimum und/oder Maximum auf, so wird der erste Zeitwert in der Haltephase ermittelt und mit dem Wert „NaN“ versehen. Daraus resultiert ein Wertepaar für diese Schicht, das nicht im Diagramm dargestellt wird. Die Werte der Minima und Maxima werden mit einem gleitenden Durchschnitt, der über zehn Werte in der Mattendicke arbeitet, geglättet. Eine Darstellung der Werte für die zeitliche Entwicklung der Minima und Maxima einer Schicht in der Haltephase für die Probe 1.1 ist in Abb. 4.26 wiedergegeben.

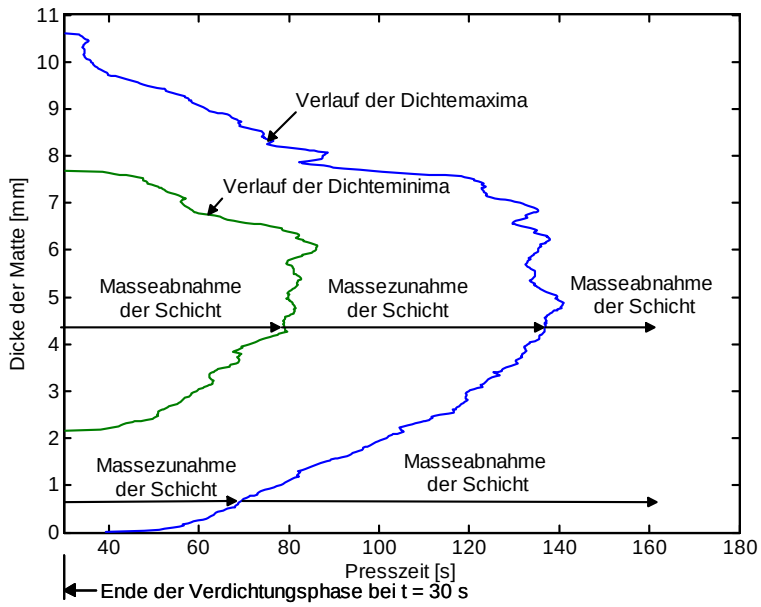


Abb. 4.26: Verlauf der minimalen und maximalen Rohdichtewerte der Schichten im Rohdichteprofil während der Haltephase. Es sind die Zonen der Massenzunahme und Massenabnahme gekennzeichnet

Die verschiedenen Schichten über die Mattendicke zeigen dabei mit zunehmender Presszeit zwei grundsätzliche Verhaltensweisen:

- Eine Schicht im äußeren Bereich der Matte weist gleich nach Beginn der Haltephase eine Massenzunahme auf. Dieses Phänomen lässt sich durch mehrere unterschiedliche über die Mattendicke ablaufende Prozesse beschreiben:

  Zum einen wandert die Feuchte aus den Partikeln mit zunehmender Presszeit von den äußeren Schichten der Matte in die inneren, es entsteht die Siedewelle. Das führt zu einer kontinuierlichen Verschiebung des Maximums aufgrund der Feuchtebewegung in der Matte von den äußeren Schichten der Matte in die inneren Schichten. Durch die zunehmende Austrocknung und die möglicherweise schon beginnende Aushärtung der Partikel zwischen Maximaverlauf und Mattenoberfläche werden die Partikel steifer und weniger verformbar. Zum anderen kommt es durch die hydrothermische Plastifizierung der Partikel im Bereich der Feuchteansammlung zu einer weiteren Verdichtung der Partikel, die durch sich ausdehnende Schichten im Matteninneren hervorgerufen werden. An diese Massenzunahme bis zum Erreichen des Maximums in der ρ-t-Ebene schließt sich eine kontinuierliche Masseabnahme bis zum Presszeitende an.
- Zu Beginn der Haltephase nimmt die Dichte einer Schicht im Bereich der Mittelschicht ab, obwohl die gesamte Matte in der Verdichtungsphase komprimiert wurde. Bis zu dem Zeitpunkt, in dem das Minimum dieser Schicht erreicht ist, ist die

Masseabnahme mit Rückdehnung dieser und aller weiteren im Matteninneren liegenden Schichten aufgrund von Spannungsrelaxation zu erklären. Der anschließende Bereich der Massenzunahme ist einerseits durch das oben schon beschriebene Verhalten der Feuchtebewegung in das Matteninnere zu begründen und andererseits durch Rückdehnung weiter innen liegender Schichten, wenn diese noch eine Massenabnahme aufweisen. Zeigen die inneren Schichten keine Massenabnahme mehr, so ist im Wesentlichen von einer Feuchtebewegung auszugehen. Nach dem Maximum kommt es mit zunehmender Presszeit zu einer kontinuierlichen Feuchteabnahme in diesen Schichten. Die atro Partikelmasse über den gesamten Querschnitt der Matte muss nach dem Massenerhaltungssatz konstant bleiben. So kommt als größter Faktor der Massebewegung nur die Partikelfeuchte in Betracht. Die Temperatur in der 50 %-Schicht ist zum Zeitpunkt des Maximums größer als 100 °C, sodass sich entweder ein Dampfdruck aufbauen kann oder der Dampf durch die kleine Probengröße über den Rand entweicht. Die zweite Annahme hat eine Massenabnahme in den Schichten im Matteninneren zur Folge.

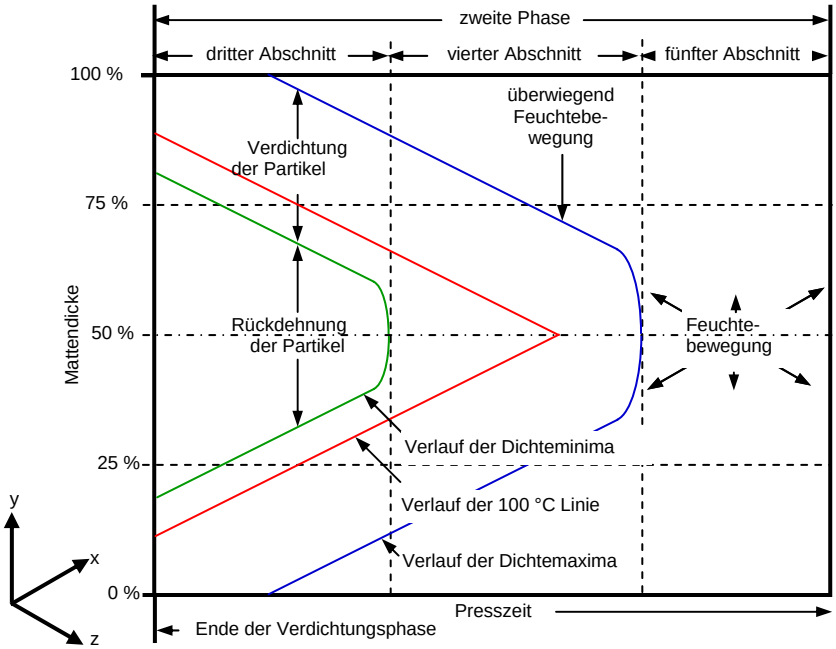


Abb. 4.27: Schematisierte Maxima- und Minimaverläufe aller Schichten im Rohdichteprofil während der Haltephase Bewertung der Massebewegung über den Querschnitt, besonders in y-Richtung der Partikelmatte in Bereiche mit Partikel- und Feuchtebewegung. Zusätzlich erfolgt die Einteilung in die Abschnitte des Heißpressvorgangs nach Wang und Winistorfer (2000b)

Mit diesen beiden Erklärungen lassen sich die Massenveränderungen in einer Schicht über den Mattenquerschnitt nach Ende der Verdichtungsphase mit zunehmender Presszeit schlüssig erklären. Eine schematische Darstellung der Verläufe von Minima und Maxima über der Presszeit nach Ende der Verdichtungsphase zeigt Abb. 4.27.
Die zeitlichen Entwicklungen des Minimums und des Maximums einer Schicht werden idealisiert als Gerade dargestellt. Vor dem Erreichen der Mittelschicht geht diese kontinuierlich in einen elliptischen Bogen über und schließt sich in der Symmetrieachse der Partikelmatte. Zusätzlich ist in der Abbildung das Erreichen von 100 °C in einer Schicht schematisch dargestellt, das aus Abb. 4.14 abgeleitet wurde. Diese Linie ist jedoch experimentell nur schwach abgesichert, da sie nur auf zwei Punkten über der halben Mattendicke basiert, nämlich je ein Wert in der 25 %- und der 50 %-Schicht. Trotzdem soll an dieser Stelle nicht auf eine mögliche schematisierte Darstellung der Temperaturentwicklung verzichtet werden. Auch wird der Verlauf der 100 °C-Linie als Gerade angenommen. Die von Thömen (2000) errechneten Temperaturverläufe in verschiedenen, nahezu gleichmäßig verteilten Schichten über dem Mattenquerschnitt unterstützen diese Annahme. Diese Schichten weisen einen annähernd einheitlichen zeitlichen Abstand bei 100 °C nach Erreichen der Solldistanz der Matte auf. Aus der Darstellung der Minima und Maxima in der Dichteentwicklung aller Schichten in Abb. 4.26 kann ein nahezu paralleler Verlauf der Linien abgelesen werden.

Die Abbildungen 4.26 und 4.27 wurden aus einer zeitlichen Betrachtung der einzelnen Schichten der Matte entwickelt. Eine Aussage über die wesentlichen Massenbewegungen in der Partikelmatte über den Mattenquerschnitt ist jedoch besser durch eine örtliche Betrachtung entlang der y-Achse in Abb. 4.27 möglich. Dabei kann eine teilweise Differenzierung in Partikelmassenbewegung und Feuchtebewegung sowie deren Auswirkung auf das Rohdichteprofil erfolgen. Die Feuchtebewegung in Richtung der y-Achse ist als Indiz für die Siedewelle zu bewerten.
Dabei sind die folgenden Zonen über die Dicke (y-Achse) in der Partikelmatte zu unterscheiden. Die Zonen werden von innen nach außen beschrieben:

- Die Zone in der Mattenmitte, die vom Verlauf der Minimalinie eingeschlossen wird. Dort kommt es zu einer Massenabnahme: Dies kann nur mit einer Rückdehnung der Partikel durch die Relaxation der gespeicherten Spannungen aus der Verdichtungsphase erklärt werden. Eine Feuchtebewegung kann hier fast vollständig ausgeschlossen werden, da es keinen nennenswerten Temperaturgradienten gibt, der die Triebkraft

für die Feuchtebewegung darstellten würde. Dies wird aus den Abbildungen 4.14 und 4.21 ersichtlich

- Zwischen der Minima- und Maximalinie bildet sich eine Zone aus, in der es zur Massenzunahme kommt. Diese Zone ist zu Beginn der Haltephase durch die oben erläuterte Zone der Partikelrückdehnung getrennt. Sie kommt auf beiden Seiten der Matte vor. In dieser liegen zwei mögliche sich überlagernde Mechanismen der Massebewegung vor. Zum einen kommt es durch die Feuchtebewegung von den äußeren in die inneren Schichten zu einer Massenzunahme der Schichten der Partikelmatte, die in dieser Zone liegen. Die Lage der 100 °C-Linie in dieser Zone deutet auf die Kondensation von Wasserdampf in der Zone vor der 100 °C-Linie hin, die zu dieser Massenzunahme führt. Zum anderen erfolgt die Verdichtung der Partikel aufgrund der hydrothermischen Plastifizierung durch die Feuchtebewegung. Der nötige Druck, um diese Schichten zu verdichten, kommt aus der Zone im Inneren der Matte, in der die Spannungen noch nicht abgebaut sind. Der Druck kann aber den von der Heißpresse aufgeprägten Pressdruck nicht überschreiten. Somit kann der Pressdruck der Presse zu diesem Zeitpunkt des Heißpressvorgangs als maximaler Pressdruck, den die Zone der inneren Schichten aufbringen kann, angesehen werden. Dieser Druck entspricht aber auch dem minimalen Pressdruck, um die Zone zwischen den Minima und Maxima weiter verdichten zu können. Sind die beiden getrennten Zonen der Massenzunahme nach dem Ende der Masseabnahme in der Mattenmitte vereinigt, kommt es im Wesentlichen zu einer Masseverschiebung durch eine Feuchtebewegung. Eine weitere Partikelmassebewegung ist zwar nicht ganz zu negieren, dürfte aber nur eine untergeordnete Rolle spielen. Für diese Annahme spricht auch der zu diesem Zeitpunkt schon sehr geringe Pressdruck, der bei der untersuchten Probe 1.1 bei 90 s lediglich 0,43 N mm^{-2} beträgt.
- Von der Mattenoberfläche bis zum Verlauf der Maximalinie bildet sich eine Zone, in der es zur Massenabnahme kommt. Diese lässt sich ebenfalls in zwei Mechanismen unterteilen. Einerseits wandert die Feuchtigkeit in den Partikeln aufgrund des Temperaturgradienten, der in diesen Schichten in der Matte vorliegt, von der Mattenoberfläche in die Mattenmitte. Das führt in der weiter innen liegenden Zone zu einer Massenzunahme. Andererseits können sich die Partikel in diesen Zonen ausdehnen. Gegen einen hohen Anteil der Partikelausdehnung an der Massenabnahme in diesem Bereich sprechen jedoch mehrere Gründe: Durch die theoretisch begründbare und schon von Rackwitz (1954) nachgewiesene Partikelaustrocknung kommt es zu einer Versteifung

der Partikel. Ebenso wirkt die beginnende Klebharzaushärtung durch zunehmende Fixierung der Partikel in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix einer umfangreichen Partikelmassenbewegung entgegen. Heinemann (2004) hat die Klebharzaushärtung beschrieben und quantifiziert. Diese genannten Effekte verstärken sich noch mit zunehmender Presszeit. Für eine Partikelmassenbewegung sprechen die hohe Dichte in diesem Bereich der Partikelmatte sowie der bekannte *spring-back-Effekt* der Matte nach Verlassen der Presse. Trotz ausreichender Leimaushärtung zur Fixierung der Partikel in der Holz-Partikel-Klebstoff-Matrix federt die Matte auf einen Dickenwert zurück, der über der Pressendistanz am Ende der Presse liegt. Nach dem Dichtemaximum in der 50 %-Schicht kommt es zu einer Massenabnahme über den gesamten Querschnitt der Matte. Diese ist auf eine Feuchtebewegung durch Austrocknung der gesamten Matte zurückzuführen.

Die drei Zonen, die hier vorgestellt worden sind, lassen sich zeitlich auch in die Abschnitte einteilen, die Wang und Winistorfer (2000b) in ihrer Modellvorstellung aufgezeigt haben. Diese Bereiche sind in Abb. 4.27 eingefügt.

Der dritte Abschnitt der Modellvorstellung von Wang und Winistorfer (2000b) reicht zeitlich vom Ende der Verdichtungsphase bis zum Zeitpunkt, zu dem der Verlauf der Minima die Mittelschicht bei 50 % der Mattendicke schneidet. In diesem Bereich nehmen Wang und Winistorfer (2000b) eine Rückdehnung der inneren und eine Verdichtung der äußeren Schichten an. Nur in dem Bereich, der von den Minima eingeschlossen wird, ist nachweislich eine Rückdehnung der inneren Schichten vorhanden. Diese Dehnung lässt sich auf reine Partikelbewegung zurückführen. Die Schichten außerhalb der Verlaufslinie der Minima werden hydrothermisch plastifiziert und weiter verdichtet. In diesen Bereichen liegen sowohl eine Partikelmasse- wie auch eine Feuchtebewegung vor. Zum Ende des dritten Abschnitts liegt zusätzlich ein äußerer Bereich der Partikelmatte vor, in dem es zu einer Massenabnahme kommt. Eine Verdichtung dieser Schichten kann also ausgeschlossen werden. Es kann vielmehr in diesen Schichten zu einer leichten Ausdehnung der Partikel kommen, die aber eher als gering einzuschätzen ist.

Der vierte Abschnitt, den Wang und Winistorfer (2000b) definieren, in dem es in den äußeren Zonen zu einer Dehnung der Partikel kommt und im Inneren zu einer weiteren Verdichtung, lässt sich auch in der hier vorgestellten Modellvorstellung wiederfinden. Dieser Abschnitt reicht von der maximalen zeitlichen Ausdehnung der Minimalinie bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Verlauf der Maxima die Mittellinie schneidet. Mit Sicherheit liegt eine

Spannungsverteilung vor, wie diese von Wang und Winistorfer (2000b) vorgeschlagen wird. Sie leiten diese aus ihren Beobachtungen zur Massenverschiebung zwischen einzelnen Schichten in der Partikelmatte ab. Ein Großteil der Massenverschiebung in diesem Bereich ist jedoch auf Feuchtebewegung von den äußeren in die inneren Schichten der Matte zurückzuführen. Die äußeren Schichten, die sich zurückdehnen können und dabei die inneren Schichten komprimieren, werden zunehmend an der Ausdehnung gehindert. Das ergibt sich aus der nachweislichen Austrocknung der Partikel, die die Partikel steifer macht und aus der beginnenden Aushärtung des Klebstoffes. Der *spring-back-Effekt* zeigt jedoch auch, dass immer noch Rückstellkräfte in der nahezu ausgehärteten Holzpartikel-Klebstoff-Matrix vorhanden sind.

Meyer (2007) stellt Versuche an 5 mm dicken Faserplatten vor, die zu verschieden Zeitpunkten während des Pressvorgangs nachverdichtet wurden. Der dafür notwendige Pressdruck weist bei ca. 40 s nach Beginn des Heißpressvorgangs ein Minimum auf. Wird ein annähernd gleicher Presszeitfaktor auch für die hier durchgeführten Versuche an Fasermatten angenommen, so kann das Minimum für den Pressdruck bei den in dieser Arbeit hergestellten Platten mit 12 mm Dicke, das entspricht dem 2,4-Fachen der oben genannten 5 mm, bei 100 s geschätzt werden. Die maximale Plastifizierung der Mittelschicht und das Minimum für den Pressdruck in einem Nachverdichtungsschritt fallen damit in den vierten Abschnitt im Heißpressvorgang. Meyer (2007) bestimmt den notwendigen Pressdruck für Nachverdichtungsschritte in diesem Zeitabschnitt auf minimal 2 N mm^{-2}. Dieser Druck kann als Größenordnung für die Verdichtung der mittleren Schichten durch die Rückdehnung der äußeren Schichten herangezogen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass es bei einem gemessenen Pressdruck von durchschnittlich 0,5 N mm^{-2} in dieser Zone zu keiner wesentlichen Verdichtung in der Mittelschicht der Partikelmatte mehr kommen kann. Daher sind die Massenveränderungen – in den äußeren Schichten eine Massenabnahme und in den inneren Schichten eine Massenzunahme – im Wesentlichen auf eine Feuchtebewegung zurückzuführen.

Der fünfte Abschnitt, den Wang und Winistorfer (2000b) im Heißpressvorgang definieren, ist ausschließlich durch Rückstellkräfte, die in der Matte vorliegen, gekennzeichnet. In der Modellvorstellung in Abb. 4.27 ist dieser Abschnitt definiert, nachdem die Maximalinie die Mattenmitte bei 50 % schneidet, und reicht bis zum Ende des Heißpressvorgangs. Die Masseabnahme über den gesamten Querschnitt lässt sich ausschließlich durch einen Feuchteverlust der Matte begründen. Die Temperatur in der Mitte der Matte liegt über 100 °C, sodass es zur Dampfbildung und dessen Migration zu den Plattenkanten kommt. In großformatigen Laborplatten bzw. unter industriellen Bedingungen würde sich zu diesem Zeitpunkt des

Heißpressvorgangs ein Dampfdruck aufbauen. Der Dampfdruck würde die Triebkraft für die Feuchtewanderung zu den Plattenkanten noch verstärken. Zusätzlich kommt es noch zu einer Dampfdiffusion vom Matteninneren in die sehr trockenen Schichten an der Mattenoberfläche aufgrund des vorhandenen Partialdruckunterschiedes. Die Feuchtebewegung ist in Abb. 4.27 durch die langen Pfeile in der Flächenebene der Partikelmatte dargestellt. Die kurzen Pfeile markieren die Richtung der Dampfdiffusion senkrecht zur Mattenebene. Eine Massenverschiebung durch Partikelmassenbewegung ist, wenn überhaupt, nur noch marginal vorhanden und hat eine untergeordnete Bedeutung. Vielmehr wird in diesem Abschnitt die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix soweit ausgehärtet, dass diese den noch in der Matte nach Ende des Heißpressvorgangs vorhandenen Rückstellkräften sowie dem Dampfdruck standhalten kann. Der Dampfdruck kann sich jedoch nur in großformatigen Laborplatten und unter industriellen Bedingungen ausbilden.

Die hier vorgestellte Modellvorstellung basiert auf der kontinuierlichen zeitlichen und örtlichen Beschreibung der Dichteentwicklung in den Schichten der Partikelmatte während der Haltephase. Die dabei beobachteten charakteristischen zeitlichen Veränderungen in einer Schicht werden in den beiden charakteristischen Werten des Minimums und Maximums für eine Schicht zusammengefasst. Eine standardisierte Beschreibung der Massenveränderung in einer Schicht im Zeitverlauf der Haltephase des Pressvorgangs wird aufgezeigt. Das Verhalten aller anderen Schichten sowie die weiteren Messwerte aus Temperatur und Pressdruck werden dabei mit einbezogen. Aus dieser zeitlichen Betrachtungsweise wird die örtliche Masseverschiebung im Rohdichteprofil abgeleitet, indem Zonen gleichen Verhaltens des Partikelmaterials in den einzelnen Schichten zusammengefasst werden. Aus der Summe der dargestellten Messwerte lässt sich teilweise auf die reine Feuchte- und reine Partikelmassenbewegungen schließen. Zusätzlich werden die Abschnitte des Heißpressvorgangs, die Wang und Winistorfer (2000b) definieren, zeitlich zugeordnet.

4.2.5 Diskussion der Rohdichteprofilentwicklung während des Heißpressvorgangs

Aus der hier dargestellten Entwicklung des Rohdichteprofils während der Verdichtungs- und Haltephase und der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Mattenschichten kann die Entwicklung des Rohdichteprofils, wie diese Wang und Winistorfer (2000b) beschreiben (siehe Abb. 2.12), im Grundsatz bestätigt und weiterentwickelt werden. Aus den Beobachtungen besonders der Dichteentwicklung in den verschiedenen Schichten während der Haltephase wird eine Modellvorstellung entwickelt. Diese erlaubt es, teilweise die Partikel- und Feuchtebewegungen in der Matte während der Haltephase zu differenzieren. Die Einteilung der Abschnitte

während der Haltephase, wie diese Wang und Winistorfer (2000b) vornahmen, kann auch in diese Modellvorstellung eingebunden werden. Es ergeben sich jedoch einige Abweichungen von der Modellvorstellung von Wang und Winistorfer (2000b) mit den hier präsentierten Ergebnissen, die im Folgenden erläutert werden:

Mit dem ersten Kontakt der Partikelmatte mit der heißen Pressplatte während des Schließvorganges der Presse erfolgt wegen der raschen Erwärmung sofort eine höhere Verdichtung der oberflächennahen Schichten. Eine Phase der gleichmäßigen Verdichtung der Partikelmatte über den gesamten Mattenquerschnitt, wie von Wang und Winistorfer (2000b) beschrieben, wurde in den hier vorgestellten Versuchen nicht beobachtet. Mit dem vollständigen Kontakt der Partikelmatte an den Pressplatten und dem damit verbundenem Anstieg des Pressdrucks erfolgt sofort eine ungleichmäßige Verdichtung über den Mattenquerschnitt und eine deutliche Ausbildung der Deckschichten. Ein weiter Bereich in der Mitte der Matte wird homogen verdichtet.

Nach Erreichen der Solldicke sind die Deckschichten im Wesentlichen ausgeprägt, besonders ist hier der Dichteabfall an den Mattenoberflächen zu erwähnen. Dieser beginnt sich mutmaßlich schon während eines frühen Zeitpunktes in der Verdichtungsphase zu entwickeln. Wang und Winistorfer (2000b) gehen von einer deutlicheren Weiterentwicklung des Rohdichteprofils während der Haltephase aus. Tendenziell entwickelt sich das Rohdichteprofil auch während der Haltephase weiter. Diese Entwicklung ist jedoch nicht so ausgeprägt, wie von Wang und Winistorfer (2000b) im Übergang von Abschnitt drei zu Abschnitt vier in Abb. 2.12 dargestellt. Bestätigt werden kann die Zone in der Mattenmitte mit einer relativ homogenen Dichte in Abschnitt drei (siehe Abb. 2.12) direkt nach Erreichen der Solldistanz. In dieser Schicht wird eine Rückdehnung der Schichten beobachtet. Die Annahme von Wang und Winistorfer (2000b), dass der Abschnitt drei bei der größten Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Mittelschicht beendet ist, kann so klar, wie Wang und Winistorfer (2000b) es formuliert haben, nicht gehalten werden. Die tendenzielle Aussage einer großen Temperaturdifferenz zwischen Mattenoberfläche und Mattenmitte wird jedoch bestätigt.

Eine so umfangreiche Änderung des Rohdichteprofils in Abschnitt vier, wie von Wang und Winistorfer (2000b) dargestellt (siehe Abb. 2.12), wird nicht beobachtet. Vielmehr wird deutlich, dass es nach der abgeschlossenen Feuchtemigration in die Mittelschicht zu einer sehr ähnlichen Ausbildung des Rohdichteprofils zum Ende des Pressvorgangs kommt, wie es zu Beginn der Haltephase schon gegeben war. Zu berücksichtigen ist dabei das Feuchteprofil, das die Messdaten überlagert. Aufgrund der in Abschnitt 4.1 dargestellten nahezu gleichen Massenschwächungskoeffizienten von absolut trockener Holzsubstanz und Wasser wird die

Feuchtebewegung in den Messdatenbildern mit erfasst. Nur durch zusätzliche Kenntnis weiterer Messdaten wie der Temperatur in verschiedenen Schichten der Matte kann in der Bewertung der Ergebnisse vorsichtig eine Differenzierung der Dichtebewegungen in der Matte vorgenommen werden. Eine teilweise Aufteilung zwischen Partikelmassenbewegung und Feuchtebewegung erscheint möglich.

Eine Möglichkeit dazu bietet die Modellvorstellung in Abb. 4.27. In schematisierter Form wird die schichtweise Entwicklung der Rohdichte mit der Presszeit in der Haltephase durch die beiden charakteristischen Werte des Minimums und des Maximums der Rohdichte einer Schicht wiedergegeben und deren zeitlicher Verlauf dargestellt. Zusätzlich bietet die 100 °C-Linie eine weitere Differenzierungsmöglichkeit für Dichteentwicklungen.

Erstmalig kann mit der gewählten Auswertungsmethode eine Zone in der Mattenmitte durch den Verlauf der Minimalinie eingegrenzt werden, in der es nachweislich ausschließlich zur Partikelrückdehnung aufgrund von Spannungsrelaxation kommt. Feuchteeffekte, die die in dieser Zone auftretende Massenabnahme überlagern, können so gut wie ausgeschlossen werden.

In der Zone zwischen dem zeitlichen Verlauf der Minima und Maxima kommt es zu einer Massenzunahme. Diese kann schlüssig auf eine Feuchtemigration aus den äußeren Schichten der Matten in diese Schichten zwischen Minima und Maxima sowie auf eine weitere nachweisliche Partikelverdichtung zurückgeführt werden. Die Lage der 100 °C-Linie in dieser Zone bestätigt sowohl die Feuchtemigration als auch die hydrothermische Plastifizierung der Partikel, die eine weitere Verdichtung der Partikel ermöglicht. In dieser Zone liegt auch die Siedewelle (siehe Abschnitt 2.1.1 und Abb. 2.3). Somit kann erstmalig nach der Einführung der Modellvorstellung der Siedewelle durch Gefahrt (1977) die zeitliche und örtliche Entwicklung der Siedewelle durch die Dichteveränderungen aufgrund von Massenverschiebungen in die Zone zwischen Minima- und Maximaverlauf eingegrenzt werden. Die Dichteveränderung ist jedoch klar als eine Überlagerung von Feuchtebewegung, die die Siedewelle darstellt, und Partikelmassebewegung zu interpretieren. Unter Berücksichtigung der 100 °C-Linie kann der Bereich in y-Richtung um die 100 °C-Linie als der Bereich der Siedewelle angesehen werden. Hier kommt es zu einer Feuchteakkumulation durch Kondensation an den davor noch relativ kälteren Partikeln, sodass diese relativ schnell auf 100 °C durch die hohe Kondensationswärme des Wassers aufgewärmt werden. Die weitere Erwärmung der Schichten von der 100 °C-Linie zur Mattenoberfläche in der Partikelmatte erfolgt eher konduktiv. Das ist durch den geringeren Wärmestrom und die notwendige Verdampfungsenergie für die zum Teil als freies und gebundenes Wasser vorliegende Feuchte ein eher langsamer Prozess.

Thömen (2000) zeigt dieses durch Simulationsberechnungen, in denen der spezifische Wärmestrom in einen konvektiven und einen konduktiven Anteil aufgeteilt wird (siehe Abb. 2.2). Das bedingt auch die Lage der 100 °C-Linie sehr dicht am Verlauf der Dichteminima in den Schichten der Matte.

Der Beginn des Feuchteverlustes über alle Schichten der Matte, der als Austrocknen der Matten zu interpretieren ist, kann erstmals mit dem Zeitpunkt, in dem das Dichtemaximum in der 50 %-Schicht erreicht ist, zeitlich bestimmt werden. In diesem Bereich herrscht mutmaßlich eine Feuchtemigration zu den Kanten der Matte, über die die Feuchte entweichen kann. Die Feuchtemigration führt zu einer Massenabnahme aller Schichten, was sich auch in Abb. 4.13 zeigt. Ein geringer Diffusionsanteil in die äußeren Schichten der Matte aufgrund von Partialdruckunterschieden ist zu berücksichtigen (Thömen 2000).

Die in Abschnitt 4.2.4 präsentierte Modellvorstellung sichert damit das bekannte Wissen über die thermodynamischen und rheologischen Abläufe im Heißpressvorgang während der Haltephase ab. Dazu wird eine integrierte Darstellung von charakteristischen Werten aus der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Schichten im Rohdichteprofil, dem Temperaturverlauf und dem Pressdruck angewendet. Eine Erweiterung dieser Modellvorstellung auf die Verdichtungsphase ist wünschenswert. Durch die Überlagerung der Feuchtemigration und der deutlich sichtbaren Verdichtung der Partikel ist es derzeit noch nicht möglich, die Feuchtebewegung aus den vorhandenen Messwerten zu isolieren. Bei einer Erweiterung der Modellvorstellung ist auch zu prüfen, ob die hier in einem ersten Ansatz in weiten Bereichen als linear angenommenen Verläufe der Minima- und Maximalinien auch die linearen Gesetzmäßigkeiten gehorchen oder infolge der nicht homogenen Dichte über die Dicke der Matte einen anderen funktionellen Zusammenhang aufweisen. Das schon in frühen Phasen des Heißpressvorgangs ausgeprägte Dichteprofil verändert durch die lokalen Dichteunterschiede die Temperaturleitfähigkeit und Permeabilität. Diese beeinflussen wesentlich die Temperatur- und Feuchteentwicklung in der Partikelmatte (Haas 1998; Haas 2000; Thömen 2000; Hanvongjirawat 2003).

4.3 Systematische Untersuchungen zur Rohdichteprofilentwicklung

Aus den Erfahrungen, die in Abschnitt 4.2 gewonnen wurden, leiten sich Verbesserungen am Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung ab mit dem Ziel, systematisch verfahrenstechnische Einflussparameter auf die Rohdichteprofilentwicklung untersuchen zu können. Als verfahrenstechnische Parameter wurden die Schließgeschwindigkeit, das Erstverdichtungsniveau für Nachverdichtungsschritte und der Zeitpunkt der Nachverdichtung variiert. Nachverdichtungsschritte haben industriell eine hohe Bedeutung für die Herstellung von MDF-Platten, da diese erst zum Ende des Heißpressvorgangs auf die Solldicke kalibriert werden. Vor der Kalibrierung wird die Matte nicht so stark verdichtet, um die Permeabilität in dieser hoch zu halten, damit entstehender Dampf besser aus der Mattenmitte entweichen kann, um das Risiko von Dampfplatzern zu verringern.

Die Modifizierungen am Versuchsaufbau erfolgten dahin gehend, dass die Ausrichtung der Verdichtungseinheit auf dem Röntgenstrahl verbessert und der Wegaufnehmer in der Verdichtungseinheit nachjustiert wurde. Die Ausrichtung des Röntgenstrahls ermöglichte eine Erfassung und Auswertung von 1001 Pixeln der 1024 Pixel der Zeilenkamera. Das ist ein Gewinn von 70 Pixeln an Messbreite gegenüber den orientierenden Versuchen, was 1,46 mm entspricht. In der Verdichtungsphase stellt das einen wertvollen Datengewinn dar. Der feste Presskolben lag bei der Justierung der Verdichtungseinheit ein bis zwei Pixel im erfassten Röntgenstrahl. Mögliche Dehnungen der Kraftmessdose, die, wie in Abschnitt 4.2.3.1 erläutert, zum Herausdrücken der Oberfläche der Matte am festen Presskolben aus dem Messbereich der Zeilenkamera führen können, sollen so mit erfasst werden. Schon bei der Einrichtung der Verdichtungseinheit auf den Röntgenstrahl wurden vermutlich Grenzflächeneffekte des Röntgenstrahls am festen Presskolben beobachtet. Eine wiederholte Justierung des Wegaufnehmers mit Parallelendmaßen bestätigte die Kalibrierung des Wegaufnehmers. Die Kombination des Messverstärkers in der MTS-Steuerung mit dem Wegaufnehmer in der Verdichtungseinheit zeigte eine bisher ungeklärte, spontane Veränderung in der Kalibrierung beim Hochfahren des Systems, die bei einem Neustart der MTS-Steuerung wieder verschwunden war. Dieser Effekt wurde durch die Kontrolle der Messwerte in den Endlagen des Wegaufnehmers berücksichtigt und gegebenenfalls das System nochmals neu gestartet.

Die Verfeinerungen in der Versuchsdurchführung erfolgten durch eine noch präzisere Vorverdichtung des Fasermaterials und durch eine bessere Positionierung der Fasern in der Presshülse vor dem Heißpressvorgang. Damit konnte ein nahezu gleichmäßiger Kontakt der Presskolben zu Beginn der Messung erreicht werden.

4.3.1 Verfahrensparameter und Versuchsumfang

Die Wahl der Verfahrensparameter erfolgte in Anlehnung an die Arbeiten von Ruf (2003) und Thömen und Ruf (2008), die an ausgewählten Parametern systematisch den Einfluss des Pressprogramms, das einen Nachverdichtungsschritt enthielt, auf das Rohdichteprofil untersuchten. Die Orientierung an den vorgenannten Arbeiten erscheint sinnvoll, da sich die Parametervariation von Ruf (2003) als günstig erwiesen hat und mit den hier durchgeführten Versuchen nicht nur ein Rohdichteprofil zum Ende des Pressvorgangs, sondern die gesamte Entwicklung des Rohdichteprofils ausgewertet werden konnte. Zudem steht mit den Ergebnissen der Arbeiten von Ruf (2003) und Thömen und Ruf (2008) eine gute Vergleichsbasis für die Diskussion der Ergebnisse zur Verfügung.

Die Variation der Pressparameter geschah wie folgt:

- Verdichtungsgeschwindigkeit im Erstverdichtungsschritt: 10 s, 20 s, 30 s von 60 mm auf Solldicke von 12 mm
- Erstverdichtungsniveaus: 100 %, 110 %, 120 % der Solldicke von 12 mm
- Dauer der ersten Haltephase: 120 s, 140 s, 160 s
- Verdichtungsgeschwindigkeit im Nachverdichtungsschritt: 2,1 s für 10 % Solldicke

Die Gesamtdauer des Heißpressvorgangs betrug bei allen Versuchen unverändert 240 s. Die geringe Schließzeit von 10 s soll die Verhältnisse von hohen Verdichtungsgeschwindigkeiten im Einlaufmaul einer kontinuierlichen Presse widerspiegeln. Für die Verdichtungsgeschwindigkeit im Erstverdichtungsschritt wird synonym auch der Begriff Schließzeit bzw. Verdichtungszeit verwendet. Das ist hier möglich, da die Pressendistanz auf Solldicke, die während des Schließvorgangs überwunden werden muss, immer konstant ist und die Verdichtungseinheit über den Weg als Führungsgröße geregelt wurde. Die Matte wurde vor dem Heißpressvorgang auf 60 mm vorverdichtet. Die sich daraus ergebenden Pressdiagramme zeigt Abb. 4.28.

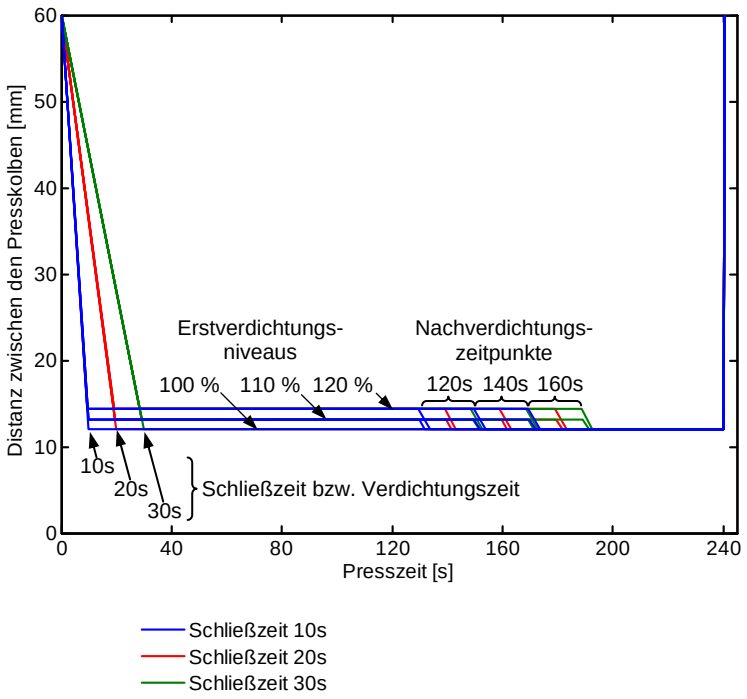


Abb. 4.28: Pressdiagramme für die systematischen Versuche. Schließzeiten 10 s, 20 s, 30 s, Erstverdichtungsniveaus: 100 %, 110 %, 120 %, Nachverdichtungszeitpunkte: 120 s, 140 s, 160 s

Die Presstemperatur betrug für alle Versuche konstant 180 °C. Eine Kombination aller Versuchsparameter miteinander führt zu 21 Versuchen. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt. Im dritten Versuchsdurchlauf wurden die Proben mit Thermoelementen in den Ebenen 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %-Mattendicke versehen. Dabei stellte sich heraus, dass die Thermoelemente extrem schwierig in der Matte zu fixieren sind und beim Einsetzen der Presshülse in die Verdichtungseinheit leicht aus der vorverdichteten Partikelmatte herausrutschen. Als besonders empfindlich zeigte sich hier das Thermoelement bei 75 %-Mattendicke, das oft versagte. Die Positionierung der Thermoelemente in der Matte erfolgte möglichst im Mittelpunkt der Probe, was jedoch nicht immer gewährleistet werden konnte. Ein Versuchsdurchlauf aller 21 Proben wurde mit einer Charge beleimter Fasern durchgeführt und dauerte etwa fünf Stunden. Dabei wurden die Versuche nach aufsteigender Verdichtungszeit durchgeführt und gruppiert. Innerhalb einer Gruppe der Verdichtungszeit erfolgte die Versuchsdurchführung nach dem Zufallsprinzip, um so systematische Fehler zu minimieren. Die Benennung der Proben ist standardisiert in Anlehnung an Ruf (2003) (siehe Abb. 4.29). Das war für die spätere Auswertung notwendig, da sich aus der Probenbenennung alle wesentlichen Prozessparameter ergeben.

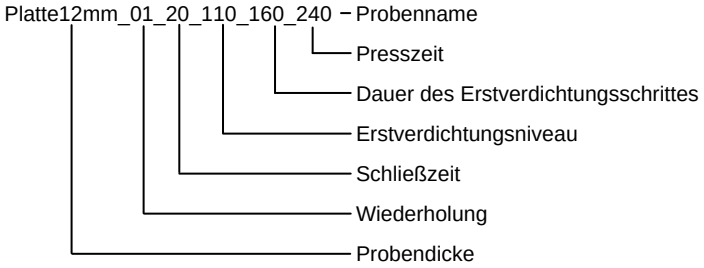


Abb. 4.29: Benennung der Proben für die systematischen Untersuchungen der Rohdichteprofilentwicklung

Die Masse der eingewogenen Fasern in der Hülse wurde direkt vor dem Einsetzen der Presshülse in die Verdichtungsvorrichtung bestimmt. Nach dem Heißpressvorgang erfolgte sofort eine weitere Massenbestimmung der fertig verpressten Platte sowie eine Dickenbestimmung der fertigen Platte. Die fertigen Platten wurden anschließend im Normklima gelagert.

4.3.2 Beschreibungsmethodik für die Rohdichteprofilentwicklung durch charakteristische Werte

Die gängige Darstellung des Rohdichteprofils zeigt die Dichtewerte kontinuierlich über der Platten- bzw. Mattendicke. Üblich ist dabei eine Ortsauflösung von 0,1 mm, entsprechend 10 Messwerten pro Millimeter, für industriell eingesetzte Rohdichteprofilscanner. In dem hier eingesetzten Scanner werden annähert 50 Messwerte pro Millimeter erzeugt. Eine extreme Reduzierung der Datenmenge sowohl der Messdaten aus in der Industrie eingesetzten Rohdichtescannern wie auch der hier vorliegenden Messdaten für ein Rohdichteprofil ist notwendig, um Rohdichteprofile miteinander vergleichen zu können. Das ist vor allem von Bedeutung bei der Beschreibung von zeitlichen Veränderungen des Rohdichteprofils, wie es in der vorliegenden Arbeit erfolgt. Im folgenden ersten Unterkapitel wird eine Beschreibungsmethodik für das Rohdichteprofil anhand von charakteristischen Werten vorgestellt. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Anwendung dieser Beschreibungsmethodik auf die Veränderung des Rohdichteprofils während dessen Entwicklung im Heißpressvorgang, vor allem in der ersten Haltephase.

4.3.2.1 Definition der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil

Die Entwicklung der Modellvorstellung zu Masseverschiebungen in Abschnitt 4.2.4 hat gezeigt, dass charakteristische Werte eine geeignete Methode zur Datenreduktion sind. Wong et al. (1998) stellen mit der Beschreibung des Rohdichteprofils, wie in Abb. 2.13 dargestellt, eine Möglichkeit zur quantitativen Charakterisierung des Rohdichteprofils durch Kennzahlen vor. Die Intention von Wong et al. (1998) bei der Definition der Kennzahlen zielte jedoch mehr auf eine quantitative Beschreibung des Rohdichteprofils zur Korrelation mit

mechanischen Eigenschaften ab. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten auch schon Plath und Schnitzer (1974), indem sie eine Theorie entwickelten, um aufgrund der Form des Rohdichteprofils auf die mechanischen Eigenschaften einer Platte schließen zu können. Die beiden angeführten Ansätze beschreiben die geometrische Form des Rohdichteprofils jedoch nicht quantitativ. Dazu lieferte Ruf (2003) einen ersten Ansatz, indem er Rohdichteprofile in Bezug auf die Plattendicke und die Rohdichte normierte, um diese vergleichbar zu machen. Die hier kurz vorgestellten Beschreibungsmöglichkeiten dienen als Grundlage für die Entwicklung einer eigenen, geometrischen Beschreibungsmethodik für das Rohdichteprofil anhand von charakteristischen Werten, die die Form des Rohdichteprofils wiedergeben. Alle Faktoren stellen ein Wertepaar aus Position und Dichtewert dar. Die Faktoren zur Beschreibung der Dichtemaxima in der Deckschicht, des Gradientfaktors sowie der Mittelschichtdichte wurden von Wong et al. (1998) übernommen. Neben der Position wurde bei diesen der Dichtewert hinzugefügt. Als zusätzlicher Faktor wurde der Profilgrund definiert.

Die Beschreibung der von Wong et al. (1998) eingeführten Faktoren wird dabei zur Vollständigkeit noch einmal aufgezeigt. Eine Darstellung der Faktoren zeigen die Abbildungen 4.30 und 4.31. Die Positionen der Faktoren über die Mattendicke werden in Prozent vom jeweiligen Startpunkt angegeben. Die Faktoren zur Beschreibung der Form des Rohdichteprofils definieren sich wie folgt:

Die Deckschichtmaxima (PD) sind als der maximal erreichte Wert in den beiden Deckschichten der Platte definiert. Ein Deckschichtmaximum besteht aus dem Dichtewert und der Position des Dichtewerts. Dieser wird dabei von der Oberfläche der Platte aus gemessen. Bei der Suche nach dem Deckschichtmaximum werden auf beiden Seiten des Rohdichteprofils die ersten zehn Pixel unter der Oberfläche nicht berücksichtigt, da diese durch Artefakte verfälscht sein können (siehe Proben im Anhang P).

Die beiden Gradientfaktoren (GF) werden durch die Dichte definiert, die sich in der Mitte zwischen dem Mittelwert der beiden Dichtemaxima und dem Wert der Mittelschichtdichte ergibt. Die Mittelschichtdichte errechnet sich im Bereich ±5 % um die Mattenmitte. Mit diesem Dichtewert werden die Positionen der beiden Dichtewerte im Rohdichteprofil ermittelt, die genau diesen Wert oder den ersten kleineren Dichtewert aufweisen. Die Position des Gradientfaktors (GF) wird von der Mattenmitte bei 50 % Mattendicke aus gemessen. Der Gradientfaktor beschreibt damit auch die „Breite“ des Deckschichtpeaks bzw. die Steilheit des Abfalls an der inneren Flanke des Deckschichtpeaks.

Der Profilgrund (PG) wird durch den ersten Dichtewert gekennzeichnet, der außerhalb des Dichtebereiches um den Filterwert (FV)[2] von ±10 kg m^{-3} von der Mittelschichtdichte liegt. Die Mittelschichtdichte wird dabei in einem Bereich ±10 % um die Mattenmitte bei 50 % Mattendicke gemittelt. Die Position des Profilgrundes wird von der Mitte der Matte aus gemessen.

Die Mittelschichtdichte (CD) wird, wie oben schon beschrieben, in einem Bereich von ±5 % um die Mattenmitte bei 50 % Mattendicke als Mittelwert errechnet.

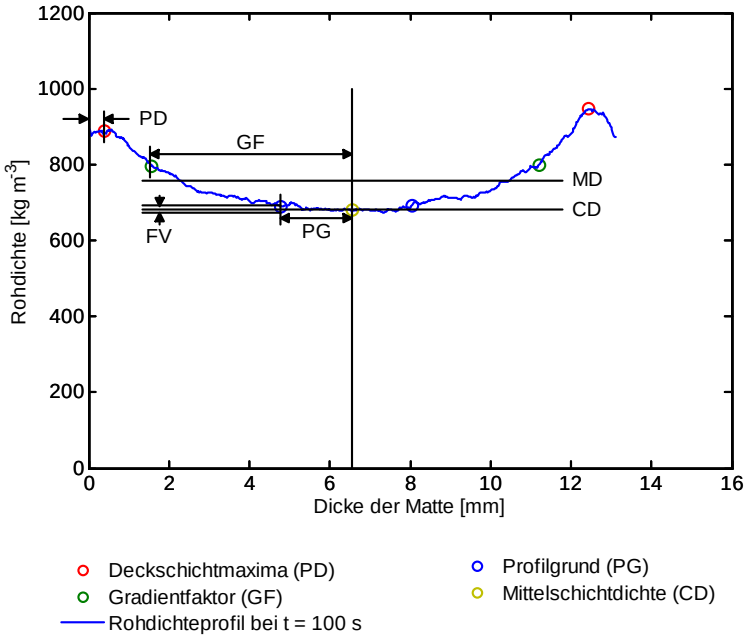


Abb. 4.30: Definition von charakteristischen Werten zur geometrischen und quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils ohne Zwischenminima am Beispiel der Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240 zum Zeitpunkt t = 100 s; MD: mittlere Dichte, CD: Mittelschichtdichte bei 50 % Mattendicke, PD: Dichte und Position der Maxima, GF: Dichte und Position des Gradientfaktors, PG: Dichte und Position der Profilgrundes, FV: Filterbreite um die Mittelschichtdichte (CD)

Für Profile mit Zwischenminima (IM) ist dieses nach dem ersten Auftreten während des Nachverdichtungsschritts definiert (siehe Abb. 4.31). Das Zwischenminimum wird durch die Dichte und Position des Minimums der Dichte, die zwischen Gradientfaktor (GF) und Profilgrund (PG) ermittelbar ist, beschrieben.

[2] Der Filterwert (FV) ist durch einen Betragswert symmetrisch um den Wert der Mittelschichtdichte definiert. Der Wert des Filterwertes kann frei gewählt werden ist. Für die hier durchgeführten Untersuchungen ist Filterwert auf einen Dichtebetragswert von 10 kg m^{-3} festgelegt.

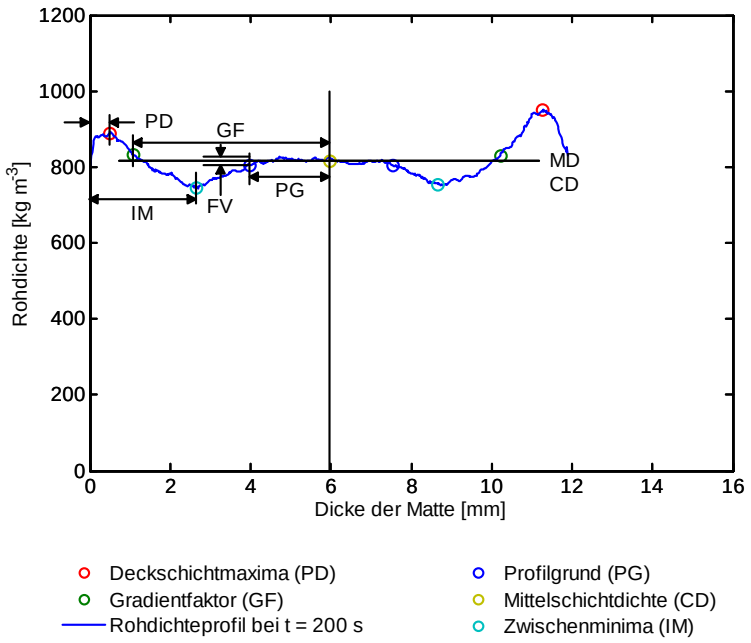


Abb. 4.31: Definition von charakteristischen Werten zur geometrischen und quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils mit Zwischenminima am Beispiel der Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240 zum Zeitpunkt t = 200 s. Zu beachten ist, dass mittlere Dichte (MD) und Mittelschichtdichte (CD) nahezu den gleichen Wert haben. MD: mittlere Dichte, CD: Mittelschichtdichte bei 50 % Mattendicke, PD: Dichte und Position der Maxima, GF: Dichte und Position des Gradientfaktors, IM: Dichte und Position des Zwischenminimums, PG: Dichte und Position der Profilgrundes, FV: Filterbreite um die Mittelschichtdichte (CD)

Die Zwischenminima werden erst nach einem Rohdichteprofil im Nachverdichtungsschritt definiert. In diesem speziellen Rohdichteprofil überschreitet die Mittelschichtdichte, die in einem Bereich von ±10 % um die Schicht bei 50 % Mattendicke ermittelt wird, erstmals die mittlere Dichte, die zwischen den charakteristischen Werten des Profilgrundes in der Mattenmitte errechnet wird oder sie ist gleich dieser Dichte. Dieser Zeitpunkt während des Nachverdichtungsschrittes wird auch Mittelschichtschritt genannt. Abb. 4.32 zeigt ein solches Rohdichteprofil für die Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240.

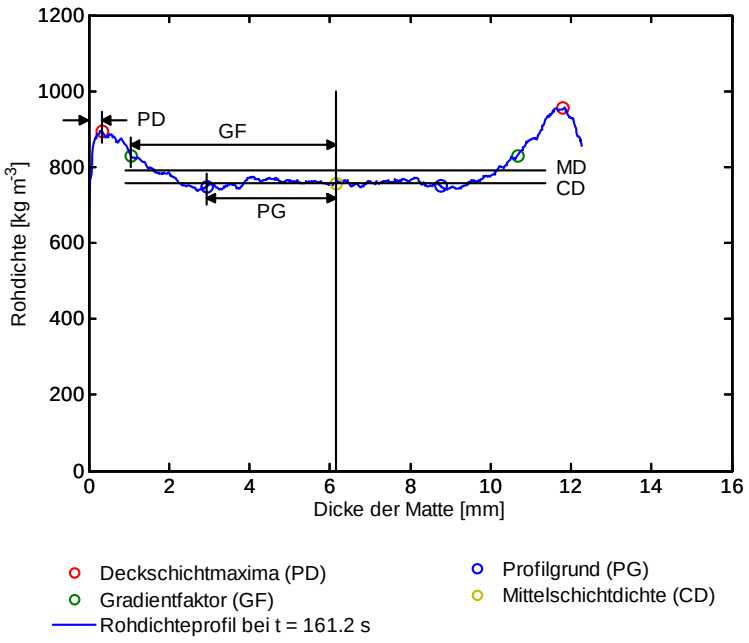


Abb. 4.32: Definition des Mittelschichtschrittes, zu diesem Zeitpunkt ist die Mittelschichtdichte ±10 % um die Schicht bei 50 % Mattendicke erstmals gleich oder größer als die Dichte zwischen den beiden charakteristischen Werten des Profilgrundes (PG). Dargestellt am Beispiel der Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240 zum Zeitpunkt t = 161,2 s (Mittelschichtschritt)

Mit den vier charakteristischen Werten Deckschichtmaximum, Gradientfaktor, Profilgrund und Mittelschichtdichte kann die geometrische Form des Rohdichteprofils gut beschrieben werden. Die Bedeutung der Deckschichtmaxima und der Mittelschichtdichte ist in der Literatur hinreichend beschrieben (Plath und Schnitzler 1974; Boehme 1992; Wong et al. 1998; Ruf 2003; Thömen und Ruf 2008). Mit dem Gradientfaktor – wie er in der vorliegenden Arbeit genutzt wird – ist eine Beschreibungsmöglichkeit gegeben, welche den Abfall der Rohdichte vom Deckschichtmaximum hin zur Mattenmitte aufweist. Der Dichtewert des Gradientfaktors – genau zwischen den Dichtemaxima und der Mittelschichtdichte – ist daher ein geeigneter Faktor für die Beschreibung des Dichtegradienten zur Mittelschicht.

Der Profilgrund verdeutlicht, wie ausgerundet oder U-förmig ein Rohdichteprofil im Bereich Mittelschicht ist und wie ausgedehnt ein Bereich annähernd homogener Dichte um die 50 %-Schicht der Matte ist. Die Aussagefähigkeit des Profilgrundes ist vom eingesetzten Filterwert (FV) abhängig.

Relativ große Prozentwerte der Positionen für den Gradientfaktor und den Profilgrund sind ein Zeichen für ein Rohdichteprofil mit einer breiten und nahezu homogenen Mittelschicht. Dazu relativ kleinere Positionswerte des Gradientfaktors und vor allem des Profilgrunds wiesen auf ein Rohdichteprofil hin, das flache Flanken vom Rohdichtemaximum zur

Mittelschicht aufweist. Die Mittelschicht eines solchen Profils ist eher weniger homogen ausgeprägt.

4.3.2.2 Zeitlicher Verlauf der Rohdichteprofilentwicklung anhand der charakteristischen Werte

Die im vorigen Abschnitt 4.3.2.1 vorgestellten charakteristischen Werte werden für jedes Rohdichteprofil im Heißpressvorgang ermittelt. Während der Verdichtungsphase kann jedoch nur das Dichtemaximum vor dem festen Presskolben erkannt werden. Weitere aussagefähige charakteristische Werte sind nicht aus den reinen Messwerten zu errechnen, ohne diese zu spiegeln oder zu ergänzen, wie in Abschnitt 4.2.3.1 dargestellt.

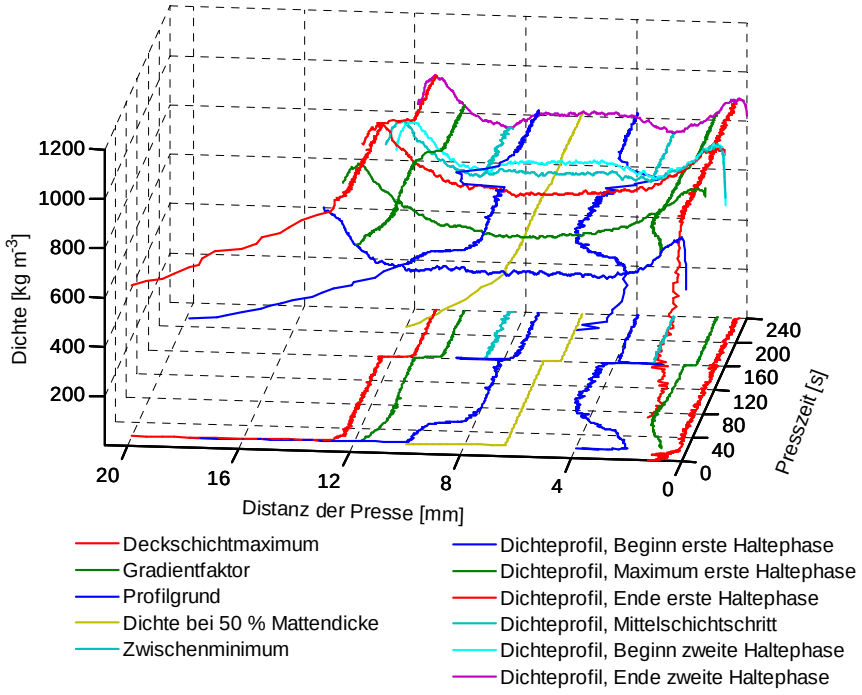


Abb. 4.33: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil während des Heißpressvorgangs dreidimensional dargestellt an Probe Platte12mm_02_20_110_140_240. Zur Veranschaulichung sind einige markante Rohdichteprofile eingezeichnet. Zusätzlich ist in der x/y-Ebene eine zweidimensionale Projektion der charakteristischen Werte dargestellt

Die Darstellung der Rohdichteprofilentwicklung wie in Abb. 4.33 reduziert diese damit auf sieben Verläufe der charakterlichen Werte während der ersten Haltephase. Nach dem Mittelschichtschritt kommen die beiden Verläufe der Zwischenminima noch hinzu. Aus dieser durch die charakteristischen Werte stark vereinfachten Rohdichteprofilentwicklung lassen sich die Rohdichteprofile zu markanten Zeitpunkten, besonders während der Haltephasen, ableiten. Von besonderem Interesse ist dabei der Beginn der ersten Haltephase, in der es zu einer

deutlichen Veränderung des Rohdichteprofils durch Feuchte- und Partikelmassebewegung kommt. Die Sensitivität der charakteristischen Werte – besonders des Profilgrundes – wird in Abb. 4.34 deutlich. In dieser Abbildung sind die charakteristischen Werte zweidimensional in der zeitlichen Veränderung über der Mattendicke dargestellt. Zur Verdeutlichung sind zusätzlich noch die Verläufe der Minima- und Maximalinie aus der in Abschnitt 4.2.4 vorgestellten Modellvorstellung eingezeichnet. Die Minimalinie beschreibt den Verlauf des Minimums einzelner Schichten über die Mattendicke im Verlauf der Presszeit während der Haltephase. Die Maximalinie zeigt analog zur Minimalinie deren Verlauf. Es ist eine gute Übereinstimmung des Profilgrundes mit dem Verlauf der Minimalinie festzustellen. Die Minimalinie verläuft vor dem festen Presskolben nahezu parallel zum Profilgrund. Vor dem beweglichen Presskolben verhält es sich im Zeitbereich von 19,6 s bis 50 s sehr ähnlich, danach verlaufen Profilgrund und Minimalinie nahezu deckungsgleich. Aus der sehr ähnlichen Entwicklung von Minimalinie und Profilgrund kann abgeleitet werden, dass der Profilgrund ein auch in der zeitlichen Entwicklung sensitiver Faktor nicht nur für die geometrische Beschreibung des Rohdichteprofils ist, sondern auch zusätzlich Rückschlüsse auf die Partikelmassebewegung und Feuchtebewegung innerhalb der Matte zulässt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Profilgrund nur aus der Form eines Rohdichteprofils zu einem diskreten Zeitschritt definiert ist. Im Gegensatz dazu sind die Minima- und Maximalinien durch den zeitlichen Verlauf der Dichte in einzelnen Schichten bestimmt (siehe Abschnitt 4.2.4).

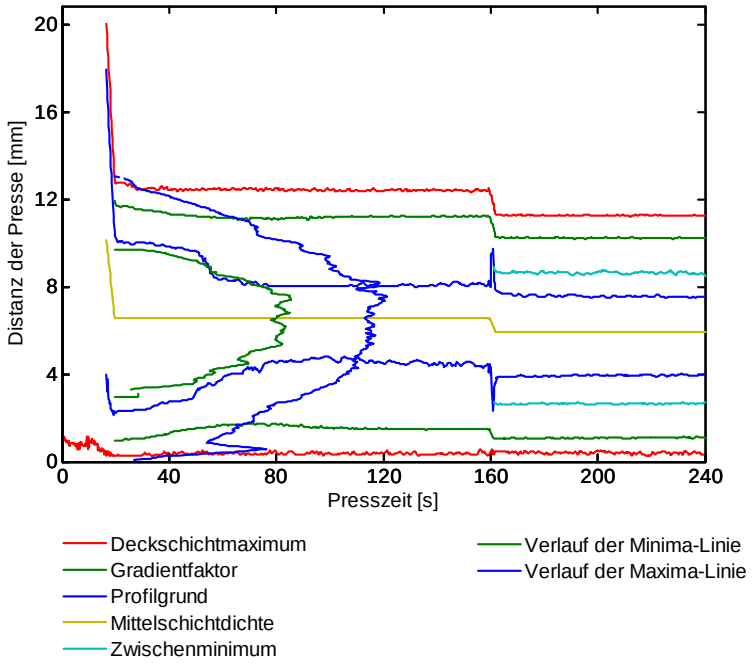


Abb. 4.34: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil während des Heißpressvorgangs zweidimensional dargestellt an Probe Platte12mm_02_20_110_140_240. Zusätzlich ist der Verlauf der Minima- und Maximalinie nach der Modellvorstellung aus Abschnitt 4.2.4 eingezeichnet. Die Minimalinie beschreibt den Verlauf des Minimums einzelner Schichten über die Mattendicke im Verlauf der Presszeit während der Haltephase. Die Maximalinie zeigt analog zur Minimalinie deren Verlauf der Maxima (Abschnitt 4.2.4)

Der zeitliche Verlauf des Gradientfaktors weist einen Zusammenhang mit dem Verlauf der Maximalinie auf (siehe Abb. 4.34). In dem Zeitbereich, in dem der Gradientfaktor den kleinsten Wert aufweist, liegt auch die Maximalinie für die Schicht über der Mattendicke, in der der Gradientfaktor liegt. Somit korreliert auch der Gradientfaktor gut mit der Massebewegung zu Beginn der ersten Haltephase.

Aus den Verläufen der charakteristischen Werte lässt sich somit gut die Entwicklung des Rohdichteprofils ableiten. Der Zusammenhang von Profilgrund und Minimalinie sowie Gradientfaktor und Maximalinie wird aus Abb. 4.34 deutlich.

Die maximalen bzw. minimalen Ausprägungen der charakteristischen Werte im zeitlichen Verlauf des Heißpressvorgangs sind somit ein geeigneter Indikator für die Ausbildung des Rohdichteprofils vor allem nach Erreichen der Solldicke in der ersten Haltephase. Dazu wird der Verlauf der charakteristischen Werte mit einem gleitenden Mittelwert über fünf Zeitschritte geglättet. In diesem so geglätteten Verlauf der charakteristischen Werte werden die Maximalwerte über der Mattendicke im zeitlichen Verlauf der ersten Haltephase errechnet. Für diesen Zeitpunkt wird der Dichtewert an dieser Stelle als zweite Koordinate aus dem Messdatenbild herausgesucht.

4.3.3 Standardisierte Auswertung der systematischen Versuche

Die Versuche, die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt worden sind, werden schematisiert mit einem Algorithmus ausgewertet. Die zusammengefassten Daten für jede Probe sind im Anhang P ersichtlich. Die im Anhang präsentierten Daten werden an dieser Stelle exemplarisch für die Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240 erläutert. Grundsätzlich bestehen die zusammengefassten Daten für eine Probe aus:

- zwei Übersichtstabellen für die charakteristischen Werte an aussagefähigen Zeitpunkten
- einer dreidimensionalen Darstellung der Rohdichteprofilentstehung
- dem Pressdiagramm
- den Rohdichteprofilen an aussagekräftigen Zeitpunkten
- der Rohdichteprofilentwicklung in der 2 %-, 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht
- dem Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs

Die einzelnen Darstellungen werden im Folgenden erklärt.

Tabelle 15: Charakteristische Werte für eine Probe am Beispiel der Probe: Platte12mm_02_20_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m-3]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,62	gravim.	832,70	gravim.	0,55	radiom.	19,29				
Endwert	19,07		809,27								
mittlere Dichte		[kg m-3]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	734,62	99,76	radiom.	18,92	radiom.	0,37				
	Endwert	750,25	101,88		19,32		-0,03				
zweite Haltephase	Startwert	813,10	100,05		18,98		0,31				
	Endwert	812,67	100,00		18,97		0,32				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,34	radiom.	3,80	gravim.	3,02			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,25	1,90	857,93	116,79	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	37,4	0,33	2,54	907,53	123,54	1,44	163,40	74,38	43,75	82,40
	Ende	159,2	0,25	2,22	883,80	120,31	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,25	1,90	928,40	126,38	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	28,2	0,68	5,17	972,29	132,35	2,04	165,21	58,70	41,87	66,38
	Ende	159,2	0,67	5,08	950,57	129,40	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderes Maximum	Beginn	161,8	0,46	3,85	897,60	110,39	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,27	2,28	889,89	109,44	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinteres Maximum	Beginn	161,8	0,52	4,38	953,75	117,30	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,65	5,43	950,71	116,92	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtdichte		Position	0,0				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	698,42	95,07			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	80,6	674,84	89,01			0,44	163,43	103,33	75,68	103,25
	Maximum	114,0	685,21	90,51			0,26	167,10	114,65	102,41	113,93
	Ende	159,2	679,64	90,59			0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
zweite Haltephase	Beginn	161,8	803,46	98,81			2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
	Ende	240,0	812,53	99,98			0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Gradientfaktor		Position	0,0		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,60	42,70	795,45	108,28	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	73,0	4,81	36,63	800,83	109,01	0,54	163,23	100,36	68,94	101,02
	Ende	159,2	5,08	38,73	795,07	108,23	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer GF	Beginn	19,6	5,39	41,11	795,26	108,25	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	75,8	4,49	34,22	800,55	108,97	0,48	163,17	101,46	71,46	101,84
	Ende	159,2	4,71	35,87	795,16	108,24	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer GF	Beginn	161,8	4,88	41,07	834,28	102,60	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,88	41,07	832,13	102,34	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer GF	Beginn	161,8	4,32	36,34	837,16	102,96	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,26	35,81	829,29	101,99	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,37	33,33	706,49	96,17	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	98,6	1,75	13,35	689,70	93,88	0,43	165,13	109,62	90,75	108,75
	Ende	159,2	2,19	16,67	688,74	93,75	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	3,96	30,16	709,72	96,61	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	79,0	1,47	11,18	685,36	93,29	0,52	162,73	100,50	69,30	101,13
	Ende	159,2	1,62	12,38	688,74	93,75	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer Profilgrund	Beginn	161,8	2,38	20,05	808,50	99,43	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,95	16,37	820,56	100,92	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer Profilgrund	Beginn	161,8	1,88	15,85	811,61	99,82	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,59	13,40	818,87	100,71	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	161,2	[mm]	12,26	[%]	103,15	2,83	173,23	125,01	114,59	126,35
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	161,8	2,60	21,89	747,50	91,93	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,69	22,59	743,81	91,48	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
vorderes Maximum	Beginn	161,8	3,35	28,20	754,30	92,77	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,41	28,72	743,81	91,48	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24

Die standardisierten Tabellen im Anhang, wie beispielhaft in Tabelle 15 gezeigt, sind unterteilt in die Bereiche

- Probenmasse
- mittlere Dichte
- Plattenfeuchte
- Deckschichtmaxima
- Mittelschichtdichte
- Gradientfaktor und
- Profilgrund

Im Bereich der Probenmasse werden die gravimetrisch direkt vor dem Versuch und direkt nach dem Heißpressvorgang ermittelten Massen sowie der daraus resultierende, gravimetrisch ermittelte Massenverlust dargestellt. Zusätzlich wird in Spalte acht die aus den radiometrischen Daten errechnete Masse zu Beginn des Verdichtungsvorganges als Vergleich angegeben. Dieser Wert ist sehr vorsichtig zu beurteilen, da er auf Basis gespiegelter und ergänzter Dichtewerte, wie in Abschnitt 4.2.3.1 aufgezeigt, berechnet wurde. Für die Umrechnung der Dichte in Masse wurde die Probe in einzelne Schichten zerlegt, die in der Dicke der effektiven Pixelbreite entsprachen und den Innendurchmesser der Presshülse haben. Innerhalb einer Schicht wurde eine konstante Dichte angenommen.

Der Bereich der mittleren Dichte zeigt in den ersten beiden Zeilen die mittlere Dichte zu Beginn der ersten Haltephase und zum Ende des Heißpressvorgangs. Diese Dichten sind jeweils zusätzlich noch auf die Dichte am Ende des Heißpressvorgangs bezogen und in Prozent angegeben. Bei Pressprogrammen mit Nachverdichtungsschritt wurde dabei die unterschiedliche Dicke der Matte während der ersten und zweiten Haltephase berücksichtigt. Weiterhin sind in diesem Bereich der Tabelle die radiometrisch ermittelten Massen der Matte zu den oben angegebenen Zeitpunkten erfasst.

Die anschließende Zeile der Tabelle gibt die gravimetrisch ermittelte Mattenfeuchte zu Beginn und zum Ende des Heißpressvorgangs sowie den daraus resultierenden Feuchteverlust wieder. Zusätzlich ist der radiometrisch ermittelte Feuchteverlust angegeben, der sich aus der radiometrisch ermittelten Massendifferenz ergibt.

Der folgende Teil der Tabelle ist für die Deckschichtmaxima, den Gradientfaktor, den Profilgrund und die Zwischenminima identisch aufgebaut und wird daher sinngemäß für einen charakteristischen Wert dargestellt. Die marginalen Unterschiede werden an entsprechender Stelle erläutert.

Der Aufbau ist zeilenweise. In jeder Zeile steht der entsprechende charakteristische Wert für einen Zeitpunkt während des Heißpressvorgangs. Die erste Spalte bezeichnet den charakteristischen Wert im Rohdichteprofil und die grobe zeitliche Einordnung in erste bzw. zweite Haltephase sowie die Seite des Rohdichteprofils. Dabei beziehen sich die vorderen Werte auf den festen und die hinteren auf den beweglichen Presskolben. Die zweite und dritte Spalte geben den Zeitpunkt des charakteristischen Wertes an. Es werden dabei Beginn- und Endzeitpunkt der ersten und zweiten Haltephase unterschieden. Diese Zeitpunkte sind durch das Pressprogramm definiert. Die dritte Spalte beinhaltet die bis zu diesen Zeitpunkten vergangene Presszeit, die je nach Versuch unterschiedlich vorgegeben ist. Aus dem Verlauf der charakteristischen Werte, wie diese in Abb. 4.33 und Abb. 4.34 dargestellt sind, werden die Extremwerte bestimmt, die als Maximum – im Sinne einer maximalen Ausprägung des charakteristischen Wertes – bezeichnet werden. Diese werden für die charakteristischen Werte Deckschichtmaxima, Gradientfaktor und Profilgrund unterschiedlich berechnet. Das Maximum in der Deckschicht ist der maximale Dichtewert, der während der ersten Haltephase erreicht wird. Für den Gradientfaktor und den Profilgrund ist das Maximum für den Zeitpunkt definiert, an dem der Verlauf der zeitlichen Linien für diese Faktoren den maximalen Abstand von der Mattenoberfläche hat. Das bedeutet, dass der Gradientfaktor und der Profilgrund zu diesem Zeitpunkt minimal sind.

Die Lage der charakteristischen Werte über dem Querschnitt senkrecht zur Plattenebene geben die Spalte vier in Millimeter und die Spalte fünf in Prozent an. Die Bezugspunkte für die Abstandsmaße sind in Abbildungen 4.30 und 4.31 ersichtlich.

Spalte sechs zeigt die Dichte am jeweiligen Zeitpunkt. Die siebte Spalte ist die prozentuale Dichte bezogen auf die mittlere Dichte der Matte zu diesem Zeitpunkt.

Der Pressdruck zu dem Zeitpunkt, für den der charakteristische Wert in der Tabelle angegeben ist, ist in Spalte acht wiedergeben.

Die Temperaturen in der Matte an den Positionen 0 % (Mattenoberfläche vor dem festen Presskolben), 25 %, 50 % und 75 %, jeweils bezogen auf die zu diesem Zeitpunkt gegebenen Plattendicke, sind in den Spalten neun bis zwölf dargestellt. Die Temperaturwerte für die beiden Wiederholungen der Versuche stammen aus einem dritten Parallelversuch, in dem nur die Temperaturen gemessen wurden. Einige Thermoelemente haben während der Versuche versagt. In den entsprechenden Spalten sind daher keine Werte angegeben.

Ähnlich ist der Bereich für die Mittelschichtdichte aufgebaut. Da die Lage der Dichtewerte durch die Definition eindeutig ist, bedarf es hier keiner Positionsangabe im Rohdichteprofil.

Die Werte für das Minimum und Maximum in dieser Schicht berechnen sich nach dem Algorithmus, der in Abschnitt 4.2.2 und 4.2.4 dargestellt wurde.
Im Bereich des Mittelschichtschrittes sind in Spalte drei der Zeitpunkt und in den Spalten fünf und sieben die Mattendicke zu diesem Zeitpunkt angegeben. Die Spalten acht bis zwölf zeigen, wie oben dargestellt, Pressdruck und Temperatur.
Ähnlich ist der Aufbau für die Fortsetzung der Tabelle 15 im Anhang. Die Peakbase, die von Wong (1998), wie in Abb. 2.13 dargestellt, definiert wurde, ist dort dargestellt. Der Aufbau dieses Bereiches entspricht denen für den Profilgrund und den Gradientfaktor. Weiterhin sind in dieser Tabelle die Dichten zu Beginn, am Minimum, am Maximum und zum Ende der ersten Haltephase dargestellt. Dabei ist der Unterschied zwischen der Dichte in der Mittelschicht, die in einem Bereich von 45 % bis 55 % der Mattendicke definiert ist, und exakt in der 50 %-Schicht, die nur ein Pixel in dieser Schicht umfasst, zu beachten.

Die dreidimensionale Darstellung der Rohdichteprofilentstehung erfolgt wie in Abschnitt 4.2.1 und Abb. 4.11 beschrieben. Der Verdichtungsbeginn ist der Zeitpunkt t = 0 s.
Ebenso wurde das Pressdiagramm schon in Abschnitt 4.2.2 und Abb. 4.14 dargestellt und erläutert.
Die Rohdichteprofile zu aussagefähigen Zeitpunkten wurden unter anderem aus der Entwicklung der charakteristischen Werte abgeleitet. Es sind die Rohdichteprofile zu folgenden Zeitpunkten dargestellt:

- zu Beginn der ersten Haltephase
- wenn der Wert für den Profilgrund für beide Seiten der Profils am kleinsten ist
- zum Ende der ersten Haltephase
- zum Mittelschichtschritt
- am Ende des Heißpressvorgangs

Auf eine Darstellung zu Beginn der ersten Haltephase wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit des Diagramms verzichtet.

Die Bedeutung der Dichteentwicklung in einzelnen Schichten im Rohdichteprofil ist in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.4 und der Abb. 4.15 erläutert.

Die Erläuterung des Feuchteprofils erfolgt in Abschnitt 4.4.

Für die Auswertungen im folgenden Abschnitt wurden die Daten aus den Tabellen im Anhang an den aussagefähigen Zeitpunkten zusammengefasst und der Mittelwert aus den charakteristischen Werten gebildet. Wertepaare, die mehr als eine Standardabweichung vom Mittelwert abwichen, wurden gestrichen.

4.3.4 Rohdichteprofilentwicklung während der ersten Haltephase

In den folgenden Abschnitten wird anhand der oben beschriebenen charakteristischen Werte die zeitliche Entwicklung der Form des Rohdichteprofils für die erste Haltephase in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit und dem Erstverdichtungsniveau dargestellt. Neben dem Rohdichteprofil werden auch zu den entsprechenden Zeitpunkten das Temperaturprofil aus der dritten Parallelprobe sowie der Pressdruck angegeben, die neben der Feuchte die wesentlichen Einflussparameter auf die Ausbildung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs darstellen. Die Entwicklung des Feuchteprofils – als nicht direkt messbarer Parameter – kann aus der Modellvorstellung in Abschnitt 4.2.4 und deren Korrelation mit den beiden charakteristischen Werten des Gradientfaktors und des Profilgrunds sowie dem Minimum und dem Maximum der Dichte in der Mittelschicht abgeleitet werden.

In der Darstellung der Temperatur- und der Druckwerte werden neben den Mittelwerten auch die Minima- und Maximawerte angegeben.

Tabelle 16: Zusammengefasste charakteristische Werte zu Beginn der ersten Haltephase vor dem festen und beweglichen (bew.) Presskolben. Es sind die drei Koordinaten Dichte, Position und Zeitpunkt angegeben. XXX beschreibt die drei Haltezeiten von 120 s, 140 s und 160 s, die für diese Tabelle zu einer Gruppe zusammengefasst werden konnten

	DS Maximum fest			Gradientfaktor fest			Profilgrund fest			
Platte 12mm	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	
10 100 240	115,7	2,4	10,2	104,0	41,9	10,2	99,7	36,8	10,2	
10 110 XXX 240	118,3	2,2	9,8	104,3	47,1	9,8	99,4	43,9	9,8	→
10 120 XXX 240	117,8	2,3	9,6	106,4	52,0	9,6	99,0	46,1	9,6	Fortsetzung
20 100 240	116,9	2,8	20,2	106,4	41,0	20,2	96,6	27,4	20,2	
20 110 XXX 240	118,0	2,7	19,6	108,4	46,9	19,6	96,5	37,7	19,6	
20 120 XXX 240	119,0	3,7	19,2	108,3	50,5	19,2	95,8	39,7	19,2	
30 100 240	115,4	3,8	30,2	106,1	40,0	30,2	94,3	24,3	30,2	
30 110 XXX 240	118,9	4,7	29,4	107,1	43,8	29,4	94,6	29,8	29,4	→
30 120 XXX 240	122,0	3,8	28,8	108,0	48,0	28,8	94,1	33,7	28,8	

	Mittelschicht			Profilgrund bew.			Gradientfaktor bew.			Deckschicht bew.		
	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]
	98,7	50,0	10,2	99,7	41,5	10,2	102,9	46,2	10,2	103,6	1,7	10,2
→	98,0	50,0	9,8	99,4	47,7	9,8	103,6	52,4	9,8	105,5	3,5	9,8
	97,4	50,0	9,6	98,9	44,9	9,6	106,5	56,2	9,6	113,9	1,8	9,6
Fortsetzung	95,1	50,0	20,2	96,5	30,7	20,2	106,7	42,1	20,2	120,9	1,7	20,2
	95,4	50,0	19,6	96,8	34,8	19,6	108,3	46,1	19,6	125,7	2,0	19,6
	94,2	50,0	19,2	95,6	35,7	19,2	107,8	48,7	19,2	126,8	3,6	19,2
	93,3	50,0	30,2	94,3	22,4	30,2	106,1	36,4	30,2	123,0	3,7	30,2
→	93,0	50,0	29,4	94,4	26,1	29,4	106,9	41,5	29,4	124,6	6,0	29,4
	92,7	50,0	28,8	93,9	29,8	28,8	107,9	45,6	28,8	124,2	6,1	28,8

Tabelle 17: Zusammengefasste charakteristische Werte an den zeitlichen Maxima der jeweiligen charakteristischen Werte während der ersten Haltephase vor dem festen und beweglichen (bew.) Presskolben. Es sind die drei Koordinaten Dichte, Position und Zeitpunkt angegeben. XXX beschreibt die drei Haltezeiten von 120 s, 140 s und 160 s, die für diese Tabelle zu einer Gruppe zusammengefasst werden konnten

	DS Maximum fest			Gradientfaktor fest			Profilgrund fest			
Platte 12mm	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	
10 100 240	143,9	2,6	27,9	122,9	37,2	72,7	100,6	14,1	86,6	
10 110 XXX 240	133,5	2,1	40,9	116,9	42,8	62,0	98,5	12,3	103,2	→
10 120 XXX 240	129,8	2,3	27,3	113,3	45,4	68,0	96,3	18,3	85,8	Fortsetzung
20 100 240	130,3	3,3	40,6	112,4	35,3	71,2	98,3	13,0	93,2	
20 110 XXX 240	126,8	3,1	43,9	113,3	40,3	75,4	95,6	16,3	94,6	
20 120 XXX 240	124,0	4,6	42,3	107,7	43,9	75,5	91,6	15,5	96,6	
30 100 240	122,0	4,4	52,3	107,2	32,7	82,7	94,5	13,8	97,6	
30 110 XXX 240	124,5	5,1	55,8	106,2	37,4	85,3	93,1	16,1	107,2	→
30 120 XXX 240	123,4	5,5	48,2	106,4	41,5	80,9	91,3	18,5	103,5	

	Mittelschicht Minimum			Mittelschicht Maximum			
	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	
	87,6	50,0	77,5	87,8	50,0	106,5	
→	89,8	50,0	106,0	90,7	50,0	151,7	→
Fortsetzung	89,1	50,0	82,2	90,8	50,0	123,0	Fortsetzung
	89,4	50,0	74,4	89,8	50,0	104,6	
	90,1	50,0	95,1	91,2	50,0	123,9	
	88,5	50,0	82,5	90,6	50,0	129,3	
	89,6	50,0	77,6	90,0	50,0	114,8	
→	89,1	50,0	86,0	90,8	50,0	134,6	→
	88,5	50,0	91,2	90,4	50,0	138,8	

	Profilgrund bew.			Gradientfaktor bew.			Deckschicht bew.		
	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dichte [%]	Position [%]	Zeit [s]	Dicht [%]	Position [%]	Zeit [s]
	97,9	13,1	67,7	120,2	35,0	67,5	154,5	1,7	21,9
→	98,3	18,7	76,8	116,9	41,5	67,5	141,0	1,8	17,8
	95,9	19,4	78,8	113,2	44,9	60,5	127,6	1,9	18,7
Fortsetzung	95,5	15,4	76,8	112,6	34,1	69,8	128,5	3,3	34,6
	95,1	14,2	80,0	110,6	39,0	72,1	128,7	4,4	31,5
	91,0	18,8	82,1	106,7	43,6	72,7	129,2	4,0	27,6
	92,2	11,0	80,7	107,2	31,1	79,2	125,4	5,5	40,3
→	92,7	16,8	84,5	106,5	36,2	84,0	126,3	6,5	38,8
	90,7	17,2	87,6	106,0	41,2	90,2	126,7	6,3	41,1

Tabelle 18: Zusammengefasste charakteristische Werte am Ende der ersten Haltephase vor dem festen und beweglichen (bew.) Presskolben. Es sind die drei Koordinaten Dichte, Position und Zeitpunkt angegeben. XXX beschreibt die drei Haltezeiten von 120 s, 140 s und 160 s, die für diese Tabelle zu einer Gruppe zusammengefasst werden konnten.

	DS Maximum fest			Gradientfaktor fest			Profilgrund fest			
	Dichte	Position	Zeit	Dichte	Position	Zeit	Dichte	Position	Zeit	
Platte 12mm	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	
10 100 240	133,6	2,4	240,0	117,6	38,5	240,0	97,7	13,7	240,0	
10 110 XXX 240	129,1	2,5	129,6	116,4	44,7	129,6	99,0	19,5	129,6	→
10 120 XXX 240	125,6	2,3	129,4	111,7	48,7	129,4	96,6	24,8	129,4	Fortsetzung
20 100 240	124,2	3,9	240,0	110,8	37,1	240,0	95,6	15,4	240,0	
20 110 XXX 240	121,9	3,4	139,4	109,4	43,2	139,4	95,4	21,5	139,4	
20 120 XXX 240	119,7	4,5	138,8	106,2	46,6	138,8	92,1	19,7	138,8	
30 100 240	116,7	4,8	240,0	104,9	34,7	240,0	92,3	35,5	240,0	
30 110 XXX 240	119,5	4,9	149,2	106,2	40,5	149,2	93,4	18,3	149,2	→
30 120 XXX 240	119,1	5,5	148,8	105,8	44,2	148,8	91,7	25,3	148,8	

	Mittelschicht			Profilgrund bew.			Gradientfaktor bew.			Deckschicht bew.		
	Dichte	Position	Zeit	Dichte	Position	Zeit	Dichte	Position	Zeit	Dichte	Position	Zeit
	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]
	87,8	50,0	240,0	97,9	12,8	240,0	117,4	33,8	240,0	145,0	4,3	240,0
→	90,7	50,0	129,6	98,9	19,7	129,6	114,9	42,4	129,6	138,6	2,2	129,6
Fortsetzung	91,0	50,0	129,4	96,4	21,4	129,4	111,9	47,4	129,4	132,6	1,9	129,4
	89,6	50,0	240,0	95,5	15,8	240,0	110,7	32,9	240,0	130,7	6,5	240,0
	91,0	50,0	139,4	95,4	18,4	139,4	109,3	40,1	139,4	129,9	5,7	139,4
	90,5	50,0	138,8	92,1	20,8	138,8	106,3	44,2	138,8	125,3	5,6	138,8
	89,8	50,0	240,0	92,3	12,1	240,0	104,9	30,9	240,0	122,1	7,3	240,0
→	90,7	50,0	149,2	93,5	21,1	149,2	106,4	37,7	149,2	123,5	7,7	149,2
	90,8	50,0	148,8	91,8	20,7	148,8	105,5	43,1	148,8	121,7	7,1	148,8

4.3.4.1 Entwicklung des Rohdichteprofils anhand von charakteristischen Werten

Die Entwicklung des Rohdichteprofils ist durch die charakteristischen Werte zu Beginn der ersten Haltephase, zu den Zeitpunkten der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte und zum Ende der ersten Haltephase dargestellt. Die Tabellen 16 bis 18 zeigen die entsprechenden Werte. Dabei sind die charakteristischen Werte für die Maxima in der Deckschicht, des Gradientfaktors und des Profilgrundes sowie das Maximum in der Mittelschicht einer Abbildung zusammengefasst. Die in diesen Diagrammen gemeinsam dargestellten Werte treten während der Rohdichteprofilentstehung nicht zum gleichen Zeitpunkt auf. Ebenso sind die charakteristischen Werte der Rohdichteprofile am Ende der ersten Haltephase zusammengefasst, obwohl diese mit einer zeitlichen Differenz von bis zu 40 s (minimal 120 s, maximal 160 s Haltezeit auf Erstverdichtungsniveau) entstanden sind. Diese

Zusammenfassung ist gerechtfertigt, da nach den Erläuterungen in Abschnitt 4.2.2 kaum weitere Entwicklungen in der Form des Rohdichteprofils zu erwarten sind, sondern nur mit einer Feuchteabnahme zu rechnen ist. Im Temperaturprofil sind die Werte zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung des Gradientfaktors angegeben. Diese Vereinfachung bei der Betrachtungsweise der Temperaturprofile war nötig, da eine Angabe der Temperaturprofile zu allen Zeitpunkten der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte während des Heißpressvorgangs die Darstellung aufgrund der hohen Informationsdichte extrem unübersichtlich machen würde.

In der folgenden Beschreibung der Versuchswerte wird hauptsächlich auf die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben eingegangen. Die Werte vor dem beweglichen Presskolben sind den Tabellen 16 bis 18 zu entnehmen.

♦ Abhängigkeit der Rohdichteprofilentwicklung von der Verdichtungszeit

Die Abhängigkeit der Rohdichte- und Temperaturprofilentwicklung von der Verdichtungszeit zeigen die Abbildungen 4.35 bis 4.37.

In Abb. 4.35a) sind die charakteristischen Werte zu Beginn der ersten Haltephase für das Erstverdichtungsniveau von 100 % dargestellt. Der relative Dichtewert der Matte liegt für das Maximum in der Deckschicht in einem Bereich von 115 % bis 117 % der relativen Rohdichte vor dem festen Presskolben. Die Lage des Deckschichtmaximums ändert sich jedoch mit zunehmender Presszeit von 2,4 % bei 10 s Verdichtungszeit über 2,8 % bei 20 s Verdichtungszeit bis zu 3,9 % bei 30 s Verdichtungszeit. Ähnlich verhält sich das Deckschichtmaximum vor dem beweglichen Presskolben, das tendenziell jedoch etwas höher liegt. Ein Ausreißer bildet hier der Wert bei einer Schließzeit von 10 s. Die Abweichungen sind auch in den Profildarstellungen der entsprechenden Proben im Anhang P zu entnehmen.

Ebenso gering sind auch die Änderungen des Gradientfaktors mit der Verdichtungszeit. Dieser bewegt sich in ein einem Bereich von 104 % bis 106 % der relativen Rohdichte und hat eine Lage von 40,1 % bis 41,9 % im Rohdichteprofil.

Der Profilgrund ändert sich jedoch markant mit der Verdichtungszeit. Diese Änderungen hängen auch deutlich mit der relativen Mittelschichtdichte zusammen. Für die Verdichtungszeit von 10 s weist der Profilgrund einen Wert von 36,8 % bei einer relativen Dichte von 99,7 %, die entsprechenden Werte für die Verdichtungszeit von 20 s und 30 s sind 27,4 % und 24,3 % bei den entsprechenden Rohdichten von 96,6 % und 94,3 %.

Die Mittelschicht weist sehr ähnliche Werte auf: Für 10 s Verdichtungszeit beträgt die relative Mittelschichtdichte 98,7 %, für 20 s 95,1 % und für 30 s 93,3 %.

Die charakteristischen Werte für das Rohdichteprofil zeigen, dass eine Mittelschicht mit nahezu homogener Dichteverteilung mit zunehmender Verdichtungszeit kleiner wird. Die Form des Rohdichteprofils wird somit mit zunehmender Verdichtungszeit ausgerundeter.

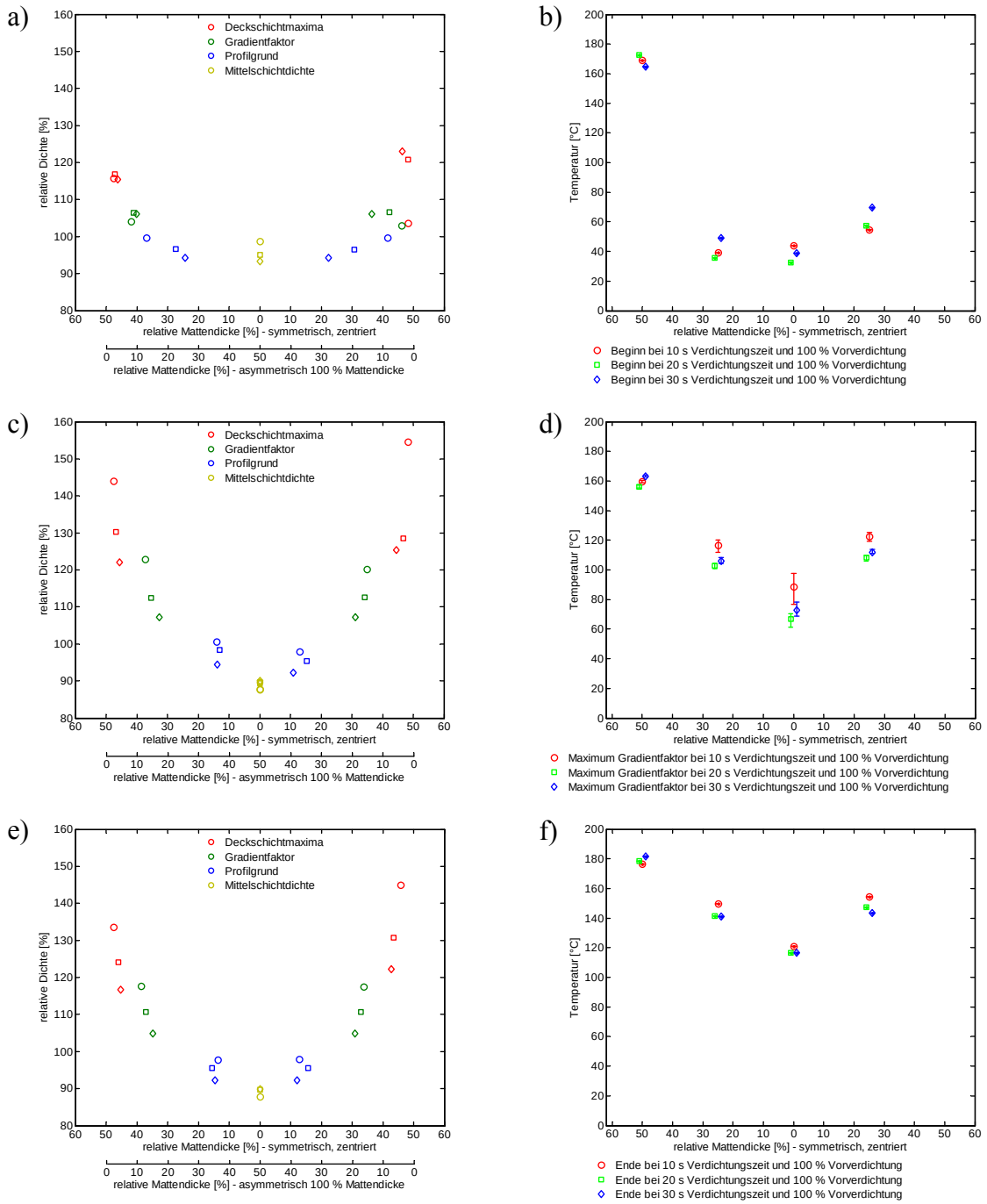


Abb. 4.35: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 100 % Solldicke anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊), a) Profil- und b) Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profilverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, d) Temperaturverlauf zur maximalen Ausprägung des Gradientfaktors, e) Profil- und f) Temperaturverlauf am Ende der ersten Haltephase (hier am Ende des Heißpressvorgangs)

Das Temperaturprofil in der Matte ist zu Beginn der ersten Haltephase deutlich ausgeprägt, die Mattenoberfläche vor dem festen Presskolben ist auf 180 °C erwärmt, die 25 %-Schicht und die 50 %-Schicht weisen Temperaturen von 40 °C auf. Die 75 %-Schicht vor dem beweglichen Presskolben weicht in der Temperatur etwas ab mit Werten von 60 °C.

Zu den Zeitpunkten der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte ist eine deutliche Veränderung der Rohdichteprofile für alle drei Verdichtungszeiten sichtbar. Tendenziell geht das ausgerundete Rohdichteprofil zu Beginn der ersten Haltephase in ein eher V-förmiges Rohdichteprofil über, während die Maxima der einzelnen charakteristischen Werte sich ausprägen. Die Deckschichtmaxima steigen auf Werte zwischen 143,9 % für 10 Sekunden Verdichtungszeit und 122 % für 30 Sekunden Verdichtungszeit an. Die Position des Maximums verlagert sich für alle drei Verdichtungszeiten etwas mehr in Richtung Mattenmitte. Der Gradientfaktor zeigt ebenfalls sehr deutliche Unterschiede für die verschiedenen Verdichtungszeiten. Mit zunehmender Verdichtungszeit wandert das Maximum des Gradientfaktors vor dem festen Presskolben weiter in die Mattenmitte, beginnend mit 37,2 % für 10 s Verdichtungszeit zu 32,7 % für 30 s Verdichtungszeit. Die Position des Gradientfaktors für 20 s Verdichtungszeit liegt bei 35,3 % nahezu in der Mitte zwischen den Verdichtungszeiten von 10 s und 30 s. Das entspricht Veränderungen von 4,7 %, 5,7% und 7,3 % für 10 s, 20 s und 30 s Verdichtungszeit.

Der Profilgrund zeigt für alle drei Verdichtungszeiten eine ähnliche Position zwischen 13,0 % und 14,1 % vor dem festen Presskolben. Die Dichte im Profilgrund nimmt mit zunehmender Verdichtungszeit von 100,6 % bei 10 s Verdichtungszeit über 98,3 % bei 20 s auf 94,5 % bei 30 s Verdichtungszeit ab. Dementsprechend sinkt ebenfalls die Dichte im Maximum der Mittelschicht von 100,6 % auf 94,5 %.

Ähnlich verhalten sich die Werte vor dem beweglichem Presskolben, die hier nicht weiter beschrieben werden. Die exakten Werte sind Tabelle 17 zu entnehmen. Einen auffallenden Wert hat die Dichte in der Deckschicht vor dem beweglichen Presskolben mit 154,5 %.

Das Temperaturprofil zum Zeitpunkt, an dem der Gradientfaktor sein Maximum erreicht, ist deutlich ausgeprägt. Die Temperaturen in der 0 %- und der 25 %-Schicht weisen über 100 °C auf. Die Mittelschichttemperaturen liegen unter 100 °C. Tendenziell zeigen die Temperaturen der kürzeren Verdichtungszeiten einen leicht höheren Wert. Eine Ausnahme bildet hier die Temperatur in der 0 %-Schicht für 20 s Verdichtungszeit, die maximal ist.

Zum Ende der ersten Haltephase verändern sich die charakteristischen Werte nicht mehr sehr deutlich. Einzig die Deckschichtdichte zeigt auffallende Änderungen, für die Verdichtungszeit von 10 s fällt diese um 10,3 % auf 133,6 %, für die Verdichtungszeiten von 20 s und 30 s

verringert sich die Dichte um ca. 6 % in den Deckschichten. Die Positionen der Deckschichtmaxima bleiben annähernd konstant.
Die Dichtewerte für den Gradientfaktor und den Profilgrund sinken ebenfalls. Die Dichtewerte für den Gradientfaktor betragen 117,6 % für 10 s Verdichtungszeit, 110,8 % für 20 s Verdichtungszeit und 104,9 % für 30 s Verdichtungszeit. Die Dichte im Profilgrund fällt zwischen 2,2 % und 2,9 % Verdichtungszeit auf 97,7 %, 95,6 % und 92,3 % für 10 s, 20 s und 30 s. Das Temperaturprofil am Ende der Verdichtung ist deutlich flacher geworden, alle Temperaturen liegen über 100 °C.

Die Abbildungen 4.36 a), c) und e) zeigen die Entwicklung des Rohdichteprofils für ein Erstverdichtungsniveau von 110 %.
Auffallend ist, dass auch hier die Dichte und die Position der Deckschichtmaxima sehr ähnlich sind. Das Deckschichtmaximum für 10 s Verdichtungszeit weist eine Dichte von 118,3 % und eine Position von 2,2 % vor dem festen Presskolben auf. Bei 20 s Verdichtungszeit liegt das Maximum bei 2,7 % mit einer Dichte von 118,0 %. Für 30 s Verdichtungszeit zeigt das Deckschichtmaximum die Dichte von 118,9 % an der Position von 4,7 %.
Der Gradientfaktor weist für 10 s und 20 s mit 47,1 % und 46,9 % nahezu identische Positionen vor dem festen Presskolben auf, die sich in den Dichtewerten mit 104,3 % und 108,4 % deutlicher unterscheiden. Der Gradientfaktor bei 30 s Verdichtungszeit liegt bei 43,8 % und einer Dichte von 107,1 % und weicht damit in der Position merklich von den beiden anderen Verdichtungszeiten ab.
Deutlich unterschiedlich verhält sich der Profilgrund für die drei verschiedenen Verdichtungszeiten. Mit zunehmender Verdichtungszeit wandert der Profilgrund in Richtung der Mittelschicht, von 43,9 % bei 10 s Verdichtungszeit über 37,7 % bei 20 s Verdichtungszeit zu 29,8 % bei 30 s Verdichtungszeit. Die Dichte fällt an diesen Positionen von 99,4 % bei 10 s auf 96,5 % bis auf 94,6 % bei 30 s Verdichtungszeit.
Die Mittelschichtdichte reduziert sich ebenfalls mit zunehmender Verdichtungszeit, von 98,0 % auf 95,4 % sinkt der Wert bei 20 s Verdichtungszeit, auf 93,0 % bei 30 s Verdichtungszeit.

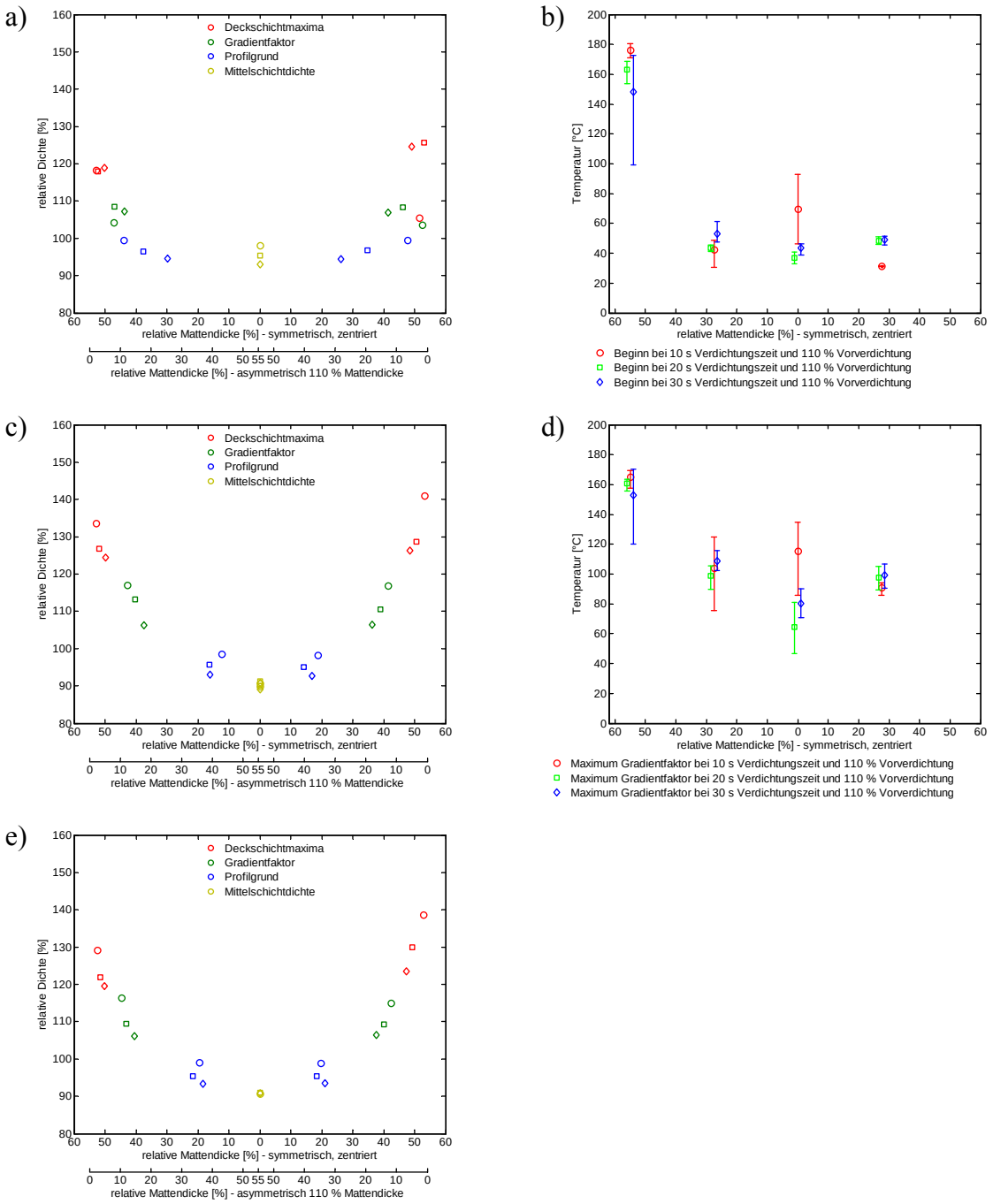


Abb. 4.36: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 110 % Solldicke anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊), a) Profil- und b) Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profil- und d) Temperaturverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, e) Profilverlauf am Ende der ersten Haltephase

Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben verhalten sich sehr ähnlich. Einzig die Deckschichtdichte vor dem beweglichen Presskolben und der Gradientfaktor weichen ab. Das Temperaturprofil, das in Abb. 4.36 b) zu diesem Zeitpunkt ersichtlich ist, ist für alle drei Verdichtungszeiten ähnlich ausgeprägt mit einer hohen Temperatur an der Mattenoberfläche und mit einem kaum deutlichen Temperaturgradienten zwischen der 25 %-Schicht und der

75 %-Schicht. Die Werte für die Temperatur bei 10 s Verdichtungszeit in der 50 %-Schicht fallen deutlich aus dem Rahmen. Das ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Lage eines Thermoelementes für die in diesem Temperaturprofil berücksichtigten Messwerte zurückzuführen.

Die maximale Ausprägung der charakteristischen Werte während der Rohdichteprofilentwicklung zeigt Abb. 4.36 c). Aus der Lage der Werte lässt sich ein deutlich V-förmigeres Rohdichteprofil als zu Beginn der ersten Haltephase erkennen. Die Dichtemaxima in den Deckschichten sind auf Dichtewerte zwischen 133,5 %, 126,8 % und 124,5 % gestiegen für die drei Verdichtungszeiten in aufsteigender Reihenfolge. Die Position der Maxima hat sich in der gleichbleibenden Reihenfolge der Verdichtungszeiten von 2,1 % über 3,1 % nach 5,1 % nach innen verschoben.

Die Gradientfaktoren weisen ein ähnliches Verhalten auf, diese verlagern sich auch deutlich in Richtung der Mattenmitte mit den Positionen 42,8 %, 40,3 % und 37,4 % vor dem festen Presskolben. In dieser Reihenfolge nehmen auch die Dichten ab von 116,9 % bei 10 s, über 113,3 % bei 20 s und 106,2 % bei 30 s Verdichtungszeit.

Der Profilgrund weist in der zeitlich maximalen Ausprägung eher einheitliche Werte auf, nachdem diese zu Beginn der ersten Haltephase sehr divergierend waren. Die Dichtewerte liegen zwischen 98,5 % und 93,1 %, die Positionen liegen bei 12,3 %, 16,3 % und 16,1 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

Das Maximum der Mittelschichtdichte ist sehr einheitlich mit Werten zwischen 91,2 % und 90,7 %.

Die Werte vor dem beweglichen Presskolben sind ähnlich konsistent, wie sich aus Tabelle 17 erkennen lässt.

Das Temperaturprofil, das in Abb. 4.36 d) ersichtlich ist, zeigt, dass die Temperaturen zum Zeitpunkt des Maximums des Gradientfaktors in der 25 %- und 75 %- Schicht um die 100 °C liegen. Die Mittelschichttemperatur ist uneinheitlich zwischen ca. 60 °C bis 80 °C. Die Temperatur für 10 s Verdichtungszeit in der Mittelschicht ist als Ausreißer zu bewerten.

Zum Ende der ersten Haltephase sind die charakteristischen Werte nicht mehr ganz so deutlich V-förmig ausgeprägt wie zum Zeitpunkt der Maxima der einzelnen charakteristischen Werte. Am deutlichsten haben sich die Deckschichtmaxima verändert, die auf 129,1 % für 10 s Verdichtungszeit auf 121,9 % für 20 s und 119,5 % für 30 s gesunken sind. Die Positionen haben sich kaum verändert mit 2,5 %, 3,4 % und 4,9 % in Reihenfolge aufsteigender Verdichtungszeiten.

Nur sehr gering haben sich die Gradientfaktoren verändert, die in der Dichte nahezu unverändert geblieben sind und die Position um zwei bis drei Prozent nach außen verschoben haben.

Sehr ähnlich verhält sich der Profilgrund, die Dichtewerte verändern sich im Bereich unter einem Prozent, die Positionen verlagern sich um 7,3 %, 5,2 % und 2,2 % nach außen. Die Positionen des Profilgrunds liegen für 10 s Verdichtungszeit bei 19,5 %, für 20 s bei 21,2 % und für 30 s bei 18,3 %. Das Niveau der Mittelschichtdichte hat sich für alle drei Verdichtungszeiten minimal verändert und weist nahezu identische Werte zwischen 90,7 % und 91,0 % auf. Ein Temperaturprofil kann für die Zeitpunkte zum Ende der ersten Haltephase nicht angegeben werden, da die Zeitpunkte für die verschiedenen Pressdiagramme unterschiedlich sind. Das würde eine unzulässige zeitliche Mischung der Daten bedeuten.

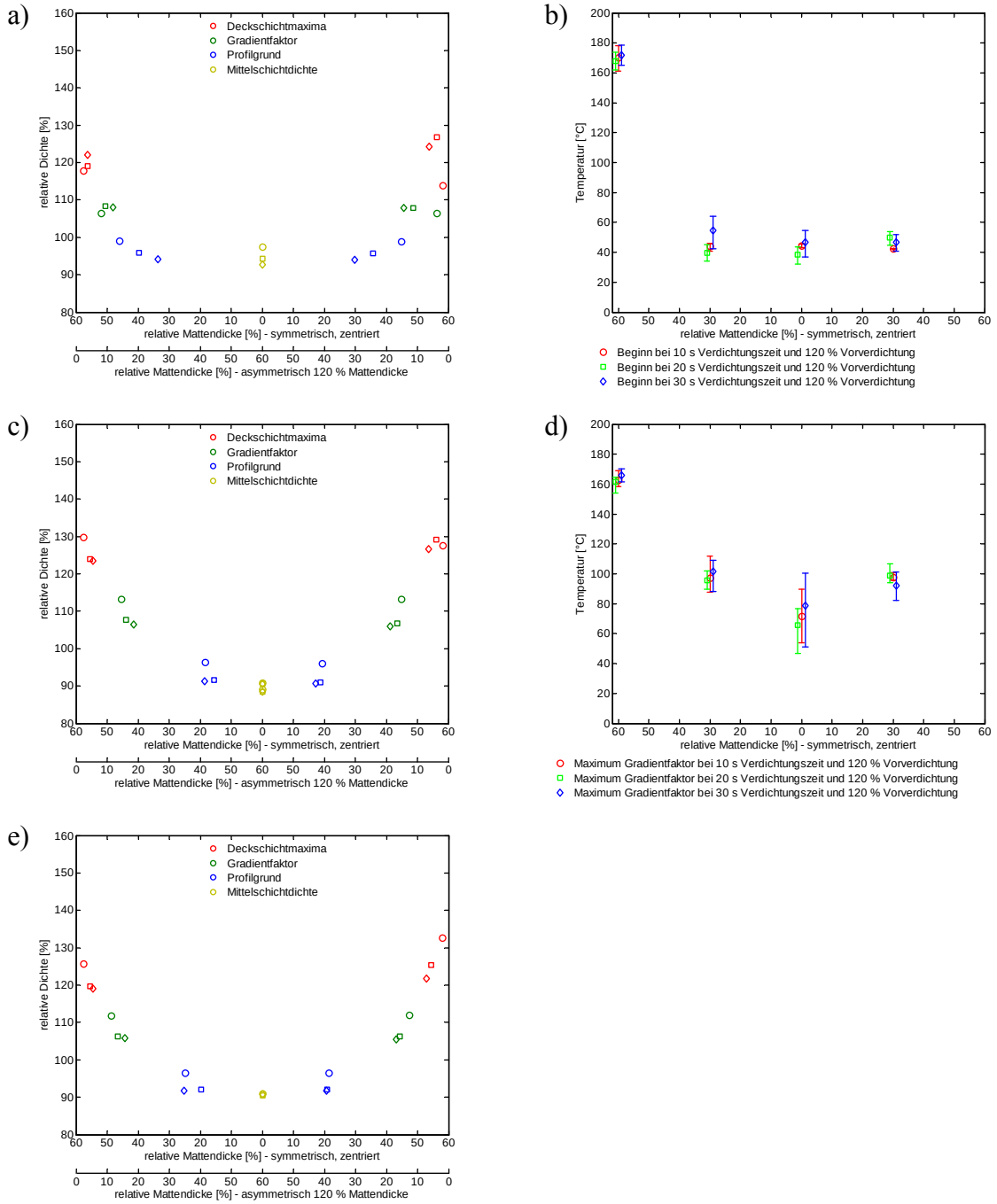


Abb. 4.37: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 120 % Solldicke anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊), a) Profil- und b) Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profil- und d) Temperaturverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, e) Profilverlauf am Ende der ersten Haltephase

Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % werden die Werte in Abb. 4.37 dargestellt. Es zeigen sich deutlich ausgerundete Rohdichteprofile, die durch die charakteristischen Werte markiert sind. Vor dem festen Presskolben befinden sich die Deckschichtmaxima zu Beginn der ersten Haltephase in der Reihenfolge aufsteigender Verdichtungszeiten von 10 s über 20 s nach 30 s bei 117,8 %, 119,0 % und 122,0 % an den Positionen 2,3 %, 3,7 % und 3,8 %. Die Deckschichtmaxima haben sich mit den unterschiedlichen Verdichtungszeiten auf ein nahezu gleichmäßiges Dichteniveau entwickelt.

Die Gradientfaktoren vor dem festen Presskolben liegen mit steigender Verdichtungszeit immer weiter in Richtung der Mattenmitte. Für eine Verdichtungszeit von 10 s liegt der Gradientfaktor bei 52,0 % der Zielmattendicke, für 20 s Verdichtungszeit bei 50,5 % und für 30 s bei 48,0 % Mattendicke. Die Dichten an den Positionen betragen in gleicher Reihenfolge 106,4 %, 108,3 % und 108,0 %.

Der Profilgrund vor dem festen Presskolben zeigt zu diesem Zeitpunkt sehr deutliche Unterschiede zwischen den Verdichtungszeiten. Bei 10 s Verdichtungszeit liegt er bei 46,1 %, für 20 s bei 39,7 % und für 30 s bei 33,7 % der Zielmattendicke. Die Dichtewerte betragen 99,0 %, 95,8 % und 94,1 %.

Die Mittelschichtdichte zu diesem Zeitpunkt ist unterschiedlich mit 97,4 %, 94,2 % und 92,7 % bei den Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

Das Temperaturprofil ist deutlich ausgeprägt (siehe Abb. 4.37 b)). In der 0 %-Schicht auf der Mattenoberfläche ist die Presskolbentemperatur mit 170 °C erreicht, in der 25 %-, der 50 %- und der 75 %-Schicht liegt die Mattentemperatur in einem Bereich von 40 °C bis 60 °C leicht über der Mattentemperatur zu Beginn des Heißpressvorgangs.

Die maximale Ausprägung der charakteristischen Werte ist aus Abb. 4.37 c) ersichtlich. Das Rohdichteprofil ist etwas V-förmiger geworden. Die Dichtemaxima vor dem festen Presskolben haben sich im Dichtewert und in der Position geändert, für die Verdichtungszeit von 10 s weist das Maximum einen Dichtewert von 129,8 %, für eine Verdichtungszeit von 20 s 124,0 % und bei 30 s einen Dichtewert von 123,4 % auf. Die Positionen zu diesen Zeitpunkten betragen 2,3 %, 4,6 % und 5,5 %. Die Deckschichtmaxima vor dem festen Presskolben haben sich zu diesen Zeitpunkten für die Verdichtungszeiten von 20 s und 30 s um 1,9 % bzw. 1,7 % in Richtung der Mattenmitte verschoben.

Die Gradientfaktoren haben sich zum zeitlichen Maximum deutlich in Richtung Mattenmitte verlagert. Für die Verdichtungszeit von 10 s weist der Gradientfaktor eine Position von 45,4 % und einen Dichtewert von 113,3 % auf, für 20 s und 30 s Verdichtungszeit sind die Werte entsprechend 43,9 % und 107,7 % und 41,5 % und 106,4 %.

Der Profilgrund für die drei Verdichtungszeiten hat sich deutlich in Richtung der Mattenmitte verschoben. Die Positionen für den Profilgrund sind mit 18,3 %, 15,5 % und 18,5 % für 10 s, 20 s und 30 s Verdichtungszeit ähnlich. Deutlich unterscheiden sich jedoch die Dichten im Profilgrund, die in der entsprechenden Reihenfolge 96,3 %, 91,6 % und 91,3 % aufweisen.
Die Dichtewerte im Maximum der Mittelschicht betragen bei 10 s Verdichtungszeit 90,8 %, bei 20 s 90,6 % und bei 30 s 90,4 %.
Die charakteristischen Werte vor dem beweglichen Presskolben verhalten sich sehr ähnlich und sind aus Tabelle 17 zu entnehmen.
Das Temperaturprofil zum Zeitpunkt des Maximums des Gradientfaktors zeigt neben der nahezu konstant gebliebenen Oberflächentemperatur, dass die Temperaturen in der 25 %-Schicht und der 75 %-Schicht knapp im Bereich von 100 °C liegen. Die Mittelschichttemperatur weist Werte zwischen knapp 70 °C und gut 80 °C auf, wobei die Extremwerte für 30 s Verdichtungszeit auch nahezu an die 100 °C Marke reichen. Auffallend ist, dass bis auf die 75 %-Schicht die Temperaturwerte für 30 s Verdichtungszeit am höchsten liegen.
Zum Ende der ersten Haltephase ist das Rohdichteprofil wieder etwas ausgerundeter. Die Deckschichtmaxima haben die Positionen nicht verändert. Die Dichtewerte sind auf 125,6 %, 119,7 % und 119,1 % vor dem festen Presskolben gesunken, das entspricht Veränderungen von 4,2 % für 10 s Verdichtungszeit und 4,3 % für 20 s und 30 s Verdichtungszeit.
Die Gradientfaktoren haben sich am Ende der ersten Haltephase mit den Positionen von 44,7 % bei 10 s Verdichtungszeit, 46,6 % bei 20 s und 44,2 % bei 30 s Verdichtungszeit um 2,3 % bis 2,7 % nach außen verlagert. Die Dichten sind auf 111,7 %, 106,2 % und 105,8 % um 0,8 % bis 1,6 % gesunken.
Deutlicher ist die Veränderung des Profilgrundes. Die Positionen haben sich mit 24,8 % für 10 s Verdichtungszeit und 19,7 % für 20 s und 25,3 % für 30 s Verdichtungszeit zwischen 4,2 % für 20 s Verdichtungszeit und 6,8 % für 30 s Verdichtungszeit in Richtung der Mattenoberfläche verschoben.
Die Dichte in der Mattenmitte ist mit 91,0 % für 10 s und 20 s Verdichtungszeit und 90,8 % für 30 s Verdichtungszeit für alle drei Verdichtungszeiten auf nahezu gleichem Niveau. Die Veränderungen zum Maximum sind nur marginal mit 0,1 % bis 0,4 %.

♦ Abhängigkeit der Rohdichteprofilentwicklung vom Erstverdichtungsniveau

Die Abbildungen 4.38 bis 4.40 zeigen die charakteristischen Werte der Rohdichteprofilentwicklung in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau für die verschiedenen Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

In Abb. 4.38 a) wird deutlich, dass sich die charakteristischen Werte Dichtemaximum, Gradientfaktor und Profilgrund für die verschiedenen Verdichtungsniveaus nur wenig unterscheiden. Die Deckschichtmaxima liegen für die Verdichtungsniveaus 100 %, 110 % und 120 % bei 115,7 %, 118,3 % und 117,8 % der relativen Dichte. Die Position der Maxima 2,4 %, 2,2 % und 2,3 % in der Reihenfolge der Verdichtungsniveaus sind nahezu gleich.

Sehr ähnlich sind auch die Dichteniveaus des Profilgrundes mit 99,7 %, 99,4 % und 99,0 % für die drei Verdichtungsniveaus in aufsteigender Reihenfolge. Die Positionswerte im Profilgrund unterscheiden sich jedoch sehr deutlich mit 36,8 %, 43,9 % und 46,1 % für drei Verdichtungsniveaus. Die Veränderung der Positionen von 100 % zu 110 % Erstverdichtungsniveau fällt dabei mit 7,1 % größer aus als mit 2,2 % von 110 % zu 120 %.

Die Mittelschichtdichte ist mit Werten zwischen 97,4 % und für das Verdichtungsniveau von 120 % und 98,7 % für 100 % auf einem sehr ähnlichen Niveau.

Im Temperaturprofil, das an den Positionen 0 %, 25 %, 50 % und 75 % Mattendicke angegeben ist, zeigt sich eine typische Ausprägung für die vier Schichten, der Maximalwert an der Mattenoberfläche mit einem deutlichen Abfall zur Mitte hin und einer nahezu homogenen Verteilung in der Mattenmitte in den Schichten von 25 %, 50 % und 75 % (siehe Abb. 4.38 b)).

Die maximale Ausprägung der charakteristischen Werte sind aus Abb. 4.38 c) ersichtlich. Die Deckschichtmaxima sind in den Dichtewerten extrem gestiegen auf 143,9 % für ein Erstverdichtungsniveau von 100 %, 133,5 % für 110 % und 129,8 % für 120 % Erstverdichtungsniveau. Das entspricht einer Zunahme zwischen 12,0 % bis 28,2 %. Die Positionen der Deckschichtmaxima haben sich kaum verändert.

Deutlich haben sich jedoch der Gradientfaktor und der Profilgrund verändert. Beide haben sich in Richtung Mattenmitte verschoben. Der Gradientfaktor für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % hat sich auf 122,9 %, 116,9 % und 113,3 % in den Dichtewerten verändert. Die Positionen haben sich in der gleichen Reihenfolge auf 37,2 %, 45,8 % und 45,4 % verschoben. Das entspricht einer Verlagerung von ca. 4,3 % bis 6,6 % in Richtung Mattenmitte.

Der Dichtewert im Profilgrund hat sich um ca. 0,5 % für die Verdichtungsniveaus von 110 % und 120 % verringert, für das Erstverdichtungsniveau von 100 % jedoch leicht erhöht. Die

Positionen haben sich deutlich verändert auf 14,1 %, 12,3 % und 18,3 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %. Das entspricht Veränderungen von 22,7 %, 31,6 % und 28,7 % in Richtung Mattenmitte.

Die Dichte in der Mittelschicht hat deutlich abgenommen auf Dichtewerte von 87,8 % für 100 %, 90,7 % für 110 % und 90,8 % für 120 % Erstverdichtungsniveau. Das sind Veränderungen gegenüber dem Beginn der ersten Haltephase von 10,9 %, 7,3 % und 6,8 % in der gleichbleibenden Reihenfolge der Erstverdichtungsniveaus.

An der Temperaturkurve ist auffallend, dass die Temperaturwerte zum Zeitpunkt des Maximalwertes des Gradientfaktors in der 25 %-Schicht, der 50 %-Schicht und der 75 %-Schicht bei Erstverdichtungen, die weiter an der Solldicke der Matte liegen, höher sind als für geringere Erstverdichtungen.

Zum Ende der ersten Haltephase, siehe Abb. 4.38 d), haben sich die Dichtewerte der Deckschichtmaxima auf 133,6 %, 129,1 % und 126,6 % gesenkt. Die Positionen sind nahezu konstant geblieben.

Der Gradientfaktor für die einzelnen Erstverdichtungsniveaus ist für die Dichtewerte nahezu konstant geblieben. Die Positionen des Gradientfaktors haben sich jedoch um 1,3 %, 1,9 % und 2,3 % nach außen auf die Werte von 38,5 %, 44,7 % und 48,7 % verschoben.

Sehr deutlich haben sich die Positionen für den Profilgrund, besonders für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % verändert, die sich um 7,3 % bzw. 6,5 % nach außen verlagert haben. Für das Erstverdichtungsniveau von 100 % ist nahezu keine Veränderung mit einer Verschiebung um 0,4 % nach außen zu beobachten. Die Dichtewerte im Profilgrund haben sich für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % mit 0,5 % und 0,3 % kaum verändert. Für das Erstverdichtungsniveau von 100 % ist jedoch eine Dichtezunahme von 2,9 % zu bemerken.

Die Dichtewerte in der Mittelschicht sind unverändert bzw. zeigen für das Erstverdichtungsniveau von 120 % nur einen Anstieg von 0,2 % im Vergleich zur Maximum.

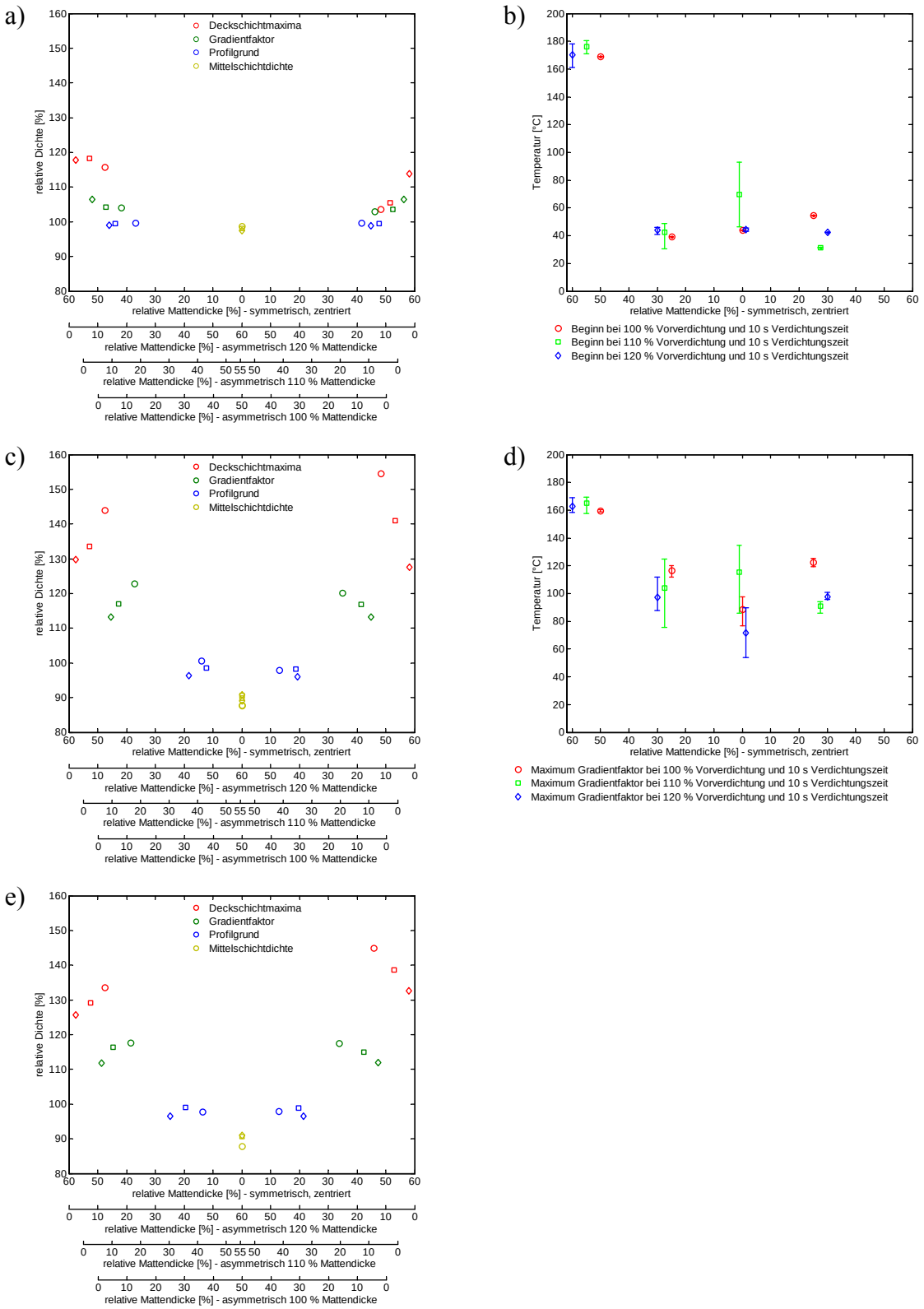


Abb. 4.38: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 10 s anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊), a) Profil- und b) Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profil- und d) Temperaturverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, e) Profilverlauf am Ende der ersten Haltephase

Die Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 20 s ist in Abb. 4.39 dargestellt. Die Abb. 4.39 a) zeigt die charakteristischen Werte direkt zu Beginn der ersten Haltephase. Die Dichtemaxima in den Deckschichten liegen für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % bei 116,9 %, 118,0 % und 119,0 % mit den Positionen bei 2,8 %, 2,7 % und 3,7 % recht dicht beieinander. Lediglich die Position bei 120 % weicht von den anderen Positionswerten deutlich ab.

Ähnlich eng liegen mit 106,4 % 108,4 % und 108,3 % auch die Dichtewerte des Gradientfaktors zusammen. Die Positionen der Dichtewerte haben mit 41,0 %, 46,9 % und 50,5 % nahezu den gleichen Abstand voneinander, bezogen auf die Zieldicke der Matte.

Der Profilgrund der Matte variiert mit 96,6 %, 96,5 % und 95,8 % nur um 0,8 % zwischen den Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %. Für 110 % und 120 % Erstverdichtungsniveau liegen die Positionen des Profilgrundes mit 37,7 % und 39,7 % nur um 2 % auseinander. Die Position für das Erstverdichtungsniveau von 100 % weicht mit 27,4 % um 10,3 % Richtung Mattenmitte deutlich ab.

Die Mittelschichtdichte weist mit 95,1 %, 95,4 % und 94,2 % nahezu gleiche Werte auf.

Zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte weisen die Deckschichtmaxima Dichtewerte von 130,3 %, 126,8 % und 124,0 % auf. Die Deckschichtmaxima liegen an den Positionen 3,3 %, 3,1 % und 4,6 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

Der Gradientfaktor für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % weist sehr gleichmäßige Dichtewerte mit 112,4 %, 112,3 % und 107,7 % auf. Die Positionen haben sich deutlich auf 35,3 %, 40,3 % 43,9 % in Richtung der Mattenmitte verschoben. Das entspricht Änderungen von 5,7 % für 100 % Erstverdichtungsniveau bzw. 6,6 % für 110 % und 120 % Erstverdichtungsniveau.

Im Profilgrund haben sich die Dichtewerte deutlich geändert. Dabei ist jedoch bei dem Wert von 98,3 % für 100 % Erstverdichtungsniveau davon auszugehen, dass dieser durch die Nichtberücksichtigung eines Wertes bei der Mittelwertbildung verfälscht wurde. Die Dichtewerte für die drei Positionen liegen bei 98,3 %, 95,6 % und 91,6 % für 100 %, 110 % und 120 % Erstverdichtungsniveau. Die Positionen des Profilgrundes haben sich deutlich nach innen auf 13,0 %, 16,3 % und 15,5 % verlagert. Das sind Veränderungen von 14,4 %, 21,4 % und 24,2 %.

Die Mittelschichtdichte ist auf Werte zwischen 89,8 % und 91,2 % gesunken, was einer Dichteabnahme von 3,9 % bis 5,4 % entspricht.

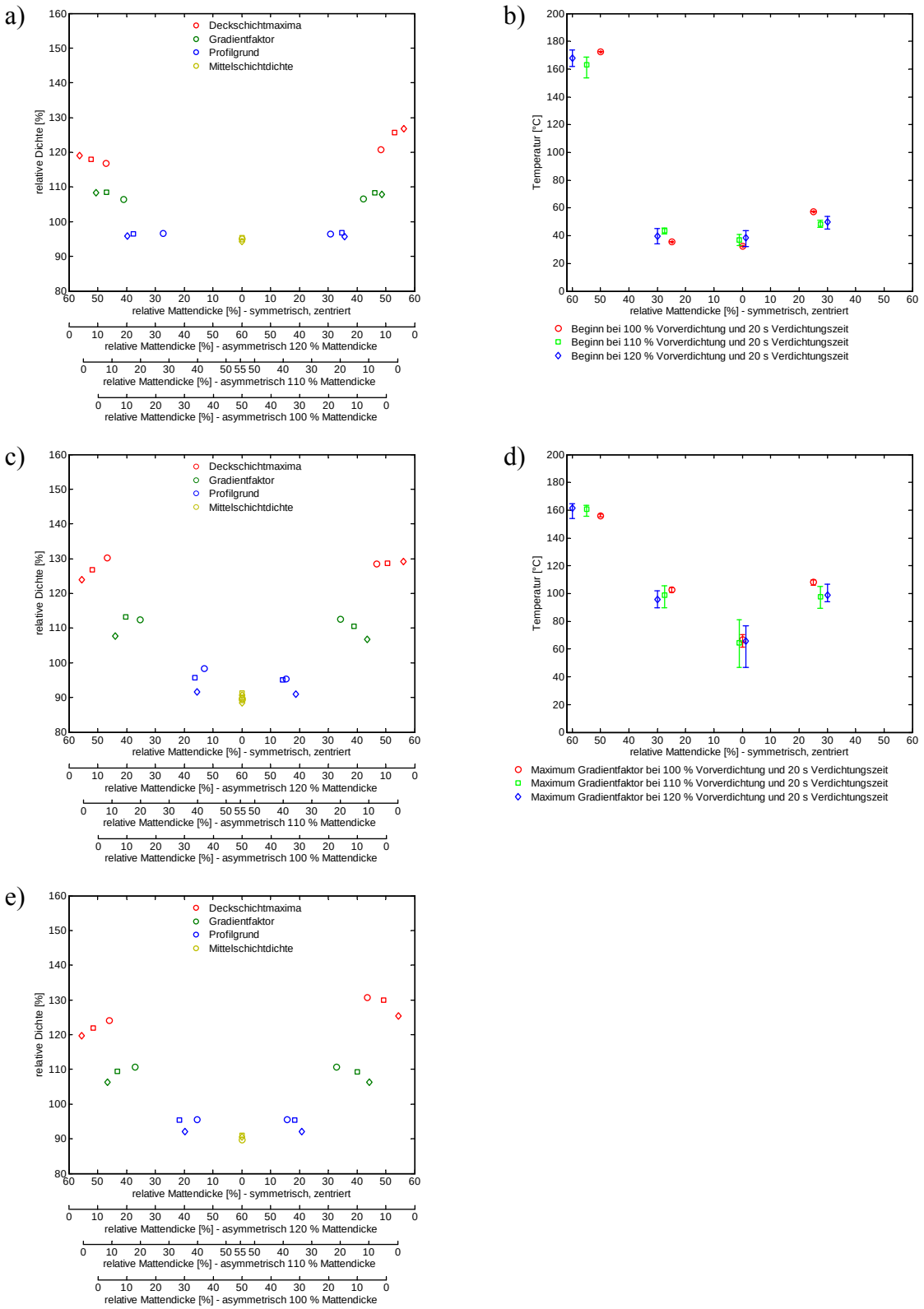


Abb. 4.39: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 20 s anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊), a) Profil- und b)Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profil- und d) Temperaturverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, e) Profilverlauf am Ende der ersten Haltephase

Die charakteristischen Werte des Rohdichteprofils für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % am Ende der ersten Haltephase sind in Abb. 4.39 e) dargestellt.
Die Dichtewerte der Deckschichtmaxima haben um 6,1 %, 4,9 % und 4,3 % auf 124,2 % 121,9 % und 119,7 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % abgenommen. Die Positionen der Dichtewerte sind mit 3,9 %, 3,1 % und 4,5 % nahezu konstant geblieben.
Die Gradientfaktoren haben sich um 1,8 %, 2,9 % und 2,7 % auf 37,1 %, 43,2 % und 46,6 % verschoben. Die Dichtewerte sind um 1,6 %, 3,9 % und 1,5 % auf 110,8 %, 109,4 % und 106,2 % gefallen.
Im Profilgrund beträgt die Dichte 95,6 %, 95,4 % und 92,1 %. Das entspricht einer Abnahme um 2,7 % für das Erstverdichtungsniveau von 100 % und 0,2 % für das Erstverdichtungsniveau von 110 %. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % ist die Dichte um 0,5 % gestiegen.
Die Mittelschichtdichte hat sich um 0,1 % bis 0,2 % verringert gegenüber dem Maximum und beträgt 89,6 %, 91,0 % und 90,5 %.

Die Abb. 4.40 zeigt die Entwicklung der charakteristischen Werte der drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % für eine Verdichtungszeit von 30 s. Die charakteristischen Werte zu Beginn der ersten Haltephase sind in der Abb. 4.40 a) dargestellt.
Die Dichtemaxima vor dem festen Presskolben weisen zu diesem Zeitpunkt die Werte 115,4 %, 118,9 % und 122,0 % auf für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %. Die entsprechenden Positionen liegen bei 3,8 %, 4,7 % und 3,8 %.
Die Gradientfaktoren zu diesen Zeitpunkten haben in der Reihenfolge die Positionen 40,0 %, 43,8 % und 48,0 % mit den entsprechenden Dichtewerten von 106,1 % 107,1 % und 108,0 %.
Im Profilgrund liegen die Dichtewerte bei 94,3 %, 94,6 % und 94,1 % an den Positionen 24,3 %, 29,8 % und 33,7 %.
Die Mittelschicht weist die Dichte von 93,3 %, 93,0 % und 92,7 % auf.
Das Temperaturprofil zu Beginn der ersten Haltephase ist deutlich ausgeprägt mit Temperaturen zwischen 160 °C und 180 °C an der Mattenoberfläche und Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C in den Schichten bei 25 %, 50 % und 75 %. Die große Abweichung der Temperatur an der Mattenoberfläche für das Erstverdichtungsniveau von 110 % fällt auf.

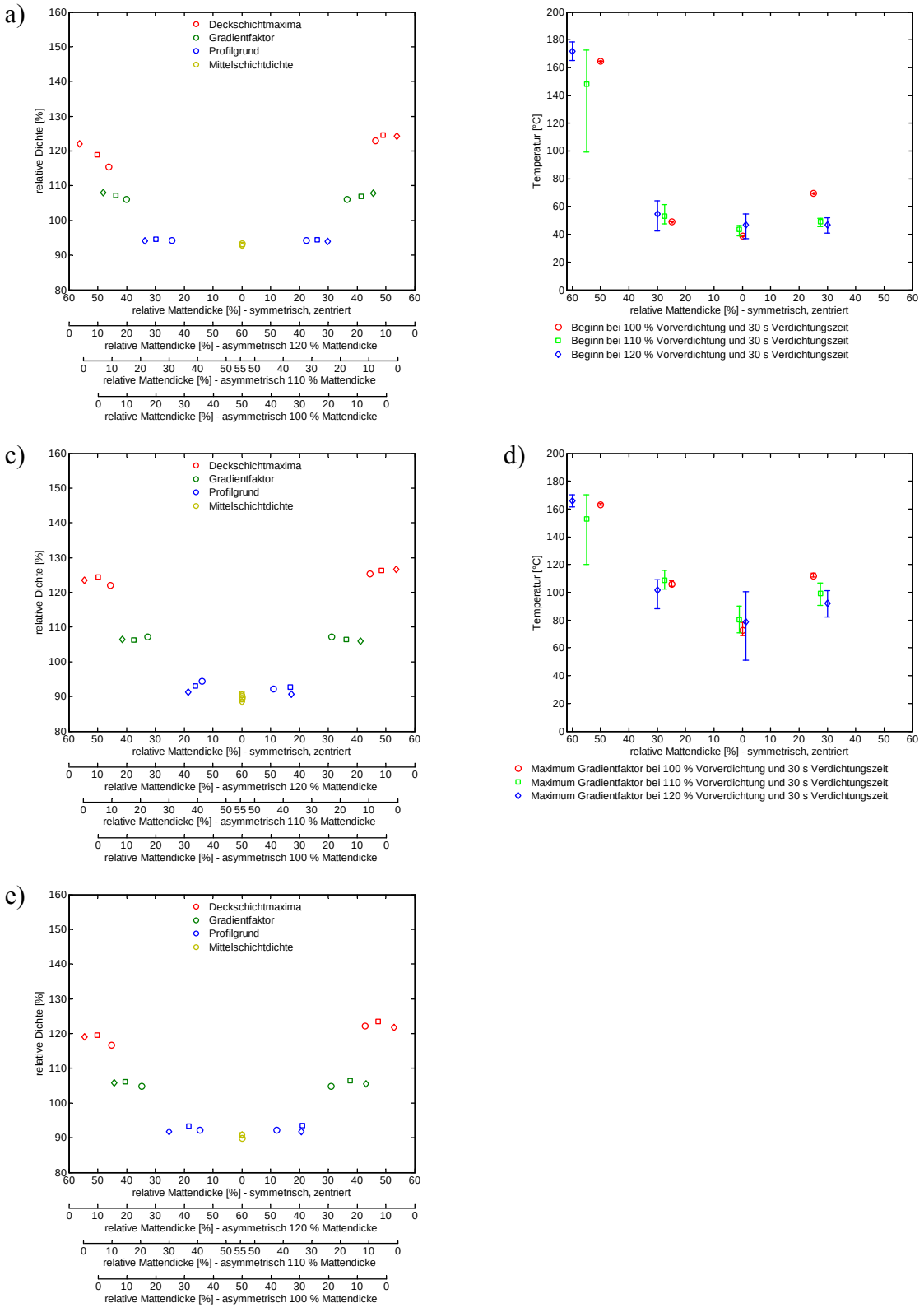


Abb. 4.40: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 30 s anhand von charakteristischen Werten für die Verdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊), a) Profil- und b) Temperaturverlauf zu Beginn der Haltephase, c) Profil- und d) Temperaturverlauf an der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte, e) Profilverlauf am Ende der ersten Haltephase

Die maximale Ausprägung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 30 s ist in Abb. 4.40 c) ersichtlich. Die Dichtewerte haben sich um 6,6 % auf 122,0 % für das Erstverdichtungsniveau von 100 % erhöht, um 5,6 % auf 124,5 % und um 1,4 % auf 123,4 % für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 %. Die Positionen haben sich etwas nach innen verschoben mit 4,4 %, 5,1 % und 5,5 %.

Der Gradientfaktor weist zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung die Dichtewerte von 107,2 %, 106,2 % und 106,4 % auf. Das sind Dichtezunahmen zwischen 0,9 % und 1,6 % gegenüber dem Beginn der ersten Haltephase. Die Positionen sind mit 32,7 %, 37,4 % und 41,5 % deutlich in die Mitte der Matte gewandert, das entspricht Änderungen von 7,3 %, 6,4 % und 6,5 % für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

Im Profilgrund hat die Dichte mit 0,2 % für das Verdichtungsniveau von 100 % etwas auf 94,5 % zugenommen und für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % um 1,5 % bzw. 1,3 % abgenommen. Die Positionen haben sich deutlich für die drei Verdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % auf 13,8 %, 16,1 % und 18,5 % geändert. Damit haben sich die Positionen um 10,5 %, 13,7 % und 15,2 % in Richtung der Mattenmitte verschoben.

Die maximale relative Dichte im Maximum der Mittelschicht ist mit 90,0 %, 90,8 % und 90,4 % für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % sehr ähnlich und hat sich um ungefähr 3 % gegenüber dem Beginn der ersten Haltephase abgesenkt.

Das Temperaturprofil zum Zeitpunkt des maximalen Wertes des Gradientfaktors ist deutlich ausgeprägt. Die Temperaturen für ein Erstverdichtungsniveau von 110 % liegen in den Schichten von 25 %, 50 % und 75 % etwas über denen bei 120 % Erstverdichtungsniveau. Für das Erstverdichtungsniveau von 100 % ist keine eindeutige Tendenz gegenüber den anderen Verdichtungsniveaus erkennbar.

Die charakteristischen Werte am Ende der ersten Haltephase für eine Verdichtungszeit von 30 s sind in Abb. 4.40 e) dargestellt. Die Maxima in den Deckschichten weisen zu diesen Zeitpunkten die Dichtewerte von 116,7 %, 119,5 % und 119,1 % für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % auf, das entspricht einer Abnahme von 5,3 %, 5,0 % und 4,3 %. Die Positionen haben sich auf 4,8 %, 4,9 % und 5,5 % verändert.

Der Gradientfaktor hat sich in den Dichtewerten uneinheitlich gegenüber der maximalen Ausprägung verändert und weist die Dichten von 104,9 %, 106,2 % und 105,8 % auf. Die Positionen des Gradientfaktors haben sich um 2,0 %, 3,1 % und 2,7 % nach außen auf 34,7 %, 40,5 % und 44,2 % verschoben.

Die Dichtewerte im Profilgrund haben sich etwas uneinheitlich entwickelt auf 92,3 %, 93,4 % und 91,7 %. Die Positionen haben sich um 0,7 %, 4,2 % und 6,8 % auf 14,5 %, 18,3 % und 25,3 % nach außen verschoben.
Die Dichtewerte in der Mittelschicht betragen 89,8 %, 90,7 % und 90,8 %. Die Veränderungen sind damit geringer als 0,5 %.

4.3.4.2 Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte

Die Abbildungen 4.41 bis 4.46 stellen die relative Rohdichte der charakteristischen Werte über der Presszeit dar (ρ-t-Ebene). Es sind nur die Werte zu Beginn der ersten Haltephase und der Zeitpunkt der maximalen Ausprägung dargestellt. Die Einbeziehung weiterer Werte zum Ende der ersten Haltephase würde die Darstellung unübersichtlich machen. Die Abbildungen 4.41 bis 4.43 zeigen Entwicklung der charakteristischen Werte in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit, die Abbildungen 4.44 bis 4.46 in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau. Bei der Beschreibung der Werte wird im Wesentlichen auf die Werte vor dem festen Presskolben eingegangen.

♦ Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit

Die Abb. 4.41 stellt die Entwicklung der charakteristischen Werte für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20, s und 30 s für das Erstverdichtungsniveau von 100 % dar. Zu Beginn der ersten Haltephase zeigen die charakteristischen Werte ein divergierendes Verhalten mit zunehmender Verdichtungszeit. Dieses wird in Abb. 4.35 nicht so deutlich wie in der hier beschriebenen Abb. 4.41. Die Maxima in den Deckschichten vor dem festen Presskolben weisen die Dichtewerte 115,7 %, 116,9 % und 115,4 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s auf.
Der Profilgrund weist die Werte 99,7 %, 96,6 % und 94,3 % auf für die entsprechenden Verdichtungszeiten. Das ist eine nahezu gleichmäßige Abnahme um 2,1 % bis 2,3 % der Dichte im Profilgrund mit steigender Verdichtungszeit.
Die Dichtewerte des Gradientfaktors ergeben sich aus der Definition und sind in Tabelle 16 ersichtlich.
Ähnlich gleichmäßig wie die Dichtewerte im Profilgrund nehmen diese auch in der Mittelschicht mit steigender Verdichtungszeit auf 98,7 %, 95,1 % und 93,3 % ab.

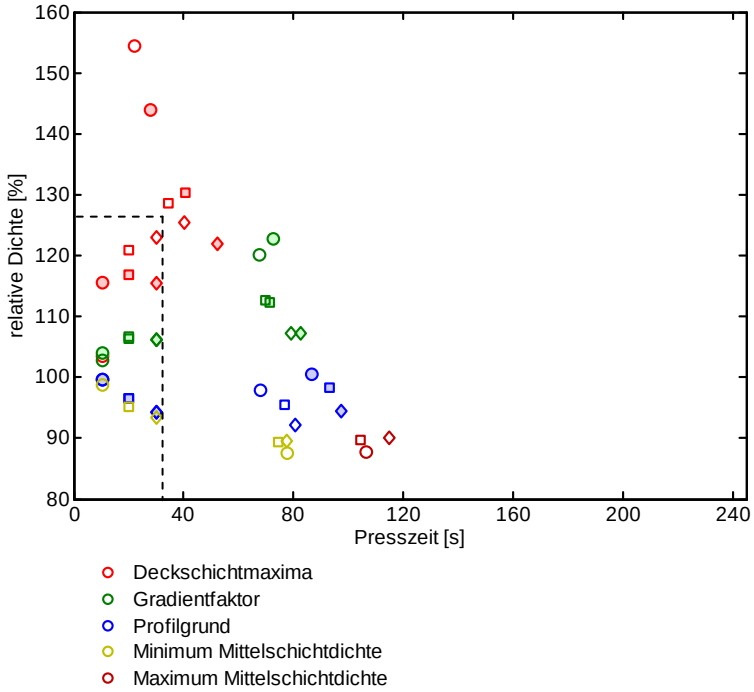


Abb. 4.41: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 100 %. Die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊) sind durch die angegebenen Marker gekennzeichnet, die unterschiedlichen Positionen der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) markiert. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Die Dichtewerte im Profilgrund sinken nahezu parallel zur Mittelschichtdichte auf 99,7 %, 96,6 % und 94,3 %, ebenfalls in abnehmender Reihenfolge der Verdichtungszeiten.

Der Dichtewert im Maximum der Deckschichten vor dem festen Presskolben zeigt sich für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s nach 27,9 s, 40,6 s und 52,3 s mit den Dichtewerten 143,9 %, 130,3 % und 122,0 %. Das entspricht 17,9 s, 20,6 s und 22,3 s nach Beginn der ersten Haltephase. Die Dichtedifferenzen an den entsprechenden Zeitpunkten sind 28,2 %, 13,4 % und 6,6 %.

Der Gradientfaktor weist das Maximum in der entsprechenden Reihenfolge der Verdichtungszeiten bei 72,7 s, 71,2 s und 82,7 s der Presszeit mit 122,9 %, 112,4 % und 107,2 % relativer Dichte auf. Die Differenzen zu Beginn der ersten Haltephase sind für die Zeit 62,7 s, 51,2 s und 52,7 s und für die Dichte 18,9 %, 7,9 % und 1,1 %.

Das Maximum des Profilgrunds zeigt sich für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s nach 86,6 s, 93,2 s und 97,6 s der Presszeit mit den relativen Dichtewerten von 100,6 %, 98,3 % und 94,5 %. Das sind zeitliche Differenzen zu Beginn der ersten Haltephase von 76,6 s, 73,3 s und 62,0 s und den Dichtewerten von +0,9 %, +1,7 % und +1,2 %.

Das Minimum in der Mittelschicht ist für die drei Presszeiten in der Reihenfolge aufsteigender Verdichtungszeiten nach 77,5 s, 74,4 s und 77,6 s mit den Dichtewerten von 87,6 %, 89,4 % und 89,6 % erreicht. Die Konzentration auf einen engen Zeit- und Dichtebereich fällt auf.

Nach 106,5 s, 104,6 s und 114,8 s zeigen sich für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s die Maxima in der Mittelschicht der Matte mit den Dichtewerten von 87,8 %, 89,8 % und 90,0 %. Das ist 29,0 s, 30,0 s und 27,2 s nach dem Minimum für die entsprechenden Verdichtungszeiten. Die Dichtewerte haben um 0,2 % für 10 s Verdichtungszeit und 0,4 % für sowohl 20 s als auch 30 s Verdichtungszeit zugenommen.

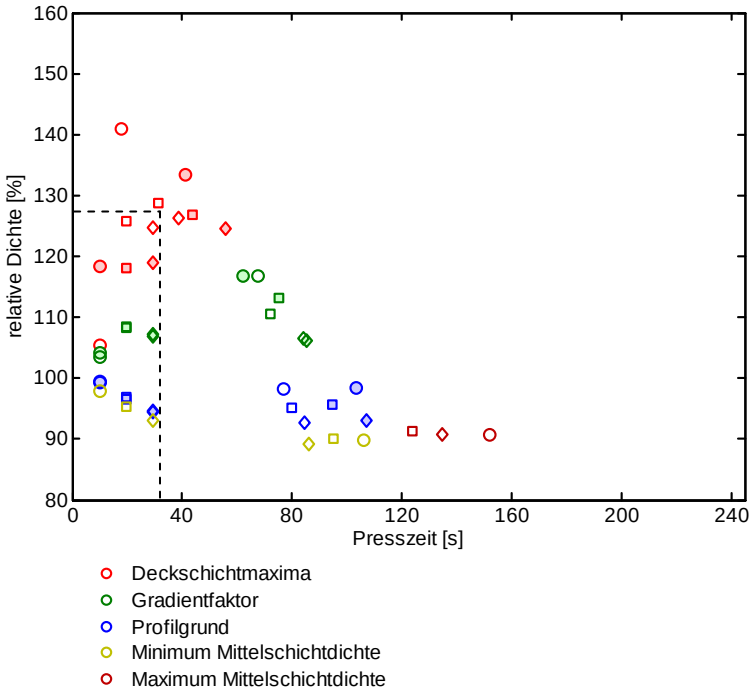


Abb. 4.42: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 110 %. Die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊) sind durch die angegebenen Marker gekennzeichnet, die unterschiedlichen Positionen der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) markiert. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Die zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte ist für das Verdichtungsniveau von 110 % in Abb. 4.42 dargestellt. Zu Beginn der ersten Haltephase liegen die Dichtemaxima in den Deckschichten der Matte für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s bei 118,3 %, 118,0 % und 118,9 %.

Der Profilgrund weist in gleicher Reihenfolge der Verdichtungszeiten die Werte 99,4 %, 96,5 % und 94,6 % auf.

Die Dichten des Gradientfaktors sind zwischen Deckschichtmaxima und Profilgrund mit 104,3 %, 108,4 % und 107,1 % angesiedelt.
Die Mittelschichtdichte sinkt ähnlich kontinuierlich mit der Verdichtungszeit wie der Profilgrund auf die Werte von 98,0 % 95,4 % und 93,0 %.
Die zeitlich maximale Ausprägung der Deckschichtmaxima vor dem festen Presskolben wird für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s nach 40,9 s, 43,9 s und 55,8 s mit den Dichtewerten 133,5 %, 126,8 % und 124,5 % erreicht. Damit treten die Dichtewerte in einem zeitlichen Abstand nach Beginn der ersten Haltephase von 30,9 s, 23,9 s und 25,8 s auf. Die Dichtezunahme an diesen Punkten beträgt 15,2 %, 8,8 % und 5,6 %.
Der Gradientfaktor wird für die drei Verdichtungszeiten in entsprechender Reihenfolge nach 62,0 s, 75,4 s und 85,3 s der Presszeit erreicht und zeigt an diesen Zeitpunkten die Dichtewerte von 116,9 % und 113,3 % und 106,2 %. Daraus folgt, dass die maximale Ausprägung des Gradientfaktors nach 52,0 s, 55,4 s und 55,3 s nach Beginn der ersten Haltephase auftritt und eine Dichteveränderung von +12,6 %, +4,9 %, und -0,9 % aufweist.
Der Profilgrund vor dem festen Presskolben erreicht die maximale Ausprägung nach 103,2 s, 94,6 s und 107,2 s mit Dichtewerten von 98,5 %, 95,6 % und 93,1 %. Im Vergleich zum Beginn der ersten Haltephase kommt es nach 93,2 s, 74,6 s und 87,2 s zur maximalen Ausprägung des Profilgrundes. Die Dichtewerte nehmen um 0,9 % für 10 s und 20 s Verdichtungszeit und 1,5 % für 30 s Verdichtungszeit ab.
In der Mittelschicht werden die Minima nach 106,0 s, 95,1 s und 86,0 s erreicht und haben Dichtewerte von 89,8 %, 90,1 % und 89,1 %. Das entspricht einer Veränderung von 8,2 %, 5,3 % und 3,9 % nach 96,0 s, 75,1 s und 56,0 s.
Das Maximum der Mittelschicht nach Beginn der ersten Haltephase zeigt sich bei 151,7 s, 123,9 s und 134,6 s mit den Dichtewerten von 90,7 %, 91,2 % und 90,8 % für die Verdichtungszeiten in aufsteigender Reihenfolge. Die Maxima werden 45,7 s, 28,8 s und 38,6 s nach den Minima für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s in entsprechender Reihenfolge erreicht. Für diese Werte ist keine gleichmäßige Zunahme zu erkennen. Die Dichtezunahme zu den entsprechenden Zeitpunkten beträgt 0,8 %, 1,1 % und 1,7 %.
In Abb. 4.43 ist die zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 120 % dargestellt. Die Maxima in der Deckschicht vor dem festen Presskolben befinden sich bei 117,8 % 119,0 % und 122,0 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

Die Dichte am Gradientfaktor ist zu Beginn der ersten Haltephase 106,4 %, 108,3 % und 108,0 %, im Profilgrund beträgt diese 99,0 %, 95,8 % und 94,1 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

Ähnlich gleichmäßig nimmt mit zunehmender Verdichtungszeit die Dichte in der Mittelschicht auf 97,4 %, 94,2 % und 92,7 % ab. Die Differenz zum Profilgrund beträgt konstant 1,6 %.

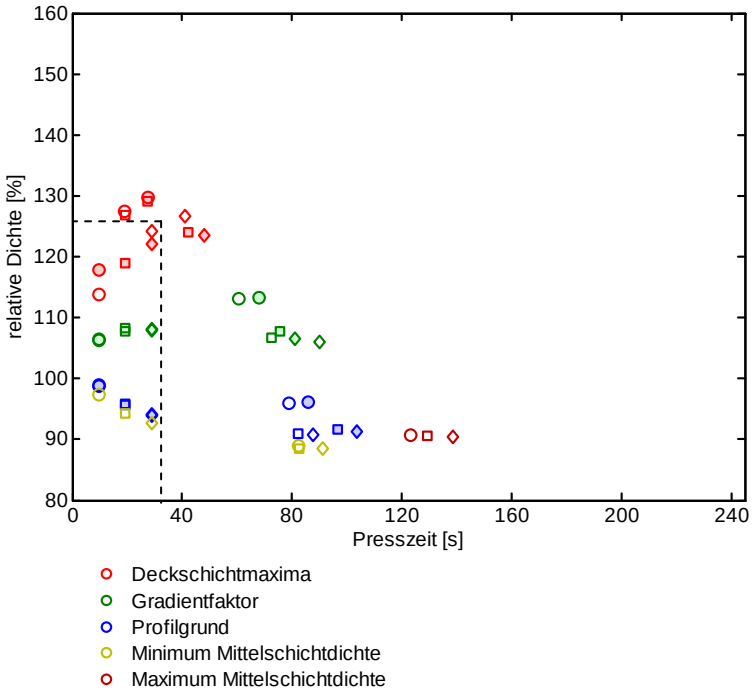


Abb. 4.43: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 120 %. Die Verdichtungszeiten 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊) sind durch die angegebenen Marker gekennzeichnet, die unterschiedlichen Positionen der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) markiert. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Die maximale Ausprägung der Deckschichtmaxima vor dem festen Presskolben erfolgt für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s nach 27,3 s, 42,3 s, und 48,2 s mit 129,8 %, 124,0 % und 123,4 % relativer Dichte. Das sind 17,3 s, 22,3 s und 18,2 s nach Beginn der ersten Haltephase. Die Dichtewerte haben sich um 12,0 %, 5,0 % und 1,4 % erhöht.

Die maximale Ausprägung des Gradientfaktors erfolgt zu den Zeitpunkten 68,0 s, 75,5 s und 80,9 s mit 113,3 %, 107,7 % und 106,4 %. Der Gradientfaktor erreicht damit das Maximum 58,0 s, 55,5 s und 50,9 s nach Beginn der ersten Haltephase und zeigt dabei Dichteveränderungen von +6,9 %, +0,4 % und -1,6 %.

Der Profilgrund hat seine maximale Ausprägung nach 85,8 s, 96,6 s und 103,5 s mit den Dichtewerten 96,3 %, 91,6 % und 91,3 % und damit 75,8 s, 76,6 s und 73,5 s nach Beginn der

ersten Haltephase erreicht. Die Dichteabnahme beträgt zu diesen Zeitpunkten 2,7 % bzw. 4,2 % für 10 s und 20 s Verdichtungszeit, während für 30 s Verdichtungszeit die Dichte um 2,8 % zunimmt.

Die Minima der Mittelschichtdichte treten bei 82,2 s, 82,5 s und 91,2 s der Presszeit mit den Dichtewerten von 89,1 % für 10 s Verdichtungszeit und 88,5 % für 20 s und 30 s Verdichtungszeit auf. Damit treten die Minima 72,2 s, 62,5 s und 61,2 s nach dem Beginn der ersten Haltephase auf. Die Dichteabnahme nach dieser Zeit ist 8,3 %, 5,7 % und 4,2 %.

Die Maxima der Dichten treten nach 123,0 s, 129,3 s und 138,8 s somit 40,8 s, 46,8 s und 47,8 s nach dem Erreichen des Minimums auf. Die Dichtezunahme beträgt 1,7 %, 2,1 % und 1,9 % für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

♦ Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau

Die Abbildungen 4.44 und 4.46 zeigen die zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s.

Die Werte für eine Verdichtungszeit von 10 s zeigt Abb. 4.44 für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

Die Dichtemaxima in den Deckschichten liegen zu Beginn der ersten Haltephase vor dem festen Presskolben bei 115,7 %, 118,3 % und 117,8 % für die drei Erstverdichtungsniveaus bei 100 %, 110 % and 120 %.

Der Profilgrund zeigt zu diesem Zeitpunkt Dichtewerte von 99,7 %, 99,4 % und 99,0 %. Definitionsgemäß liegen die Dichtewerte des Gradientfaktors mit 104,0 %, 104,3 % und 106,4 % zwischen den Dichtewerten von Deckschichtmaxima und Mittelschichtdichte.

Die Mittelschichtdichte weist 98,7 %, 98,0 % und 97,4 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % auf.

Die für einen charakteristischen Wert im Rohdichteprofil sehr eng beieinander liegenden Werte lassen die Darstellung im Diagramm etwas unübersichtlich werden. Für die weitere Entwicklung der charakteristischen Werte ist die Darstellung der Werte jedoch unerlässlich. Die maximale Ausprägung hat die Deckschichtdicke nach 27,9 s, 40,9 s und 27,3 s mit Dichtewerten von 143,9 %, 133,5 % und 129,8 % erreicht. Das entspricht einer Veränderung gegenüber dem Beginn der ersten Haltephase von 28,2 %, 15,2 % und 12,0 %. Auffallend ist der Wert für 110 % Erstverdichtungsniveau mit 40,9 s, der als Ausreißer zu bewerten ist.

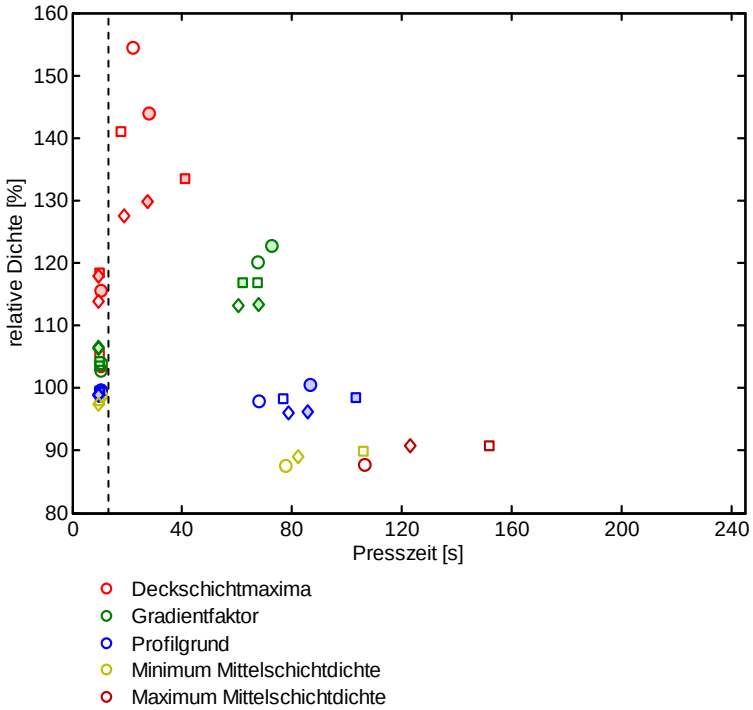


Abb. 4.44: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 10 s. Die Erstverdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊) sind durch die angegebenen Marker differenziert, die verschiedenen Positionen im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) unterschieden. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Der Gradientfaktor weist die zeitlichen Maxima bei 72,7 s, 62,0 s und 68,0 s auf. Die Dichtewerte zu diesen Zeitpunkten betragen 122,9 %, 116,9 % und 113,3 %. Das entspricht einer Veränderung zu Beginn der ersten Haltephase von 18,9 %, 12,6 % und 6,9 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

Der Profilgrund zeigt die maximale Ausprägung nach 86,6 s, 103,2 s und 85,8 s mit 100,6 %, 98,5 % und 96,3 %. Die Dichtedifferenzen zu Beginn der ersten Haltephase betragen 0,9 %, 1,1 % und 1,7 %.

Die Minima in der Mittelschicht treten nach 77,5 s, 106,0 s und 82,2 s mit Dichtewerten von 87,6 %, 89,8 % und 89,1 % für die Vorverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % auf.

Die Maxima in der Mittelschicht zeigen sich nach 106,5 s, 151,7 s und 123,0 s. Die Dichten an diesen Stellen sind 87,8 %, 90,7 % und 90,8 %. Die zeitliche Differenz zwischen Minima und Maxima beträgt somit 29,0 s, 45,7 s und 40,8 s, die Dichtezunahme 0,2 %, 0,9 % und 1,7 %. Für die Verdichtungszeit von 20 s zeigt Abb. 4.45 die Entwicklung der charakteristischen Werte. Das Dichtemaximum vor dem festen Presskolben weist 116,9 %, 118,0 % und

119,0 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % zu Beginn der ersten Haltephase auf.

Der Gradientfaktor hat zu diesem Zeitpunkt die Dichtewerte von 106,4 %, 108,4 % und 108,3 %, die mit den Dichtewerten des Profilgrundes von 96,6 %, 96,5 % und 95,8 % eng verbunden sind.

Die Mittelschichtdichte beträgt zu Beginn der ersten Haltephase 95,1 %, 95,4 % und 94,2 %.

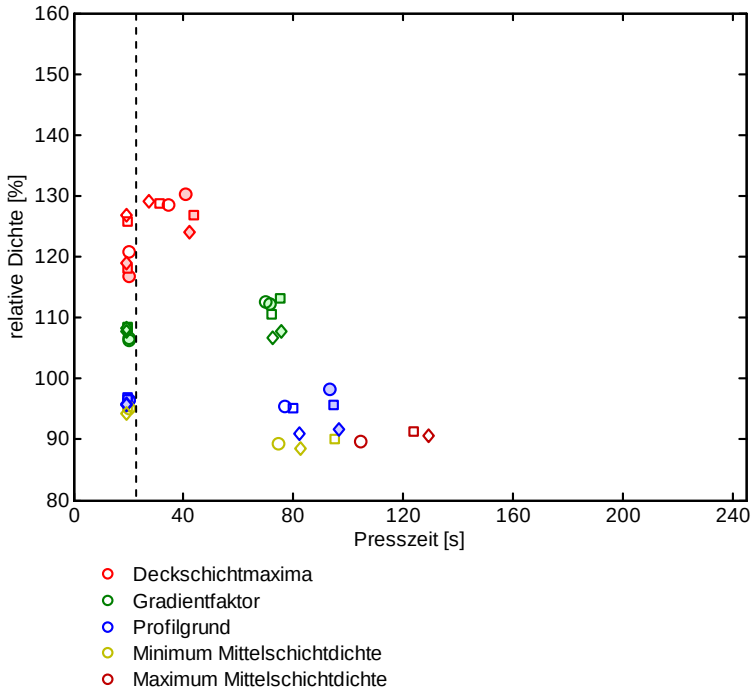


Abb. 4.45: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 20 s. Die Erstverdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊) sind durch die angegebenen Marker differenziert, die verschiedenen Positionen im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) unterschieden. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Die Maxima für die Deckschichtdichte sind nach 40,6 s, 43,9 s und 42,3 s mit 130,3 %, 126,8 % und 124,0 % erreicht. Das entspricht einer Dichtezunahme von 9,9 %, 8,8 % und 5,0 % gegenüber dem Beginn der ersten Haltephase.

Der Gradientfaktor weist die maximale Ausprägung nach 71,2 s, 75,4 s und 75,5 s mit den Dichtewerten von 112,4 %, 113,3 % und 107,7 % auf. Das bedeutet eine Dichteabnahme von 6,0 %, 4,9 % und 0,6 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

Die maximale Ausprägung des Profilgrundes wird nach 93,2 s, 94,6 s und 96,6 s erreicht. Die Dichtewerte betragen zu diesen Zeitpunkten 98,3 %, 95,6 % und 91,6 %.

Das Minimum in der Deckschicht zeigt sich nach 74,4 s, 95,1 s und 82,5 s mit den Dichtewerten von 89,4 %, 90,1 % und 88,5 %, das ist ein Dichteabnahme von 5,7 % für die Erstver-

dichtungsniveaus von 100 % und 120 % und 4,1 % für das Erstverdichtungsniveau von 110 %. Das Maximum in der Mittelschicht ist nach 74,4 s, 95,1 s und 82,5 s mit Dichtewerten von 89,8 %, 91,2 % und 90,6 % erreicht. Die Zeitspanne zwischen Minimum und Maximum ist damit 30,2 s, 28,8 s und 46,8 s und der entsprechende Dichteunterschied 0,4 % für 100 % Erstverdichtungsniveau und 1,1 % für 110 s und 120 s Erstverdichtungsniveau.

Die Entwicklung der charakteristischen Werte in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau für eine Verdichtungszeit von 30 s zeigt Abb. 4.46.

Das Maximum in der Deckschicht vor dem festen Presskolben findet sich zu Beginn der Presszeit für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % bei 115,4 %, 118,9 % und 122,0 %. Der Gradientfaktor liegt bei 106,1 %, 107,1 % und 108,0 %, der Profilgrund bei 94,3 %, 94,6 % und 94,1 % in der entsprechenden Reihenfolge der Erstverdichtungsniveaus.

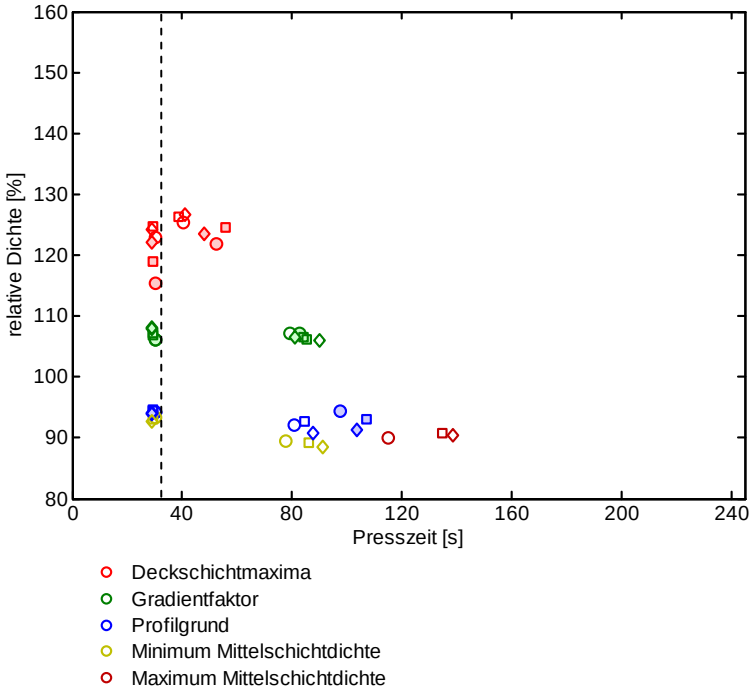


Abb. 4.46: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 30 s. Die Erstverdichtungsniveaus von 100 % (○), 110 % (□) und 120 % (◊) sind durch die angegebenen Marker differenziert, die verschiedenen Positionen im Rohdichteprofil durch verschiedene Farben (siehe Abbildungslegende) unterschieden. Die charakteristischen Werte vor dem festen Presskolben sind durch eine leichte Füllfarbe gekennzeichnet, die Werte vor dem beweglichen Presskolben zeigen keine Füllfarbe. Es sind nur die Werte zu Beginn (links der gestrichelten Line) und zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte dargestellt

Die Mittelschichtdichte weist die Werte von 93,3 %, 93,0 % und 92,7 % auf.

Die Deckschichtmaxima haben ihre maximalen Ausprägungen vor dem festen Presskolben für die Verdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % zu den Zeitpunkten von 52,3 s, 55,8 s und 48,2 s mit den Dichtewerten von 122,0 %, 124,5 % und 123,4 %.

Die zeitlichen Maxima des Gradientfaktors sind nach 82,7 s, 85,3 s und 80,9 s erreicht. Die Dichtewerte betragen dabei 107,2 %, 106,2 % und 106,4 %. Für das Erstverdichtungsniveau von 100 % bedeutet das eine Dichtezunahme von 1,1 %, für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % ist das eine Dichteabnahme von 0,9 % bzw. 1,6 %.

Der Profilgrund hat die maximale Ausprägung bei 97,6 s, 107,2 s und 103,5 s mit den Dichtewerten von 94,5 %, 93,1 % und 91,3 % für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %. Das entspricht Dichteveränderungen von +0,2 %, -1,5 % und -2,8 % für die drei Erstverdichtungsniveaus.

Die Mittelschichtdichte zeigt nach 77,6 s, 89,0 s und 91,2 s das Minimum mit Dichtewerten von 89,6 %, 89,1 % und 88,5 % und nach 114,8 s 134,6 s und 138,8 s das Maximum mit Dichtewertewerten von 90,0 %, 90,8 % und 90,4 %. Daraus resultieren Dichteabnahmen von 3,7 %, 3,9 % und 4,2 % vom Beginn der ersten Haltephase bis zum Erreichen des Minimums und Dichtezunahmen von 0,4 %, 1,7 % und 1,9 % vom Minimum bis zum Maximum. Der zeitliche Abstand von Minimum und Maximum ist 37,2 s, 48,6 s und 47,6 s für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %.

4.3.4.3 Pressdrücke zu den Zeitpunkten der charakteristischen Werte

Die Pressdrücke zu den Zeitpunkten der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte sind in Abb. 4.47 dargestellt. Die Teilabbildungen 4.47 a)–c) zeigen die Abhängigkeit von der Verdichtungszeit für die drei Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 %, die Abb. 4.47 d)–f) die Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s. Als Druckwert ist der Mittelwert und durch den Fehlerbalken der Maximal- und der Minimalwert angegeben. Der Maximaldruck am Ende der Verdichtungsphase liegt für ein Erstverdichtungsniveau von 100 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s bei 7,2 N mm^{-2}, 7,1 N mm^{-2} und 6,8 N mm^{-2}, für das Erstverdichtungsniveau von 110 % bei 6,6 N mm^{-2}, 6,0 N mm^{-2} und 5,3 N mm^{-2} und das Erstverdichtungsniveau von 120 % bei 5,5, N mm^{-2}, 4,2 N mm^{-2} und 4,0 N mm^{-2}. Die Abnahme des Pressdrucks mit der Verdichtungszeit ist klar ersichtlich. Ebenso deutlich ist die Verringerung des Pressdruckes mit dem Vorverdichtungsniveau in den Abb. 4.47 d)–f) zu sehen.

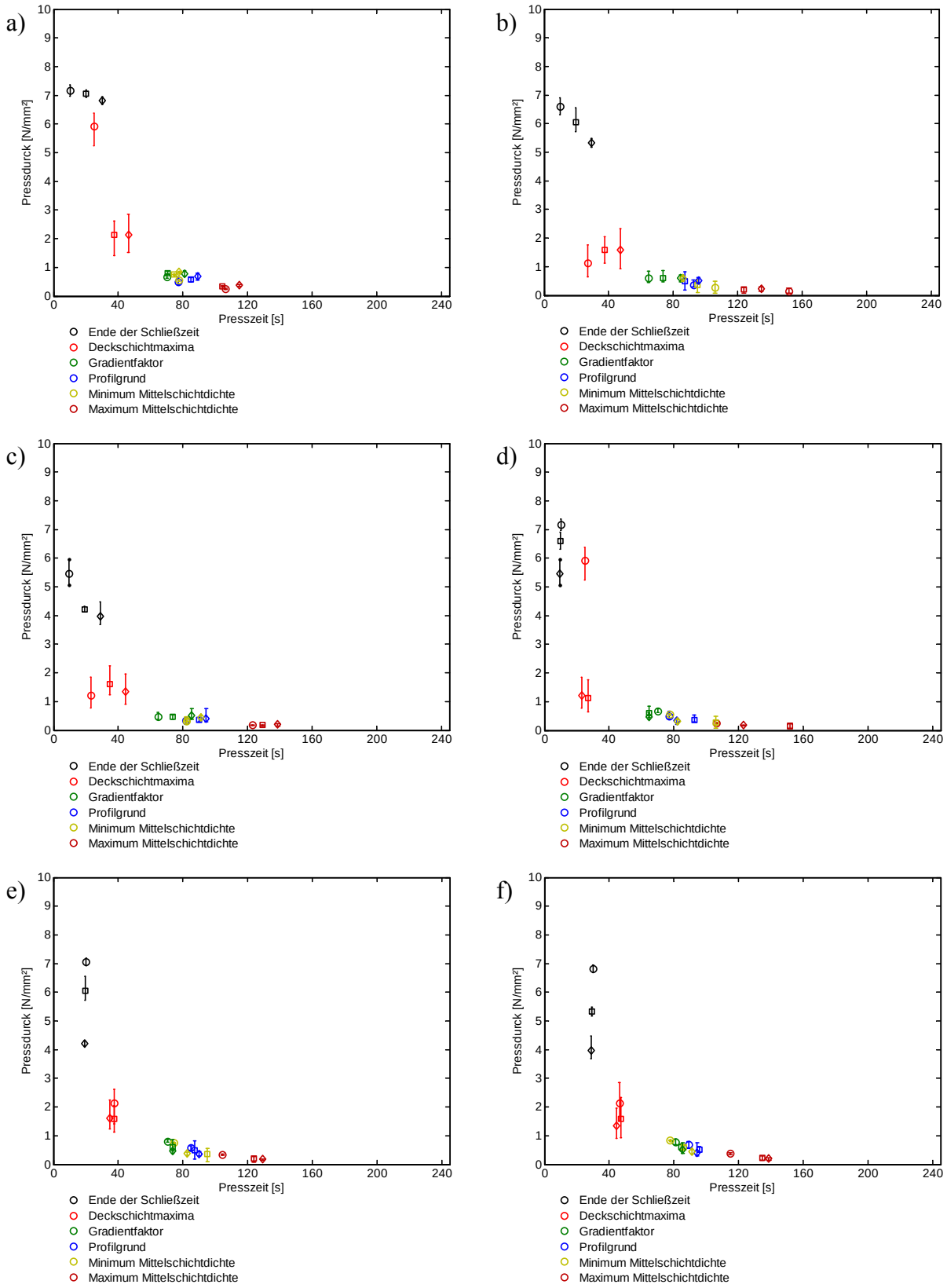


Abb. 4.47: Pressdrücke zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte (siehe Legende) für die Erstverdichtungsniveaus von a) 100 %, b) 110 % und c) 120 %, Marker: (○) 10 s, (□) 20 s, (◊) 30 s Verdichtungszeit, für die Verdichtungszeiten von d) 10 s, e) 20 s und f) 30 s, Marker: (○) 100 %, (□) 110 %, (◊) 120 % Erstverdichtungsniveau

Zur maximalen Ausprägung des Deckschichtmaximums betragen die Pressdrücke für das Erstverdichtungsniveau von 100 % 5,9 N mm^{-2} für 10 s Verdichtungszeit und 2,1 N mm^{-2} für 20 s und 30 s Verdichtungszeit. Diese Drücke sind nach 24,9 s, 37,6 s und 46,3 s für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s erreicht. Daraus folgt, dass das Zeitfenster, in dem der Pressdruck für die Maxima in den Deckschichten erreicht wird, mit 14,9 s für 10 s Verdichtungszeit, 17,6 s für 20 s Verdichtungszeit und 16,3 s für 30 s Verdichtungszeit in einem Zeitbereich von unter 3 s liegt. Für das Erstverdichtungsniveau von 110 % betragen die Pressdrücke 1,1 N mm^{-2} für 10 s Verdichtungszeit und sind mit 1,6 N mm^{-2} für 20 s und 30 s Verdichtungszeit ebenfalls wie bei einem Erstverdichtungsniveau von 100 % identisch. Diese werden in der Reihenfolge aufsteigender Presszeiten nach 27,0 s, 37,7 s und 47,3 s erreicht. Das Zeitfenster hat eine Größe von weniger als einer Sekunde. Die Pressdrücke für das Erstverdichtungsniveau von 120 % betragen 1,2 N mm^{-2} nach 23 s, 1,6 N mm^{-2} nach 34,9 s und 1,3 N mm^{-2} nach 44,6 s für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s. Auch hier zeigt sich ein enges Zeitfenster von weniger als 2 s, in dem sich das Deckschichtmaximum am Ende der Verdichtungsphase einstellt. Diese sehr kleinen Zeitfenster sind gut in den Abbildungen 4.47 d)–f) ersichtlich.

Alle weiteren Pressdrücke zu Zeitpunkten, an denen die charakteristischen Werte wie der Gradientfaktor, der Profilgrund sowie das Minimum und das Maximum in der Mittelschicht die maximale Ausprägung haben, liegen deutlich unter 1 N mm^{-2}. Die Relevanz für Massenverschiebungen durch Spannungsrelaxation innerhalb der verschiedenen Schichten des Rohdichteprofils ist daher als gering einzuschätzen. Weitere Werte zu diesen Zeitpunkten stehen in Anhang P zur Verfügung.

4.3.4.4 Diskussion der Rohdichteprofilentwicklung während der ersten Haltephase

In den beiden vorherigen Abschnitten 4.3.4.2 und 4.3.4.3 sind die Entwicklungen der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil ausführlich beschrieben. Für die drei verschiedenen Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s wurde dabei beobachtet, dass sich mit zunehmender Verdichtungszeit schon während der Verdichtungsphase flachere Rohdichteprofile ausbilden (siehe Abb. 4.35 a), Abb. 4.36 a), Abb. 4.37 a)). Dieser Effekt nimmt mit zunehmendem Verdichtungsniveau (d. h. größerer Nachverdichtung) jedoch ab. Auffallend ist, dass die relative Dichte in der Mittelschicht zu Beginn der ersten Haltephase für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % nahezu gleich ist (siehe Abb. 4.38 a), Abb. 4.39 a), Abb. 4.40 a)). Das Temperaturprofil zu Beginn der ersten Haltephase ist sehr ausgeprägt. Die Mattenoberflächen in der 0 %-Schicht weisen eine hohe Temperatur auf, die 25 %-, 50 %- und 75 %-Schicht zeigen kaum eine merkliche Temperaturzunahme.

Die Deckschichtmaxima nehmen für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s um ca. 7 % bis 25 %, 6 % bis 15 % und 1 bis 11 % für die unterschiedlichen Erstverdichtungsniveaus zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung zu. Die maximale Ausprägung der Deckschichtmaxima liegt für diese Verdichtungszeiten ca. 20 s nach Beginn der ersten Haltephase. Der Pressdruck zu diesen Zeitenpunkten liegt, wie in Abb. 4.47 ersichtlich, zwischen 1 N mm^{-2} und 2,5 N mm^{-2}. Die Temperaturverteilung in der Matte befindet sich zwischen den jeweiligen Kurven der Abbildungen 4.35 bis 4.40 (jeweils die Teilabbildungen b) und d)). Damit ist von einem sehr hohen Restspannungsniveau in den inneren Schichten der Matte auszugehen: dadurch werden wegen der Rückdehnung dieser inneren Schichten infolge von Spannungsrelaxation die äußeren, schon hydrothermisch plastifizierten Schichten weiter verdichtet. Mit zunehmendem Erstverdichtungsniveau von 100 % bis 120 % nimmt die Ausprägung der Deckschichtmaxima ab. Das ist auf die Kombination von geringer mittlerer Dichte und dadurch geringerem Gegendruck beim Verdichten (entspr. Pressdruck) zurückzuführen. Damit ist keine so starke weitere Verdichtung der oberflächennahen Schichten durch die Spannungsrelaxation möglich. Thömen (2002) hat den Einfluss des Pressdruckes anhand der Daten von v. Haas (1998) beispielhaft für zwei Volumenelemente mit Partikelmasse dargestellt.

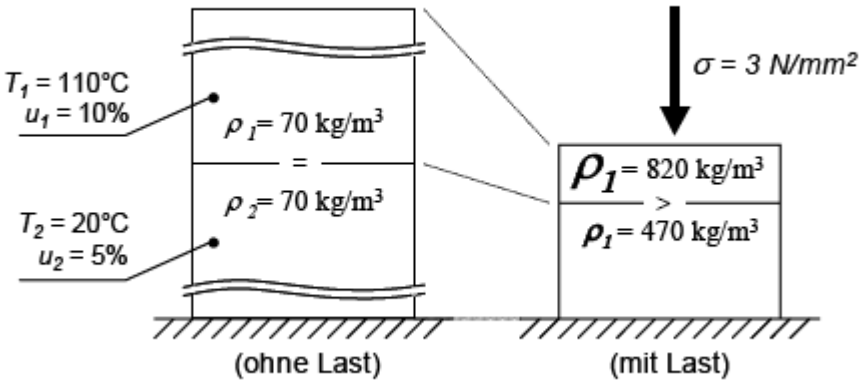


Abb. 4.48: Die Verdichtung von Fasermaterial bei zwei unterschiedlichen Feuchte- und Temperaturbedingungen (Thömen 2002) (nach Daten von v. Haas (1998))

Die Abb. 4.48 verdeutlicht, wie hoch der Pressdruck sein muss, um hydrothermisch plastifiziertes Partikelmaterial weiter zu komprimieren. Beide in der Abbildung dargestellten Feuchte- und Temperaturzustände sind ungefähr zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung des Deckschichtmaximums im Rohdichteprofil vorhanden. Das hydrothermisch plastifizierte Volumenelement befindet sich in der Deckschicht und das relativ kühlere und trockenere

Volumenelement in der Mittelschicht. Der angegebene Pressdruck mit 3 N mm^{-2} in Abb. 4.48 ist ebenfalls in einem realistischen Bereich.

Zu den Zeitpunkten, an denen der Gradientfaktor die maximale Ausprägung (den Minimalwert) erreicht, ist der Pressdruck generell bereits unter 1 N mm^{-2} gefallen. Nach den Versuchsergebnissen von Meyer (2007) sind für Nachverdichtungsschritte im Bereich von 850 kg m^{-3} mindestens 2 N mm^{-2} und von 550 kg m^{-3} minimal 0,5 N mm^{-2} notwendig, um die Matte weiter zu verdichten. Dieser Pressdruck liegt zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung des Deckschichtmaximums an. Die Gradientfaktoren verlagern sich deutlich in die Mitte der Matte zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung. Die Abhängigkeit von der Verdichtungszeit und dem Erstverdichtungsniveau ist nicht sehr deutlich ausgeprägt und liegt bei ca. 5 % bis 10 % Verlagerung in der Position nach innen. Für die zeitlich maximale Ausprägung des Gradientfaktors findet sich möglicherweise eine leichte Abhängigkeit von der Verdichtungszeit und dem Erstverdichtungsniveau. Die höhere Permeabilität der Matte, die bei den höheren Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % durch geringere Dichte in der Matte vorhanden ist, könnte zu einer schnelleren Feuchtebewegung innerhalb der Matte führen (Hanvongjirawat 2003; Thömen und Klüppel 2008). Andererseits wird die Durchwärmung durch Konduktion infolge des schlechteren Partikelkontaktes behindert (Haas 2000). Sehr deutlich werden diese Effekte für den Profilgrund, der extrem in die Mitte der Matte wandert. Ebenso wie für den Gradientfaktor ist für den Profilgrund keine klare Abhängigkeit von der Verdichtungszeit und für die unterschiedlichen Verdichtungsniveaus erkennbar. Tendenziell scheint jedoch die maximale Ausprägung des Profilgrunds bei den prozentual höheren Erstverdichtungsniveaus später erreicht zu werden, deutlich und durchgängig ist dieser Trend jedoch nicht. Das ist verwunderlich, da infolge der erhöhten Permeabilität bei geringer Dichte mit einem schnelleren Feuchtetransport zu rechnen wäre. Dem spricht jedoch die geringere Konduktion bei geringerer Dichte, wie oben schon erwähnt, ebenfalls entgegen. Diese ist für das Fortschreiten der Feuchte von den Mattenoberflächen in die Mattenmitte unerlässlich, wie in Abb. 2.3 dargestellt. Die beiden unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen während des Heißpressvorgangs quantifiziert Thömen (2000) (siehe Abb. 2.2).

Das Minimum und das Maximum der Dichte in der Mittelschicht hängen zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung deutlicher als der Gradientfaktor und Profilgrund vom Erstverdichtungsniveau ab: je höher das Erstverdichtungsniveau, desto später treten Minimum und Maximum auf. Dieses sehr eindeutige Verhalten könnte einerseits für einen schnelleren, zumindest inneren Spannungsabbau bei einem prozentual geringeren Erstverdichtungsniveau sprechen und auch für die oben schon erwähnte bessere Konduktion innerhalb der Matte durch höhere

Dichten bei geringeren Erstverdichtungsniveaus (d. h. bei stärkerer Vorverdichtung). Die Abhängigkeit der Minima und Maxima in der Mittelschicht von der Verdichtungsgeschwindigkeit lässt sich nicht eindeutig erkennen.

Zum Ende der ersten Haltephase verringern sich die charakteristischen Werte wieder. Das Deckschichtmaximum sackt ab. Mit zunehmender Verdichtungszeit nimmt der Anstieg der Dichte jedoch ab. Ein ähnlicher Effekt ist auch für die Erstverdichtungsniveaus von 100 %, 110 % und 120 % erkennbar. Der Profilgrund verlagert sich auch durchschnittlich um 5 % bis 7 % in Richtung der Mattenoberfläche. Das kann auf die beginnende Austrocknung der Matte zurückzuführen sein. Der Unterschied in der Position des Profilgrunds in Bezug auf den Beginn der ersten Haltephase ist jedoch deutlich, was für eine nachhaltige Partikelmassenverschiebung während des Zeitbereiches spricht, in dem die charakteristischen Werte die maximale Ausprägung zeigen. Wang et al. (2004) beobachten bei Versuchen an MDF-Platten ein ähnliches Verhalten (siehe Abb. 2.21). Auffallend ist, dass sich für ein Erstverdichtungsniveau relativ ähnliche Rohdichteprofile für die verschiedenen Verdichtungszeiten, markiert durch die charakteristischen Werte, abzeichnen: das wird besonders für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % deutlich. Besonders beachtenswert sind die nahezu gleichen relativen Rohdichten in der Mittelschicht für die beiden zuletzt erwähnten Erstverdichtungsniveaus (siehe Abb. 4.36 e) und Abb. 4.37 e)).

Es zeigt sich aus der vorausgegangenen Beschreibung und Diskussion der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil, dass diese durchaus eine geeignete Darstellungs- und Beschreibungsmethode für das Rohdichteprofil sind. Es lassen sich damit nicht nur die Korrelation zu mechanischen Werten, wie sie von Wong (1998) angewendet wurde, zeigen, sondern auch der zeitliche Verlauf der Rohdichteprofilentwicklung während des Heißpressvorgangs näher beschreiben. Besonders die maximale Ausprägung des Deckschichtmaximums kurz nach Beginn der ersten Haltephase wie auch die deutlichen Positionsänderungen des Gradientfaktors und des Profilgrundes lassen Rückschlüsse auf eine weitere Partikelmassenbewegung kurz nach Beginn der ersten Haltephase zu. Im weiteren Verlauf des Heißpressvorgangs kann aber auch anhand des Gradientfaktors und im Besonderen durch die Veränderungen der Position des Profilgrundes sowie der zeitlichen Lage des Minimums und Maximums in der Mittelschicht der Matte auf eine Feuchtebewegung geschlossen werden. Eine klare Trennung von Partikelmassenbewegung und Feuchtebewegung ist jedoch nicht so scharf möglich, wie diese wünschenswert wäre. Ein Hinweis auf die Möglichkeit einer Partikelmassenbewegung zu Beginn der ersten Haltephase kann der Pressdruck sein. Aus Abb. 4.34 geht aber auch unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2.4 hergeleiteten Modellvorstellung klar hervor, dass es

nach dem Maximum in der Mittelschicht keine weiteren signifikanten Masseverschiebungen im Rohdichteprofil gibt. Der zeitliche Verlauf des Profilgrunds ab diesen Zeitpunkten ist nahezu parallel zueinander.

4.3.5 Nachverdichtungsschritt

In den Abbildungen 4.49 und 4.50 werden der Pressdruck und die relative Mattendicke zum Zeitpunkt des Nachverdichtungsschrittes dargestellt. Die Werte sind aus den beiden redundanten Versuchen arithmetisch gemittelt. Aus der relativen Plattendicke und der Verdichtungsgeschwindigkeit von 1,75 s mm^{-1} kann ebenso der exakte Zeitpunkt im Nachverdichtungsschritt ermittelt werden.

4.3.5.1 Pressdruck und Mattendicke im Nachverdichtungsschritt

Der Pressdruck zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes, das heißt, wenn die Dichte ±10 % um die Mittelschicht erstmals während des zweiten Verdichtungsschrittes größer oder gleich der Dichte des Profilgrunds ist, zeigt Abb. 4.49. Für den Nachverdichtungszeitpunkt 120 s nach Beginn der ersten Haltephase werden für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s und einem Erstverdichtungsniveau von 110 % die Drücke von 2,28 N mm^{-2}, 2,84 N mm^{-2} und 2,87 N mm^{-2} erreicht. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % sind die Drücke für die entsprechenden Verdichtungszeiten 2,17 N mm^{-2}, 2,12 N mm^{-2} und 1,92 N mm^{-2}. Die Druckwerte für das Erstverdichtungsniveau von 110 % liegen deutlich über einem Wert von 2,2 N mm^{-2}, die für ein Erstverdichtungsniveau von 110 % weisen weniger als 2,2 N mm^{-2} auf.

Für den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s nach Beginn der ersten Haltephase betragen die Drücke für die drei Verdichtungszeiten in aufsteigender Reihenfolge bei einem Erstverdichtungsniveau von 110 % 2,10 N mm^{-2}, 2,48 N mm^{-2} und 2,39 N mm^{-2}, bei einem Erstverdichtungsniveau von 120 % liegen die Druckwerte bei 2,07 N mm^{-2}, 2,12 N mm^{-2} und 2,06 N mm^{-2} in einem sehr engen Bereich um 2,1 N mm^{-2}. Die Druckwerte für 120 % Erstverdichtungsniveau streuen für diesen Nachverdichtungszeitpunkt im Vergleich zu den Werten von 120 s und 160 s weniger. Für den Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s und die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s werden für das Erstverdichtungsniveau von 110 % für den Nachverdichtungsschritt die Druckwerte von 2,49 N mm^{-2}, 2,51 N mm^{-2} und 2,77 N mm^{-2} erreicht. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % weisen die Druckwerte für die Verdichtungszeiten von 10 s und 30 s 1,97 N mm^{-2} und für die Verdichtungszeit von 20 s 2,04 N mm^{-2} auf. Zu diesem Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s sind die Druckwerte klar in die Bereiche für 110 % und 120 % Erstverdichtungsniveau unterteilt. Der Bereich für 110 % liegt zwischen 2,49 N mm^{-2}

und 2,77 N mm^{-2}, der Bereich für 120 % Erstverdichtungsniveau liegt bei 2 N mm^{-2} ±0,4 N mm^{-2}.

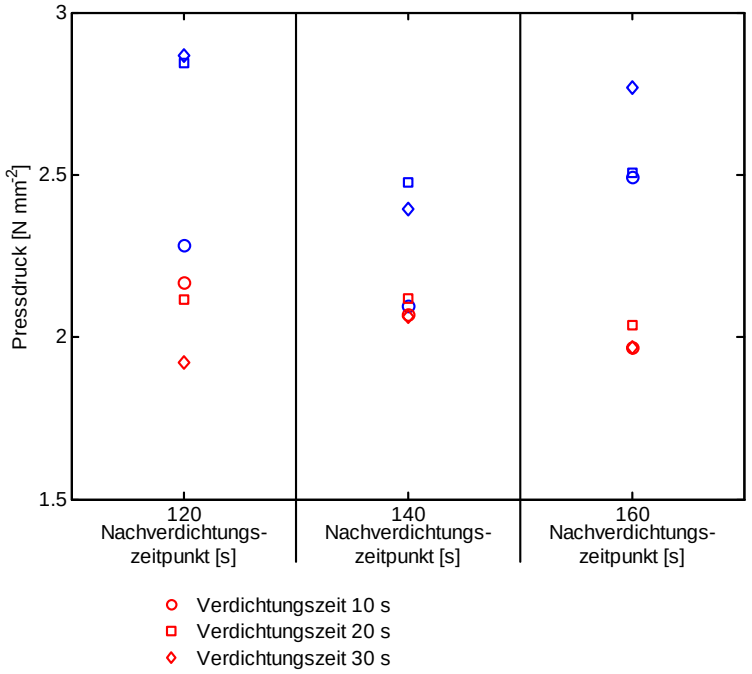


Abb. 4.49: Pressdruck zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes (siehe Abb. 4.32) im Nachverdichtungsschritt für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s. Die blauen Marker kennzeichnen das Erstverdichtungsniveau von 110 %, die roten das von 120 %

Die relativen Mattendicken, zu denen der Mittelschichtschritt erreicht wird, sind in Abb. 4.50 dargestellt. Für den Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s und ein Erstverdichtungsniveau von 110% erfolgt der Mittelschichtschritt für die relativen Mattendicken von 100,6 % für 10 s Verdichtungszeit und 101,1 % für 20 s und 30 s Verdichtungszeit. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % betragen die relativen Mattendicken 111,0 %, 108,6 % und 110, 0 %. Die Matte kann damit zum Zeitpunkt von 120 s nach Beginn der ersten Haltephase für das Erstverdichtungsniveau von 110 % rund 9 % der Dicke und für das Erstverdichtungsniveau von 120 % zwischen 9 bis 11 % nachverdichtet werden, ohne dass es zur Ausbildung von Zwischenminima kommt.

Bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s kommt es für ein Erstverdichtungsniveau von 110 % bei 101,7 %, 103,3 % und 105,0 % und für das Erstverdichtungsniveau von 120 % bei 110,3 %, 110,9 % und 112,9 % zum Mittelschichtschritt für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s. Die zeitliche Abhängigkeit der Mittelschichtschritte zeigt sich mit aufsteigender Verdichtungszeit und somit längerer verstrichener Presszeit beim Eintreten des Mittelschichtschrittes. Für 110 % Erstverdichtungsniveau kann die Matte zwischen 5,0 % bei 30 s Verdichtungszeit und 8,3 % bei 10 s Verdichtungszeit nachverdichtet werden. Die

entsprechenden möglichen Nachverdichtungen für das Erstverdichtungsniveau von 120 % betragen 7,1 % bei 30 s Verdichtungszeit und 9,7 % bei 10 s Verdichtungszeit.

Für den Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s liegen die relativen Mattendicken bei einem Erstverdichtungsniveau von 110 % mit 104,4 %, 104,9 % bis 104,1 % für die Erstverdichtungsniveaus von 10 s, 20 s und 30 s in einem sehr kleinen Bereich von unter einem Prozent. Noch deutlicher wird es für das Erstverdichtungsniveau von 120 %, für das die relativen Dicken mit 113,0 %, 112,9 % und 113,2 % in einem Bereich von 113,0 ±0,2 % liegen. Das bedeutet, dass die Matten bei 110 % Erstverdichtungsniveau zwischen 5 % bis 6 % nachverdichtet werden können und entsprechend bei einem Erstverdichtungsniveau von 120 % rund 7 % nachträglich verdichtet werden können zum Zeitpunkt von 160 s nach Beginn der ersten Haltephase. Für diesen Nachverdichtungszeitpunkt ist keine Abhängigkeit von der Verdichtungszeit zu erkennen.

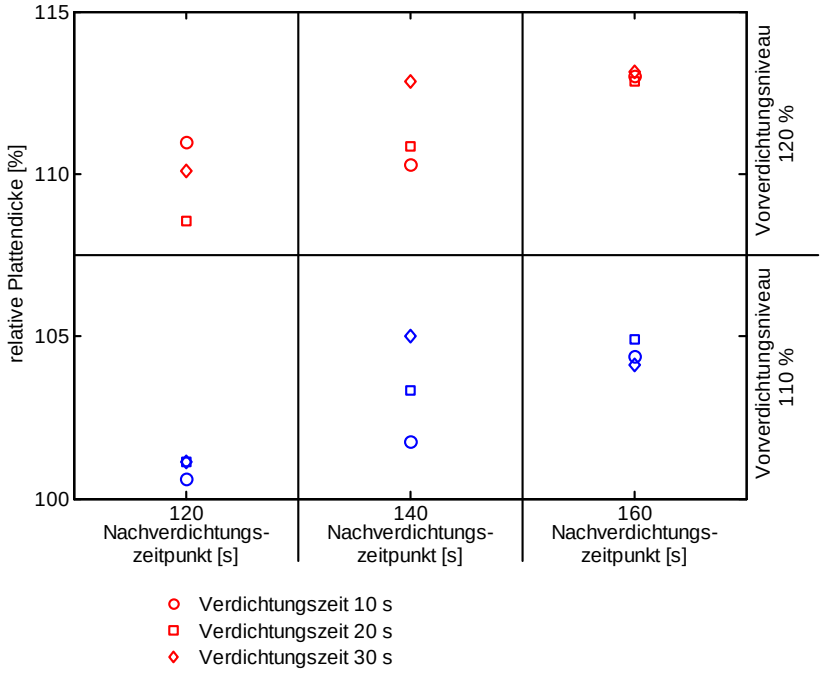


Abb. 4.50: Mattendicke zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes (siehe Abb. 4.32) im Nachverdichtungsschritt für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s. Die blauen Marker kennzeichnen das Erstverdichtungsniveau von 110 %, die roten das von 120 %

4.3.5.2 Diskussion des Nachverdichtungsschrittes

Für die Pressdrücke ist auffallend, dass diese für den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s geringer sind als für die beiden anderen Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s und 160 s für das Erstverdichtungsniveau von 110 %. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % sinken die Pressdrücke eher mit späterem Nachverdichtungszeitpunkt. Tendenziell zeigt sich auch, dass die Pressdrücke zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes ansteigen, wenn die Nachverdichtung wegen einer langsameren Erstverdichtung zu einer späteren Presszeit erfolgt (die

Haltephase auf Erstverdichtungsniveau wird konstant gehalten). Drei sich gegenseitig beeinflussende Effekte können zu den unterschiedlichen Zeitpunkten des Mittelschichtschrittes den Pressdruck beeinflussen:

a) hydrothermische Plastifizierung der Mittelschicht,
b) möglicherweise beginnende Austrocknung der Matte und
c) beginnende Aushärtung des Klebstoffes.

Die beginnende Austrocknung der Matte – zumindest in den äußeren Schichten – und die von den äußeren Schichten her zunehmende Aushärtung des Klebstoffes behindern die Nachverdichtung. Auch in der Mittelschicht kann nunmehr schon von einer beginnenden Aushärtung des Klebstoffes ausgegangen werden. Die genannten Faktoren können einen höheren Pressdruck im Nachverdichtungsschritt verursachen. Die während des Zeitpunktes des Nachverdichtungsschrittes insbesondere in der Mittelschicht auftretende hydrothermische Plastifizierung der Matte verringert den Pressdruck.

Aus den Abbildungen in Abschnitt 4.3.4.2 ist ersichtlich, dass das Maximum der hydrothermischen Plastifizierung in der Mittelschicht vor dem Nachverdichtungszeitpunkt erreicht ist. Es ist daher von einer vollständigen Plastifizierung der Mittelschicht auszugehen. Diese beginnt möglicherweise schon auszutrocknen, wenn die Nachverdichtung erfolgt. Zu den Zeitpunkten der Nachverdichtung liegen die Temperaturen in der Mittelschicht über 100 °C. Für diese Temperaturen und Zeitpunkte ab 130 s im Heißpressvorgang gibt Heinemann (2004) Querzugfestigkeiten von mehr als 0,45 N mm^{-2} an. Es kann damit schon von einer Behinderung der Nachverdichtung durch die Aushärtung des Klebstoffes ausgegangen werden.

Das Optimum zwischen hydrothermischer Erweichung der Matte und Austrocknung der Matte – zumindest in den äußeren Schichten – und der Aushärtung des Klebstoffes scheint damit für das Verdichtungsniveau von 110 % für den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s zu liegen.

Deutlich geringer ist der Pressdruck für ein Erstverdichtungsniveau von 120 % im Nachverdichtungsschritt. Eine klare Abhängigkeit für dieses Erstverdichtungsniveau ist hier nicht ersichtlich, tendenziell scheint der Pressdruck mit zunehmendem Nachverdichtungszeitpunkt zu sinken. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die bessere hydrothermische Plastifizierung durch Konvektion infolge der erhöhten Permeabilität sein, die durch die geringen Dichten der Mittelschicht bedingt ist. Die Abhängigkeit der Permeabilität von der Dichte hat Hanvongjirawat (2003) untersucht.

Die Definition des Mittelschichtschrittes bedingt, dass bei weiterer Verdichtung über dieses Nachverdichtungsmaß hinaus Zwischenminima entstehen.

Aus der Beschreibung von Abb. 4.50 wird deutlich, dass die mögliche relative Nachverdichtung, ohne Zwischenminima zu erzeugen, mit zunehmendem Nachverdichtungszeitpunkt immer geringer wird. Für ein Erstverdichtungsniveau von 110 % liegt die mögliche Nachverdichtung für die Mattendicke zu einem Zeitpunkt von 120 s nach Beginn der ersten Haltephase noch bei ca. 9 %, so sind es bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s und diesem Erstverdichtungsniveau nur noch 5 % bis 6 %. Das kann mutmaßlich auf die fortschreitende Aushärtung des Klebstoffes zurückgeführt werden. Dazu passt auch der sehr hohe Pressdruck für den Mittelschichtschritt bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s. Demgegenüber steht der Pressdruck bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s, der trotz einer prozentualen Nachverdichtung von 5 % bis 8,3 % etwas höher ausfällt.

Eine Ausnahme bildet für die Pressdrücke der Pressdruck zum Zeitpunkt von 120 s bei einem Vorverdichtungsniveau von 110 % und einer Verdichtungszeit von 10 s, der deutlich geringer ist als für die anderen Verdichtungszeiten.

Meyer (2007) gibt für 7 mm dicke Faserplatten bei Nachverdichtungen auf 5 mm Mattendicke Pressdruckkurven an, die ebenfalls wie die hier dargestellten Pressdrücke ein ausgeprägtes Minimum haben. Das Minimum im zeitlichen Verlauf des Pressdruckes liegt bei knapp 50 s für die von Meyer (2007) hergestellten Platten. Wird linear über die Mattendicke extrapoliert, so würde das Minimum des zeitlichen Verlaufs der Pressdrücke bei knapp 100 s liegen bei einer angenommenen Mattendicke von 13,2 mm bis 14,4 mm. Eine gute Übereinstimmung sowohl des zeitlichen Verlaufes als auch der Größenordnung der Druckwerte mit dem Minimum von 2 N mm^{-2} ist hier gut zu erkennen. Deutlich unterscheiden sich die Druckwerte jedoch von den bei Ruf (2003) erwähnten Werten. Ruf (2003) ermittelte für Nachverdichtungsschritte von 10 % Mattendicke einen maximalen Druck von 0,53 N mm^{-2} bzw. für Nachverdichtungsschritte von 20 % Mattendicke maximal 0,91 N mm^{-2} in einer Laborpresse; die in der Miniaturpresse von Roos (2000) nach gleichen Pressprogrammen herstellten Platten wiesen sehr ähnlich Druckwerte wie in der Laborpresse auf. In den Untersuchungen von Wang (2004) ist kein ausgeprägter Druckanstieg während des einen Nachverdichtungsschrittes zu erkennen (siehe Abb. 2.21). Wird der Mittelschichtschritt in der von Wang et al. (2004) dargestellten Abb. 2.21 ermittelt, wobei annähernd gleiche Dichteverläufe vorausgesetzt und die Mittelschichtdichte bei 50 % angenommen werden, so kann von einer Nachverdichtung bis zum Mittelschichtschritt von ca. 3–5 % ausgegangen werden. Diese Nachverdichtungsdistanz ist kleiner als alle hier gefunden Werte, tendiert aber in die Richtung der Nachverdichtung zu einem Zeitpunkt von 160 s bei einem Erstverdichtungsniveau von 110 %.

Ein weiterer Parameter für den Pressdruck und die mögliche relative Nachverdichtungsmattendicke könnte die absolute Dichte im Bereich der Mittelschicht der Matte sein, die, wie in Abschnitt 4.3.4.4 gezeigt, von der Verdichtungsgeschwindigkeit abhängig ist. Meyer (2007) findet eine deutliche Abhängigkeit des Pressdruckes bei Nachverdichtungsschritten von der Rohdichte. Diese Versuche sind in Abschnitt 4.2.4 ausführlich beschrieben.

Der Mittelschichtschritt in Verbindung mit dem Pressdruck und der relativen Mattendicke kann damit als Parameter dafür angesehen werden, ob und wann es bei Nachverdichtungs- oder den in der industriellen Produktion notwendigen Kalibrierschritten zur Ausbildung von unerwünschten Nebenminima kommt. Unter Kalibrierschritten ist das Erreichen der endgültigen Plattendicke zum Ende des Pressvorganges zu verstehen.

4.3.6 Rohdichteprofil am Ende der zweiten Haltephase

Die Rohdichteprofile am Ende der zweiten Haltephase, das heißt am Ende des Heißpressvorgangs, werden anhand der charakteristischen Werte beschrieben. Während des Nachverdichtungsschrittes vom Erstverdichtungsniveau – 110 % oder 120 % – auf Solldicke von 100 % relativer Mattendicke sind in allen Versuchen Nebenminima entstanden (siehe Anhang P). Diese sind ab dem Zeitpunkt, an dem der Mittelschichtschritt (siehe Abb. 4.32) auftritt, erstmalig definiert. Zwischen den Nebenminima ist die Mittelschicht der Matten und der fertigen Platte deutlich überverdichtet, das ist weder ressourcenorientiert noch für die weitere Verwendung der Platte sinnvoll und notwendig. Es ist hier eher eine Verschlechterung der mechanischen Werte zu erwarten. Die mechanischen Werte der Proben wurden jedoch nicht geprüft.

In den drei folgenden Unterkapiteln werden die Nebenminima und die Mittelschicht der Matte in Abhängigkeit der Prozessparameter

- Verdichtungszeit
- Erstverdichtungsniveau
- Nachverdichtungszeitpunkt

beschrieben.

Dabei werden die charakteristischen Werte des Zwischenminimums (IM) und des Profilgrundes (PG) beschrieben und diskutiert. Der Profilgrund stellt, wie aus Abb. 4.31 ersichtlich, die seitliche Begrenzung der über das notwendige Maß verdichteten Mittelschicht dar. Die Bezeichnung Profilgrund ist in diesem Zusammenhang möglicherweise etwas unzutreffend, aber die Definition des Profilgrundes, wie in Abschnitt 4.3.2.1 dargestellt, erscheint auch hier, besonders im Sinne der einheitlichen Bezeichnung, sinnvoll, um die Mittelschicht der Matte zu beschreiben.

4.3.6.1 Beschreibung der Rohdichteprofile am Ende der zweiten Haltephase durch charakteristische Werte

Die Tabelle 19 zeigt die charakteristischen Werte am Ende der ersten Haltephase. Die Abb. 4.51 stellt die charakteristischen Werte des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit dar. Die Abb. 4.52 verdeutlicht die charakteristischen Werte in Abhängigkeit der beiden Erstverdichtungsniveaus, die Abb. 4.53 in Abhängigkeit vom Nachverdichtungszeitpunkt.

Tabelle 19: Zusammengefasste charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs vor dem festen und beweglichen (bew.) Presskolben. Es sind die zwei Koordinaten Dichte und Position angegeben. (DS-Max: Deckschichtmaximum, Gradientf.: Gradientfaktor, IM-Min.: Zwischenminimum, MS.: Mittelschicht)

	DS-Max fest		Gradientf. fest		IM-Min. fest		Profilg. fest		
Platte 12mm	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	
10 110 120 240	111,7	2,4	103,9	43,1	92,4	22,2	98,5	21,0	
10 110 140 240	115,0	2,8	104,8	42,4	90,7	22,9	96,4	19,8	
10 110 160 240	111,4	2,4	103,5	42,6	92,6	22,9	101,8	14,8	
10 120 120 240	101,9	8,8	99,7	27,7	95,0	27,9	102,0	14,8	
10 120 140 240	103,0	2,3	98,1	44,2	90,1	14,5	104,1	16,6	→
10 120 160 240	104,1	2,1	97,5	43,4	88,8	18,4	105,5	15,3	Fortsetzung
20 110 120 240	108,8	3,4	102,7	42,0	93,3	17,7	99,6	22,3	
20 110 140 240	110,2	2,7	102,6	41,2	91,9	23,1	100,9	18,1	
20 110 160 240	109,8	4,0	102,1	40,5	92,7	23,8	103,2	12,3	
20 120 120 240	102,1	5,3	97,0	41,3	90,3	15,7	102,2	20,7	
20 120 140 240	102,5	4,7	98,0	42,6	90,4	19,4	104,7	15,9	→
20 120 160 240	102,9	3,9	97,9	41,9	89,8	19,1	105,8	14,7	
30 110 120 240	108,0	4,9	101,7	40,1	93,9	21,6	100,1	19,1	
30 110 140 240	110,8	5,3	102,2	38,3	93,7	23,1	101,4	19,6	
30 110 160 240	110,4	4,4	102,4	37,5	93,1	22,6	102,1	12,9	
30 120 120 240	101,2	4,7	96,6	40,3	89,8	17,4	102,6	17,3	
30 120 140 240	102,9	5,5	97,5	38,9	92,2	18,7	104,9	16,1	
30 120 160 240	103,2	5,3	97,7	39,9	90,0	19,7	105,9	15,9	

	MS	Profilg. bew.		IM-Min. bew.		Gradientf. bew.		DS-Max. bew.	
	Dichte [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]	Dichte [%]	Pos. [%]
	98,0	98,4	19,5	92,4	22,5	103,7	40,1	120,6	3,3
	96,8	96,5	13,7	90,7	23,6	105,0	39,0	124,7	3,0
	101,0	102,0	10,5	92,6	24,5	103,8	38,4	120,0	3,1
	102,2	102,8	21,7	95,0	15,7	98,8	42,6	108,6	2,5
→	105,7	106,2	13,4	90,1	21,8	98,1	39,5	110,7	3,9
	107,5	107,6	11,9	88,8	23,5	97,5	39,7	110,3	3,9
	98,9	99,3	19,0	93,3	24,8	102,5	37,1	116,0	6,2
Fortsetzung	100,0	101,0	15,3	91,9	27,0	102,6	36,8	117,2	5,1
	101,7	103,4	11,9	92,7	25,2	102,6	36,8	115,2	6,6
	103,7	104,0	17,7	90,3	18,2	96,9	38,2	106,8	6,1
→	105,9	106,5	14,2	90,4	22,4	97,8	37,6	108,6	6,6
	107,1	107,8	10,4	89,8	22,7	97,7	37,8	109,0	5,9
	99,8	100,3	17,1	93,9	25,0	101,8	35,5	111,3	7,9
	100,2	101,1	11,1	93,7	25,4	101,8	35,9	112,8	7,4
	100,7	102,5	11,1	93,1	27,9	102,5	35,3	115,5	8,4
	104,7	104,2	17,9	89,8	20,2	96,8	36,4	106,4	8,7
	106,0	105,5	14,1	92,2	20,8	97,6	37,0	105,5	7,1
	106,8	106,9	12,7	90,0	21,2	97,7	36,7	107,6	7,4

♦ Abhängigkeit des Rohdichteprofils von der Verdichtungszeit

Die Abhängigkeit des Rohdichteprofils von der Vorverdichtungszeit wird in Abb. 4.51 dargestellt.

Die Abb. 4.51a) zeigt die charakteristischen Werte für das Erstverdichtungsniveau von 110 % und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s. Für die drei Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s liegen die Zwischenminima vor dem festen Presskolben an den Positionen 22,2 %, 17,7 % und 21,6 % mit den relativen Dichtewerten von 92,4 %, 93,3 % und 93,9 %. Der Profilgrund liegt mit 21,0 %, 22,3 % und 19,1 % und den Dichtewerten von 98,5 %, 99,6 % und 100,1 % ungefähr 1 % bis 2 % weiter in Richtung Mattenmitte und weist ca. 6,5 % höhere Dichtewerte auf. Der Positionswert für das Zwischenminimum bei 20 s Verdichtungszeit scheint unrealistisch, da dieser nicht weiter in der Plattenmitte liegen darf als der dazugehörige Profilgrund. Eine mögliche Ursache könnte hier die Mittelung der charakteristischen Werte aus den beiden Parallelproben sein.

In der Teilabbildung Abb. 4.51b) ist das Erstverdichtungsniveau von 120 % beim Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s dargestellt. Das Zwischenminimum ist bei 27,9 %, 15,7 % und 17,4 % mit den Dichtewerten von 95,0 %, 90,3 % und 89,8 % für die drei Verdichtungszeiten in aufsteigender Reihenfolge zu finden. Dabei ist der Wert für 10 s als Ausreißer zu bewerten. Der Profilgrund liegt bei 14,8 %, 20,7 % und 17,3 % und zeigt die Dichtewerte von 100,2 %, 102,2 % und 102,6 %. Damit liegt die Dichte im Profilgrund ca. 10 % über der in den Zwischenminima und konstant über der mittleren Rohdichte in der Matte.

Die Teilabbildungen 4.51 c) und d) zeigen die charakteristischen Werte für den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s. In 4.51c) ist das Erstverdichtungsniveau von 110 % mit den Werten für das Zwischenminimum von 22,9 %, 23,1 % und 23,1 % für die Positionen und 90,7 %, 91,9 % und 93,7 % für die Dichte bei den Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s in entsprechender Reihenfolge dargestellt. Die entsprechenden charakteristischen Werte für den Profilgrund liegen bei 19,8 %, 18,1 % und 19,6 % mit den Dichtewerten von 94,4 %, 100,9 % und 101,4 % und damit 3 % bis 5 % weiter in der Mattenmitte und in der Dichte mit aufsteigenden Verdichtungszeiten 3,7 %, 9 % und 7,7 % höher als das Zwischenminimum. Das Erstverdichtungsniveau von 120 % wird in der Teilabbildung 4.51 d) beschrieben, die Zwischenminima vor dem festen Presskolben liegen an den Positionen 14,5 %, 19,4 % und 18,7 % mit den relativen Dichtewerten von 90,1 %, 90,4 % und 92,2 % für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s. Der Profilgrund für diese Kombination aus 120 % Erstverdichtungsniveau und einem Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s hat die Positionswerte von 16,6 %, 15,9 % und 16,1 % bei Dichtewerten von 104,1 %, 104,7 % und

104,9 %. Auffallend ist hier, dass sich die Positions- und Dichtewerte nur geringfügig unterscheiden. Die Positionswerte von Zwischenminimum und Profilgrund liegen in einem sehr engen Bereich von wenigen Prozent, die Dichtewerte der beiden charakteristischen Werte unterscheiden sich deutlich um 12,7 % für 30 s Verdichtungszeit und bis zu 14,1 % bzw. 14,3 % bei 10 s und 20 s Verdichtungszeit.

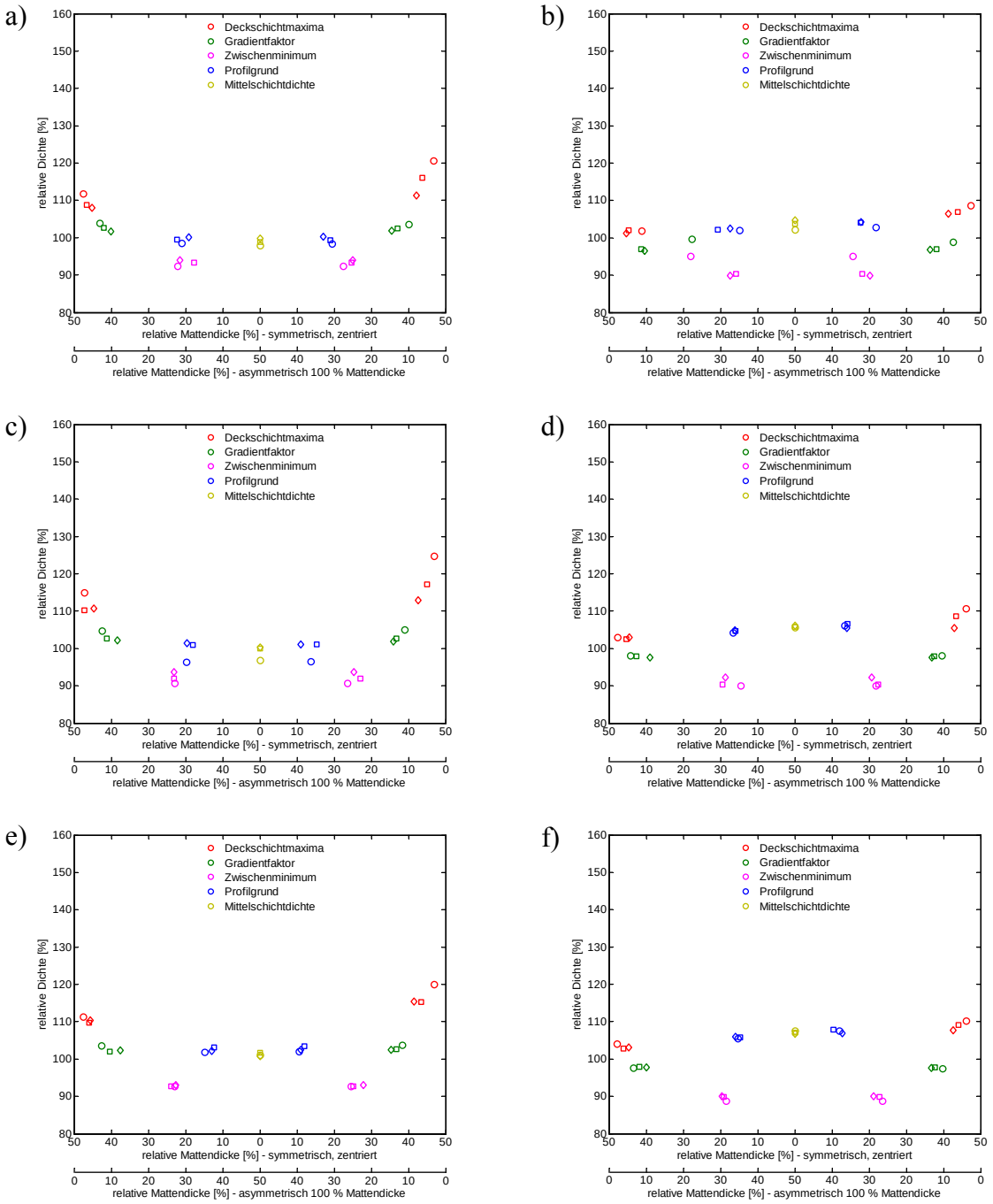


Abb. 4.51: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit. Die Teilabbildungen a), c), e) beschreiben das Erstverdichtungsniveau von 110 %, die Teilabbildungen b), d), f) das Erstverdichtungsniveau von 120 %. Die Nachverdichtungszeitpunkte betrugen in den Abbildungen a) und b) 120 s, c) und d) 140 s sowie e) und f) 160 s. Die drei unterschiedlichen Verdichtungszeiten von 10 s (○), 20 s (□) und 30 s (◊) werden durch die angegebenen Marker beschrieben

Der Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s wird in den Teilabbildungen 4.51 e) und f) beschrieben, wobei die Abb. 4.51 e) das Erstverdichtungsniveau von 110 % beschreibt, Abb. 4.51 e) das Erstverdichtungsniveau von 120 %. Das Zwischenminimum liegt für die Verdichtungszeiten von 10 s, 20s und 30 s an den Positionen von 22,9 %, 23,8 % und 22,6 % mit den Dichten von 92,6 %, 92,7 % und 93,1 % sehr eng zusammen sowohl für die Position als auch für die Dichte. Der Profilgrund weist die Werte von 14,8 %, 12,3 % und 12,9 % für die Position vor dem festen Presskolben auf, die Dichtewerte betragen an den entsprechenden Positionen 101,6 %, 103,2 % und 102,1 %. Damit liegt der Profilgrund ca. 11 % bis 12 % weiter in der Mattenmitte als das Zwischenminimum und weist zwischen 9 % und 10 % höhere Dichtewerte auf. Die Werte vor dem festen Presskolben für den Profilgrund liegen ebenfalls sehr eng zusammen, deutlicher ist das jedoch noch vor dem beweglichem Presskolben zu erkennen. Für das Erstverdichtungsniveau von 120 % befindet sich das Zwischenminimum für die drei Verdichtungszeiten an den Positionen von 18,4 %, 19,1 % und 19,7 % mit den Dichtewerten von 88,8 %, 89,8 % und 90,0 % vor dem festen Presskolben. Der Profilgrund für die entsprechenden Verdichtungszeiten ist an den Positionen von 15,3 %, 14,7 % und 15,9 % mit den Dichtenwerten von 105,5 %, 105,8 % und 105,9 % zwischen 3 % und 4 % weiter in der Mattenmitte zu finden. Die Dichte liegt im Profilgrund ca. 16 % über der Dichte im Zwischenminimum. Die Werte für den Profilgrund sind damit in Bezug auf die Position und die Dichte im Rohdichteprofil für die drei Verdichtungszeiten an sehr ähnlichen Stellen zu finden.

♦ Abhängigkeit des Rohdichteprofils vom Vorverdichtungsniveau

Die Abhängigkeit des Rohdichteprofils vom Vorverdichtungsniveau wird in Abb. 4.52 dargestellt. Die Teilabbildungen von links nach rechts, z. B. a)–c), zeigen die unterschiedlichen Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s, die Teilabbildungen von oben nach unten, z. B. a), d), g), die Nachverdichtungszeitpunkte in aufsteigender Reihenfolge von 120 s, 140 s und 160 s.

In der Abb. 4.52 a) werden die beiden Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % für eine Verdichtungszeit von 10 s und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s gezeigt. Das Zwischenminimum liegt vor dem festen Presskolben bei 22,2 % bzw. 27,9 % mit Dichtewerten von 92,4 % und 95,0 %. Der Profilgrund ist mit 21,0 % bzw. 14,8 % weiter in die Mattenmitte gerückt. Eine eindeutige Aussage zu den Positionen kann hier jedoch nicht getroffen werden, da Positionswerte für das Erstverdichtungsniveau von 110 % fehlerhaft erscheinen. Das kann durch das Streichen von stark abweichenden Werten hervorgerufen

werden. Die Dichteniveaus von 98,5 % und 102,0 % liegen um 6,1 % bzw. 7,0 % über der Dichte in den Zwischenminima. In der Abb. 4.52 b) sind die Werte für eine Verdichtungszeit von 20 s und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s dargestellt. Die Positionswerte für das Zwischenminimum und den Profilgrund vor dem festen Presskolben sind nicht auswertbar. Mögliche Ursachen für dieses Wertepaar sind weiter oben in der Beschreibung der Abb. 4.51 a) gegeben. Daher werden hier die Werte vor dem beweglichen Presskolben herangezogen. Die Positionen für das Zwischenminimum liegen bei 24,8 % und 18,2 % mit den Dichtewerten von 93,3 % und 90,3 %. Der Profilgrund liegt mit 19,0 % und 17,7 % und einer Dichte von 99,3 % und 104,0 % entsprechend 5,8 % bzw. 0,5 % weiter in der Mattenmitte und weist 6,0 % bzw. 13,7 % höhere Dichtewerte auf. Auch hier ist eine eindeutige Aussage bezüglich der Position nicht möglich, wie weiter oben schon begründet ist. Für eine Verdichtungszeit von 30 s und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s werden die charakteristischen Werte in Abb. 4.52 c) gezeigt. Das Zwischenminimum weist die Positionswerte von 21,6 % und 17,4 % mit den entsprechenden Dichtewerten von 93,7 und 89,8 % für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % auf. Der Profilgrund liegt mit 2,5 % bzw. 0,1 % weiter innen an den Positionen 19,1 % und 17,3 % für die beiden Erstverdichtungsniveaus. Die Dichtewerte an den beiden Positionen sind mit 100,1 % und 102,6 % also 6,2 % bzw. 12,8 % höher als im Zwischenminimum.

In der Abb. 4.52 d) werden die charakteristischen Werte, die beiden Erstverdichtungsniveaus und die Verdichtungszeit von 10 s bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s dargestellt. Das Zwischenminimum vor dem beweglichen Presskolben befindet sich bei 23,6 % und 21,8 % mit den Dichtewerten von 90,7 % und 90,1 % für die beiden Erstverdichtungsniveaus in aufsteigender Reihenfolge. Der Profilgrund der entsprechenden Hälfte des Rohdichteprofils liegt bei 13,7 % und 13,4 %, folglich 9,9 % bzw. 8,4 % weiter innen als das Zwischenminimum, und weist die Dichtewerte von 96,5 % und 106,2 % auf. Das ist eine Erhöhung der Dichte um 5,7 % bzw. 16,1 % bezogen auf das Zwischenminimum für die beiden Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 %.

Die Abb. 4.52 e) zeigt die charakteristischen Werte für die Verdichtungszeit von 20 s und den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s. Das Zwischenminimum vor dem festen Presskolben liegt bei 23,1 % und 19,4 % mit den relativen Dichtewerten von 91,9 % und 90,4 %. Die Positionen des Profilgrunds für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % sind bei 18,1 % und 15,9 %. Damit sind die Positionswerte um 5,0 % bzw. 3,5 % nach innen verlagert und die Dichtewerte um 9,0 % und 14,3 % höher als im Zwischenminimum.

In Abb. 4.52 f) sind die charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 30 s und den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s dargestellt.

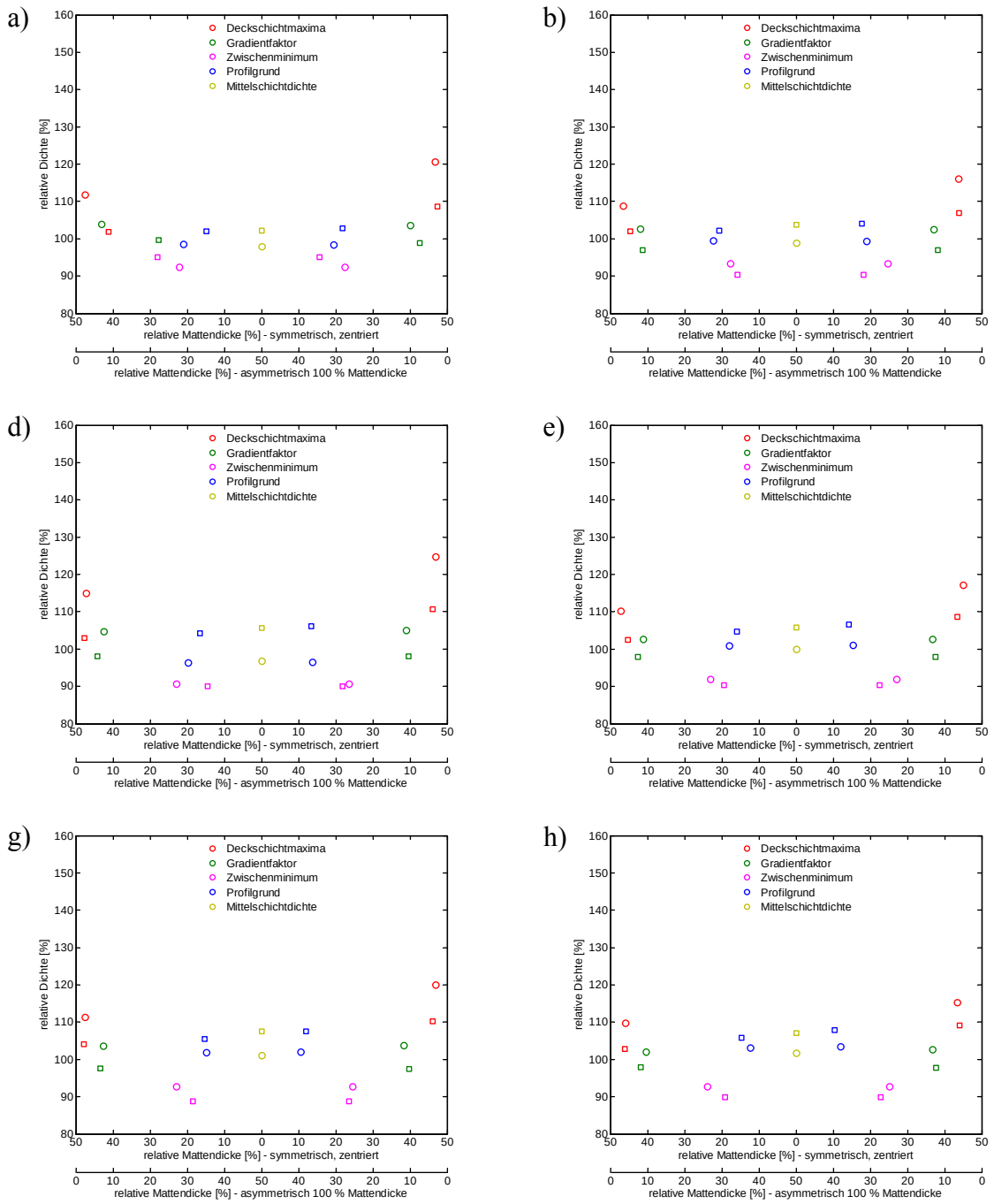


Abb. 4.52: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau. Die Teilabbildungen a)–f) beschreiben die unterschiedlichen Kombinationen aus Verdichtungszeit und Nachverdichtungszeitpunkt wie folgt: Die Teilabbildungen von links nach rechts, z. B. a)–c), sind nach aufsteigender Verdichtungszeit 10 s (a)), 20 s (b)) und 30 s (c)) angeordnet, die Teilabbildungen von oben nach unten, z. B. a), d), g), sind nach aufsteigendem Nachverdichtungszeitpunkt 120 s (a)), 140 s (d)) und 160 s (g)), angeordnet. Die Erstverdichtungsniveaus von 110 % (○) und 120 % (□) werden durch die angegebenen Marker beschrieben. Die Abbildung wird auf der folgenden Seite fortgesetzt

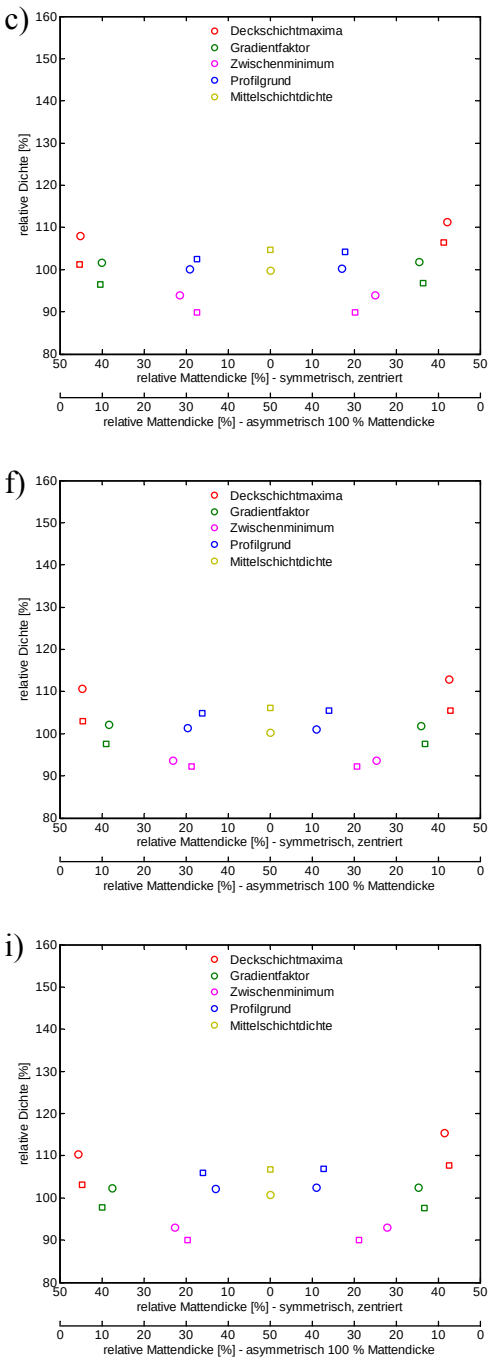


Abb. 4.52 (Fortsetzung): Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau

Das Zwischenminimum hat die Positionswerte von 23,1 % und 18,7 %, an denen die relativen Dichten 93,7 % und 92,2 % betragen. Der Profilgrund weist die Positionen von 19,6 % und 16,1 % mit den Dichten von 101,4 % und 104,9 % auf. Verglichen mit dem Zwischenminimum liegt der Profilgrund um 3,5 % bzw. 2,6 % weiter innen und zeigt um 7,7 % und 12,7 % höhere Dichten.

Die Abb. 4.52 g) zeigt die charakteristischen Werte für die Verdichtungszeit von 10 s und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s. Das Zwischenminimum vor dem festen Presskolben liegt bei 22,9 % und 18,4 % für die beiden Erstverdichtungsniveaus mit den relativen Dichten von 92,6 % und 88,8 %. Der entsprechende Profilgrund hat die Wertepaare von 14,8 % und 15,3 % mit den Dichtewerten von 101,8 % und 105,5 % und liegt damit 8,1 % und 3,1 % weiter in der Mattenmitte und zeigt 9,2 % bzw. 16,7 % höhere Dichtewerte. In der Abb. 4.52 h) sind die Werte 20 s Verdichtungszeit und einen Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s gezeigt. Das Zwischenminimum weist die Positionen von 23,8 % und 19,1 % mit den Dichtewerten von 92,7 % und 89,8 % auf. Der Profilgrund liegt 11,5 % bzw. 4,4 % weiter innen mit den relativen Dichten von 103,2 % und 105,8 %. Das entspricht einem Dichtesprung von 10,5 % bzw. 16,0 % für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 %. Die Kombination von 30 s Verdichtungszeit und einem Nachverdichtungszeitpunkt von 160 s wird in Abb. 4.52 i) dargestellt. Die Position der Zwischenminima

für die Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % liegt bei 22,6 % und 19,7 % mit den Dichtewerten von 93,1 % und 90,0 %. Der Profilgrund liegt 9,7 % bzw. 3,8 % weiter innen an den Positionen 12,9 % und 15,9 % mit den relativen Dichten von 102,1 % und 105,9 %. Damit betragen die Dichtedifferenzen 9,0 % und 15,9 % vom Zwischenminimum zum Profilgrund.

♦ Abhängigkeit des Rohdichteprofils vom Nachverdichtungszeitpunkt

Die Abb. 4.53 zeigt die Abhängigkeit der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil vom Nachverdichtungszeitpunkt. In den linken Teilabbildungen a), c), e) ist das Erstverdichtungsniveau von 110 % dargestellt, in den rechten b), d) und f) das Erstverdichtungsniveau von 120 %. Von oben nach unten nimmt die Verdichtungszeit von 10 s, 20 s und 30 s in den Teilabbildungen a) und b), c) und d) sowie e) und f) zu.

Die Abb. 4.53 a) zeigt die charakteristischen Werte für das Erstverdichtungsniveau von 110 % und Verdichtungszeit von 10 s. Das Zwischenminimum vor dem festen Presskolben liegt bei 22,2 % für den Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s und 22,9 % für die Nachverdichtungszeitpunkte von 140 s und 160 s. Die Dichten sind an diesen Positionen auch sehr ähnlich mit 92,4 %, 90,7 % und 92,6 % für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s. Der Profilgrund zu den Nachverdichtungszeitpunkten ist in entsprechender Reihenfolge an den Positionen 21,0 %, 19,8 % und 14,8 % zu finden. Die Dichtewerte an den entsprechenden Positionen sind 98,5 %, 96,4 % und 101,8 %. Tendenziell zeigen die Positions- und Dichtewerte, dass der Profilgrund bei späteren Nachverdichtungszeitpunkten weiter in die Plattenmitte wandert und dabei die Dichte steigt.

In der Abb. 4.53 b) sind die charakteristischen Werte für das Erstverdichtungsniveau von 120 % und 10 s Verdichtungszeit angegeben. Für den Nachverdichtungszeitpunkt von 140 s sind das Zwischenminimum und der Profilgrund vor dem festen Presskolben, für den Nachverdichtungszeitpunkt von 120 s vor dem beweglichen Presskolben nicht interpretierbar. Hier handelt es sich um das Wertepaar, das in Abb. 4.51a) schon als abweichend aufgefallen ist und beschrieben wurde. Vor dem beweglichen Presskolben befindet sich das Zwischenminimum bei 15,7 %, 21,8 % und 23,5 % mit den Dichtewerten von 95,0 %, 90,1 % und 88,8 %. Der entsprechende Profilgrund liegt bei 21,7 %, 13,4 % und 11,9 % und weist die relativen Dichtewerte von 102,8 %, 106,2 % und 107,6 % auf. Die Dichte im Profilgrund liegt somit 7,8 %, 16,1 % und 18,8 % höher als im Zwischenminimum für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s.

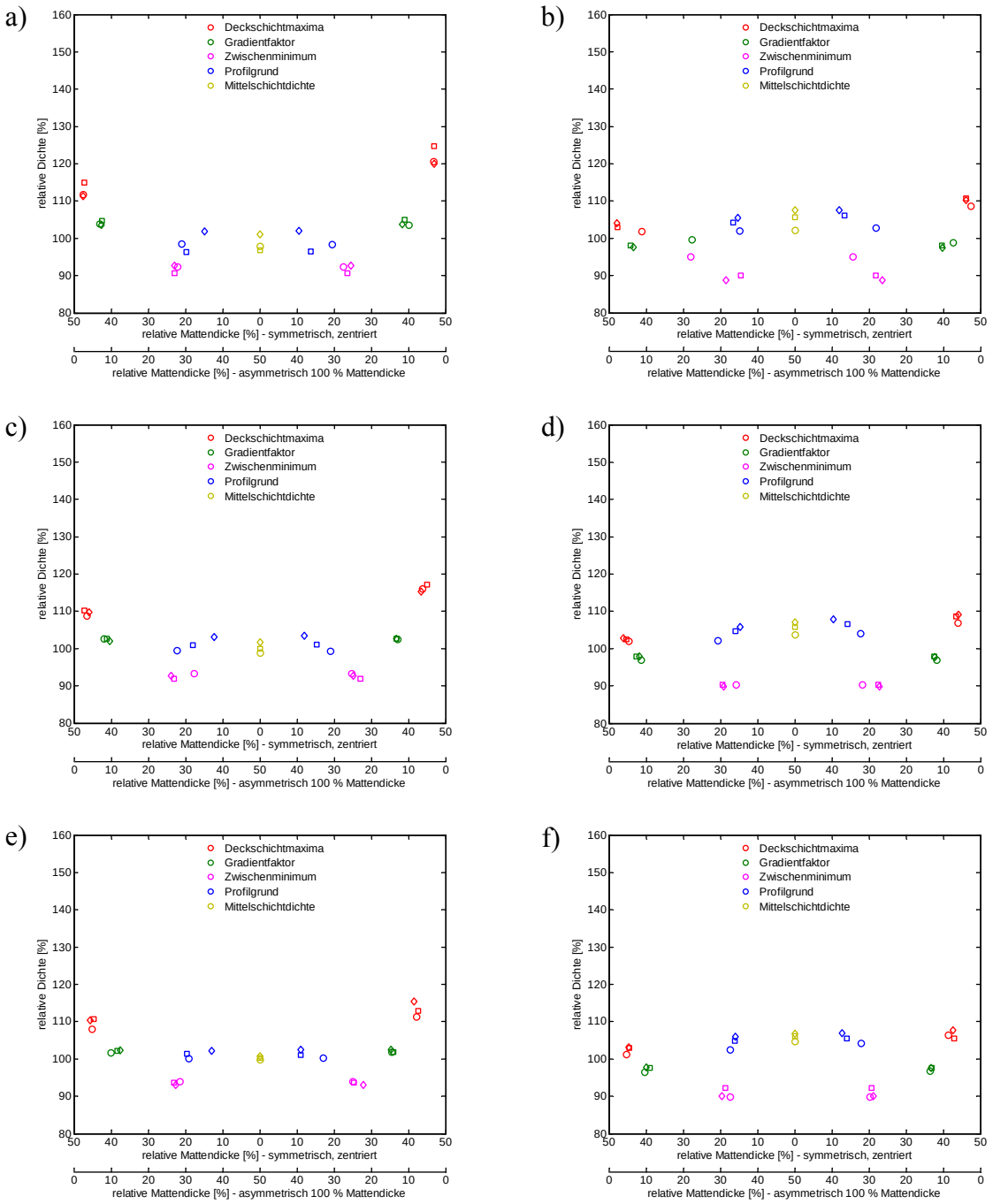


Abb. 4.53: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit vom Nachverdichtungszeitpunkt. Die Teilabbildungen a), c), e) beschreiben das Erstverdichtungsniveau von 110 %, die Teilabbildungen von b), d), f) das Erstverdichtungsniveau von 120 %. Die Verdichtungszeit von 10 s wird in den Teilabbildungen a) und b), die Verdichtungszeit von 20 s in den Teilabbildungen c) und d) sowie die Verdichtungszeit von 30 s in den Teilabbildungen e) und f) dargestellt. Die drei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s (○), 140 s (□) und 160 s (◊) werden durch die angegebenen Marker beschrieben

Die Abb. 4.53 c) zeigt die charakteristischen Werte für die Verdichtungszeit von 20 s und ein Erstverdichtungsniveau von 110 %. Die Werte vor dem beweglichen Presskolben sind in dieser Abbildung klarer darstellbar. Das Zwischenminimum hat an den Positionen 24,8 %, 27,0 % und 25,2 % die Dichten von 93,3 %, 91,9 % und 92,7 % für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s. Der Profilgrund zu den entsprechenden Nachverdichtungszeitpunkten ist an den Positionen 19,0 %, 15,3 % und 11,9 % mit den Dichtewerten von 99,3 %, 101,0 % und 103,4 % zu finden. Damit liegt der Profilgrund für diese Kombination aus 20 s Verdichtungszeit und 110 % Erstverdichtungsniveau vor dem beweglichen Presskolben mit 5,8 %, 11,7 % und 13,3 % deutlich weiter innen und weist für die drei Nachverdichtungszeitpunkte Dichtedifferenzen von 6,0 %, 9,1 % und 10,7 % auf.

Die Abb. 4.53 d) stellt die charakteristischen Werte für die Verdichtungszeit von 20 s und das Erstverdichtungsniveau von 120 % dar. Die charakteristischen Werte vor dem beweglichen Presskolben sind hier deutlicher zu interpretieren. Das Zwischenminimum weist die Positionen von 18,2 %, 22,4 % und 22,7 % mit den Dichtewerten von 90,3 %, 90,4 % und 89,8 % auf. Der Profilgrund in der Hälfte des Rohdichteprofils vor dem beweglichen Presskolben liegt bei 17,7 %, 14,2 % und 10,4 % mit den Dichtewerten von 104,0 %, 106,5 % und 107,8 %. 0,5 % weiter innen liegen mit 8,2 % und 12,3 % das Zwischenminimum für die drei Nachverdichtungszeitpunkte. Die Dichtedifferenzen betragen 13,7 %, 16,1 % und 18,0 % und weisen damit untereinander mit Unterschieden von 1,9 % bzw. 2,4 % nahezu gleiche Dichteabstände auf.

Die Abb. 4.53 e) zeigt die charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 30 s und ein Vorverdichtungsniveau von 110 %. Auch für diese Kombination der Pressparameter erscheinen die charakteristischen Werte vor dem beweglichen Presskolben klar beschreibbar. Das Zwischenminimum befindet sich an den Positionen 25,0 %, 25,4 % und 27,9 % mit den Dichten von 93,9 %, 93,7 % und 93,1 % für die Nachverdichtungszeitpunkte von 120 s, 140 s und 160 s. Der entsprechende Profilgrund liegt an den Positionen 17,1 % für den Nachverdichtungszeitpunkt bei 120 s und 11,1 % für den Nachverdichtungszeitpunkt bei 140 s und 160 s. Die Unterschiede in den Positions- und Dichtewerten zwischen Profilgrund und Zwischenminimum betragen für die Position 7,9 %, 14,3 % und 16,8 % und die Dichtewerte 6,4 %, 7,4 % und 9,4 %. Eine Tendenz, dass sowohl die Differenzen in der Position als auch in den Dichtewerten mit dem Nachverdichtungszeitpunkt zunehmen, ist erkennbar.

Die Abb. 4.53 f) zeigt die charakteristischen Werte für 30 s Verdichtungszeit und ein Vorverdichtungsniveau von 120 %. In dieser Teilabbildung ist es ebenfalls sinnvoll, die charakteristischen Werte vor dem beweglichen Presskolben zu betrachten. Das Zwischen-

minimum befindet sich an den Positionen von 20,2 %, 20,8 % und 21,2 % mit den Dichtewerten von 89,8 %, 92,2 % und 90,0 % für die Nachverdichtungszeitpunkte bei 120 s, 140 s und 160 s. Der entsprechende Profilgrund liegt bei 17,9 %, 14,1 % und 12,7 % mit den Dichtewerten von 104,2 %, 105,5 % und 106,9 %. Damit betragen die Differenzen zwischen Profilgrund und Zwischenminimum in der Position 2,3 %, 6,7 % und 8,5 % und in der Dichte 14,4 %, 13,3 % und 16,9 %. Die Positionen des Profilgrundes verlagern sich vor dem beweglichem Presskolben mit zunehmendem Nachverdichtungszeitpunkt nach innen. Nicht so klar, aber dennoch relativ gleichmäßig steigen die Dichten mit dem Nachverdichtungszeitpunkt, eine Tendenz, wie diese in den Abb. 4.53 c)–e) sehr deutlich für das Zwischenminimum und den Profilgrund sichtbar ist, lässt sich für die Werte in Abb. 4.53 f) erkennen.

4.3.6.2 Diskussion der Rohdichteprofile am Ende der zweiten Haltephase

Die Rohdichteprofile, die in den Abbildungen 4.51 bis 4.53 durch die charakteristischen Werte beschrieben sind, zeigen alle ein ausgeprägtes Dichtemaximum in der Mittelschicht, welches in manchen Fällen sogar das Dichtemaximum in den Deckschichten übersteigt. Das Rohdichteprofil weist zwischen den Rohdichtemaxima in den Deckschichten und dem Mittelschichtmaximum ein Zwischenminimum auf beiden Seiten des Rohdichteprofils – vor dem festen und dem beweglichen Presskolben – auf. Das Maximum in der Mittelschicht weist nahezu eine plateauförmige Ausprägung ohne nennenswertes Minimum in der Mittelschicht auf. Daher wurde die Mittelschicht auch nicht besonders im Abschnitt 4.3.6.1 beschrieben. Ruf (2003) beobachtet hingegen zusätzlich einen deutlichen Abfall der Rohdichte zur Mitte der Platte hin. Die von Ruf (2003) mit gleichen Pressprogrammen durchgeführten Versuche auf einer Laborpresse und der von Roos (2000) entwickelten Miniaturpresse zeigten leicht unterschiedliche Rohdichteprofile. Ruf (2003) betont jedoch, dass die Tendenzen in der Ausprägung der Rohdichteprofile zwischen den beiden Pressenkonstruktionen bei gleichen Pressprogrammen ähnlich sind. Die unterschiedlichen Rohdichteprofile werden von Ruf (2003) vor allem durch die unterschiedlich dicken Pressbleche, den geschlossenen Verdichtungsraum in der Miniaturpresse nach Roos (2000) sowie die generell unterschiedliche Konstruktion und Größe der beiden Pressen begründet. Dieser Argumentation kann hier gefolgt werden, um das Mittelschichtplateau der in Abschnitt 4.3.6.1 beschriebenen Proben (siehe ebenfalls Anhang P) zu erklären. Durch den geringen Durchmesser der Probe von 50 mm kann es daher zu einer sehr gleichmäßigen Durchwärmung der Mittelschicht durch den Einfluss der Presshülse vom Rand her kommen. Das kann zur Folge haben, dass sich während einer weiteren Nachverdichtung aufgrund der wenig ausgeprägten Temperatur- und möglicherweise auch Feuchtebedingungen in einem weiten Bereich der Mittelschicht keine

deutlicheren Dichtegradienten im Dichteplateau bei Nachverdichtungsschritten ausprägen können. Ein weiterer möglicher Grund ist der sehr späte Nachverdichtungszeitpunkt von mindestens 120 s nach Erreichen des Erstverdichtungsniveaus, sodass es dadurch einerseits bereits zu einer starken (und an sich unerwünschten) Durchwärmung der Mittelschicht gekommen ist. Gleichzeitig kann aber für die etwas weiter außen liegenden Schichten schon eine so weitgehende Austrocknung bzw. schon weitgehende Aushärtung des Klebstoffes angenommen werden, dass eine weitere Verdichtung dieser Schichten kaum mehr möglich ist. Die gesamte Verdichtung während des Nachverdichtungsschrittes konzentriert sich demnach in einer relativ schmalen Schicht (innere Mittelschicht), die dadurch übermäßig verdichtet wird. Für diese Argumentation sprechen die in Abschnitt 4.2.4 entwickelte Modellvorstellung und die daraus ableitbare Bedeutung des Minimums und Maximums in der Mittelschicht, die in Abschnitt 4.3.4.2 präsentiert wird. Aus den in Abschnitt 4.3.4.2 beschriebenen zeitlichen Entwicklungen der Dichte der Mittelschicht wird deutlich, dass die Nachverdichtung in den hier durchgeführten Versuchen erst nach einer nahezu kompletten Durchwärmung der Mittelschicht stattfand.

Die Verdichtungszeit zeigt keinen merklichen Einfluss auf die Ausprägung der Zwischenminima. Generell ist jedoch zu bemerken, dass die charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 10 s auffallend uneinheitlich sind. Das kann auf die sehr schnelle Verdichtung und die daraus resultierende hohe mechanische Belastung der Presse zurückzuführen sein. Industrielle Pressprogramme weisen aufgrund der mechanischen Belastung in der Hochdruckzone kurz hinter dem Presseneinlauf eher eine Drucksteuerung als eine Wegsteuerung auf. Das Erstverdichtungsniveau zeigt jedoch einen deutlichen und auch reproduzierbaren Einfluss auf die Ausprägung der Zwischenminima und das Dichteplateau in der Plattenmitte. Der Dichtesprung von den Zwischenminima zum Profilgrund (mit seiner höheren Dichte) verdoppelt sich nahezu vom Erstverdichtungsniveau von 110 % zu 120 %. Diese Beobachtung ist bei der Verdichtungszeit von 20 s am ausgeprägtesten. Bei der Verdichtungszeit von 10 s zeigt sich das Verhalten nicht so deutlich. Weniger stark ausgeprägt ist der Anstieg des Dichteplateaus in der Mittelschicht für die Verdichtungszeit von 30 s und spätere Nachverdichtungszeitpunkte. Ruf (2003) beobachtet im Wesentlichen eine Erhöhung der mittleren Rohdichte bei höheren Erstverdichtungsniveaus. Ähnliche Beobachtungen machen auch Thole et al. (2000) und Wang et al. (2001a). Ruf (2003) führt die erhöhten Mittelschichtdichten auf geringere Dichten in den Deckschichtmaxima und eine erhöhte hydrothermische Plastifizierung der Mittelschicht zurück. Diese ist nach seinen Überlegungen auf eine Temperaturerhöhung durch Konduktion und Konvektion zurückzuführen. Die Annahme einer

Erhöhung der Konduktion mit sinkender Rohdichte vor allem in der Mittelschicht bei höheren Erstverdichtungsniveaus von 110 % und 120 % kann hier nicht unterstützt werden. Das widerspricht den experimentellen Ergebnissen von v. Haas (2000) sowie den simulierten Daten zur Wärmeleitfähigkeit von Walther (2006). Thole et al. (2000) folgern aus Versuchen mit einem Nachverdichtungsschritt, dass ein erheblicher Teil der Verdichtungsarbeit für die Erhöhung der Mittelschichtdichte im Nachverdichtungsschritt genutzt wird. Das zeigt sich auch in den Pressdrücken zum Zeitpunkt des Nachverdichtungsschrittes, die im Abschnitt 4.3.5 beschrieben und diskutiert worden sind. Die Positionen des Profilgrundes liegen mit einer Erhöhung des Erstverdichtungsniveaus tendenziell weiter in der Mattenmitte. Diese Beobachtung lässt sich nicht hinreichend genau quantifizieren, ist jedoch qualitativ reproduzierbar. Eine mögliche Begründung dafür könnte sein, dass bei der weiteren Nachverdichtung bei höheren Erstverdichtungsniveaus die weiter außen liegenden Schichten im Rohdichteprofil schon etwas trockener als die mittleren Schichten sind, in denen sich nachweislich die Feuchte sammelt (siehe Abschnitt 4.4). Bei dem langen zusätzlichen Verdichtungsweg bei hohen Erstverdichtungsniveaus können daher dann nur die sehr stark plastifizierten und noch nicht durch die Klebstoffaushärtung fixierte Partikel der inneren bzw. innersten Mittelschicht weiter verdichtet werden. Daraus kann eine hohe mechanische Belastung der Bereiche im Rohdichteprofil, die nicht mehr weiter verdichtet werden, resultieren, was zu einer Schädigung von Klebstoffbrücken führen kann. Ob ein dafür erforderlicher Pressdruck während der Nachverdichtung und damit eine solche Schädigung auftreten, ist von vielen Faktoren abhängig, insbesondere vom Verdichtungswiderstand der einzelnen Schichten. Diese Thematik ist in vielen Arbeiten diskutiert worden (Jahic 2000; Wang und Winistorfer 2000b; Heinemann 2004; Meyer 2007).

Die Abhängigkeit vom Nachverdichtungszeitpunkt ist besonders deutlich auch in den Abbildungen 4.53 c)–e) zu erkennen. Für diese Kombinationen aus Verdichtungszeit (20 s und 30 s) und Erstverdichtungsniveaus scheint es klare Abhängigkeiten der Dichte und der Position des Profilgrundes vom Nachverdichtungszeitpunkt her zu geben: je später der Nachverdichtungszeitpunkt liegt, umso weiter bewegt sich der Profilgrund in Richtung der Mattenmitte. Auch in dieser Darstellung der Abhängigkeiten sind die Werte für 10 s Erstverdichtungszeit uneinheitlich und lassen sich schwer interpretieren. Ruf (2003) findet für eine Verlängerung der ersten Haltephase flache Rohdichteprofile in Abhängigkeit des Nachverdichtungszeitpunktes: die Rohdichteprofile für 120 s Haltezeit in der ersten Haltephase weisen auffallende Zwischenmaxima mit hohen Dichtespitzen nach dem Zwischenminimum und einem deutlichen Minimum in der Mitte der Matte auf, die Rohdichteprofile für 140 s und

160 s zeigen eine Mittelschichtdichte, die nur wenig über der der Zwischenminima liegt. Die deutliche Abhängigkeit des Profilgrunds vom Nachverdichtungszeitpunkt wie bei den vorliegenden Versuchen fällt bei den von Ruf (2003) berichten Rohdichteprofilen nicht auf. In den Abbildungen 4.53 c)–e) verschiebt sich die Position des Profilgrunds je 20 s bei später erfolgendem Nachverdichtungsschritt um ca. 3,5 % in die Mattenmitte, unabhängig vom Erstverdichtungsniveau. Die relativen Dichten steigen für die Zeitdifferenz zwischen den unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten von 20 s um ca. 2 %. Für die angegebenen Abbildungen lässt sich somit ein nahezu linearer Zusammenhang annehmen. Diese Beobachtung unterstützt die Annahme, dass es bei der Verdichtung der einzelnen Schichten in der Mittelschicht einen Zusammenhang mit fortschreitender Austrocknung und zunehmender Aushärtung des Klebstoffes gibt. Es ist zusätzlich die Annahme möglich, dass dieser Zusammenhang nur bis zu einer gewissen relativen Dichte und zu einem gewissen Zeitpunkt im Verdichtungsvorgang gilt. Oberhalb dieser relativen Dichte und nach einem gewissen Zeitpunkt während der Verdichtung kann es zu einer vollständigen Verdichtung unabhängig von der Feuchtigkeit und dem Aushärtungsgrad in der Mittelschicht kommen. Diese Annahme wird durch Abb. 4.53 f) unterstützt. Die unter ungünstigen Bedingungen möglichen Zerstörungen von bereits entstandenen Leimbrücken zwischen einzelnen Partikeln (wenn im Nachverdichtungsschritt zu hohe Pressdrücke auftreten und bereits ausgehärtete Leimstrukturen in einzelnen Schichten gegeben sind) können im rheologischen Modell durch ein von der Klebstoffaushärtung abhängiges Partikelbruchelement (PMF), wie in Abb. 2.5 dargestellt, beschrieben werden. Eine noch tiefer gehende Analyse des Nachverdichtungsschrittes könnte somit wertvolle Daten über die Klebstoffaushärtung während des Heißpressvorgangs ergeben. Weiterhin können Daten für das rheologische Modell nach Abb. 2.5 gewonnen werden, die das von Thömen (2000) entwickelte Programm VHP erweitern können. Die Simulation der Rohdichteprofilentwicklung mit VHP wird in Kapitel 5 beschrieben und diskutiert werden.

4.4 Berechnung des Feuchteprofils am Ende des Heißpressvorgangs

Auf das mögliche Feuchteprofil einer Matte am Ende des Heißpressvorgangs kann aus der Differenz des Rohdichteprofiles zu Beginn der Haltephase und am Ende des Heißpressvorgangs geschlossen werden, wie unter anderem in Abb. 4.25 dargestellt. Aus diesen Überlegungen heraus wurde eine weitere Untersuchungs- und Auswertungsmethode abgeleitet. Die Proben der systematischen Versuche, die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt werden, wurden für mindestens sechs Wochen im Normklima bei $\vartheta = 20$ °C, $\varphi = 65$ % gelagert. Anschließend

wurde an den Proben das Rohdichteprofil im Itrax Woodscanner bestimmt. Die Anordnung der Probe war identisch wie bei der Herstellung der Probe, während der die Rohdichteprofilentwicklung ermittelt wurde. Es wurde ebenso der Röntgenstrahl in seiner Breite von bis zu 25 mm durch die Kapillaroptik auf der Ebene senkrecht zur Plattenebene durch den Mittelpunkt der Probe angeordnet, in der auch während des Verdichtungsversuchs gemessen wurde. Die Messdauer in dieser Position betrug 60 s, die Probe ruhte während dieser Zeit in einem Probenhalter. Es wurde nur eine Messung ausgeführt, da durch die oben beschriebene Ausrichtung der Probe im Röntgenstrahl die Platte durch die einzelnen Pixel in der Zeilenkamera schichtweise erfasst werden konnte. Der Röntgenstrahl war wesentlich breiter mit ca. 25 mm als die Platte mit ca. 12 mm. Die Probe wurde ungefähr mittig im Röntgenstrahl positioniert. Das Messdatenbild wurde in Matlab® eingelesen und die Bereiche an den Seiten des Röntgenstrahls, in denen sich keine Platte befand, verworfen. Die Messwerte während der 60 Sekunden, die sich nur um das Rauschen der Zeilenkamera unterscheiden, wurden gemittelt und damit das Rohdichteprofil geglättet. Die Feuchte der Proben nach der Klimatisierung war bekannt und wurde als homogen verteilt über den Plattenquerschnitt angenommen. Aus dem bekannten Rohdichteprofil und der Feuchte nach der Klimatisierung konnte durch einfache Differenzbildung mit dem Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs das Feuchteprofil am Ende des Heißpressvorgangs in einem Algorithmus in Matlab® errechnet werden. Die Feuchteprofile sind im Anhang P als fünfte Abbildung für jede Probe dargestellt. Bei der Betrachtung der Feuchteprofile ist zu beachten, dass die minimale Feuchte immer auf 0 % verschoben wurde, wenn in den oberflächennahen Schichten negative Feuchten errechnet wurden. Dieses Vorgehen war notwendig, da nicht absolut sichergestellt werden konnte, dass die Proben während der zweiten Messung absolut auf der gleichen Ebene wie bei der ersten Messung lagen. Trotz dieser Ungenauigkeiten liegen die ermittelten Feuchtigkeiten in einem sinnvollen Bereich und bestätigen somit das Vorgehen. Daher können die Ergebnisse im Wesentlichen nur qualitativ im Anhang P beurteilt werden.

Diese Methode kann daher als ein erster Ansatz gesehen werden, das Feuchteprofil während des Heißpressvorgangs zerstörungsfrei zu bestimmen. Die in der Literatur bekannten Ansätze von Rackwitz (1954) (siehe Abb. 2.4) und Meyer (2003) beruhen auf einer zerstörenden Prüfung, die auch immer eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, während der es schon zu Ausgleichprozessen für die Feuchte kommen kann. Der Ansatz scheint jedoch vielversprechend zu sein und sollte im Sinne einer weiteren quantitativen Auswertung und zeitlichen Analysemöglichkeiten intensiver verfolgt werden.

5 Vergleich der Messdaten mit Simulationsdaten aus Virtual Hot Press (VHP)

Das Softwarepaket VHP (*Virtual Hot Press*) basiert auf dem physikalisch-analytischen Modell von Thömen (2000). Die Modellvorstellung von Thömen (2000) zum Heißpressvorgang ist in Abschnitt 2.3 näher beschrieben. VHP berücksichtigt die rheologischen Prozesse im Partikelmaterial und die Prozesse des kombinierten Wärme- und Stofftransports und benötigt neben modellspezifischen Eingabeparametern verschiedene Eingangsdaten:

- verwendetes Partikelmaterial
- Plattendimensionen
- Druck- und Temperaturverlauf während des Heißpressvorgangs

Als Ausgabedaten werden unter anderem

- die Rohdichteprofilentwicklung
- die Temperaturentwicklung
- der Pressdruckverlauf

berechnet.

Mit dem für die Herstellung der Probe 1.1 verwendeten Pressprogramm (Druck- und Temperaturverlauf) wird die Rohdichteprofilentwicklung für diese Probe simuliert, basierend auf der VHP-Version vom 18.07.2008. Die rheologischen Eigenschaften des Partikelmaterials sind dabei über „Tuning-Parameter“ so angepasst, dass es zu einer maximalen Übereinstimmung der Simulationsdaten mit den Messwertdaten für das Rohdichteprofil im Heißpressvorgang bei t = 240 s kommt. Diese Version von VHP ermöglicht die getrennte Berücksichtigung der Klebharzaushärtung für jedes einzelne Element im 5-Elemente-Humphrey-Burgers-Modell. Ein umfassende Darstellung der Klebharzaushärtung findet sich bei Thömen et al. (2004). Der sich aus der Rohdichteprofilanpassung ergebende Temperaturverlauf in den unterschiedlichen Mattenschichten sowie der resultierende Pressdruckverlauf werden als sekundär betrachtet und nicht angepasst. Mit den „Tuning-Parametern“ lassen sich die einzelnen Faktoren für das jeweilige Partikelmaterial in der Größe und dem Einfluss nach auf das in Abb. 2.5 beschriebene rheologische Modell anpassen. Eine genaue Beschreibung der Anpassungsfaktoren findet sich bei Thömen (2000-2007). Das von VHP berechnete Rohdichteprofil bezieht sich auf die atro Rohdichte der Partikel. Das Feuchteprofil, das VHP für jeden

Zeitschritt über die Mattendicke berechnet, wird bei den folgenden Betrachtungen ***nicht*** berücksichtigt, da die Erfahrung mit VHP gezeigt hat, dass das Feuchteprofil sehr ausgeprägt in den Simulationsdaten berücksichtigt wird. Stattdessen wird ***ein*** globaler Korrekturfaktor über die Mattenbreite zur Berücksichtigung der Partikelfeuchte auf alle simulierten Rohdichtewerte eines Zeitschritts angewendet. Dieser im Folgenden ***Feuchtekorrekturfaktor*** oder kurz ***Korrekturfaktor*** genannte Wert berechnet sich aus dem Quotienten der Mittelwerte der Dichtewerte aus den mittleren 30 % des gemessenen und simulierten Rohdichteprofils. Die Messdaten der Probe 1.1 werden im folgenden Abschnitt exemplarisch den Simulationsdaten zur Rohdichteprofilentstehung aus VHP gegenübergestellt.

Tabelle 20: Eingabedaten für die Simulationsrechnung mit VHP der Probe1.1

Parameter	Werte
Material	MDF-Fasern
Mattenhöhe	55 mm
Flächengewicht	8,80 kg m^{-2}
Materialfeuchte	16,0 %
Presstemperatur	180 °C konstant (Vereinfachung)
Zieldicke der Platte	11,00 mm
Plattenlänge	50 mm
Plattenbreite	50 mm
Mattentemperatur (t =0 s)	23 °C
Ausgabe Zeitintervall	0,2 s
Korrekturfaktor Einfluss auf die Konduktivität	0,5
Korrekturfaktor Partikelsteifigkeit (V_1)	0,2
Korrekturfaktor Partikelbruch (PMF)	2
Korrekturfaktor auf die Partikeleigenschaften für den Partikelbruch (PMF-Faktor)	0,8
Effekt der Klebharzaushärtung auf E_{el}[3]	10
Effekt der Klebharzaushärtung auf E_{de}[3]	10

Als Eingangsdaten für die Simulationsrechnung werden die Werte nach Tabelle 20 verwendet. Die Zeitschrittweite wurde entsprechend den Messdaten mit 0,2 s gewählt, damit die

[3] Parameter zur Beeinflussung des rheologischen Modell durch die Klebstoffaushärtung.

Simulationsdaten eines Zeitschritts mit den Messdaten vergleichbar sind. Es wird eine Rohdichte der vorverdichteten, feuchten Matte von 160 kg m^{-3} zugrunde gelegt, die auf Mattenhöhe und Flächengewicht umgerechnet wird. Als Pressdiagramm wird das einfache Programm für die Probe 1.1 angewendet (siehe Abb. 4.12). Die Schließzeit ist auf 20 s korrigiert und beginnt bei 10,2 s der gesamten Presszeit, die Haltezeit beträgt 210 s. Der Wärmeeintrag beginnt bereits zum Startzeitpunkt des Pressvorgangs bei t = 0 s. In einer weiteren Präzisierung kann die Presskolbentemperatur beider Presskolben mit maximal 40 Stützpunkten über die Presszeit als variable Presstemperatur angegeben werden. Das wurde in der vorliegenden Simulation jedoch nicht berücksichtigt.

In einem Simulationsdurchlauf wird die maximale Anzahl von 20 Stützpunkten, die durch die maximale Zahl von Gitterzellen festgelegt wird, über die halbe Plattendicke für das Rohdichteprofil berechnet. Die maximale Anzahl der Stützpunkte ist durch Instabilitäten, die in VHP durch Rundungsfehler in den Iterationsschritten auftreten, begrenzt. Die maximale Gitterzellenanzahl ist abhängig von der Anzahl der Iterationsschritte und der sich daraus ergebenden Rechenzeit, die bei hoher Gitterzellenanzahl länger als eine Minute sein kann. Der kritischste Prozess bei der VHP-Simulation ist die Konvektion (Thömen 2000). Die simulierten Daten aus VHP werden zusätzlich zu den Messdaten in den Auswertealgorithmus in Matlab® eingelesen. Das vollständige, simulierte Rohdichteprofil wird durch gespiegelte Simulationsdaten um die gedachte Mittellinie desselben erzeugt. Da die Simulationsdaten immer auf 100 % der aktuellen Plattendicke bezogen sind, werden die exakten x-Werte (Mattendicke) für die Stützpunkte des Rohdichteprofils in jedem Zeitschritt auf die aktuelle Mattendicke aus den Messdaten bezogen.

Eine Orientierung für die Übereinstimmung der Messdaten mit den Simulationsdaten geben der Temperaturverlauf in verschiedenen Schichten, der in Abb. 5.1 gezeigt ist, und der Verlauf des Pressdrucks, den Abb. 5.2 zeigt. Die Simulationsdaten werden erst ab dem Zeitpunkt t = 10 s in den Diagrammen dargestellt, da erst zu diesem Zeitpunkt die Verdichtung der Probe 1.1 in den Messdaten beginnt, wie in Abschnitt 4.2.1 bereits dargelegt wurde.

5.1 Temperatur- und Pressdruckverlauf der Messdaten und der Simulationsdaten

Die Oberflächentemperatur für die Simulationsdaten entwickelt sich deutlich unterschiedlich im Vergleich zu den Messdaten. Das ist auf den hohen Wärmestrom, der aus den Presskolben in die Partikelmatte abfließt, zurückzuführen, sodass die Temperatur im Presskolben durch die zur Verfügung stehende Heizleistung nicht gehalten werden kann. Dieses Verhalten ist nicht untypisch für kleine Laborpressen (Rauch 1984). Der Temperaturanstieg in den

Simulationsdaten beginnt in der 25 %-Schicht etwas früher als in den Messdaten. Der anschließende Temperaturanstieg in den Simulationsdaten erfolgt zuerst langsamer und verläuft ab dem Zeitpunkt von t = 40 s in etwa parallel zu den Messdaten. In einem Bereich ab t = 50 s verringert sich die Temperaturzunahme in der 25 %-Schicht stark, obwohl mit 80 °C noch nicht das Temperaturniveau von üblicherweise 100 °C für eine Abflachung des Temperaturverlaufes erreicht ist. Das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den in den Simulationsrechnungen durch den „Tuning-Parameter“ verminderten Einfluss von nur 50 % der Konduktion auf die Temperaturentwicklung zurückzuführen. Diese Diskrepanz zwischen simulierten und gemessenen Temperaturwerten wird bewusst akzeptiert, um das simulierte Rohdichteprofil an das gemessene Rohdichteprofil optimal anzupassen. Anschließend verläuft die simulierte Temperatur mit verminderter Steigung weiter bis zum Ende des Pressvorgangs. Die gemessene und simulierte Temperatur entwickeln sich dabei nahezu parallel mit einer Differenz von minimal 10 °C bei 113 s und maximal 21 °C bei 236 s. Bemerkenswert ist der sehr ähnliche Verlauf der gemessenen und der simulierten Temperaturen in der Mittelschicht bei 50 % Mattendicke. Der Temperaturanstieg in der Schicht 50 % unter der Plattenoberfläche beginnt für die gemessene Temperatur bei 32 s, also lediglich 7 s früher als für die simulierte Temperatur in dieser Schicht. Die gemessene Temperatur steigt anfänglich etwas schneller an. Abgesehen davon sind die nahezu gleichen Steigungen der gemessenen und simulierten Temperatur in der 50 %-Schicht auffallend. Die simulierte Temperatur in dieser Schicht zeigt eine geringfügig höhere Steigung. Nach dem Erreichen von 100 °C bildet sich für die Simulationsdaten ein deutliches Temperaturplateau aus, auf das Thömen (2000) in der Diskussion der Simulationsdaten für Taktpressen hinweist. Wie in Abschnitt 4.2.2 schon dargestellt, kann die Temperaturdifferenz auf einen minimalen Dampfdruck zurückzuführen sein, der sich in der Mattenmitte ausbildet. Der langsamere Anstieg der Mittelschichttemperatur in den Messdaten kann durch die sehr hohe Feuchte, mit der die Platten hergestellt wurden, begründet werden, da sehr viel Energie für die Verdampfung der Feuchte aufgebracht werden muss. Die Übereinstimmung von Mess- und Simulationsdaten ist insgesamt als gut zu bezeichnen. Auffallend ist jedoch die hohe Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Simulationsdaten in der Schicht bei 25 % Mattendicke, die wahrscheinlich auf die geringere Mattenoberflächentemperatur und die geringe angenommene Konduktion für die Simulationsrechnungen zurückzuführen ist, wie schon oben dargelegt. Wird die Konduktion in der Matte nicht angepasst, erfolgt die Simulation der Rohdichteprofile nicht so gut.

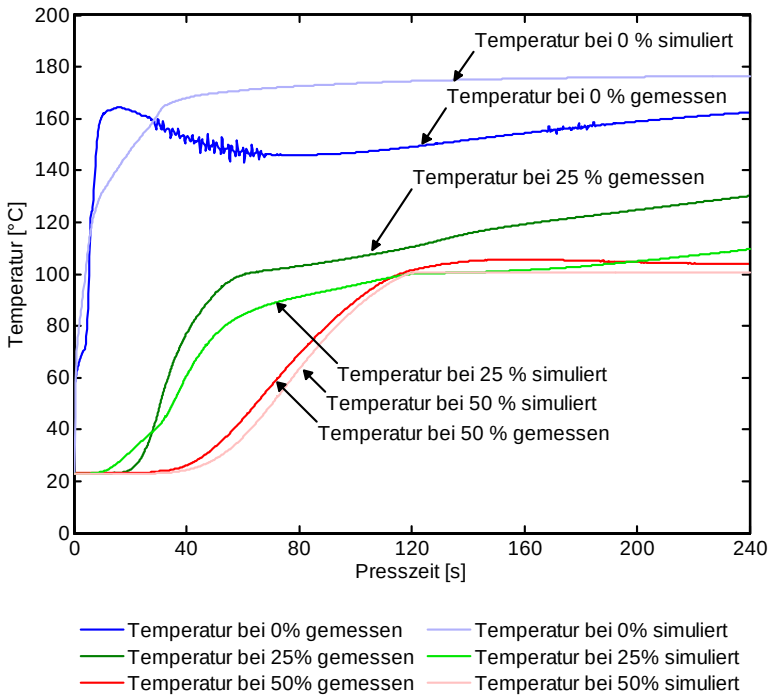


Abb. 5.1: Temperaturverlauf der Messdaten und der Simulationsdaten für Probe 1.1 nach den Eingabeparametern aus Tabelle 20

Den simulierten Pressdruck, der aus den Eingabedaten nach Tabelle 20 resultiert, zeigt Abb. 5.2. Der Kurvenverlauf für die Simulationsdaten wurde mit den Korrekturfaktoren V_1 für die Partikelsteifigkeit und PMF für den Partikelbruch an die Messdaten angepasst. Obwohl der Pressdruckverlauf nicht Ziel einer optimalen Anpassung der Simulation an die Messdaten war, zeigt der Pressdruck eine gute Übereinstimmung. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der gemessene Pressdruck in der Verdichtungseinheit möglicherweise durch die behinderte Querdehnung der Partikelmatte beeinflusst wird. Tendenziell ist daher mit einem zu hohen Pressdruck der Messdaten zu rechnen. Der Korrekturfaktor V_1 mit dem gewählten Wert von 0,2 in den erweiterten Eingangsdaten der Simulationssoftware VHP bewirkt eine Erhöhung des viskosen Anteils im 5-Elemente-Humphrey-Burger Modell der Matte (siehe Abb. 2.5) und erhöht damit die gegenseitige Beweglichkeit der Partikel. Das führt zu einem schnelleren Spannungsabbau nach Erreichen der Solldistanz. Der Korrekturfaktor PMF für die Beschreibung des Partikelbruchs mit dem eingestellten Wert 2 erhöht den Verdichtungswiderstand durch steifere Partikel während des Verdichtungsvorgangs und führt somit zu einem höheren Pressdruck.

Der Temperatur- und Pressdruckverlauf der Simulationsdaten gibt mit akzeptabler Übereinstimmung die Messdaten wieder. Deutliche Abweichungen zeigt jedoch die Oberflächentemperatur der Matte. Aufgrund der Temperatur- und Pressdruckentwicklung kann aber davon

ausgegangen werden, dass die Eingangsparameter nach Tabelle 20 die Materialeigenschaften bezüglich der Rheologie und der Permeabilität der Partikelmatte während des Heißpressvorgangs ausreichend gut beschreiben. Das radiometrisch gemessene und das durch Simulation ermittelte Rohdichteprofil können somit zumindest qualitativ recht gut miteinander verglichen werden.

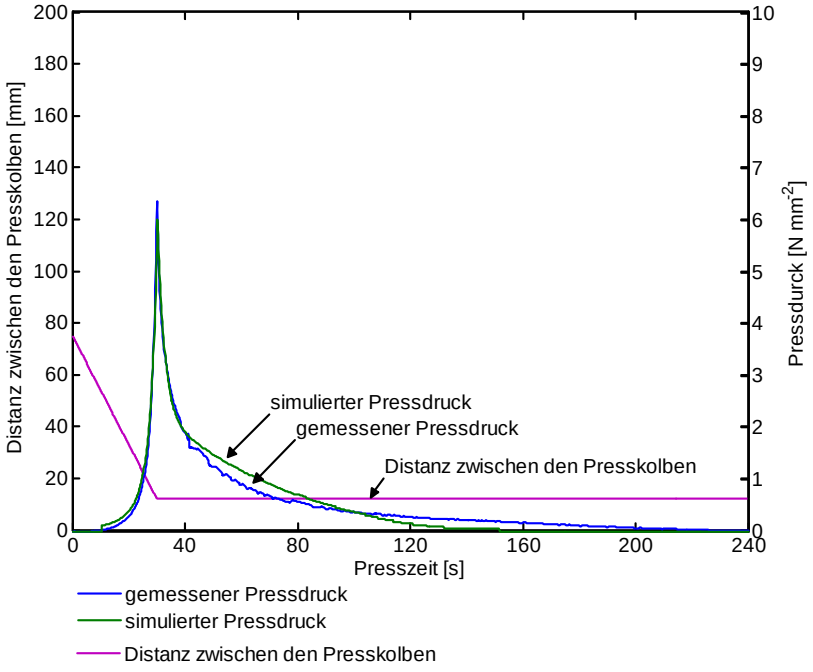


Abb. 5.2: Gemessener Pressdruck und simulierter Pressdruck in der Probe 1.1 nach den Eingabeparametern aus Tabelle 20

5.2 Rohdichteprofilentwicklung der Messdaten und der Simulationsdaten

Abb. 5.3 zeigt den Ausschnitt der simulierten Daten, der dem Bereich entspricht, in dem Messdaten aufgenommen worden sind. Die Messdaten der Probe 1.1 sind zum Vergleich in Abb. 5.4 dargestellt.

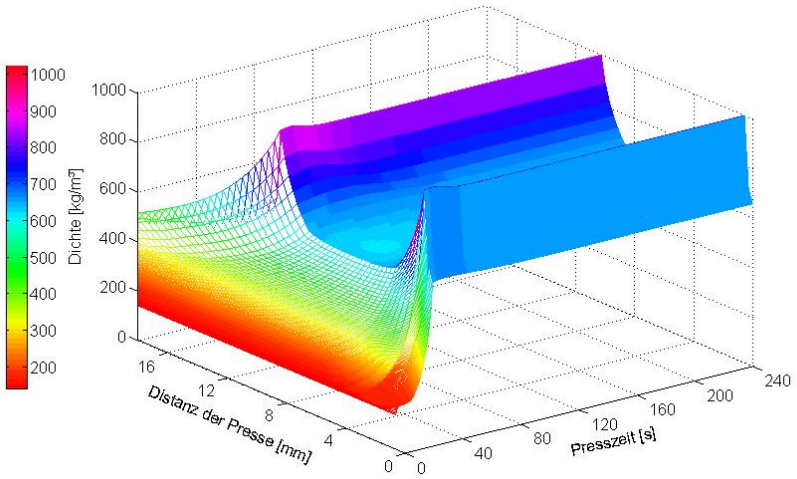


Abb. 5.3: Simulierte Rohdichteprofilentwicklung der Probe 1.1 mit dem Softwarepaket VHP mit den Eingangsparametern nach Tabelle 20, die der Probe 1.1 entsprechen

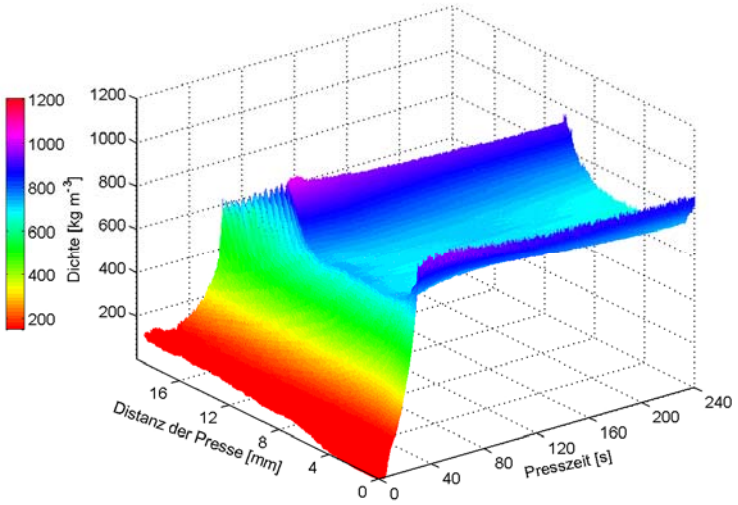


Abb. 5.4: Gemessene Rohdichteprofilentwicklung der Probe 1.1 mit einer Verdichtungszeit von 30 s und einer Haltezeit von 210 s. Der Beginn der Verdichtung liegt bei 10,2 s, siehe Abb. 4.11

Bei einem Vergleich der Messdaten mit den Simulationsdaten ist zu berücksichtigen, dass die Datendichte mit maximal 931 Pixeln beim Beginn des Pressvorgangs und minimal 525 Pixeln nach Erreichen der Solldicke über die Mattendicke für die Messdaten um den Faktor 13 bis 23

dichter ist als für die Simulationsdaten mit konstant 40 Stützpunkten über die Mattendicke. Die Anzahl der Stützstellen ist durch die Stabilität des Programms und die notwendige Rechenzeit begrenzt. Besonders fällt der Bereich unterhalb der Oberfläche in den ersten Sekunden nach Erreichen der Solldistanz auf, in dem es zu einer deutlich sichtbaren Zunahme des Deckschichtmaximums sowohl in den Messdaten (vgl. Abb. 5.4) als auch in den Simulationsdaten kommt (vgl. Abb. 5.3). Die Annahme in Abschnitt 4.2.2, dass diese Dichtezunahme im Wesentlichen durch Verschiebung von Partikelmasse in die hydrothermisch plastifizierten, äußeren Schichten der Partikelmatte durch die Rückdehnung von inneren Schichten erfolgt, in denen noch nicht relaxierte Spannungen gespeichert sind, wird dadurch bekräftigt, da das gleiche Phänomen auch in der Simulation der Rohdichteprofilentstehung zu erkennen ist (vgl.Wang und Winistorfer 2000b).

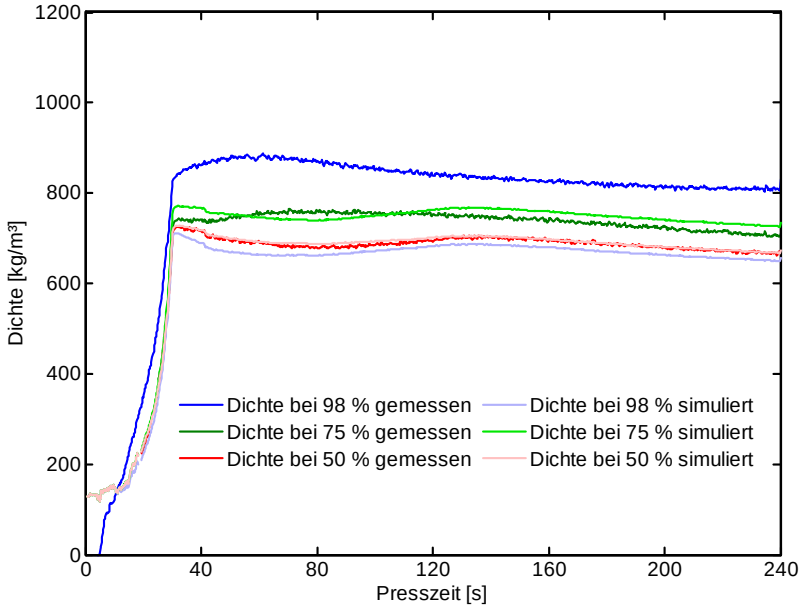


Abb. 5.5: Dichteentwicklung in den Schichten 98 %, 75 % und 50 %. Die Messdaten und die simulierten Daten für die Probe 1.1 sind über der Presszeit aufgetragen. Es wird die Hälfte des Rohdichteprofils betrachtet, die vor dem beweglichen Presskolben liegt

In Abb. 5.5 ist die Dichteentwicklung in verschiedenen Schichten der Matte anhand der gemessenen und simulierten Daten wiedergegeben. Dabei wurde die Hälfte des Dichteprofils betrachtet, das vor dem beweglichen Presskolben liegt. Während der Verdichtungsphase steigen die gemessenen und die durch Simulation berechneten Dichten in den verschiedenen Schichten gleichmäßig an. Eine Ausnahme bildet die gemessene Dichte bei 98 % der Mattendicke. Diese steigt etwas früher an und weist mit 968 kg m^{-3} die höchste Dichte nach Ende der Verdichtungsphase auf. Während der anschließenden Haltephase kann der Verlauf der

gemessenen Dichte und der simulierten Dichte nur schwer miteinander verglichen werden, da die simulierten Daten der 98 %-Schicht in einem Bereich des Rohdichteprofils liegen, der sich deutlich unterschiedlich zu den Messdaten ausprägt. Das ist sehr gut in den nächsten Abbildungen 5.7 bis 5.12 zu erkennen.

Die deutliche Dichtezunahme in der 25 %-Schicht im Bereich von t = 40 bis t = 70 s ist in den simulierten Dichtedaten nicht wiederzufinden. Im Gegenteil, diese zeigen in diesem Bereich eine Abnahme der Dichte. Dieses Verhalten ist auf die Anwendung eines konstanten Feuchtewertes auf das gesamte Rohdichteprofil statt eines Feuchteprofils über den Plattenquerschnitt in einem Zeitschritt zurückzuführen. Damit wird in den simulierten Daten der 25 %-Schicht auch die Dichteentwicklung in der 50 %-Schicht wiedergegeben. Auffallend ist jedoch die gleichmäßige Dichteabnahme der Messdaten und der simulierten Daten in dieser Schicht ab einem Zeitpunkt von t = 140 s.

Die Rohdichte in der 50 %-Schicht muss durch den angewendeten Algorithmus zur Feuchtekorrektur und durch den für jeden Zeitschritt angewendeten Feuchtekorrekturfaktor immer einen parallelen Verlauf der Messdaten und der Simulationsdaten zueinander mit nur einem geringen Abstand haben.

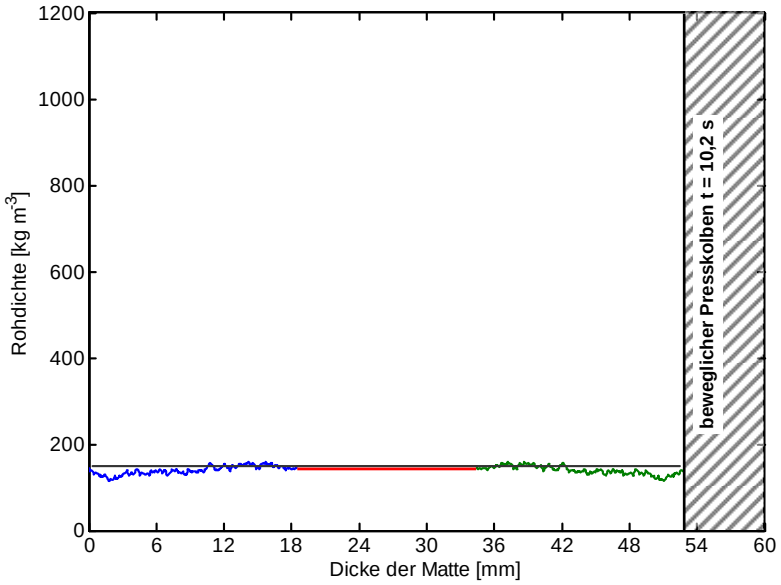


Abb. 5.6: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =10,2 s; blaue Linie: Messdaten, grüne Linie: gespiegelte Messdaten vor dem beweglichen Presskolben, rote Linien: Rohdichteprofil vervollständigt nach Annahme, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Zu Beginn der Verdichtung (siehe Abb. 5.6) zeigt sich die gleichmäßige Vorverdichtung in der Hülse in den gemessenen Dichtedaten der Fasermatte und den mit VHP simulierten Dichtewerten. Die Abweichungen der gemessenen von der simulierten Dichte sind mit

+21,1 kg m^{-3} und -24,2 kg m^{-3} akzeptabel und lassen sich auf leichte Inhomogenitäten in der Streuung und der manuellen Vorverdichtung der Fasermatte zurückführen.

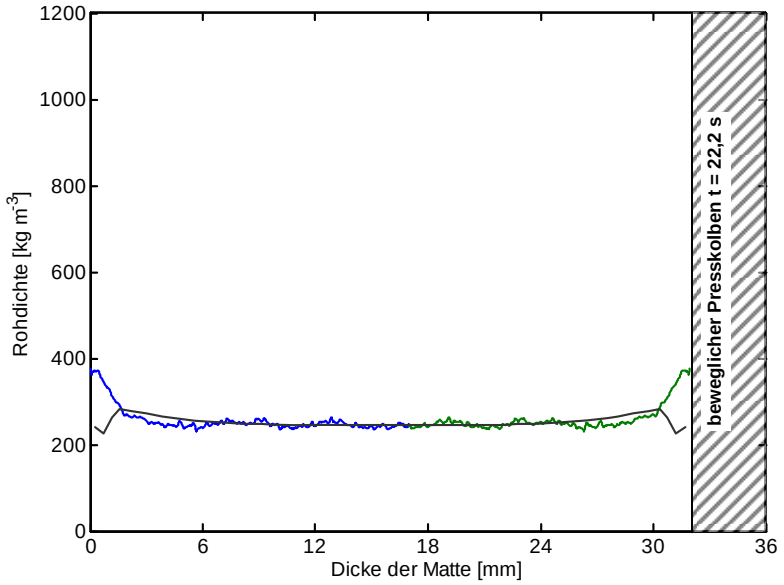


Abb. 5.7: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =22,2 s; blaue Linien: Messdaten, grüne Linien: gespiegelte Messdaten vor dem beweglichen Presskolben, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Nach weiteren 12 s zum Zeitpunkt t = 22,2 s haben sich im gemessenen Rohdichteprofil deutlich Deckschichten mit einem Maximalwert von 435 kg m^{-3} herausgebildet. In den Simulationsdaten beträgt das Maximum in der Deckschicht 333 kg m^{-3}. Das Maximum liegt in der vierten Schicht. Diese Schicht entspricht einer Distanz vom Presskolben zu diesem Zeitpunkt von 1,35 mm. Direkt unterhalb der Oberfläche bildet sich ein Minimum in der zweiten Schicht der Simulationsdaten aus, das auf die Austrocknung dieser Schichten vor dem Beginn der Verdichtung und die damit einhergehende Versteifung der Partikel zurückzuführen ist. Die Mittelschichtdichte beträgt zu diesem Zeitpunkt durchschnittlich 280 kg m^{-3} für die Messdaten, in der Simulation wird die Mittelschichtdichte mit 286 kg m^{-3} berechnet unter Berücksichtigung des Feuchtekorrekturfaktors von 12,1 %. Auffallend ist, dass der homogene Bereich der Mittelschicht in den Messdaten und den simulierten Daten des Rohdichteprofils qualitativ gesehen den gleichen örtlichen Startpunkt hat. In den Messdaten beginnt der homogene Bereich in etwa bei 3,0 mm Plattendicke, in den Simulationsdaten ist die Dichte ab der neunten Schicht von 40 Schichten homogen. Die neunte Schicht hat eine Distanz von der Mattenoberfläche von ca. 4,7 mm von der Mattenoberfläche. Das lässt darauf schließen, dass die hydrothermische Plastifizierung der Partikelmatte durch die Ausbildung eines Temperatur- und Feuchteprofils in der Matte während des Heißpressvorgangs in den Mess- und

Simulationsdaten vergleichbar ist. Die gemessenen bzw. durch die Simulation berechneten Temperaturen direkt auf der Mattenoberfläche zeigen einen unterschiedlichen Verlauf, ebenso weist die Temperatur in der Schicht bei 25 % Mattendicke durchschnittlich eine Differenz von 20 K auf. Diese Beobachtung konnte für die Temperaturentwicklung in den Schichten 0 %, 25 % und 50 %-Plattendicke in Abb. 5.5 gezeigt werden.

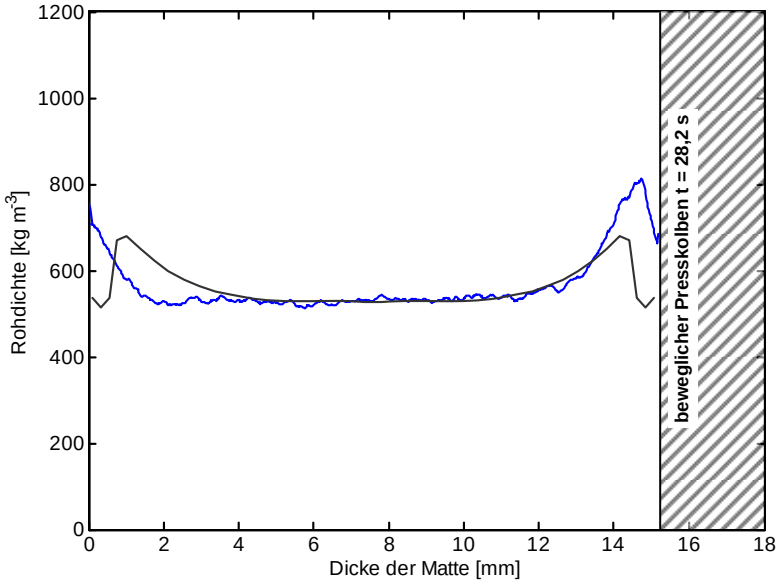


Abb. 5.8: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =28,2 s; blaue Linie: Messdaten, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Zum Zeitpunkt t = 28,2 s, kurz bevor die Solldicke der Partikelmatte erreicht ist, ist in beiden Rohdichteprofilen ein ähnlicher Verlauf erkennbar (siehe Abb. 5.8). Es sind deutliche Deckschichten und eine ausgeprägte Zone im Bereich der Mittelschicht mit homogener Rohdichte zu erkennen. Das Maximum im simulierten Rohdichteprofil hat sich in die fünfte Schicht verschoben und liegt mit 697 kg m^{-3} 0,96 mm unter der Mattenoberfläche vor dem beweglichen Presskolben. Das Minimum in der äußersten Deckschicht hat sich noch weiter ausgeprägt und geht mit geringfügig steigender Dichte in die dritte Schicht über. Die Dichte im homogenen Bereich der Mittelschicht beträgt in dem gemessenen Rohdichteprofil 530 kg m^{-3}, im simulierten Rohdichteprofil zu diesem Zeitpunkt 528 kg m^{-3}. Der Feuchtekorrekturfaktor beträgt für die simulierten Daten 14,2 %.

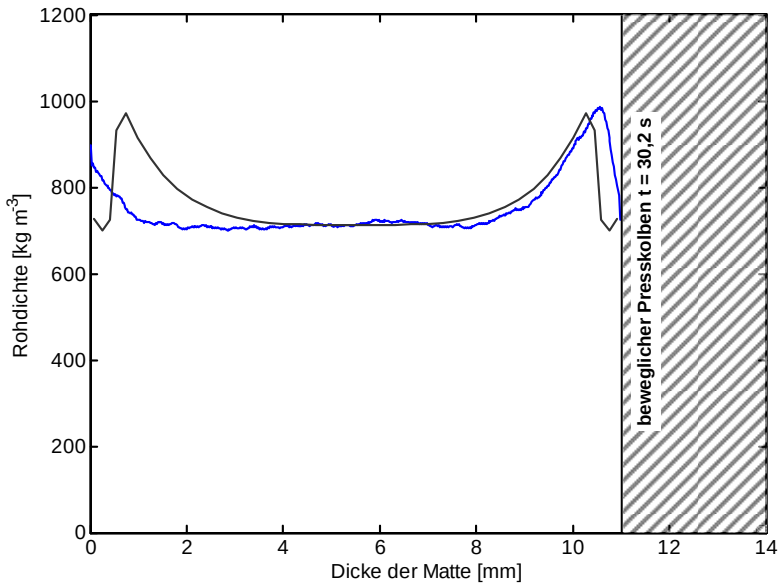


Abb. 5.9: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =30,2 s; blaue Linie: Messdaten, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Nach Erreichen der Solldicke zum Zeitpunkt t = 30,2 s (siehe Abb. 5.9) sind die Formen der Rohdichteprofile weiterhin sehr ähnlich. Besonders auffallend ist die nahezu parallel verlaufende innere und äußere Flanke des Rohdichteprofils am beweglichen Presskolben. Die nicht vorhandene Symmetrie des gemessenen Rohdichteprofils ist auf den ungleichmäßigen Kontakt der beiden Mattenoberflächen mit den beheizten Presskolben zurückzuführen. Das Maximum der Deckschichtdichte des gemessenen Rohdichteprofils beträgt 985 kg m^{-3}, etwa 0,42 mm unterhalb der Oberfläche am beweglichen Presskolben. Die Maximaldichte des simulierten Rohdichteprofils beträgt 968 kg m^{-3} in der fünften Schicht unterhalb der Oberfläche, das entspricht 0,68 mm. Das Minimum unterhalb der Mattenoberfläche ist nicht mehr so stark ausgeprägt: die dritte Schicht zeigt nun schon einen deutlicheren Dichteanstieg als zum Zeitpunkt t = 28,2 s. Der weitgehend homogene Bereich zwischen den Deckschichten im gemessenen Rohdichteprofil weist eine Dichte von 712 kg m^{-3} auf. Die mit dem Korrekturfaktor für die Feuchte multiplizierten Simulationsdaten in diesem Bereich zeigen ebenfalls eine Dichte von 712 kg m^{-3}. Der Korrekturfaktor für die Feuchte beträgt 11 % für die Simulationsdaten.

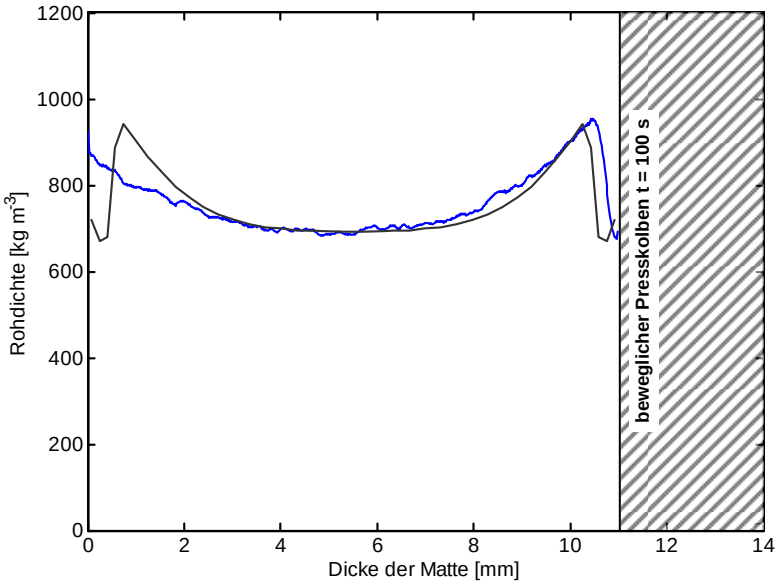


Abb. 5.10: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =100 s; blaue Linien: Messdaten, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Zum Zeitpunkt t = 100 s (siehe Abb. 5.10) ist die flache Mittelschicht beim gemessenen Rohdichteprofil etwas schwächer ausgeprägt als bei dem mittels Simulation berechneten Rohdichteprofil. In der Hälfte des Rohdichteprofils vor dem beweglichen Presskolben liegen die gemessenen Dichtewerte größtenteils über den simulierten Dichtewerten. Das Rohdichtemaximum in der Deckschicht der Messdaten beträgt 955 kg m^{-3} und ist 0,44 mm unterhalb der Mattenoberfläche am beweglichen Presskolben. Das Maximum in der Deckschicht der Simulationsdaten zu diesem Zeitpunkt beläuft sich auf 941 kg m^{-3} in der fünften Schicht von der Plattenoberfläche aus gesehen. Das Minimum in der zweiten und dritten Schicht ist etwas breiter geworden und weist zwischen diesen beiden Schichten eine Dichte von 716 kg m^{-3} in der zweiten Schicht und von 711 kg m^{-3} in der dritten Schicht auf. Die Mittelschichtdichte im Minimum differiert geringfügig bei einen Feuchtekorrekturfaktor von 9,1 %, die Messdaten weisen eine Dichte von 685 kg m^{-3} auf, während die **unkorrigierte** Mittelschichtdichte der Simulation bei 636 kg m^{-3} liegt. Der qualitative Unterschied in der Form der Rohdichteprofile zwischen gemessenen und simulierten Daten ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf Feuchtebewegungen innerhalb der Partikelmatte zurückzuführen, die die Messdaten beeinflussen. Zudem muss die beginnende Aushärtung des Klebstoffes in den äußeren Schichten der Partikelmatte berücksichtigt werden. Die Partikel in diesen Bereichen werden durch die sich ausbildende Holz-Partikel-Klebstoff-Matrix steifer.

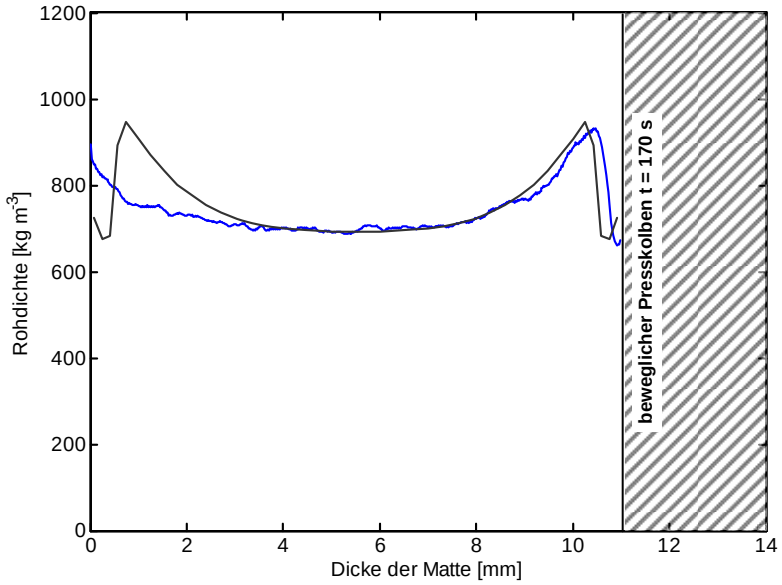


Abb. 5.11: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =170 s; blaue Linien: Messdaten, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Nach weiteren 70 s Presszeit, also bei t = 170 s (siehe Abb. 5.11), ist das gemessene Rohdichteprofil im Bereich der Mittelschicht im Vergleich zum Zeitpunkt t = 100 s deutlich flacher geworden. Das Maximum in der Deckschicht der Messdaten vor dem beweglichen Presskolben weist eine Dichte von 932 kg m^{-3} auf, die sich 0,5 mm unter der Mattenoberfläche befindet. Das Dichtemaximum des simulierten Rohdichteprofils ist in Größe und Position in der fünften Schicht der Simulationsdaten mit 941 kg m^{-3} unverändert geblieben, der Feuchtekorrekturfaktor weist einen Wert von 9,55 % auf. Das Minimum direkt unter der Mattenoberfläche ist mit 693 kg m^{-3} bzw. 703 kg m^{-3} in der zweiten bzw. dritten Schicht ebenso nahezu unverändert geblieben. Auffallend ist der qualitativ sehr ähnliche Verlauf der Dichten in der Mittelschicht, die Mittelschichtdichte beträgt **unkorrigiert** (ohne Feuchteeinfluss) 637 kg m^{-3} bis 647 kg m^{-3} in den mittleren 10 Schichten der Simulation, die gemessene Dichte beträgt in diesem Bereich minimal 687 kg m^{-3} und maximal 756 kg m^{-3} in diesem Bereich. Diese Entwicklung setzt sich bis zum Ende des Pressvorgangs bei t = 240 s (siehe Abb. 5.12) fort. Zu diesem Zeitpunkt weist das Maximum der Dichte in der Partikelmatte vor dem beweglichen Presskolben eine Dichte von 919 kg m^{-3} auf. Die Position des Dichtemaximums hat sich gegenüber dem Zeitpunkt von t = 100 s nicht verändert. Der annähernd gleichförmige Anstieg der Dichte von der Mattenoberfläche zum Maximum in der Deckschicht zwischen den Mess- und Simulationsdaten ist auffallend, ebenso die sehr ähnliche Position des Dichtemaximums in der Deckschicht. In den Messdaten liegt das Maximum bei 0,56 mm vor dem beweglichen Presskolben und in den Simulationsdaten bei 0,75 mm. Das ist bei der Plattendicke von

11 mm eine Abweichung von lediglich 1,7 %, Die Mittelschichtdichte der Messdaten hat sich weiter abgesenkt auf 671 kg m^{-3}, die der **unkorrigierten** Mittelschichtdichte in den Simulationsdaten beträgt 632 kg m^{-3} bei einem Feuchtekorrekturwert von 6,52 %.

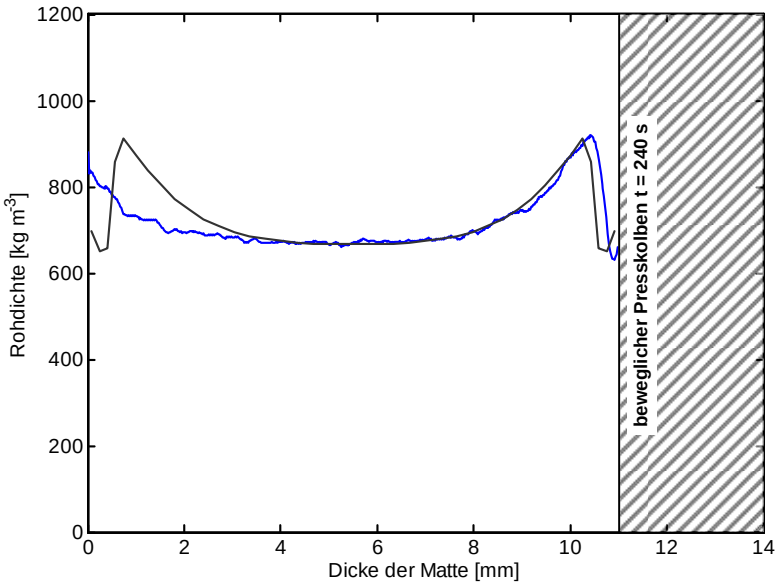


Abb. 5.12: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =240 s; blaue Linien: Messdaten, dunkelgraue Linie: Simulationsdaten aus VHP

Zusammenfassend kann eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Simulation mit den Messdaten für die Entwicklung des Rohdichteprofils festgestellt werden. Die weiter ausgerundete Ausprägung des Rohdichteprofils bei gemessenen Rohdichteprofilen wird auch schon von Thömen (2000) beschrieben. Er vergleicht dabei das Rohdichteprofil einer Faserplatte, die auf einer Laborpresse mit der Größe 4’ · 8’ mit einer von Zieldicke von 39 mm hergestellt wurde, mit einer Simulation des Heißpressvorgangs, die die Eingangsdaten des Pressprogramms der entsprechenden Laborplatte hat. Das ausgerundete Rohdichteprofil der Messdaten konnte durch gezielte Anpassung der „Tuning-Parameter“ sehr gut angepasst werden. Das Temperaturprofil und infolgedessen auch das Feuchteprofil werden durch die Beeinflussung der Matteneigenschaften mit den „Tuning-Parametern“ allerdings nicht so gut wiedergegeben. Das für die Simulation verwendete Pressprogramm mit dem verzögerten Verdichtungsbeginn nach 10,2 s bedingt eine Ausbildung von kleinen Minima direkt unter der Mattenoberfläche. In diesen Bereichen kommt es zu einer Austrocknung des Partikelmaterials ohne gleichzeitige Verdichtung, sodass die Partikel so steif werden, dass sie nicht mehr durch den gegebenen Pressdruck während der anschließenden Verdichtung komprimiert werden können. Zudem kommt zu späteren Zeitpunkten des Verdichtungsvorgangs noch die Aushärtung des Klebstoffes hinzu.

6 Schlussfolgerungen

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode lässt erstmalig die kontinuierliche Beobachtung des Rohdichteprofils über die gesamte Plattendicke während des Heißpressvorgangs zu. Die Dichteveränderungen im Heißpressvorgang während der Verdichtungs- und der Haltephase können durch synchrone Messungen beschrieben werden. Die beiden wesentlichen Aspekte, der methodische Ansatz und die verfahrenstechnischen Konsequenzen aus den Versuchen, werden im folgenden Kapitel kritisch betrachtet.

6.1 Methodische Schlussfolgerungen

Die örtliche Auflösung des verwendeten Itrax Woodscanners ist mit 25 µm pro Pixel, das entspricht 21 µm in der optischen Ebene der Probe, mehr als ausreichend. Durch die verwendete Long-Fine-Focus-Röntgenröhre und die Kapillaroptik, mit der der Röntgenstrahl fokussiert wird, können die limitierenden Faktoren der Auflösung teilweise begrenzt, jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Der fein fokussierte Röntgenstrahl ermöglicht erst den Einsatz der Verdichtungseinheit. Walther (2006) untersucht mit Röntgenstrahlung aus einem Synchrotron die Strukturen von Naturfaserwerkstoffproben, unter anderem auch MDF-Platten mit einer Auflösung von 2 µm. Diese Auflösung ist nach Walther (2006) gerade ausreichend für die Strukturanalyse von makroskopischen anatomischen Strukturen der Naturfasern, hier insbesondere der MDF-Fasern in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Auflösung ist um eine Zehnerpotenz gröber; sie ist als hinreichend zur Analyse der Rohdichteprofilentwicklung zu bewerten.

Wie die wiedergegebenen Versuche (siehe Anhang P) zeigen, ist die entwickelte Verdichtungseinheit geeignet, um die Entwicklung des Dichteprofils während des Heißpressvorgangs mit dem Itrax Dichtescanner aufzuzeichnen. Ab einer Mattendicke von 19 mm bis 20 mm, je nach Einstellung des Dichtescanners, wird der Verdichtungsvorgang lückenlos dargestellt. Durch den eingesetzten Wiener-Filter werden die Messdaten so beruhigt, dass eine gute Analyse der Rohdichteprofile zu jedem Zeitpunkt des Heißpressvorgangs möglich ist. Ebenso ist die zeitliche Auflösung mit einer Messrate von 5 Hz ausreichend genau. Auch während der Verdichtungsphase ist diese zeitliche Auflösung genau genug, um die dynamischen Prozesse der Verdichtung darstellen zu können. In der Haltephase ist die zeitliche Auflösung mehr als ausreichend, um auch die Verschiebungen der Partikelmasse beschreiben zu können. Zur wieteren Auswertung der Messdaten, besonders während der Haltephase, wurden zwei Methoden entwickelt: Die erste ist geeignet, teilweise die Partikelmassen- von der Feuchtebewegung zu

differenzieren und erweitert damit die von Wang und Winistorfer (2000b) präsentierte Modellvorstellung, die zweite Methode beschreibt das Rohdichteprofil durch charakteristische Werte. Beide Methoden berücksichtigen auch die zeitliche Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs.

Die Probengröße von 50 mm im Durchmesser ist im Vergleich zu industriellen Prozessen und auch zu normalen Laborpressen als sehr klein anzusehen. Durch die seitliche Begrenzung des Probenraums mit nur wenigen Öffnungen wird jedoch die Querdehnung der Partikelmatte während des Heißpressvorgangs verhindert. Das ist methodisch notwendig, um die Durchstrahlungslänge der Röntgenstrahlen in der Matte konstant zu halten, da diese als Rechenkonstante in die Auswertung der Dichte eingeht. Zudem werden dadurch wahrscheinlich die Gasdruckverhältnisse in der Partikelmatte an diejenigen während des Heißpressvorgangs in einer großformatigen Laborpresse oder in einer kontinuierlichen Presse angenähert, weil der Dampf nur teilweise entweichen kann, wie dies auch bei großformatigen, industriellen Produktionen in der Partikelmatte der Fall ist. Somit kann bei der beobachteten Rohdichteprofilentwicklung durchaus von realitätsnahen Verhältnissen ausgegangen werden.

Trotz der optischen Verzerrung der Bilder infolge des Penumbra-Effektes durch die hohe Probendicke werden gute qualitativ und quantitativ auswertbare Messwertbilder erzeugt.

Die Kalibrierung des Dichtescanners mit einer Funktion, die sowohl von der Flächenmasse als auch von der Holzfeuchte abhängig ist, scheint geeignet, um quantitativ gute Ergebnisse in den verschiedenen Dichtebereichen während der Verdichtung der Proben darzustellen. Auch ist die Auflösung des Itrax Dichtescanners dazu geeignet, kleinere Dichteunterschiede während der Haltephase nach der Verdichtung der Partikelmatte sichtbar zu machen. Das wird besonders bei der Berechnung der Minima- und Maximalinien für die in Abschnitt 4.2.4 erläuterte Modellvorstellung wie auch bei der Berechnung der charakteristischen Werte deutlich (siehe Abb. 4.33). Zudem lässt sich mit guten qualitativen und quantitativen Ergebnissen das Feuchteprofil am Ende des Heißpressvorgangs darstellen. Die Feuchteveränderungen liegen in einem Bereich von unter 20 % der lokalen atro Rohdichte einer Probe. Das spricht für die Orts- und Dichteauflösung des Dichtescanners.

Der nur minimale Einfluss der Holzfeuchte auf den Massenschwächungskoeffizienten des feuchten Holzes im Bereich von null Prozent Holzfeuchte bis knapp Fasersättigung ist für diesen ersten methodischen Ansatz zur Beobachtung des Verdichtungsverhalten und der Dichteverschiebung in der anschließenden Haltephase sogar als vorteilhaft anzusehen. Weder die Dichteerhöhung während der Verdichtungsphase noch die Dichteverschiebung während der Haltephase werden durch die besonders starke Schwächung eines Stoffes (Holzsubstanz

bzw. Wasser) so überlagert, dass der jeweils andere Prozess dadurch nicht mehr zu beobachten ist. Nachteilig an der Ähnlichkeit der Massenschwächungskoeffizienten für Holzsubstanz und Wasser ist jedoch, dass keine eindeutige Trennung der Feuchte- und der Holzpartikelbewegung während der Verdichtungs- und Haltephase möglich ist. Der Nachweis der Feuchtebewegung bzw. der Siedewelle ist damit nur indirekt unter Zuhilfenahme der Temperaturmessungen in einzelnen Schichten und der erweiterten Modellvorstellung zur Masseverschiebung während der Haltephase im Heißpressvorgang möglich. Eine eindeutige Trennung ist mit den zur Verfügung stehenden Messdaten und Auswertemechanismen allerdings noch nicht zu erreichen, wäre jedoch erstrebenswert.

Der Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Messdaten mit den Simulationsdaten aus der Software VHP, die auf der Arbeit von Thömen (2000) basiert, ist qualitativ und quantitativ erstaunlich gut. Besonders hervorstechend sind die gute Übereinstimmung der Position und der zeitlichen Entwicklung der Dichtemaxima in der Deckschicht sowie der für Platten aus Taktpressen typische Randabfall der Dichte von den Maxima zur Oberfläche hin. Eine recht zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulation ergibt sich auch für den Bereich der Mittelschicht. Die insgesamt gute Übereinstimmung der Messdaten mit der Simulation ist durch Anpassung der Materialeigenschaften der Partikelmatte im Simulationsprogramm erreicht worden. Diese erweiterte Anpassungsoption der Materialeigenschaften ist so in der Simulationssoftware vorgesehen, um die Simulation an die jeweiligen aktuellen Gegebenheiten in der Industrie und Forschung anzupassen.

Die entwickelte Methode durch die Konstruktion und den Bau der Verdichtungseinheit, die im Itrax Dichtescanner betrieben wird, stellt im Vergleich zu dem von DePaula (1992) präsentierten Ansatz eine wesentliche Weiterentwicklung dar, mit der der Verdichtungsvorgang umfassend und lückenlos aufgezeichnet und beschrieben werden kann. Die wesentlichen Verfeinerungen der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Bestimmung des Rohdichteprofils ist die kontinuierliche Messung über die gesamte Mattendicke während eines Heißpressvorgangs und nicht nur an drei Stellen, wie es in der Messeinrichtung von DePaula (1992) möglich ist. Wang et al. (2004) fügen Messwerte von verschiedenen Positionen der Messwertaufnehmer aus der Versuchseinrichtung von DePaula (1992) zusammen, die in aufeinander folgenden Versuchen erstellt worden sind, und stellen dadurch die Rohdichteprofilentwicklung während der Haltephase dar. Diese Vorgehensweise unterstellt, dass die verschiedenen Wiederholungsversuche mit den gleichen Parametern absolut identische Rohdichteprofile ergeben. Diese Voraussetzung ist jedoch nur teilweise erfüllt und dementsprechend kritisch zu hinterfragen.

Die vorgestellte Methode zur Untersuchung der Entwicklung des Rohdichteprofils an MDF-Platten kann somit als gutes Bindeglied zwischen realitätsnaher Messung der Rohdichteprofilausbildung und der Simulation angesehen werden. Durch die sehr hohe Auflösung des Woodscanners sind sehr detaillierte qualitative Aussagen zur Rohdichteprofilentstehung möglich.

Die angewendeten Auswertemethoden scheinen geeignet, um sowohl eine qualitative Aussage über die Form des Rohdichteprofils machen zu können als auch die zeitliche Entwicklung während des Heißpressvorgangs beschreiben zu können.

6.2 Verfahrenstechnische Schlussfolgerungen

Die Rohdichteprofilentwicklung während der Verdichtungs- und der Haltephase des Heißpressvorgangs wird mit der entwickelten Messmethode beschrieben. Während der in der systematischen Untersuchung angewendeten Verdichtungszeiten von 10 s, 20 s und 30 s bildet sich ein ausgeprägtes Temperaturprofil in der Partikelmatte aus. Das führt zur bevorzugten Plastifizierung der äußeren Schichten und damit zur Ausbildung des Rohdichteprofils während der Verdichtungsphase. In einem weiten Bereich in der Mittelschicht der Matte werden die Partikel gleichmäßig verdichtet, weil in der gesamten Mittelschicht die gleiche niedrige Temperatur gegeben ist. Dieser Vorgang ist in der Literatur hinreichend beschrieben. Zu bemerken ist, dass das Temperaturprofil gut mit der Ausbildung des Rohdichteprofils korreliert.

Die in der Mittelschicht gespeicherten Spannungen führen direkt nach Erreichen der Solldicke zu deutlichen Partikelverschiebungen von der Mittelschicht der Partikelmatte in Richtung der Deckschicht. Dieses Phänomen wird reproduzierbar durch die charakteristischen Werte für alle durchgeführten Versuche in den Messdaten beschrieben und zeigt sich auch in den Simulationsdaten. Daraus kann gefolgert werden, dass sich bei den angewendeten Verdichtungszeiten ein Teil des Rohdichteprofils erst nach Erreichen der Solldicke beim Beginn der Haltephase ausbildet, ohne dass Nachverdichtungsschritte angewendet werden. Wang und Winistorfer (2000b) haben dazu eine Modellvorstellung entwickelt (siehe Abb. 2.12), die hier durch die zur Verfügung stehende örtliche Auflösung der Messdaten noch weiter vervollständigt werden konnte (siehe Abb. 4.27).

Unter Berücksichtigung des aktuellen Pressdrucks und der Entwicklung der Festigkeiten der Partikelmatte durch die Klebharzaushärtung nach dem Erreichen der Solldicke kann davon ausgegangen werden, dass durch die Partikelbewegungen während der Haltephase kaum die Ausbildung der Klebharzbrücken beeinflusst wird. Diese Annahme gilt jedoch nur für eine absolut isochore Haltephase. Zwischenverdichtungs- bzw. Entlüftungsschritte, wie sie typisch

für die Herstellung von MDF-Platten sind, können jedoch das sich ausbildende Gefüge der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix während der Haltephase empfindlich stören, wenn zu diesem Zeitpunkt bereits Teile der Mittelschicht plastifiziert sind und dort auch schon die Klebstoffaushärtung begonnen hat (vgl. Abb. 4.22, Abb. 4.26 und Abb. 4.33). Einen weiteren möglichen negativen Einfluss, der in dieser Arbeit jedoch nicht näher überprüft werden konnte, können anlagenbedingte Druck- und daraus resultierende Distanzschwankungen während des Pressvorgangs auf die Entwicklung des Rohdichteprofils und die Ausbildung der Festigkeiten besonders bei sehr dünnen Platten haben (Meyer 2007).

Die charakteristische Form des Rohdichteprofils in den Deckschichten, die für den jeweiligen Einsatzzweck der spezifischen Platte angestrebt wird, ist aus diesen Überlegungen heraus im Wesentlichen während der Verdichtungsphase zu erzeugen. Hier bekommt die Schließgeschwindigkeit der Presse eine besondere Bedeutung. Die kleineren Rohdichteprofilveränderungen besonders zu Beginn der Haltephase sind wahrscheinlich für den späteren Anwendungszweck zu vernachlässigen und haben mutmaßlich kaum Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Das gilt insbesondere für die Rohdichteprofiländerungen in der Deckschicht am Anfang der Haltephase, da der Klebstoff bei den hier durchgeführten Versuchen wahrscheinlich nur einen so geringen Aushärtegrad hatte, dass es kaum zu einer nennenswerten Schädigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in diesem Bereich kam.

Bei Nachverdichtungsschritten kann es jedoch zu einer deutlichen Veränderung der Form des Rohdichteprofils kommen. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Ausbildung des Rohdichteprofils vom Zeitpunkt der Nachverdichtung und vom Erstverdichtungsniveau. Eine Nachverdichtung von mehr als knapp 10 % der Sollmattendicke ist nicht sinnvoll, da sich Nebenminima im Rohdichteprofil ausbilden, die technologisch nicht erstrebenswert sind.

Die verfahrenstechnischen Konsequenzen daraus lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die wesentliche Festlegung des anwendungsbezogenen Rohdichteprofils für die Holzwerkstoffplatte sollte während der Verdichtungsphase im Heißpressvorgang erfolgen.
- Reduzierung der Zwischenverdichtungsschritte und Nachverdichtungsschritte, wenn dies durch anlagenspezifische, industrielle Gegebenheiten sowie die erzeugten mechanischen Kennwerte insbesondere der Querzugfestigkeit möglich ist. Ab knapp 10 % Nachverdichtung, bezogen auf die Solldicke der fertigen Matte, kommt es in

Abhängigkeit vom Nachverdichtungszeitpunkt zur Ausbildung von Nebenminima, die technologisch nicht erwünscht sind.

- Je später nach der Durchwärmung der Mittelschicht eine Distanz- bzw. Druckänderung im Heißpressvorgang erfolgt, umso schädlicher ist diese für das Rohdichteprofil und die Festigkeit der Platte. Erfolgt diese zu früh, zeigt die Distanz- bzw. Druckänderung keine Wirkung aufgrund des noch stark ausgeprägten Temperaturgradienten in der Matte.

7 Ausblick

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden stehen im Spannungsfeld zwischen der Ermittlung der Materialeigenschaften von Holzwerkstoffpartikeln, der Strukturanalyse von Holzwerkstoffmatten und -partikeln und der Simulation der Eigenschaftsausbildung von Holzwerkstoffen während des Heißpressvorgangs. In diesem Kontext sind weiterführende Arbeiten sowohl von eher anwendungsorientierten als auch von primär wissenschaftlichem Interesse anzusiedeln.

Methodisch ist die weitere Verfolgung des Ansatzes zur getrennten Betrachtung der Bewegung von Partikelmasse und Feuchtigkeit interessant. Weitere Untersuchungen zu den angewendeten Kalibrierfunktionen sowie die weitere Einbeziehung der Temperatur können hier möglicherweise einen tieferen Aufschluss über das hydrothermische Verhalten der Partikel in einzelnen Schichten ergeben. Ein denkbarer Ansatz dazu ist, die Feuchtebewegung in bereits fertigen Platten mit unterschiedlichen Rohdichteprofilen (mit deutlichen DS-Spitzen oder homogen) zu verfolgen. Dazu kann entweder eine auf eine bekannte Feuchte klimatisierte oder eine darrtrockene Probe erneut ohne Druck, aber mit der gewünschten Presstemperatur in der Verdichtungseinheit im Itrax Dichtescanner beobachtetet werden. Bei diesem methodischen Ansatz wird zwar die Entwicklung des Rohdichteprofils als solches während des Heißpressvorganges außer Acht gelassen, dafür aber die Feuchtebewegung in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Ferner könnte versucht werden, das Wasser mit einer geeigneten Substanz zu markieren, die einen hohen Massenschwächungskoeffizienten aufweist und in der Lage ist, die Feuchtebewegung in Partikelmatte mitzumachen und sich nicht an die Holzsubstanz chemisch oder physikalisch zu binden. Es besteht ebenso die Gefahr, dass die Substanz aufgrund eines räumlich sehr großen Moleküls bzw. Ions bei der Feuchtebewegung während des Heißpressvorgangs nicht mit transportiert wird. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Neutronenstrahlung (Lehmann et al. 2001; Niemz et al. 2002; Niemz et al. 2004; Mannes et al. 2006).

Für die weiteren Untersuchungen ist es sinnvoll, die limitierenden Effekte der Auflösung des Dichtescanners weiter zu untersuchen und gegebenenfalls Korrekturfunktionen über die Plattendicke einzuführen.

Weitere Versuche mit praxisrelevanter Bedeutung sind als typische Reihenuntersuchungen mit der Variation einzelner Press- und Partikelmattenparameter neben den schon untersuchten Einflussgrößen zu planen. Wesentliche Einflussgrößen, die zu untersuchen wären, sind:

- im Pressprogramm:
  - Zielrohdichte der fertigen Platte
  - Plattendicke
  - Zwischenverdichtungsschritte
  - anlagenbedingte Druckentlastungen während der Haltephase
  - Presstemperatur
- in der Partikelmatte:
  - Partikelgestalt (Fasern, Späne, Strands)
  - Partikelfeuchte und Feuchteverteilung
  - oberflächliche Befeuchtung (Besprühung) der Partikelmatte
  - Beleimungsgrad und Klebstoffart

Für die Plattendicke dünner Platten sind 4 mm anzustreben: das entspricht einer vorverdichteten Matte von ca. 20 mm Dicke. So kann die Entwicklung beider Deckschichten synchron verfolgt werden.

Von besonderem Interesse sind die Auswirkungen von Entlüftungs- und Nachverdichtungsschritten während des Heißpressvorgangs auf die Ausbildung des Rohdichteprofils. Besonders sind hier die Schichten zu beobachten, in denen es bei Nachverdichtungsschritten zu deutlichen Dichteveränderungen kommt. Die dabei beobachteten Dichteveränderungen könnten für die umfassendere Beschreibung der Materialeigenschaften – möglicherweise besonders der Klebharzaushärtung – dienen.

Die Untersuchung von Spänematten (Deckschicht- und Mittelschichtspäne) ist bei der gegebenen Baugröße der Verdichtungseinheit durchaus möglich: so kann die Methode auch ohne weitere Modifizierungen für Späne verwendet werden. Strands hingegen sind für die Verdichtungseinheit deutlich zu groß. Zu überprüfen ist in diesem Zusammenhang, ob eine aus einer großen Strandmatte ausgestanzte Probe von 50 mm Durchmesser in der beschriebenen Verdichtungseinheit repräsentative Ergebnisse bringt oder ob eine Probe mit einem größeren Durchmesser notwendig ist, wie sie Hanvongjirawat (2003) in seiner zweiten Versuchseinrichtung realisiert hat. In diesem Fall ist eine komplette Neuentwicklung einer Verdichtungseinheit mit einer auf die Probengröße angepassten Röntgenstrahlungsquelle nötig. Dabei sind die limitierenden Effekte der Auflösung besonders zu beachten.

Unberücksichtigt sind in den bisherigen Versuchen die mechanischen Eigenschaften der fertigen Platten geblieben. Hier sind die Querzugfestigkeit und die Dickequellung und deren Korrelation zu den dynamischen Vorgängen während des Heißpressvorgangs zu untersuchen. Der Einsatz der charakteristischen Werte kann bei der Auswertung der mechanischen Eigenschaften sehr hilfreich sein (Wong et al. 1998).

Von großem wissenschaftlichen Interesse ist der direkte Vergleich der Messdaten mit den Simulationsdaten aus dem bestehenden Programm VHP. Die konsequente Verknüpfung und der Vergleich von Mess- und Simulationsdaten ermöglichen die Anpassung von Materialeigenschaften der verwendeten Partikel in der Simulation sowie der Anpassungsparameter auf spezielle Gegebenheiten in der industriellen Produktion bzw. bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten für Forschungszwecke.

Die kontinuierliche Ermittlung von elastomechanischen und rheologischen Materialeigenschaften an **einer** Probe für unterschiedliche Temperatur-, Feuchte- und Druckbedingungen erscheint möglich. Die Vergleichbarkeit der Werte ist dadurch wesentlich besser als wenn die Werte in verschiedenen Versuchen an unterschiedlichen Proben ermittelt werden. Des Weiteren werden die Materialparameter in einem realen Herstellungsprozess für Holzwerkstoffe erstellt und nicht in einem auf den Einzelparameter idealisierten Versuch. Als wesentlich kann die Berücksichtigung der Beleimung der Partikel und deren dynamisches Verhalten in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix angesehen werden.

Die hohe Auflösung des Itrax Woodscanners bietet auch die Chance, elastomechanische und rheologische Modellvorstellungen zur Holzpartikel-Klebstoff-Matrix unter der Nutzung der Strukturanalyse zu entwickeln und zu verbessern. Die Methoden zur Strukturanalyse, die von Walther (2006) präsentiert wurden, und die Modellvorstellungen von Zhou (2008) zur Verdichtung der Holzpartikel-(Klebstoff)-Matrix können die Simulation zum Heißpressvorgang weiter präzisieren. Walther (2006) deutet sogar die Möglichkeit von Strukturuntersuchungen mittels Mikrotomographie bei dynamischen Prozessen an. Die mikrotomographische Untersuchung des Heißpressvorgangs unter besonderer Berücksichtigung der strukturellen Veränderungen in der Verdichtungs- und der Haltephase wäre für Holzfaserwerkstoffe dabei von sehr hohem Interesse. Die dynamische Entwicklung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix könnte damit näher untersucht werden und weitere Erkenntnisse für Simulationsmodelle liefern, die die Interaktion der Holzpartikel während des Heißpressvorgangs näher beschreiben. Einen möglichen Ansatz bieten hier die Nachverdichtungsschritte. In einem weiteren Schritt sind die Einbeziehung des Klebstoffeinflusses sowie die Interaktion von Klebstoff und Holzpartikel an deren Grenzfläche zu berücksichtigen.

Ein wichtiger Aspekt beim Vergleich der präsentierten Messdaten und der Simulationsdaten ist die Berücksichtigung des Klebstoffes in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Hier bietet die Messmethode auf der Basis der Arbeiten von Heinemann (2004) für die Klebstoffaushärtung und von Meyer (2007) für die Auswirkung von Nachverdichtungsschritten Ansätze, um das gesamte Verhalten der beleimten Partikel zu beschreiben.

Die angeführten Überlegungen gelten in erster Linie für Fasern, da die Strukturanalyse die Mechanismen auf der Partikelebene beschreibt. Die von Walther (2006) entwickelte Methode arbeitet um eine Zehnerpotenz feiner in der örtlichen Auflösung als die Faserstrukturen von der Größenordnung her sind. Die eigene unter Verwendung des Itrax Woodscanners entwickelte Methode liegt mit der Ortsauflösung im Bereich der Größenordnung von Faserstrukturen. Durch die lange Durchstrahlungsstrecke kommt es allerdings zu einer integrativen Beschreibung des Verhaltens einer Schicht.

Aus einer tiefer gehenden Strukturanalyse der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bis auf die Ebene von Einzelpartikeln und dazugehörige Klebstoffbrücken sowie des Vorgangs der Klebstoffaushärtung sind weitere Parameter für die Simulationsmodelle, insbesondere für VHP zu erwarten. Ebenso ist es denkbar, die Auflösung der Simulationsrechnungen mit der immer wieter steigenden Rechenleistung der Computer zu erhöhen. Eine Annäherung der Auflösungen von Simulation und Messwerten ist dadurch möglicherweise gegeben. Damit könnte eine noch bessere Anpassung der Simulationsparameter erreicht werden.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erstmalig die Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs über die gesamte Plattendicke mitverfolgt.

Dazu wurde eine spezielle Verdichtungseinheit entwickelt, die an einen Röntgenscanner, den Itrax Woodscanner, angepasst und in diesen eingebaut ist. Die Probenkörper in der Verdichtungseinheit haben einen Durchmesser von 50 mm. Der Heißpressvorgang in der Verdichtungseinheit läuft in einer Presshülse ab, die Öffnungen für den Röntgenstrahl und weitere Sensorik, wie z. B. Thermoelemente, enthält. Die seitliche Begrenzung der Probe durch die Hülse ist von ausschlaggebender methodischer Bedeutung, da der Durchmesser als Konstante in die Berechnung der Dichte einfließt. Die Proben werden auf einer Ebene durch die Mittelachse der Probe durchstrahlt. Die örtliche Auflösung des Itrax Woodscanners beträgt 25 µm, sodass die Probenkörper in dieser Schichtdicke gemessen werden können. Die Dichte und deren Veränderung während des Heißpressvorgangs werden als 16-Bit-Grauwerte in einer tiff-Datei in der Steuerung des Itrax Woodscanners abgelegt. Die Auflösung der tiff-Dateien entspricht in x-Richtung der örtlichen Auflösung und in t-Richtung der zeitlichen Auflösung. Die Datenerfassungsrate beträgt in den Versuchen 5 Hz. Mit einer flächenmassen- und feuchteabhängigen Kalibrierung werden die Dichtewerte ermittelt. Die Kalibrierfunktion wurde für zwei verschiedene Kombinationen von Beschleunigungsspannung und Anodenstrom ermittelt. Die Korrektur der Massenschwächungskoeffizienten mit der Flächenmasse ist infolge der Verwendung einer polychromatischen Röntgenstrahlung notwendig. Die Feuchte zeigt in den Kalibrierfunktionen einen deutlich geringeren Einfluss auf den Massenschwächungskoeffizienten als die Flächenmasse.

Zusätzlich werden die Presskolbendistanz und der Pressdruck sowie optional Temperaturwerte in verschiedenen Schichten der Partikelmatte im kombinierten Steuerungs- und Messdatenerfassungssystem für die Verdichtungseinheit gespeichert. Über die Steuerung für die Verdichtungseinheit wird der Messvorgang im Itrax Dichtescanner durch ein Triggersignal gestartet, damit wird die Synchronisation der beiden Datendateien sichergestellt.

In Verdichtungsversuchen mit einer Verdichtungszeit von 10 s, 20 s und 30 s und einer Gesamtdauer des Heißpressvorgangs von 240 s wird die Entwicklung des Rohdichteprofils aufgezeichnet. Zusätzlich wurde bei einigen Versuchen ein Nachverdichtungsschritt von 110 % bzw. 120 % auf Solldicke von 100 % nach 120 s, 140 s und 160 s in das Pressprogramm eingebaut. Es ergeben sich somit 21 Versuchsvariationen, die jeweils doppelt ausgeführt wurden. Während der Verdichtungsphase bildet sich deutlich das charakteristische Rohdichteprofil aus mit den Dichtemaxima in den Deckschichten und einer weitgehend homogenen Mittelschicht.

Es bestätigen sich hier die empirischen Erfahrungen über das Zusammenspiel aus der Entwicklung des Rohdichteprofils und dem sich ausbildenden Temperaturprofil, das mit drei Thermoelementen in der Matte bestimmt wurde.

In der anschließenden Haltephase ist auffallend, dass es unmittelbar nach dem Erreichen der Solldistanz noch zu größeren Dichteänderungen in den oberflächennahen Schichten kommt. Diese sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf Partikelmassenbewegungen zurückzuführen. Im Verlauf der weiteren Haltephase kommt es, besonders in einem Bereich von 100 s nach Beginn des Heißpressvorgangs, zu deutlichen Dichteänderungen zwischen Deck- und Mittelschicht, die mutmaßlich zum großen Teil auf eine Feuchtebewegung durch den konvektiven Feuchtetransport in der Partikelmatte zurückzuführen sind. Auffallend sind die qualitativ sehr ähnlichen Formen der Rohdichteprofile direkt nach dem Erreichen der Solldistanz in der Haltephase und unmittelbar vor Ende des Heißpressvorgangs bei Versuchen ohne Nachverdichtungsschritt. Sie differieren in den Mittelschichtdichten und einem insgesamt niedrigeren Niveau des Rohdichteprofils unmittelbar vor Ende des Heißpressvorgangs: Dies ist auf eine Austrocknung der Probe aufgrund der insgesamt sehr hohen Mattenfeuchten von 16 % bei den orientierenden Versuchen zurückzuführen. Diese Beobachtungen werden auch bei den systematischen Versuchen bestätigt, die mit einer Zielfeuchte von 8 % durchgeführt worden sind. Aus den geringen Rohdichteprofiländerungen zwischen dem Ende des Heißpressvorgangs und dem Rohdichteprofil der bei Normklima konditionierten Probe ist das Feuchteprofil mit guten Ergebnissen ableitbar.

Der Vergleich zwischen Messdaten und Simulationsdaten aus dem Softwarepaket VHP (*Virtual Hot Press*) zeigt eine zufriedenstellende qualitative Übereinstimmung der Messdaten mit den Simulationsdaten für die Ausbildung des Rohdichteprofils sowohl während der Verdichtungs- als auch in der Haltephase. Lediglich die Temperaturverläufe vor dem Beginn des eigentlichen Verdichtungsvorgangs sind mit der VHP-Simulation schwer zu erfassen. Die möglichen Einstellparameter in dem Softwarepaket ermöglichen eine sehr gute Anpassung des Pressdrucks und der Temperaturverläufe in der Probe während des Heißpressvorgangs.

Die vorgestellte Messmethode und die angewendeten Auswertemethoden bieten die Möglichkeit, mit weiteren systematischen Untersuchungen die Entwicklung des Rohdichteprofils während des Heißpressvorgangs intensiver zu untersuchen und so einen Beitrag zur weiteren Entwicklung der Verfahrenstechnik für die Herstellung von Holzwerkstoffen zu leisten. Die Messdaten aus den Versuchen können auch zur Verbesserung der Werte für die Materialeigenschaften, die in der Simulation verwendet werden, genutzt werden. Eine enge Verknüpfung der Messung des Rohdichteprofils und der Simulation ist daher eine sinnvolle und notwendige Methode für das tiefer gehende Verständnis des Heißpressvorgangs.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Übersicht physikalischer Vorgänge während des Heißpressvorgangs und deren Interaktionen 5
Abb. 2.2: Spezifischer Wärmestrom zur Temperaturerhöhung im Zentrum einer Laborfaserplatte 7
Abb. 2.3: Modellvorstellung der Siedewelle nach Gefahrt (1977) und v. Haas (1998), modifiziert 9
Abb. 2.4: Feuchtigkeitsprofile in einer 25-mm-Spanplatte 10
Abb. 2.5: Von Humphrey erweitertes 4-Elemente-Burger-Modell (*5-Elemente-Humphrey-Burger-Modell*) zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Holzwerkstoffpartikelmatten 12
Abb. 2.6: Rheologisches Verhalten von Partikeln in einer Holzwerkstoffpartikelmatte 12
Abb. 2.7: Horizontale Permeabilitätswerte von Fasermatten in Abhängigkeit der Rohdichte 19
Abb. 2.8: Vertikale Permeabilitätswerte von Fasermatten in Abhängigkeit der Rohdichte 19
Abb. 2.9: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität verschiedener Partikelmaterialien in Abhängigkeit der Rohdichte 20
Abb. 2.10: Querzugfestigkeitskoeffizienten für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit von Presszeit und Presstemperatur 22
Abb. 2.11: Idealisiertes Rohdichteprofil für eine MDF-Platte 24
Abb. 2.12: Prinzipielle Entstehung des Rohdichteprofils nach der Modellvorstellung von Wang und Winistorfer 26
Abb. 2.13: Definitionen von quantitativen Kenngrößen an einem Rohdichteprofil 31
Abb. 2.14: Simulation der Rohdichteprofilentstehung in einer 28 m langen kontinuierlichen Presse 35
Abb. 2.15: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums unter besonderer Berücksichtigung der ionisierenden Strahlung 36
Abb. 2.16: Prinzipieller Aufbau einer Röntgenröhre, modifiziert nach Poppe et al. (2001) 37
Abb. 2.17: Prinzipbild der Intensitätsverteilung eines Spektrums aus einer Röntgenröhre 38
Abb. 2.18: Schwächungseffekte der elektromagnetischen Strahlung 39
Abb. 2.19: Aufbauprinzip des Stenographen 49
Abb. 2.20: Prinzipskizze der in-situ-Messeinrichtung von DePaula (1992) 50

Abb. 2.21: Pressendiagramm für eine MDF-Platte mit einem Nachverdichtungsschritt..... 52
Abb. 2.22: Rohdichteprofilentwicklung an einer OSB-Platte während der Verdichtung..... 52
Abb. 2.23: Rohdichteprofilentwicklung an einer OSB-Platte während der Haltephase..... 53
Abb. 3.1: Itrax Woodscanner 59
Abb. 3.2: Prinzipskizze zur Entstehung des Penumbra-Effektes in der Punktdarstellung von radiographischen Bildern 61
Abb. 3.3: Prinzipskizze der Verzerrung der Abbildung einer in Richtung des Röntgenstrahls ausgedehnten Probe 61
Abb. 3.4: Prinzipskizze zur Berechnung der effektiven Pixelgröße in der optischen Ebene der Probe. 62
Abb. 3.5: Prinzipskizze des Probenraumes des Itrax Woodscanners und der Ausrichtung der Zeilenkamera 64
Abb. 3.6: Prinzipskizze der Presshülse 66
Abb. 3.7: Prinzipskizze zur Anordnung der Presshülse auf dem Röntgenstrahl 67
Abb. 3.8: Gesamtübersicht über die Konstruktion der Verdichtungseinheit. 68
Abb. 3.9.: Prinzipieller Zuschnittplan für die Probenkörper zur Kalibrierung des Dichtescanners. 74
Abb. 3.10: Kalibrierproben für eine Messung im Probenhalter des Itrax Woodscanner eingebaut. 77
Abb. 3.11: Messdatenbild der Proben 29 bis 35 80
Abb. 3.12: Grundprogramm für einen Versuchsablauf mit parallelen Strukturen und getrennter Datenerfassung zwischen Itrax und MTS-Steuerung. 84
Abb. 3.13: Übersicht zur örtlichen und zeitlichen Anordnung der Pixel in einem Messdatenbild eines Verdichtungsvorgangs. 86
Abb. 3.14: Darstellung der Rohdaten eines Messdatenbildes..... 89
Abb. 3.15: Histogramm der Grauwertverteilung für eine Probe..... 91
Abb. 4.1: Verteilung der Feuchtewerte der Kalibrierproben 94
Abb. 4.2: Übersicht der für die weiteren Auswertungen berücksichtigten Werte (○) bzw. nicht berücksichtigten Ausreißerwerte (◊) für das Energieniveau 55 kV, 40 mA für die im Klima ϑ = 20 °C und φ = 85 % konditionierten Proben..... 95
Abb. 4.3: Messwerte für den Massenschwächungskoeffizienten für ein Energieniveau von 55 kV und 40 mA..... 96
Abb. 4.4: Wie Abb. 4.3, aber mit zusätzlich eingefügter Ebene..... 96

Abb. 4.5: Prozentuale Abweichungen zwischen gravimetrisch ermittelter Rohdichte und der aus der angeglichenen Funktion ermittelten Rohdichte für das Energieniveau 55kV und 40mA 97
Abb. 4.6: Übersicht der für die weiteren Auswertungen berücksichtigten Werte (○) bzw. nicht berücksichtigten Ausreißerwerte (◊) für das Energieniveau 50 kV, 40 mA für die im Klima ϑ = 20 °C und φ = 65 % konditionierten Proben. 98
Abb. 4.7: Messwerte für den Massenschwächungskoeffizienten für ein Energieniveau von 50 kV und 40 mA 99
Abb. 4.8: Wie Abb. 4.7, aber mit zusätzlich eingefügter Ebene 100
Abb. 4.9: Prozentuale Abweichungen zwischen gravimetrisch ermittelter Rohdichte und aus der angeglichenen Funktion ermittelten Rohdichte für das Energieniveau 50kV und 40mA 100
Abb. 4.10: Übersicht über die Wasserfalldiagramme der Proben 104
Abb. 4.11: Darstellung der Ausbildung des Rohdichteprofils an der Probe 1.1 107
Abb. 4.12: Pressdiagramm für Probe 1.1 108
Abb. 4.13: Mittlere Rohdichte der Probe 1.1 109
Abb. 4.14: Pressdiagramm der Probe 1.1 110
Abb. 4.15: Dichteentwicklung in den Schichten 2 %, 25 % und 50 % über der Presszeit für Probe 1.1 111
Abb. 4.16: Rohdichteprofile während der Verdichtungsphase 116
Abb. 4.17: Rohdichteprofil zu dem als Beginn der Verdichtung definierten Zeitpunkt bei t = 10,2 s. 120
Abb. 4.18: Rohdichteprofil bei t = 22,2 s. 120
Abb. 4.19: Rohdichteprofil bei t = 30,2 s. 121
Abb. 4.20: Rohdichteprofile während der Haltephase zu den Zeitpunkten 124
Abb. 4.21: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 30,2 s mit Temperaturmarkern 124
Abb. 4.22: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 100 s mit Temperaturmarkern 125
Abb. 4.23: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t = 170 s mit Temperaturmarkern 127
Abb. 4.24: Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Ende der Presszeit beim Zeitpunkt t = 240 s mit Temperaturmarkern 127
Abb. 4.25: Vergleich der Rohdichteprofile zu den Zeitpunkten t = 30,2 129

Abb. 4.26: Verlauf der minimalen und maximalen Rohdichtewerte der Schichten im Rohdichteprofil während der Haltephase 132
Abb. 4.27: Schematisierte Maxima- und Minimaverläufe aller Schichten im Rohdichteprofil während der Haltephase 134
Abb. 4.28: Pressdiagramme für die systematischen Versuche. 145
Abb. 4.29: Benennung der Proben für die systematischen Untersuchungen der Rohdichteprofilentwicklung 146
Abb. 4.30: Definition von charakteristischen Werten zur geometrischen und quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils ohne Zwischenminima 148
Abb. 4.31: Definition von charakteristischen Werten zur geometrischen und quantitativen Beschreibung des Rohdichteprofils mit Zwischenminima 149
Abb. 4.32: Definition des Mittelschichtschrittes 150
Abb. 4.33: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil während des Heißpressvorgangs dreidimensional dargestellt 151
Abb. 4.34: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte im Rohdichteprofil während des Heißpressvorgangs zweidimensional dargestellt 153
Abb. 4.35: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 100 % Solldicke 164
Abb. 4.36: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 110 % Solldicke 167
Abb. 4.37: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtung auf 120 % Solldicke 170
Abb. 4.38: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 10 s 175
Abb. 4.39: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 20 s 177
Abb. 4.40: Zeitliche Entwicklung des Rohdichte- und Temperaturprofils bei der Verdichtungszeit von 30 s 179
Abb. 4.41: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 100 %. 182
Abb. 4.42: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 110 %. 183
Abb. 4.43: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für ein Erstverdichtungsniveau von 120 %. 185

Abb. 4.44: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 10 s. 187
Abb. 4.45: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 20 s. 188
Abb. 4.46: Zeitliche Entwicklung der charakteristischen Werte für eine Verdichtungszeit von 30 s. 189
Abb. 4.47: Pressdrücke zum Zeitpunkt der maximalen Ausprägung der charakteristischen Werte 191
Abb. 4.48: Die Verdichtung von Fasermaterial bei zwei unterschiedlichen Feuchte- und Temperaturbedingungen 193
Abb. 4.49: Pressdruck zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes 197
Abb. 4.50: Mattendicke zum Zeitpunkt des Mittelschichtschrittes 198
Abb. 4.51: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit von der Verdichtungszeit. 205
Abb. 4.52: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit vom Erstverdichtungsniveau. 208
Abb. 4.53: Charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs in Abhängigkeit vom Nachverdichtungszeitpunkt. 211
Abb. 5.1: Temperaturverlauf der Messdaten und der Simulationsdaten 222
Abb. 5.2: Gemessener Pressdruck und simulierter Pressdruck 223
Abb. 5.3: Simulierte Rohdichteprofilentwicklung der Probe 1.1 224
Abb. 5.4: Gemessene Rohdichteprofilentwicklung der Probe 1.1 224
Abb. 5.5: Dichteentwicklung in den Schichten 98 %, 75 % und 50 % 225
Abb. 5.6: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =10,2 s 226
Abb. 5.7: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =22,2 s 227
Abb. 5.8: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =28,2 s 228
Abb. 5.9: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =30,2 s 229
Abb. 5.10: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =100 s 230

Abb. 5.11: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =170 s 231
Abb. 5.12: Gemessenes und simuliertes Rohdichteprofil der Probe 1.1 zum Zeitpunkt t =240 s 232

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Errechnete Massenschwächungskoeffizienten auf Basis der elementaren Zusammensetzung 42
Tabelle 2: Massenschwächungskoeffizienten von verschiedenen Holzarten bei unterschiedlichen Strahlungsenergien 43
Tabelle 3: Errechnete Massenschwächungskoeffizienten auf Basis der elementaren Zusammensetzung für Wasser 44
Tabelle 4: Normierte Rohdichte und Flächenmasse der zur Kalibrierung des Itrax Woodscanners verwendeten Proben 75
Tabelle 5: Klimabedingungen für die Konditionierung der Proben zur Kalibrierung des Itrax Woodscanners 76
Tabelle 6: Verwendete Energieniveaus der Röntgenröhre für die Kalibriermessungen 77
Tabelle 7: Grundeinstellungen des Itrax Woodscanners für alle Kalibriermessungen 78
Tabelle 8: Verteilung der Regions of Interest für die Proben mit 55 kV und 40 mA 79
Tabelle 9: Verteilung der Regions of Interest für die Proben mit 50 kV und 40 mA 79
Tabelle 10: Grundeinstellungen des Röntgenscanners für alle in-situ-Röntgenscans während des Verdichtungsvorgangs 83
Tabelle 11: Feuchteverteilung der Proben für die drei angewendeten Feuchteklimata 93
Tabelle 12: Bei der Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten nicht berücksichtigte Werte für das Energieniveau 55 kV, 40mA 94
Tabelle 13: Bei der Berechnung des Massenschwächungskoeffizienten nicht berücksichtigte Werte für das Energieniveau 50 kV, 40 mA 98
Tabelle 14: Beschreibung ausgewählter Proben der Verdichtungsversuche. 102
Tabelle 15: Charakteristische Werte für eine Probe 155
Tabelle 16: Zusammengefasste charakteristische Werte zu Beginn der ersten Haltephase ... 160
Tabelle 17: Zusammengefasste charakteristische Werte an den zeitlichen Maxima der jeweiligen charakteristischen Werte während der ersten Haltephase 161
Tabelle 18: Zusammengefasste charakteristische Werte am Ende der ersten Haltephase 162
Tabelle 19: Zusammengefasste charakteristische Werte am Ende des Heißpressvorgangs ... 203
Tabelle 20: Eingabedaten für die Simulationsrechnung mit VHP der Probe1.1 219

Normenverzeichnis

ISO 16 979:2003	Holzwerkstoffe – Bestimmung des Feuchtegehaltes
ISO 16 984:2003	Holzwerkstoffe – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
RöV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen, Röntgenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003 (BGBl. I S.604)

Literaturverzeichnis

Alkan, S., Y. Zhang und F. Lam (2005). „Moisture content profiles and wetwood phenomena during drying of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* [Hook] *Nut*) wood using CT images obtained from a newly designed high x-ray energy industrial CT scanner“. 9th International IUFRO Wood Drying Conference - 2005.

Andrews, C. K., P. M. Winistorfer und R. M. Bennet (2001). „The influence of furnish moisture content and press closure rate on the formation of the vertical density profil in oriented strandboard.“ Forest Products Journal 51(5): 32-39.

Anonymus. (2007). „NDT Resource Center.“ Abgerufen am: 15.01.08, von: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/nature.htm.

Baettig, R., R. Remond und P. Perre (2006). „Measuring moisture content profiles in a board during drying: a polychromatic X-ray system interfaced with a vacuum/pressure laboratory kiln.“ Wood Science and Technology 40(4): 261-274.

Bayer, A. (2005). „X-ray attenuation techniques to explore the dynamics of water in porous media“, Universität Heidelberg. Dissertation: 99 Seiten.

Bergsten, U., J. Lindeberg, A. Rindby und R. Evans (2001). „Batch measurement of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensiometry.“ Wood Science and Technology 35(5): 435-452.

Bikerman, J. J. (1968). „The science of adhesive joints“. New York and London, Academic press.

Boehme, C. (1991). „Rohdichteprofil und Dickenquellung von Spanplatten - Einfluß des Deckschicht-Rohdichteprofils auf die Dickenquellung und Wasseraufnahme von Spanplatten in Abhängigkeit vom Prüfkörperformat.“ Holz-Zentralblatt 117(125): 1984.

Boehme, C. (1992). „Die Bedeutung des Rohdichteprofils für MDF.“ Holz als Roh- und Werkstoff 50(1): 18-24.

Boehme, C. (1993). „Optimierung des Eigenschaftsprofils von MDF.“ Holz als Roh- und Werkstoff 51(4): 240-246.

Bolton, A. J. und P. E. Humphrey (1988). „The hot pressing of dry-formed wood-based composites, Part I: Review of the literature, identifying the primary physical processes and the nature of their interaction.“ Holzforschung 42(6): 403-406.

Bolton, A. J. und P. E. Humphrey (1989). „The hot pressing of dry-formed wood-based composites, Part III: Predicted vapour pressure and temperature variation with time, compared with experimental data for laboratory boards.“ Holzforschung 43(4): 265-274.

Bolton, A. J., P. E. Humphrey und P. K. Kavvouras (1989). „The hot pressing of dry-formed wood-based composites, Part IV: Predicted variation of mattress moisture content with time.“ Holzforschung 43(5): 345-349.

Carvalho, L. M. H., M. R. N. Costa und C. A. V. Costa (2001). „Modeling rheology in the hot-pressing of MDF: Comparison of mechanical models.“ Wood and Fiber Science 33(3): 395-411.

Carvalho, L. M. H., M. R. N. Costa und C. A. V. Costa (2003). „A global model for the hot-pressing of MDF.“ Wood Science and Technology 37(3-4): 241-258.

Czichos, H. (1989). „Hütte : Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“. Berlin, Springer.

Dai, C. (2001). „Viscoelasticity of wood composite mats during consolidation.“ Wood and Fiber Science 33(3): 353-363.

Dai, C. und P. R. Steiner (1993). „Compression behavior of randomly formed wood flake mats.“ Wood and Fiber Science 25(4): 349-358.

Dai, C. P. und C. M. Yu (2004). „Heat and mass transfer in wood composite panels during hot-pressing: Part I. A physical-mathematical model.“ Wood and Fiber Science 36(4): 585-597.

Dai, C. P., C. M. Yu und X. Y. Zhou (2005). „Heat and mass transfer in wood composite panels during hot pressing. Part II. Modeling void formation and mat permeability.“ Wood and Fiber Science 37(2): 242-257.

Denisov, O. B., P. P. Anisov und P. E. Zuban (1975). „Untersuchung der Permeabilität von Spanvliesen.“ Holztechnologie 16(1): 10-14.

DePaula, E. V. C. M. (1992). „Design and fabrication of a mechanical device for "in-situ" measurement of density of a wood particle mat during pressing“. Knoxville, The University of Tennessee. Ph.D. Thesis: 95 Seiten.

Deppe, H.-J. und K. Ernst (1996). „MDF - Mitteldichte Faserplatte“. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag.

Dubbel, H. und W. Beitz (1990). „Taschenbuch für den Maschinenbau (mit 511 Tabellen)“. Berlin, Springer.

Dueholm, S. (1995). „Bestimmung des Rohdichteprofils von Holzwerkstoffplatten - Von traditioneller off-line-Labormessung bis hin zur kontinuierlichen In-line-Echtzeitmessung.“ [HK] Holz- und Kunststoffverarbeitung 30(11): 1394-1398.

Dunky, M. und P. Niemz (2002). „Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren (mit 150 Tabellen)“. Berlin, Springer.

Eriksson, J., H. Johansson und J. Danvind (2006). „Numerical determination of diffusion coefficients in wood using data from CT-scanning.“ Wood and Fiber Science 38(2): 334-344.

Faessel, M., C. Delisée, F. Bos und P. Castéra (2005). „3D modelling of random cellulosic fibrous networks based on X-ray tomography and image analysis.“ Composites Science and Technology 65: 1931-1940.

Faessel, M., C. Delisee und J. Lux (2003). „On the microstructure and the 3D simulation of wood based fibrous insulators“. ESWM, Stockholm.

Fahrni, F. (1956). „Das Verpressen von Spanplatten bei befeuchteten oder feuchteren Deckspänen.“ Holz als Roh- und Werkstoff 14(1): 8-10.

Frühwald, A., A. Steffen, P. E. Humphrey, v. G. Haas und H. Thömen (1999). „Entwicklung und Überprüfung eines Modells des thermodynamischen und des rheologischen Verhaltens von Fasermatten für MDF während der Heißpressung in Taktpressen und Ansätze zur Modellierung von Endlospressen.“ Final Report, AIF project 10359 N, Ordinariat für Holztechnologie, Universität Hamburg: 214 Seiten.

Ganev, S., A. Cloutier, R. Beauregard und G. Gendron (2005a). „Linear expansion and thickness swell of MDF as a function of panel density and sorption state.“ Wood and Fiber Science 37(2): 327-336.

Ganev, S., G. Gendron, A. Cloutier und R. Beauregard (2005b). „Mechanical properties of MDF as a function of density and moisture content.“ Wood and Fiber Science 37(2): 314-326.

Gefahrt, J. (1977). „Zur Spänevorwärmung mit Hochfrequenzenergie - Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufes in Vliesmitte bei der Heißpressung.“ Holz als Roh- und Werkstoff 35(5): 183-188.

Goring, D. A. I. (1971). „Polymer properties of lignin and lignin derivates“. Lignins, occurence, formation, structure and reactions. Eds: K. V. Sarkanen and C. H. Ludwig. New York, London, Sydney, Toronto, Wiley-Interscience.

Groom, L., L. Mott und S. Shaler (1999). „Relationship between Fiber Furnish Properties and the Structural Performance of MDF“. 33rd International Particleboard/Composite Materials Symposium, Pullman, Washington, USA.

Haas, G. v. (1998). „Untersuchungen zur Heißpressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens, der Permeabilität, der Temperaturleitfähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit“. Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Dissertation: 264 Seiten.

Haas, G. v. (2000). „Untersuchung zur Wärmeleitfähgkeit von Faser- und Spanmatten und Platten.“ Holzforschung und Holzverwertung 54(5): 102-104.

Haas, v. G. und A. Frühwald (1999). „Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit der sorptiven Wasseraufnahme von Furnieren.“ Holz als Roh- und Werkstoff 57: 77-78.

Haas, v. G. und A. Frühwald (2000a). „Untersuchungen zum rheologischen Verhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 58: 415-418.

Haas, v. G. und A. Frühwald (2000b). „Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 58: 317-323.

Hänsel, A., P. Niemz und F. Brade (1988). „Untersuchungen zur Bildung eines Modells für das Rohdichteprofil im Querschnitt dreischichtiger Spanplatten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 46(4): 125-132.

Hanvongjirawat, W. (2003). „Permeabilität von Holzwerkstoffmatten“. Fachbereich Biologie. Hamburg, Universität Hamburg. Dissertation: 206 Seiten.

Harless, T. E. G., F. G. Short, P. H. Wagner, R. D. Seale, P. H. Mitchell und D. S. Ladd (1987). „A model to predict the density profile of particleboard.“ Wood and Fiber Science 19(1): 81-92.

Haselein, C. R. (1998). „Numerical Simulation of Pressing Wood-Fiber Composites“. Department of Forest Products. Corvallis, Oregon State University Ph.D. Thesis: 241 Seiten.

Hata, T. (1993). „Heat flow in particle mat and properties of particleboard under steam-injection pressing.“ Wood Research, Bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University No. 80: 48 Seiten.

Heinemann, C. (1999). „Methodische Untersuchungen zur Permeabilität von Holzwerkstoffmatten für Gas“. Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 106 Seiten.

Heinemann, C. (2004). „Charakterisierung der Aushärtung von Aminoharzen in einer Holzpartikelmatrix durch Evaluierung von Festigkeiten und Reaktionskinetik“, Universität Hamburg. Dissertation: 228 Seiten.

Houts, v. J. H., D. Bhattacharyya und K. Jayaraman (2003). „Viscoelastic behaviour of wood fibres during the hot pressing of medium density fibreboard.“ Holzforschung 57(4): 391-399.

Hubbell, J. H. und S. M. Seltzer. (1996). „Ionizing Radiation Division, Physics Laboratory National Institute of Standards and Technology.“ Abgerufen am: 02.01.08, von: http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html.

Humphrey, P. E. (1994). „Engineering composites from oriented natural fibres: A strategy.“ Proceedings of: The Chemistry and Processing of Wood and Plant Fibrous Materials. Proceedings of the Cellucon Conference, Bangor, U. K.: 213-220.

Humphrey, P. E. und A. J. Bolton (1989). „The hot pressing of dry-formed wood-based composites, Part II: A simulation model for heat and moisture transfer, and typical results.“ Holzforschung 43(3): 199-206.

Humphrey, P. E. und D. Zavala (1989). „A Technique to Evaluate the Bonding Reactivity of Thermosetting Adhesives.“ Journal of Testing and Evaluation 17(6): 323-328.

Jackson, S. A. und R. M. Thomas (2004). „Cross sectional imaging made easy“. Edinburgh ; New York, Churchill Livingstone.

Jahic, J. (2000). „Herstellung von Spanplatten bei höheren Spanfeuchten“. Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Dissertation: 120 Seiten.

Jurasek, L. und J. Jokel (1962). „Absorption of Co-60 gamma rays in woods of various density.“ Drevarsky Vyskum 10(2): 21-32.

Kamke, F. A. und L. J. Casey (1988). „Fundamentals of flake-board manufacture: internal-mat conditions.“ Forest Products Journal 38(6): 38-44.

Kamke, F. A. und M. P. Wolcott (1991). „Fundamentals of flakeboard manufacture: wood-moisture relationships.“ Wood Science and Technology 25: 57-71.

Kelley, S. S., T. G. Rials und W. G. Glasser (1987). „Relaxation behavior of the amorphous components of wood.“ Journal of Materials Science 22(2): 617-624.

Kelly, M. W. (1997). „Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard.“ USDA Forest Service Forest Products Laboratory General Technical Report FPL - 10, U.S. Department of Agriculture forest Service Forest Products Laboratory Madison, WI: 64 pages.

Keylwerth, R. (1958). „Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte.“ Holz als Roh- und Werkstoff 10(11): 419-430.

Klauditz, W. und H. J. Ulbricht (1956). „Weitere Untersuchungen zur Beschleunigung der Verleimung von Holzspänen zu Holzspanplatten in beheizten hydraulischen Pressen.“ Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, Stuttgart; Entwicklung und Herstellung von Holzspanplatten, Sitzung am 2. Mai 1956 in Braunschweig(2/56): 12-20.

Kollmann, F. (1961). „Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz.“ Holz als Roh- und Werkstoff 19(3): 73-80.

Konnerth, J., D. Harper, S. H. Lee, T. G. Rials und W. Gindl (2008). „Adhesive penetration of wood cell walls investigated by scanning thermal microscopy (SThM).“ Holzforschung 62: 91-98.

Kotwaliwale, N., J. Subbiah, P. R. Weckler, G. H. Brusewitz und G. A. Kranzler (2007). „Calibration of a soft X-ray digital imaging system for biological materials.“ Transactions of the Asabe 50(2): 661-666.

Krug, D. und E. Kehr (2001). „Einfluss des Aufschlussdruckes bei der Faserstoffherstellung auf die Quellungsvergütung von MDF.“ Holz als Roh- und Werkstoff 59(5): 342-343.

Kruse, K., F.-W. Bröker und A. Frühwald (1996). „Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeit , Rohdichteprofil und Ultraschallgeschwindigkeit von Spanplatten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 54: 295-300.

Kruse, K., C. Dai und A. Pielasch (2000). „An analysis of strand and horizontal density distributions in oriented strand board (OSB).“ Holz als Roh- und Werkstoff 58(4): 270-277.

Kunesh, R. H. (1961). „The inelastic behavior of wood: A new concept for improved panel forming processes.“ Forest Products Journal 11(9): 395-406.

Lang, E. M. und M. P. Wolcott (1996). „A Model for viscoelastic consolidation of wood-strand mats. Part I: Structural characterization of the mat via Monte Carlo simulation.“ Wood and Fiber Science 28(1): 100-109.

Laufenberg, T. L. (1986). „Using gamma radiation to measure density gradients in reconstituted wood products.“ Forest Products Journal 36(2): 59-62.

Lehmann, E., P. Vonotobel, P. Scherrer und P. Niemz (2001). „Anwendung der Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften.“ Holz als Roh- und Werkstoff 59: 463-471.

Lenth, C. A. und F. A. Kamke (1996). „Investigations of flakeboard mat consolidation Part II: Modeling mat consolidation using theories of cellular materials.“ Wood and Fiber Science 28(3): 309-319.

Lenth, C. A. und F. A. Kamke (2001a). „Equilibrium Moisture Content of wood in High-Temperature Pressuized Environments.“ Wood and Fiber Science 33(1): 104-118.

Lenth, C. A. und F. A. Kamke (2001b). „Moisture dependent softening behavior of wood.“ Wood and Fiber Science 33(3): 492-507.

Lindgren, L. O. (1991). „Medical CAT-scanning: X-ray absortion coefficients, CT-numbers and their relation to wood density.“ Wood Science and Technology 25(5): 341-349.

Loos, W. E. (1961). „The relationship between gamma ray absorption and wood moisture content and density.“ Forest Products Journal 11(3): 145-149.

Lu, C. und F. Lam (1999). „Study on the X-ray calibration and overlap measurements in robot formed flakeboard mats.“ Wood Science and Technology 33(2): 85-95.

Macchioni, N., S. Palanti und P. Rozenberg (2007). „Measurements of fungal wood decay on Scots pine and beech by means of X-ray microdensitometry.“ Wood Science and Technology 41(5): 417-426.

Macedo, A., C. M. P. Vaz, J. C. D. Pereira, J. M. Naime, P. E. Cruvinel und S. Crestana (2002). „Wood density determination by X- and gamma-ray tomography.“ Holzforschung 56(5): 535-540.

Maku, T., P. Hamada und H. Sasaki (1959). „Studies on the particle board, Report 4: Temperature and moisture distribution in particle board during hot-pressing.“ Wood Research: 34-46.

Malan, F. S. und P. G. Marais (1992). „Some notes on the direct gamma ray densitometry of wood.“ Holzforschung 46(2): 91-97.

Mannes, D., P. Niemz und E. Lehmann (2006). „Study on the penetration behavior of water in cornerjoints by means of neutron radiography.“ Wood Research 51(2): 1-14.

Marra, A. A. (1992). „Technology of wood bonding: principles in practice“. New York, Van Nostrand Reinhold.

May, H. A. (1983). „Zusammenhänge zwischen Eigenschafen, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten, Teil 4.“ Holz als Roh- und Werkstoff 41(4): 271-275.

Meyer, N. (2003). „Untersuchung des Verhaltens von Holzwerkstoffmatten in Doppelbandpressen mit integrierter Rückkühlung“. Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 118 Seiten.

Meyer, N. (2007). „Einfluss von Druckänderungen auf die mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen“. Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften. Hamburg, Universität Hamburg. Dissertation: 230 Seiten.

Nachtmann, O. und R. U. Sexl (1992). „Phänomene und Konzepte der Elementarteilchenphysik : mit 171 Bildern und 40 Tabellen“. Braunschweig [u.a.], Vieweg.

Nave, C. R. (2005). „HyperPhysics.“ Abgerufen am: 21.01.08, 2008, von: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/quantum/xrayc.html#c1.

Neagu, R. C., E. K. Gamstedt und M. Lindstrom (2006). „Characterization methods for elastic properties of wood fibers from mats for composite materials.“ Wood and Fiber Science 38(1): 95-111.

Niemz, P., E. Lehmann, P. Vontobel, P. Haller und S. Hanschke (2002). „Untersuchungen zur Anwendung der Neutronenradiographie zur Beurteilung des Eindringens von Wasser in Eckverbindungen aus Holz.“ Holz als Roh- und Werkstoff 60: 118-126.

Niemz, P., D. Mannes, E. Lehmann, P. Vontobel und S. Haase (2004). „Untersuchungen zur Verteilung des Klebstoffes im Bereich der Leimfuge mittels Neutronenradiographie und Mikroskopie.“ Holz als Roh- und Werkstoff 62(4): 424–432.

Oja, J., S. Grundberg und A. Grönlund (2000). „Predicting the strenght of sawn products by X-ray scanning of logs: a preliminary study.“ Wood and Fiber Science 32(2): 203-208.

Oja, J. und E. Temnerud (1999). „The appearance of resin pockets in CT-images of Norway spruce.“ Holz als Roh- und Werkstoff 57: 400-406.

Olson, J. R. und D. G. Arganbright (1981). „Prediction of mass attenuation coefficients of wood.“ Forest Products Journal 14(2): 86-90.

Parrish, W. B. (1960). „Attenuation of gamma-rays by wood“, Ohio State University. Ph.D. Thesis.

Plath, E. (1971). „Beitrag zur Mechanik der Holzspanplatten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 29(10): 377-382.

Plath, E. und E. Schnitzler (1974). „Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten.“ Holz als Roh- und Werkstoff 32(11): 443-449.

Poppe, L. J., V. F. Paskevich, J. C. Hathaway und D. S. Blackwood. (2001). „A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction.“ Abgerufen am: 21.01.2008, 2008, von: http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/images/xrdtube.jpg.

Rackwitz, G. (1954). „Ein Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge bei der Verleimung von Holzspänen zu Holzspanplatten in beheizten hydraulischen Pressen“. Braunschweig, Technische Hochschule Braunschweig. Dissertation 100 Seiten.

Ranta, L. und H.-A. May (1978). „Zur Messung von Rohdichteprofilen an Spanplatten mittels Gammastrahlen.“ Holz als Roh- und Werkstoff 36(12): 467-474.

Rauch, W. (1984). „Temperatur- und Dampfdruckverlauf bei der Herstellung von Spanplatten und ihr Einfluß auf die technologischen Eigenschaften.“ Holz als Roh- und Werkstoff 42(8): 281-286.

Ren, S. (1991). „Thermo-hygro rheological behavior of materials used in the manufacture of wood-based composites“. Oregon State University. Corvallis, Dissertation. Ph.D. Thesis: 226 Seiten.

Rindby, A. (2003). „Point-projection radiography, basic concepts and principles.“ Eigenverlag: 14 Seiten.

Rojas, G., A. Condal, R. Beauregard, D. Verret und R. E. Hernandez (2006). „Identification of internal defect of sugar maple logs from CT images using supervised classification methods.“ Holz als Roh- und Werkstoff 64(4): 295-303.

Roos, T. (2000). „Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Querzugfestigkeit von Holzwerkstoffen“. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 104 Seiten.

Ruf, C. (2003). „Einfluss des Pressprogramms auf das Rohdichteprofil von Holzwerkstoffen“. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 112 Seiten.

Schajer, G. S. (2000). „Lumber strength grading using x-ray scanning.“ Forest Products Journal 51(1): 43-50.

Schröder, W. (1994). „Der Zusammenhang zwischen Rohdichte und den physikalisch - technologischen Eigenschaften bei MDF“. Fachbereich Biologie, Insitut für physikalische Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 103 Seiten.

Schulte, M. und A. Frühwald (1996a). „Shear modulus, internal bond and density profile of medium density fibre board (MDF).“ Holz als Roh- und Werkstoff 54(1): 49-55.

Schulte, M. und A. Frühwald (1996b). „Some investigations concerning density profile, internal bond and relating failure position of particleboard.“ Holz als Roh- und Werkstoff 54(2): 289-294.

Sepúlveda, P., D. E. Kline und J. Oja (2003). „Prediction of fiber orientation in Norway spruce logs using an X-ray log scanner: a preliminary study.“ Wood and Fiber Science 35(3): 421-428.

Shaler, S. M. (1997). „Microtomography of wood composite microstructure“. 1st European panel products symposium, Llandudno, Wales.

Soiné, H. (1984). „Kontinuierliches Preßverfahren in der Spanplattenindustrie - Verfahrensbedingte Ersparnisse und Platteneigenschaften.“ Holz als Roh- und Werkstoff 42(1): 1-5.

Steffen, A. (1996). „Entwicklung und Stand der Optimierung und Modellierung der Heißpressung von Holzwerkstoffen.“ Holz als Roh- und Werkstoff 54(5): 321-332.

Steffen, A., G. v. Haas, A. Rapp, P. Humphrey und H. Thömen (1999). „Temperature and gas pressure in MDF-mats during industrial continuous hot pressing.“ Holz als Roh- und Werkstoff 57(2): 154-155.

Stehr, M. (1999). „Adhesion to machined and laser ablated wood surfaces“. Institute för Produktionssystem avdelning Träteknologi. Stockholm, Kungliga Tekniska Högskolan. Dissertation.

Stevens, V. und O. Wienhaus (1984). „Bedeutung und Bestimmung des Glasübergangszustandes von Lignin.“ Holztechnologie 25(2): 77-83.

Strickler, M. D. (1959). „Effect of press cycles and moisture content on properties of douglas-fir flakeboard.“ Forest Products Journal(7): 203-215.

Suchsland, O. (1967). „Behavior of a particleboard mat during the press cycle.“ Forest Products Journal 17(2): 51-57.

Suchsland, O. und G. E. Woodson (1991). „Fiberboard manufactoring practices in the United States“. Madison, Forest Products Research Society.

Sugimori, M. und F. Lam (1999). „Macro-void distribution analysis in strand-based wood composites using an X-ray computer tomography technique.“ Japan Wood Science 45: 254-257.

Suo, S. und J. L. Bowyer (1994). „Simulation modeling of particleboard density profile.“ Wood and Fiber Science 26(3): 397-411.

Thole, V., J. Jahic und M. Lewark (2000). „Auf's Pressprogramm kommt's an.“ MDF-Magazin, Ein Supplement von Holz-Zentralblatt und HK, Oktober 2000: 80-85.

Thömen, H. (2000). „Modeling the physical processes in natural fiber composites during batch and continuous pressing“. Department of Forest Products. Corvallis, Oregon State University Dissertation: 187 Seiten.

Thömen, H. (2000-2007). „Hilfe Menü zum Programm Virtual Hot Press Vers.1.2.“ Seiten.

Thömen, H. (2002). „Die Entstehung des Rohdichteprofils beim Heißpressen von Holzwerkstoffen“. Pressen von Holzwerkstoffen - Aktuelle Trends und Perspektiven. Hamburg, Universität Hamburg.

Thömen, H., C. R. Haselein und P. E. Humphrey (2006). „Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part II. Rheology.“ Holz als Roh- und Werkstoff 64(2): 125-133.

Thömen, H., C. Heinemann und W. Hanvongjirawat (2004). „The Virtual Hot Press: A simulation platform for process optimization and training“. 4th European Wood-Based Panels Symposium, Hannover.

Thömen, H. und P. E. Humphrey (2003). „Modeling the continuous pressing process for wood-based composites.“ Wood and Fiber Science 35(3): 456-468.

Thömen, H. und A. Klüppel (2008). „An investigation on the permeability of different wood furnish materials.“ Holzforschung 62(2): 215-222.

Thömen, H. und C. Ruf (2008). „Measuring and simulating the effects of the pressing schedule on the density profile development in wood-based composites.“ Wood and Fiber Science 40(3): 325-338.

Thömen, H., T. Walther und A. Wiegmann (2008). „3D simulation of macroscopic heat and mass transfer properties from the microstructure of wood fibre networks.“ Composites Science and Technology 68: 608-616.

Tiitta, M., H. Olkkonen, T. Laooalainen und T. Kanko (1993). „Automated low energy photon absorption equipment for measuring internal moisture and density distributions of wood samples.“ Holz als Roh- und Werkstoff 51(6): 417-421.

Tsai, C. M. und Z. H. Cho (1976). „Physics of contrast mechanism and averaging effect of linear attenuation coefficients in a computerized transverse axial tomography (CTAT) transmission scanner.“ Physics in medicin and biology 21(4): 544-559.

Walther, T. (2003). „The influence of moisture content and grain orientation on the compressibility and recovery of wood particles“. Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg, Universität Hamburg. Diplomarbeit: 135 Seiten.

Walther, T. (2006). „Methoden zur qualitativen und quantitativen Analyse der Mikrostruktur von Naturfaserwerkstoffen“. Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg. Hamburg, Universität Hamburg. Dissertation: 232 Seiten.

Wang, S. und P. M. Winistorfer (2000a). „Consolidation of flakeboard mats under theoretical laboratory pressing and simulated industrial pressing.“ Wood and Fiber Science 32(4): 527-538.

Wang, S. und P. M. Winistorfer (2000b). „Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites, Part II: Methodology of vertical density formation under dynamic conditions.“ Wood and Fiber Science 32(2): 220-238.

Wang, S. und P. M. Winistorfer (2002). „Monitoring in-situ density change for in-press measurement and control of hot-pressing.“ Forest Products Journal 52(7/8): 77-82.

Wang, S., P. M. Winistorfer, W. W. Moschler und C. Helton (2000). „Hot-Pressing of oriented strandboard by step-closure.“ Forest Products Journal 50(3): 28-34.

Wang, S., P. M. Winistorfer, T. M. Young und C. Helton (2001a). „Step-closing pressing of medium density fiberboard, Part 1: Influences on the vertical density profile.“ Holz als Roh- und Werkstoff 59(1-2): 19-26.

Wang, S., P. M. Winistorfer, T. M. Young und C. Helton (2001b). „Step-closing pressing of medium density fiberboard, Part 2: Influences on panel performance and layer characteristics.“ Holz als Roh- und Werkstoff 59(5): 311-318.

Wang, S. Q., P. M. Winistorfer und T. M. Young (2004). „Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites, Part III. MDF density formation during hot-pressing.“ Wood and Fiber Science 36(1): 17-25.

Wiberg, P. und T. J. Morén (1999). „Moisture flux determination in wood during drying above fibre saturation point using CT-scanning and digital image processing.“ Holz als Roh- und Werkstoff 57: 137-144.

Winistorfer, P. M. und W. W. Moschler (1996). „Dynamics of mat consolidation during pressing: what we've learned with our in press radiation system for pressing wood composites.“ Proceedings of Society for Experimental Mechanics: 10 pages.

Winistorfer, P. M., W. W. Moschler, S. Wang, E. Bledsoe und B. L. DePaula (2000). „Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites, Part I: In-situ density measurement of the consolidation process.“ Wood and Fiber Science 32(2): 209-219.

Winistorfer, P. M., T. M. Young und E. Walker (1996). „Modeling and Comparing vertical Density Profils.“ Wood and Fiber Science 28(1): 133-141.

Wolcott, M. P., F. A. Kamke und D. A. Dillard (1994). „Fundamental aspects of wood deformation pertaining to manufacture of wood-based composites.“ Wood and Fiber Science 26(4): 496-511.

Wong, E. D., M. Zhang, Q. Wang, G. Han und S. Kawai (2000). „Formation of the density profile and its effects on the properties of fibreboard.“ Journal of Wood Science 46(3): 202-209.

Wong, E. D., M. Zhang, Q. Wang und S. Kawai (1998). „Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard.“ Journal of Wood Science 44(4): 287-295.

Wong, E. D., M. Zhang, Q. Wang und S. Kawai (1999). „Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard.“ Wood Science and Technology 33(4): 327-340.

Xu, W., P. M. Winistorfer und W. W. Moschler (1996). „A procedure to determine water absorption distribution in wood composite panels.“ Wood and Fiber Science 28(3): 286-294.

Zhou, C., C. P. Dai und G. D. Smith (2008). „A generalized mat consolidation model for wood composites.“ Holzforschung 62(2): 201-208.

Zombori, B. G. (2001). „Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites“. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University. Dissertation: 211 Seiten.

Zombori, B. G., F. A. Kamke und L. T. Watson (2004). „Sensitivity analysis of internal mat environment during hot-pressing.“ Wood and Fiber Science 36(2): 195-209.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2008 am Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes am Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Arno Frühwald. Die grundlegende Idee entstammt dem Jahr 2000.
Viele projekttechnische und gesundheitliche Hürden haben den reibungslosen Beginn und Fortgang der Arbeit hinausgezögert und immer wieder unterbrochen.
Viele Menschen haben mich in dieser Zeit begleitet, begleiten müssen. Aus vielen sind Freunde geworden. Einigen möchte ich hier namentlich meinen Dank aussprechen. Denjenigen, die ich nicht expressis verbis nenne, sei mein Dank gewiss.

„Amicus certus in re incerta cernitur!“

Während der gesamten Arbeitszeit hat mich mein Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Jörg B. Ressel uneingeschränkt unterstützt. Viele fachliche Diskussionen und das kontinuierliche Infragestellen des methodischen Vorgehens haben eine angenehme, fordernde und auch sehr persönliche Arbeitsatmosphäre mit vielen Freiheiten, aber auch dem nötigen Rahmen zum Gelingen der Arbeit geschaffen. Meinem Doktorvater sei an dieser Stelle für all seine Unterstützung und Motivation von Herzen gedankt. – Danke!
Herrn Dr. mont. habil. Manfred Dunky möchte ich für die engagierte Übernahme der Zweitbegutachtung danken. Seine wertvollen Anregungen haben die Arbeit abgerundet.
Für die immerwährende Unterstützung in der Zeit am Institut möchte ich dem Institutsleiter Prof. Dr. rer. nat. Arno Frühwald meinen Dank aussprechen.
In vielen Diskussionen mit Dr. rer. nat. habil. Heiko Thömen ging es immer wieder um das Spannungsfeld zwischen der von ihm entwickelten Simulationssoftware Virtual Hot Press (VHP) und den Messergebnissen aus der vorliegenden Arbeit, immer geprägt durch die Neugier auf die Ergebnisse und die konsequente methodische Arbeit. Das hat das Arbeiten auf angenehme Art fachlich und persönlich bereichert.
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. Marius Barbu möchte ich neben vielen gemeinsamen Waldläufen für das Interesse und die kontinuierliche Unterstützung beim Anfertigen der Arbeit danken. So macht viel Arbeit viel Spaß!
Die Versuchseinrichtung wäre ohne den unermüdlichen Einsatz von Herrn Jens Schröder, der viele mechanische Teile für die Verdichtungseinheit immer in der Erwartung neuer CAD-

Zeichnungen angefertigt hat, und Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Bartz, der alle Ideen für die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Elektronik und endlose Meter Messkabel umgesetzt hat, nie zum Laufen gekommen. Dafür sei beiden herzlich gedankt.

Mein Dank gilt auch Frau Dörte Bielenberg für die Prüfung der Proben sowie Frau Stefanie Warsow für den Probenzuschnitt.

An dieser Stelle sei Frau Prof. Katja Frühwald und Herrn Dr. rer. nat. Thomas Walther dafür gedankt, wenn ich im Dickicht der Kapitel den Holzwerkstoff mal wieder nicht gesehen habe und mich einfach in einem guten (Fach-)Gespräch an beide wenden konnte.

Einige Freunde standen mir während der Anfertigung der Arbeit, aber auch in einer Zeit davor, in der ich gesundheitlich bedingt sehr zurückgezogen leben musste, sehr und uneingeschränkt zur Seite. Namentlich möchte ich hier Frau Ines Sauerteig und ihre Familie, Herrn Dipl.-Ing. Ole Warrelmann, Herrn Dr. rer. nat. Thomas Walther, Herrn Dr.-Ing. Ralph Mayer und Herrn Dr. silv. Frank Eilermann und Familie sowie Herrn Dr. phil. Franz Greb nennen. Ohne Eure Freundschaft und Motivation wären manche Momente einfach sehr trist gewesen! Schön, dass wir so herzlich gemeinsam lachen können! – Danke!

Für das Interesse an meinem Lebensweg nach dem Abitur und die Durchsicht des Manuskriptes möchte ich ganz herzlich meinem ehemaligen Geschichts- und Schwedischlehrer Herrn StDir a.D. Jürgen Wollenzin meinen Dank aussprechen.

Ohne den unermüdlichen und immer wieder kreativen Einsatz des Ärzteteams, das sich in den Jahren 2004 bis 2006 formiert und sich intensiv um mich gekümmert hat, wäre diese Arbeit unvollendet geblieben. Besonders sei hier Herrn Dr. med. Werner Helten, Herrn Dr. med. Detlef Holland, dem Pflege- und Ärzteteam der II. Med. Klinik am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein (UKSH), Campus Kiel unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. Michael Kneba sowie dem Pflege- und Ärzteteam des Dr. Mildred-Scheel-Hauses am UKSH unter der Leitung von Prof. Dr. med. Martin Gramatzki und hier besonders Dr. med. Andreas Günther gedankt. Ohne die durchdachten, aber auch risikoreichen Entscheidungen dieses Ärzteteams hätte ich heute nicht diese uneingeschränkte Lebensqualität.

Mein ganz besonderer und tiefster Dank gilt an dieser Stelle auch meiner unbekannten Stammzellspenderin für Ihre selbstlose Gabe! Ohne sie hätte ich diese Zeilen und alle vorherigen nie formulieren können! – Danke!

Meinen Eltern und meiner Patentante gilt mein ganz besonderer und unermesslicher Dank aus tiefstem Herzen! Eure Liebe, die menschliche und familiäre Wärme hat uns alle durch die gesundheitlich kritischen Jahre getragen, die vor dem Abschluss der Dissertation lagen.

Danke!

Anhang P

Abb. P- 1: Übersicht über die Proben

Probe: Platte 12 mm_...	Seiten	Bemerkung
…01_10_100_240	268 - 271	Starkes Artefakt
...02_10_100_240	272 – 275	Sehr starkes Artefakt im Bereich 10 s bis 30 s
...01_10_110_120_240	276 - 279	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...02_10_110_120_240	280 - 283	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...01_10_110_140_240	284 - 287	---
...02_10_110_140_240	288 - 291	Sehr starkes Artefakt im Bereich 10 s bis 80 s
...01_10_110_160_240	292 - 295	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...02_10_110_160_240	296 - 299	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...01_10_120_120_240	300 - 303	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...02_10_120_120_240	304 - 307	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...01_10_120_140_240	308 - 311	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...02_10_120_140_240	312 - 315	Thermoelement bei 75 % ausgefallen
...01_10_120_160_240	316 - 319	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...02_10_120_160_240	320 - 323	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...01_20_100_240	324 - 327	---
...02_20_100_240	328 - 331	---
...01_20_110_120_240	332 - 335	---
...02_20_110_120_240	336 - 339	Starkes Artefakt im Bereich 20 s bis 60 s
...01_20_110_140_240	340 - 343	---
...02_20_110_140_240	344 - 347	---
...01_20_110_160_240	348 - 351	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...02_20_110_160_240	352 - 355	Thermoelement bei 50 % ausgefallen
...01_20_120_120_240	356 - 359	Alle Thermoelemente ausgefallen
...02_20_120_120_240	360 - 363	Alle Thermoelemente ausgefallen
...01_20_120_140_240	364 - 367	---
...02_20_120_140_240	368 - 371	---
...01_20_120_160_240	372 - 375	---
...02_20_120_160_240	376 - 379	---
...01_30_100_240	380 - 383	---
...02_30_100_240	384 - 387	---
...01_30_110_120_240	388 - 391	---
...02_30_110_120_240	392 - 395	---
...01_30_110_140_240	396 - 399	---
...02_30_110_140_240	400 - 403	---
...01_30_110_160_240	404 - 407	Thermoelement bei 0 % ausgefallen
...02_30_110_160_240	408 - 411	Thermoelement bei 0 % ausgefallen
...01_30_120_120_240	412 - 415	---
...02_30_120_120_240	416 - 419	---
...01_30_120_140_240	420 - 423	---
...02_30_120_140_240	424 - 427	---
...01_30_120_160_240	428 - 431	---
...02_30_120_160_240	432 - 435	---

Beschreibung der Probennamen siehe Abb. 4.29, Seite 146

1.1 Platte 12 mm_01_10_100_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,51	gravim.	828,03	gravim.	0,66	radiom.	20,95				
Endwert	18,86		800,23								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	701,44	89,39	radiom.	16,43	radiom.	4,52				
	Endwert	784,55			18,38		2,57				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,76	radiom.	1,13	gravim.	3,60			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	10,2	0,25	2,09	819,47	116,83	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	25,8	0,32	2,72	1009,90	143,97	5,25	161,76	81,51	46,42	107,30
	Ende	240,0	0,25	2,09	960,99	137,00	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
hinteres Maximum	Beginn	10,2	0,65	5,41	718,39	102,42	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	25,2	0,21	1,75	1790,37	255,24	6,37	161,90	79,91	46,22	106,72
	Ende	240,0	0,42	3,49	1043,84	148,81	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	691,28	98,55			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	82,4	695,63	85,90			0,58	159,29	121,23	100,37	126,13
	Maximum	112,8	702,69	87,29			0,27	164,37	131,87	116,24	135,16
	Ende	240,0	680,25	86,71			0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	10,2	4,99	41,80	730,06	104,08	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	79,2	4,43	37,12	862,16	122,91	0,63	159,39	119,97	97,63	125,17
	Ende	240,0	4,57	38,31	838,91	119,60	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
hinterer GF	Beginn	10,2	5,32	44,59	714,23	101,82	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	76,8	3,90	32,65	857,07	122,19	0,66	160,43	119,05	95,50	124,46
	Ende	240,0	3,97	33,25	840,05	119,76	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	10,2	4,34	36,39	700,46	99,86	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	91,8	1,41	11,80	712,44	101,57	0,45	161,46	124,86	107,53	129,09
	Ende	240,0	1,63	13,70	692,74	98,76	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
hinterer Profilgrund	Beginn	10,2	4,80	40,23	698,35	99,56	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	77,2	1,31	10,99	708,49	101,00	0,66	158,24	119,19	95,84	124,56
	Ende	240,0	1,55	13,00	692,89	98,78	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58

Tab. P- 1:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 2

Probenname	Platte 12mm_01_10_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	10,2	3,48	29,14	701,44	100,00	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	10,2	3,48	29,14	701,44	100,00	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Ende	240,0	1,92	16,06	784,55	111,85	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
hintere Peakbase	Beginn	10,2	2,89	24,26	701,44	100,00	7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	10,6	2,93	24,26	701,44	100,00	7,36	169,11	39,53	43,96	56,73
	Ende	240,0	2,52	21,12	784,55	111,85	0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	693,85	98,92			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	10,2	693,85	98,92			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Maximum	97,2	770,51	95,11			0,39	162,14	126,95	111,15	130,87
	Ende	240,0	727,56	92,74			0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	688,15	98,11			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	236,6	675,96	86,04			0,04	176,62	149,21	120,79	154,22
	Maximum	237,2	684,78	87,17			0,04	176,67	149,27	120,87	154,28
	Ende	240,0	680,35	86,72			0,05	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	691,70	98,61			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	10,2	691,70	98,61			7,37	169,17	39,20	43,79	54,46
	Maximum	25,4	831,01	95,53			6,01	161,85	80,42	46,28	106,92
	Ende	240,0	753,36	96,02			0,05	176,57	149,56	121,07	154,58

Tab. P- 2:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

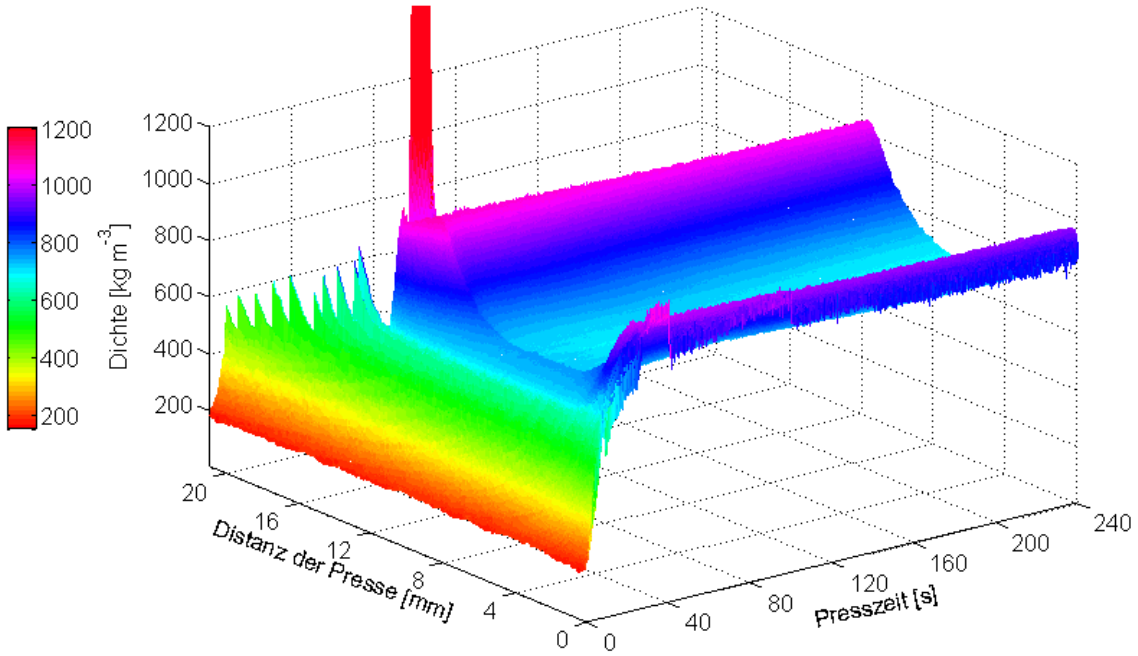


Abb. P- 2: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240.

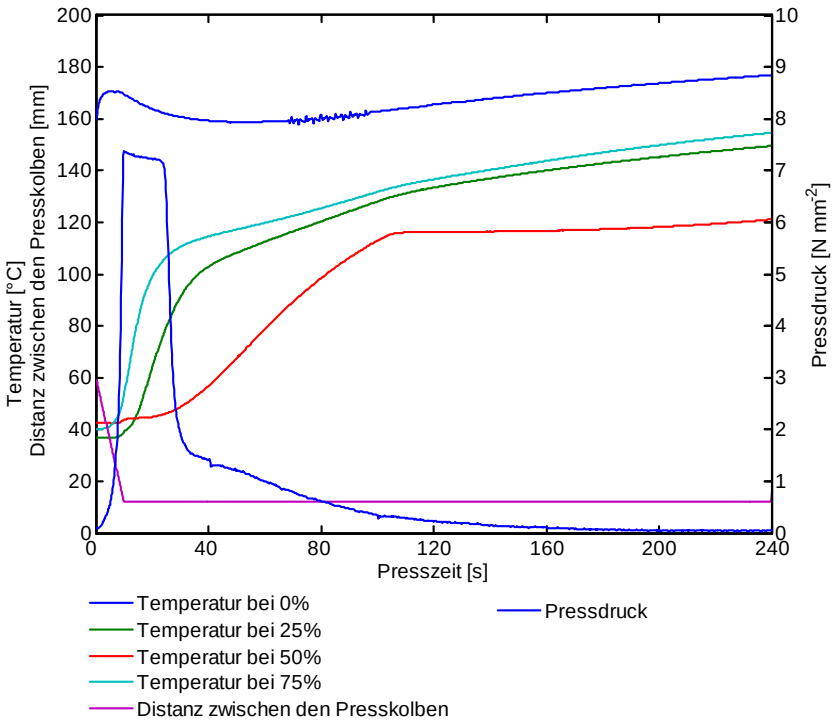


Abb. P- 3: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

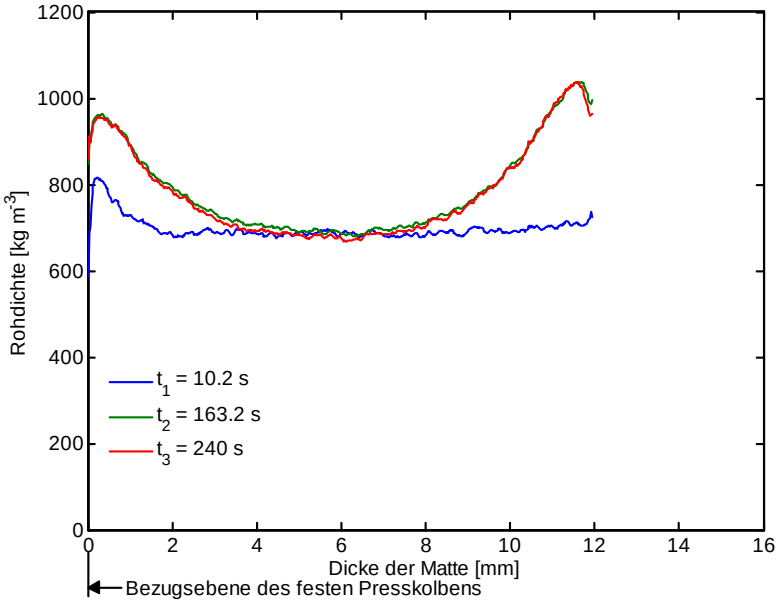


Abb. P- 4: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

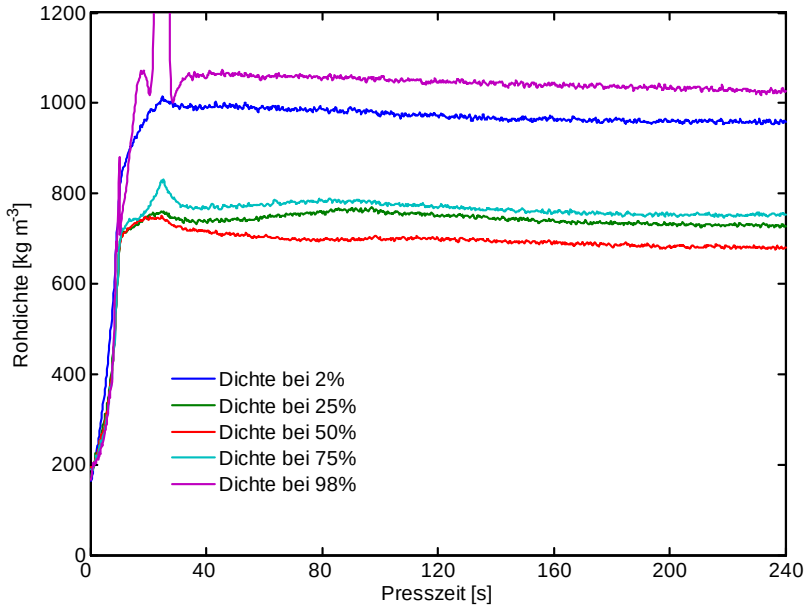


Abb. P- 5: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240.

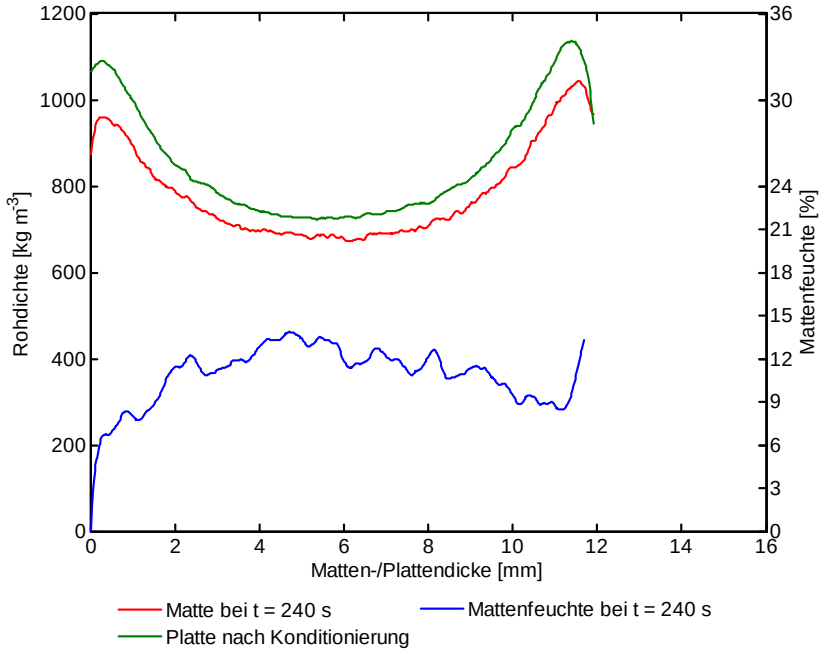


Abb. P- 6: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.2 Platte 12 mm_02_10_100_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,63	gravim.	833,12	gravim.	0,73	radiom.	18,92				
Endwert	18,90		802,14								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	720,34	92,52	radiom.	16,87	radiom.	2,05				
	Endwert	777,89			18,22		0,70				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,37	radiom.	-0,34	gravim.	3,99			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	10,2	0,33	2,79	824,95	114,52	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	30,0	0,29	2,41	1206,58	167,50	1,55	160,75	91,03	48,64	110,51
	Ende	240,0	0,33	2,79	938,06	130,23	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
hinteres Maximum	Beginn	10,2	0,21	1,75	754,90	104,80	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	18,6	0,21	1,75	1488,46	206,63	6,14	164,70	58,96	44,68	95,62
	Ende	240,0	0,60	5,06	1016,44	141,11	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	712,56	98,92			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	72,6	704,33	88,05			0,52	159,70	117,42	91,59	123,21
	Maximum	100,2	715,60	89,50			0,22	162,81	128,10	112,99	131,80
	Ende	240,0	690,67	88,79			0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	10,2	5,01	41,97	748,77	103,95	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	66,2	4,45	37,26	847,06	117,59	0,62	159,06	114,92	85,24	121,40
	Ende	240,0	4,61	38,66	833,46	115,70	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
hinterer GF	Beginn	10,2	5,69	47,73	748,85	103,96	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	58,2	4,00	33,56	851,72	118,24	0,75	158,78	111,71	76,66	119,30
	Ende	240,0	4,09	34,29	829,09	115,10	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	10,2	4,45	37,26	716,97	99,53	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	81,4	1,95	16,34	717,37	99,59	0,40	160,32	120,85	99,48	125,84
	Ende	240,0	2,15	18,06	696,40	96,68	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
hinterer Profilgrund	Beginn	10,2	5,11	42,84	718,63	99,76	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	75,4	1,36	11,41	713,37	99,03	0,49	158,95	118,51	94,24	124,03
	Ende	240,0	1,51	12,65	698,50	96,97	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58

Tab. P- 3:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung Tab. P- 4

Probenname	Platte 12mm_02_10_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	10,2	1,87	15,71	720,34	100,00	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	66,2	2,01	16,81	799,23	110,95	0,62	159,06	114,92	85,24	121,40
	Ende	240,0	1,79	15,01	777,89	107,99	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
hintere Peakbase	Beginn	10,2	3,02	25,31	720,34	100,00	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
erste Haltephase	Maximum	10,2	3,02	24,03	799,23	110,95	6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Ende	240,0	2,44	20,42	777,89	107,99	0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	712,44	98,90			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	10,2	712,44	98,90			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Maximum	30,4	965,61	94,57			1,51	160,67	91,77	48,88	110,72
	Ende	240,0	723,55	93,01			0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	711,12	98,72			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	224,6	686,75	88,20			0,03	175,72	147,97	119,83	152,88
	Maximum	235,4	693,78	89,13			0,03	176,54	149,09	120,67	154,10
	Ende	240,0	693,33	89,13			0,02	176,57	149,56	121,07	154,58
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	10,2	724,67	100,60			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Minimum	10,2	724,67	100,60			6,98	169,17	39,20	43,79	54,46
	Maximum	30,4	962,75	94,29			1,51	160,67	91,77	48,88	110,72
	Ende	240,0	763,29	98,12			0,02	176,57	149,56	121,07	154,58

Tab. P- 4:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

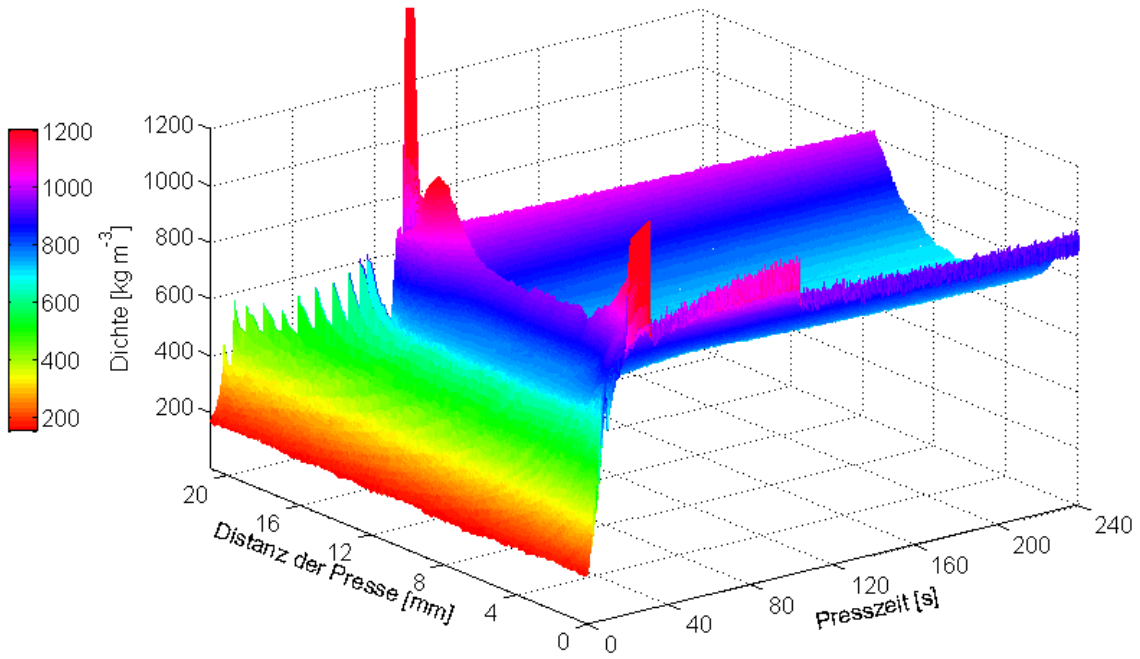


Abb. P- 7: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240.

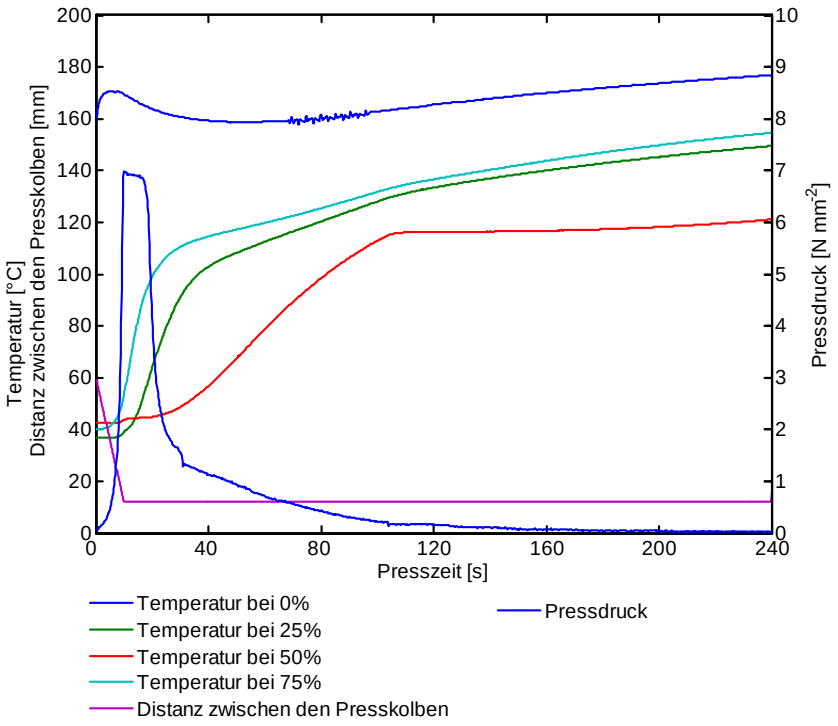


Abb. P- 8: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, , 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

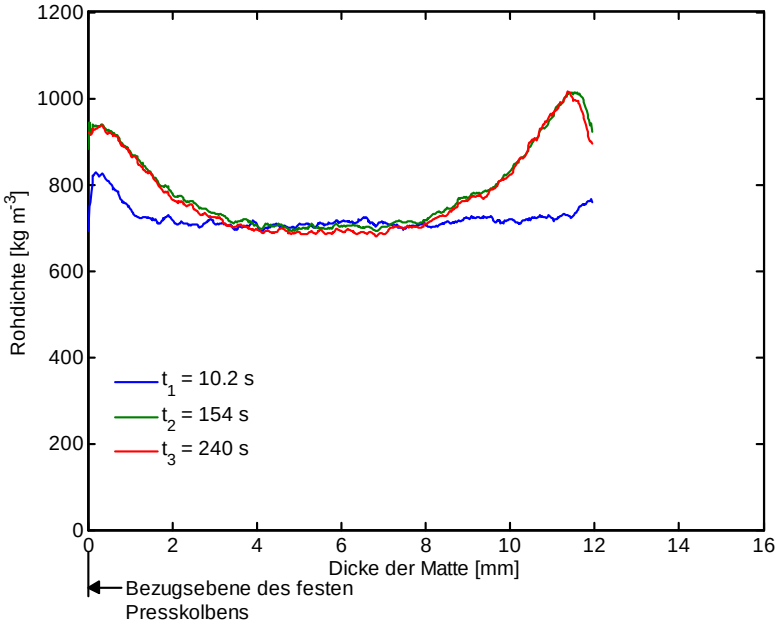


Abb. P- 9: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

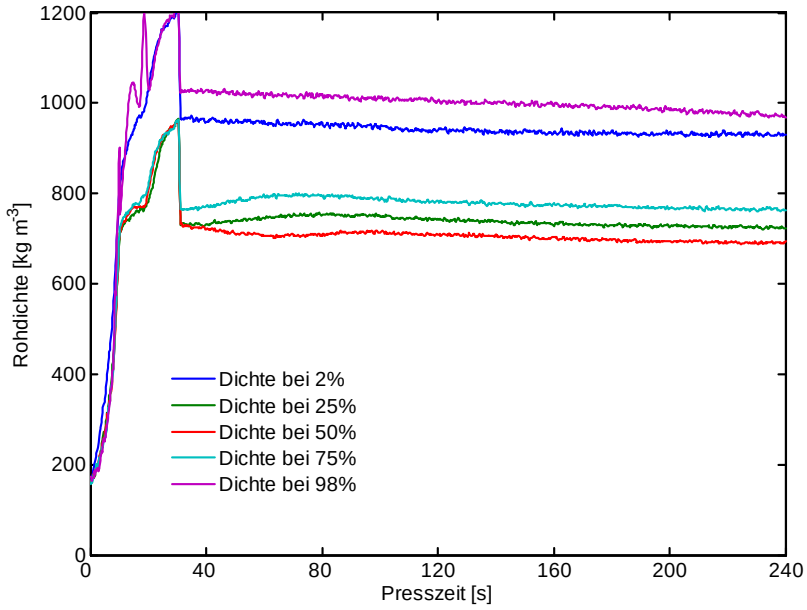


Abb. P- 10: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240.

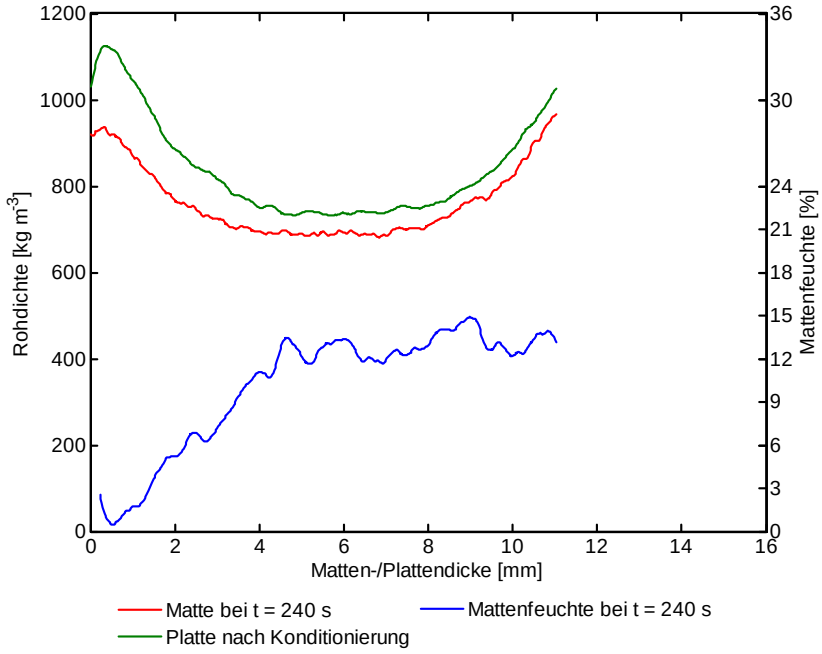


Abb. P- 11: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.3 Platte 12 mm_01_10_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,49	gravim.	827,18	gravim.	0,59	radiom.	16,68				
Endwert	18,90		802,14								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	593,83	91,33	radiom.	15,25	radiom.	1,43				
	Endwert	659,26	101,40		16,93		-0,25				
zweite Haltephase	Startwert	728,10	102,13		17,03		-0,35				
	Endwert	712,93	100,00		16,67		0,01				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,11	radiom.	-8,17	gravim.	3,25			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,25	1,91	703,43	118,46	6,73	180,37	47,78	92,91	
erste Haltephase	Maximum	54,6	0,25	1,91	852,53	143,56	0,79	167,04	117,18	128,40	
	Ende	129,6	0,25	1,91	832,64	140,22	0,19	172,90	141,14	146,11	
hinteres Maximum	Beginn	9,8	0,21	1,59	622,95	104,90	6,73	180,37	47,78	92,91	
erste Haltephase	Maximum	14,0	0,25	1,94	926,62	156,04	4,74	178,96	67,85	107,33	
	Ende	129,6	0,27	2,07	899,37	151,45	0,19	172,90	141,14	146,11	
vorderes Maximum	Beginn	132,0	0,25	2,10	828,48	113,79	1,97	173,67	141,64	146,73	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,33	2,80	820,16	112,64	0,08	182,46	155,10	158,34	
hinteres Maximum	Beginn	132,0	0,31	2,62	921,90	126,62	1,97	173,67	141,64	146,73	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,33	2,80	900,67	123,70	0,08	182,46	155,10	158,34	
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	581,58	97,94			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	84,0	570,74	86,49			0,37	168,76	128,26	137,09	37,41
	Maximum	123,0	583,72	88,24			0,21	173,96	139,92	145,12	56,20
	Ende	129,6	582,00	88,28			0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
zweite Haltephase	Beginn	132,0	698,24	95,90			1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
	Ende	240,0	687,86	96,48			0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,56	42,52	619,37	104,30	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	69,0	5,16	39,46	722,43	121,66	0,59	169,27	122,96	133,11	26,86
	Ende	129,6	5,35	40,92	722,67	121,70	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
hinterer GF	Beginn	9,8	6,33	48,41	616,19	103,76	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	74,6	5,08	38,85	721,16	121,44	0,51	169,10	125,03	134,77	30,85
	Ende	129,6	5,21	39,81	720,61	121,35	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
vorderer GF	Beginn	132,0	5,23	43,88	782,49	107,47	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,16	43,36	760,42	104,44	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
hinterer GF	Beginn	132,0	4,93	41,43	785,51	107,88	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,81	40,38	758,08	104,12	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	5,18	39,65	590,33	99,41	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	101,8	1,24	9,50	590,16	99,38	0,30	170,27	134,08	140,42	49,70
	Ende	129,6	2,14	16,40	594,91	100,18	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	5,75	43,95	589,98	99,35	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	84,2	1,27	9,68	584,76	98,47	0,37	168,88	128,33	137,18	37,01
	Ende	129,6	1,52	11,62	594,09	100,04	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
vorderer Profilgrund	Beginn	132,0	4,52	37,94	711,50	97,72	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,04	25,52	699,56	96,08	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
hinterer Profilgrund	Beginn	132,0	3,28	27,52	710,11	97,53	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,46	20,63	700,46	96,20	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	132,4	[mm]	11,91	[%]	100,00	1,64	173,75	141,73	146,64	55,58
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	132,0	2,08	17,48	687,49	94,21	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,71	22,73	662,86	91,04	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15
vorderes Maximum	Beginn	132,0	2,50	20,98	679,84	93,16	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,56	21,50	662,86	91,04	0,08	182,46	155,10	158,34	5,15

Tab. P- 5:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 6

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	1,39	10,67	593,83	100,00	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	76,2	2,50	19,09	664,41	111,88	0,48	168,79	125,54	135,26	32,94
	Ende	129,6	2,42	18,47	659,26	111,02	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
hintere Peakbase	Beginn	9,8	4,23	32,32	593,83	100,00	6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	10,0	4,34	20,21	664,41	111,88	6,70	179,33	48,58	95,02	16,58
	Ende	129,6	2,25	17,20	659,26	111,02	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
vordere Peakbase	Beginn	132,0	1,15	9,62	728,10	100,00	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	129,6	1,02	8,57	712,93	97,92	0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
hintere Peakbase	Beginn	132,0	1,48	12,41	728,10	100,00	1,97	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	129,6	1,48	12,41	712,93	97,92	0,19	182,46	155,10	158,34	5,15
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	588,52	99,11			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	9,8	588,52	99,11			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Maximum	103,8	637,15	96,48			0,29	170,27	134,73	140,99	50,85
	Ende	129,6	628,42	95,32			0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	585,74	98,64			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	98,8	568,92	86,12			0,32	170,26	133,13	139,91	48,12
	Maximum	123,0	585,10	88,45			0,21	173,96	139,92	145,12	56,20
	Ende	129,6	583,78	88,55			0,19	172,90	141,14	146,11	50,03
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	581,43	97,91			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	9,8	581,43	97,91			6,73	180,37	47,78	92,91	17,00
	Maximum	13,0	632,54	96,94			5,56	181,09	62,98	105,39	14,59
	Ende	129,6	622,95	94,49			0,19	172,90	141,14	146,11	50,03

Tab. P- 6:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

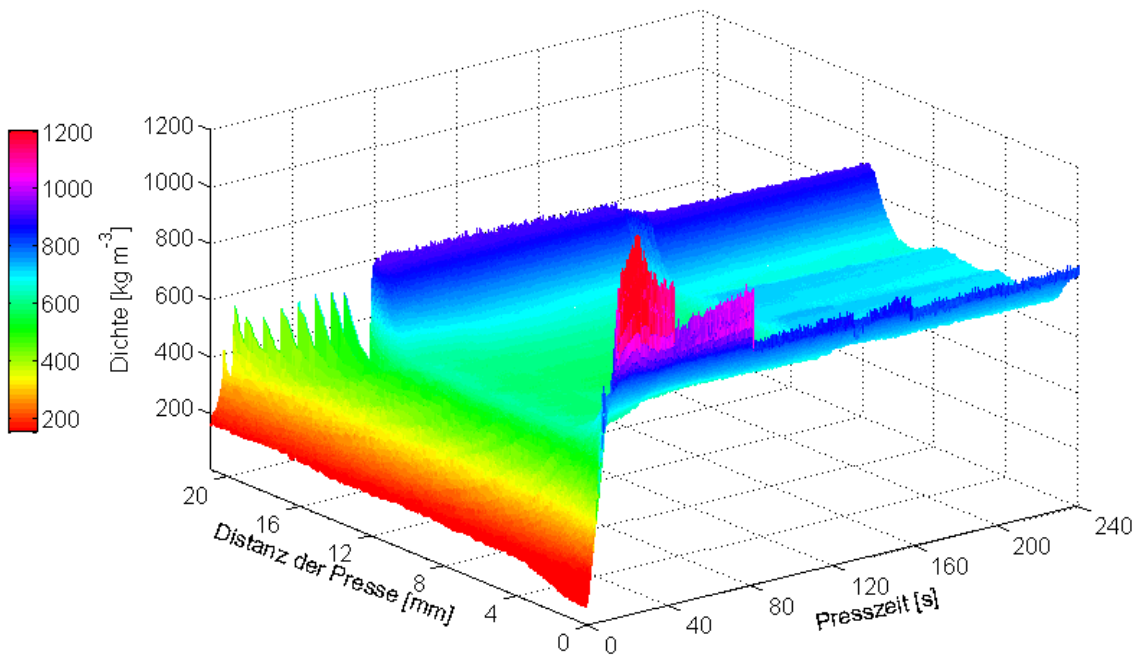


Abb. P- 12: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240.

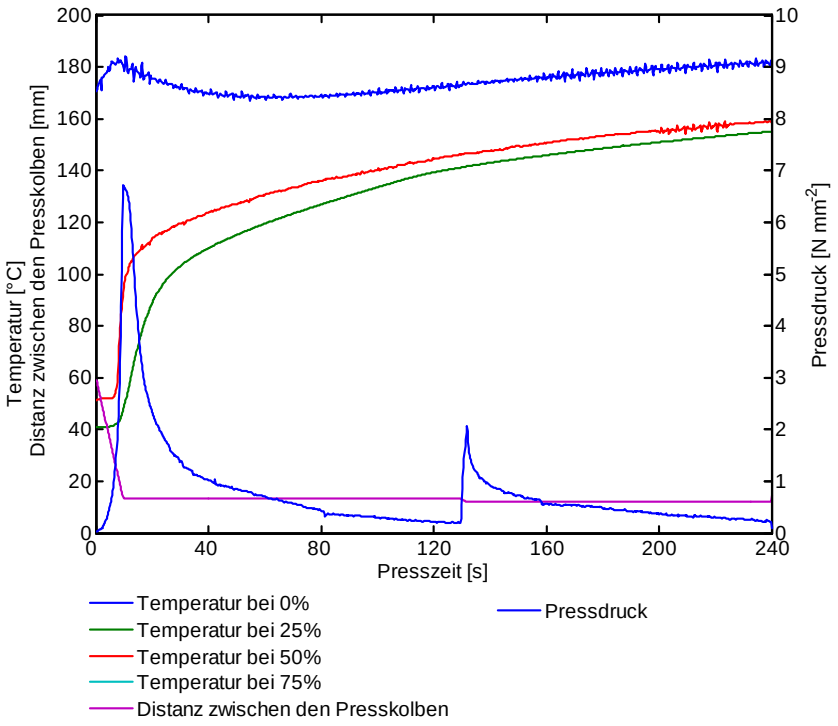


Abb. P- 13: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

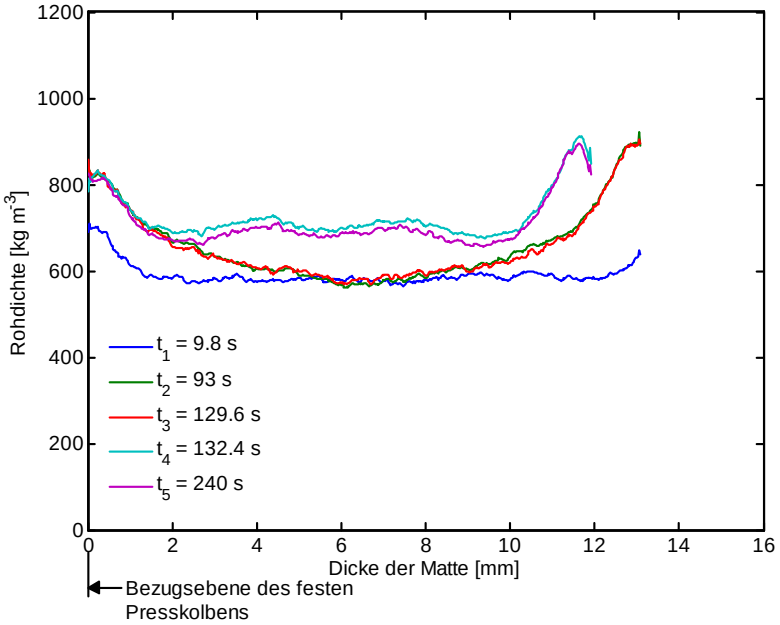


Abb. P- 14: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

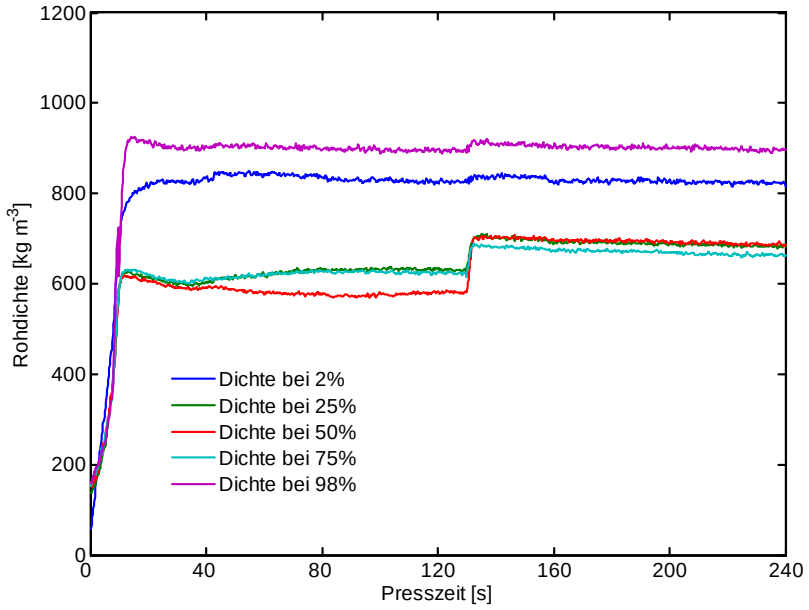


Abb. P- 15: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240.

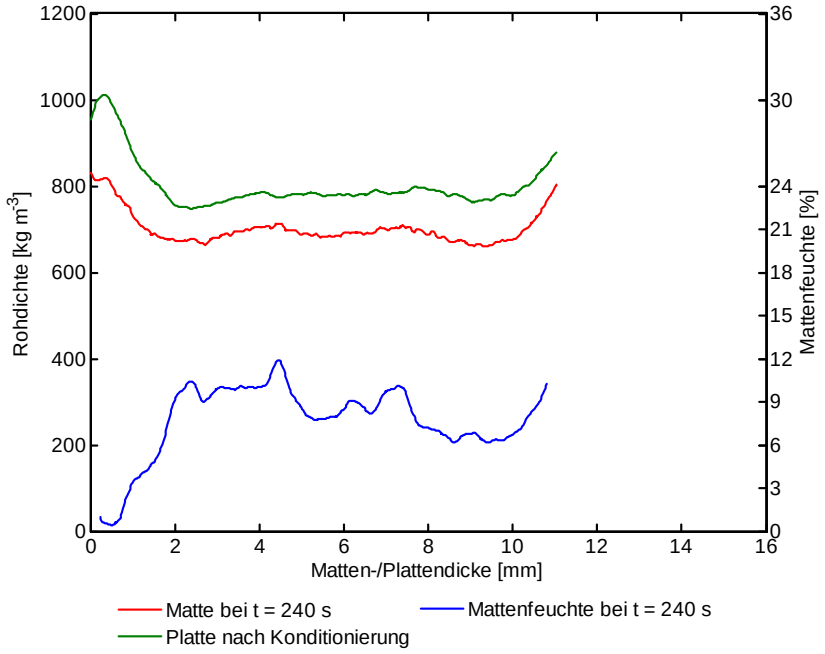


Abb. P- 16: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.4 Platte 12 mm_02_10_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,60	gravim.	831,85	gravim.	0,70	radiom.	19,13				
Endwert	18,90		802,14								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	652,25	93,15	radiom.	16,82	radiom.	2,31				
	Endwert	713,74	101,94		18,41		0,72				
zweite Haltephase	Startwert	771,15	100,26		18,10		1,04				
	Endwert	769,12	100,00		18,05		1,09				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,53	radiom.	-1,14	gravim.	3,83			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,25	1,90	768,48	117,82	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	26,4	0,25	1,90	881,23	135,11	1,32	173,40	99,45	117,46	16,68
	Ende	129,6	0,25	1,90	852,57	130,71	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
hinteres Maximum	Beginn	9,8	0,21	1,58	677,90	103,93	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	13,4	0,25	1,87	932,19	142,92	2,82	175,48	64,96	106,28	15,71
	Ende	129,6	0,27	2,06	909,53	139,45	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
vorderes Maximum	Beginn	132,0	0,25	2,09	852,25	110,52	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,09	854,81	110,85	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
hinteres Maximum	Beginn	132,0	0,25	2,09	914,63	118,61	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,46	3,83	906,04	117,49	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	643,89	98,72			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	67,2	642,52	89,64			0,49	168,55	122,30	132,33	25,76
	Maximum	103,4	654,58	91,24			0,26	169,69	134,61	140,35	51,25
	Ende	129,6	651,00	91,21			0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
zweite Haltephase	Beginn	132,0	758,54	98,36			2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
	Ende	240,0	764,61	99,41			0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,57	42,39	680,71	104,36	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	49,4	5,19	39,54	770,78	118,17	0,69	168,76	114,83	127,04	18,92
	Ende	129,6	5,47	41,60	762,07	116,84	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
hinterer GF	Beginn	9,8	6,36	48,42	675,39	103,55	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	67,2	4,85	36,91	763,55	117,07	0,49	168,55	122,30	132,33	25,76
	Ende	129,6	5,01	38,11	762,68	116,93	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
vorderer GF	Beginn	132,0	5,18	43,38	802,17	104,02	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,12	42,86	796,86	103,33	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
hinterer GF	Beginn	132,0	4,91	41,11	803,22	104,16	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,75	39,72	795,92	103,21	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	5,30	40,33	654,48	100,34	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	80,4	1,65	12,53	657,83	100,86	0,39	168,27	126,99	136,16	34,15
	Ende	129,6	2,53	19,26	662,93	101,64	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	5,99	45,56	654,07	100,28	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	76,6	1,57	11,93	657,14	100,75	0,40	168,80	125,67	135,34	32,65
	Ende	129,6	2,15	16,40	661,48	101,42	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
vorderer Profilgrund	Beginn	132,0	3,08	25,78	768,56	99,66	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,98	16,55	776,24	100,66	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
hinterer Profilgrund	Beginn	132,0	2,39	20,00	768,03	99,60	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,19	18,29	775,16	100,52	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	131,8	[mm]	12,10	[%]	101,22	2,92	173,52	141,59	146,75	55,73
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	132,0	2,58	21,60	732,66	95,01	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,58	21,60	722,83	93,73	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15
vorderes Maximum	Beginn	132,0	2,69	22,47	721,48	93,56	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,81	23,52	722,83	93,73	0,15	182,46	155,10	158,34	5,15

Tab. P- 7:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 8

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	1,77	13,47	652,25	100,00	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	76,0	2,44	18,54	717,53	110,01	0,40	168,72	125,45	135,22	32,50
	Ende	129,6	2,23	16,96	713,74	109,43	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
hintere Peakbase	Beginn	9,8	0,81	6,18	652,25	100,00	6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
erste Haltephase	Maximum	66,8	2,72	20,02	717,53	110,01	0,49	168,54	122,14	132,49	26,50
	Ende	129,6	2,54	19,33	713,74	109,43	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
vordere Peakbase	Beginn	132,0	1,06	8,89	771,15	100,00	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	129,6	1,02	8,54	769,12	99,74	0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
hintere Peakbase	Beginn	132,0	1,58	13,24	771,15	100,00	2,80	173,67	141,64	146,73	56,10
zweite Haltephase	Ende	129,6	1,58	13,24	769,12	99,74	0,16	182,46	155,10	158,34	5,15
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	644,59	98,83			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	9,8	644,59	98,83			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Maximum	79,0	696,32	97,15			0,39	168,59	126,52	135,60	33,97
	Ende	129,6	680,57	95,35			0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	648,80	99,47			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	67,4	640,43	89,32			0,48	168,34	122,37	132,45	26,45
	Maximum	109,0	657,28	91,75			0,24	170,93	136,35	142,16	54,32
	Ende	129,6	648,80	90,90			0,16	172,90	141,14	146,11	50,03
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	650,35	99,71			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Minimum	9,8	650,35	99,71			6,57	180,37	47,78	92,91	17,00
	Maximum	70,8	699,33	97,47			0,45	168,68	123,62	133,67	29,57
	Ende	129,6	685,95	96,11			0,16	172,90	141,14	146,11	50,03

Tab. P- 8:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240. zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

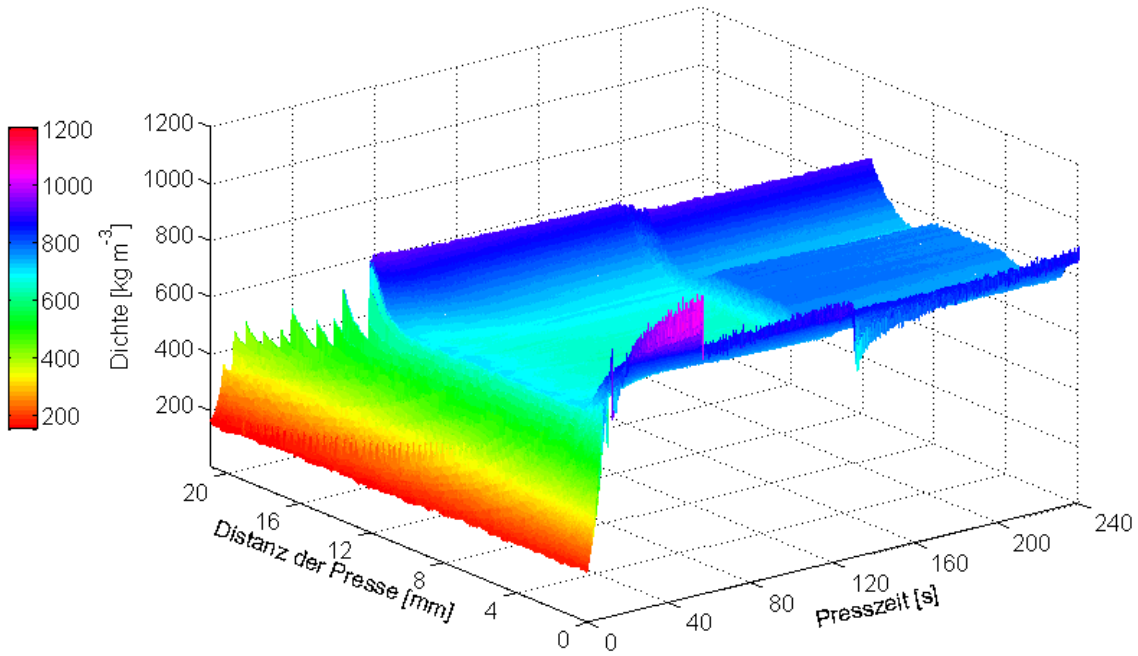


Abb. P- 17: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240

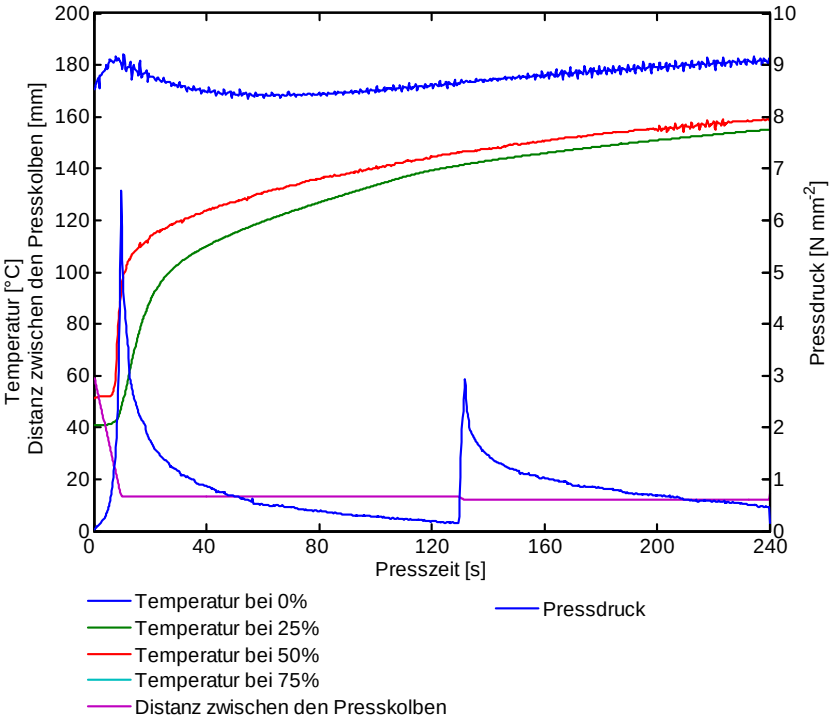


Abb. P- 18: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

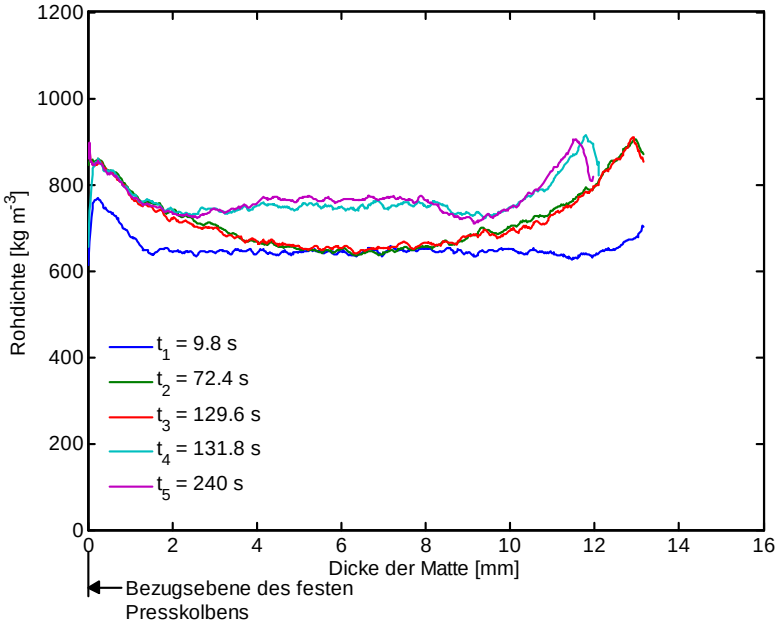


Abb. P- 19: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

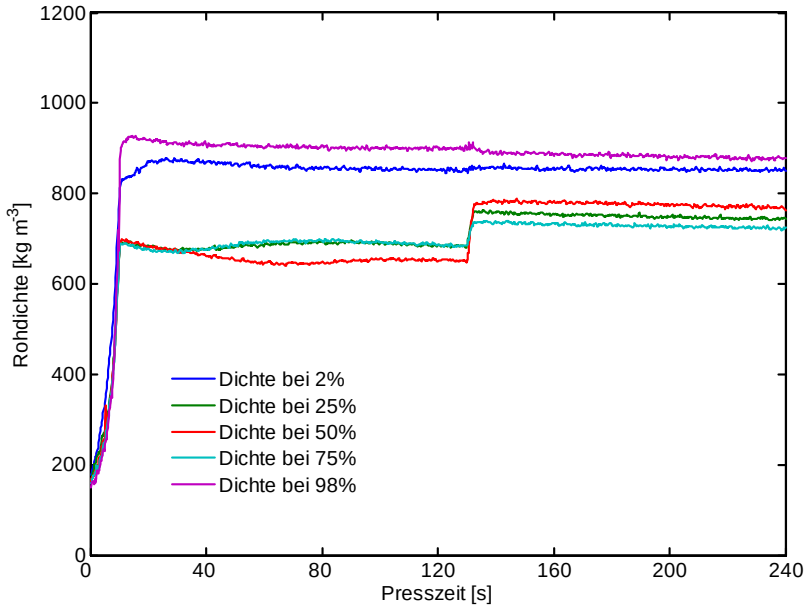


Abb. P- 20: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240.

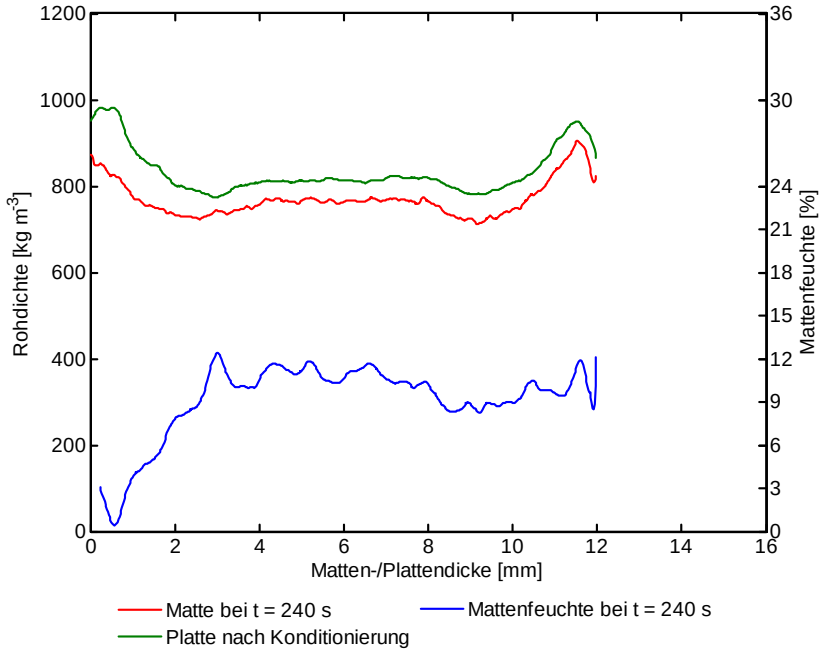


Abb. P- 21: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.5 Platte 12 mm_01_10_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,60	radiom.	22,02				
Endwert	18,90		802,31								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	685,65	92,82	radiom.	17,43	radiom.	4,59				
	Endwert	735,00	99,51		18,69		3,33				
zweite Haltephase	Startwert	812,26	101,32		19,03		3,00				
	Endwert	801,66	100,00		18,78		3,25				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,08	radiom.	3,39	gravim.	3,28			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,25	1,93	816,31	119,06	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	49,8	0,25	1,93	937,10	136,67	0,85	167,66	106,28	78,42	80,66
	Ende	149,6	0,25	1,93	908,44	132,49	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
hinteres Maximum	Beginn	9,8	0,21	1,61	711,43	103,76	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	15,2	0,21	1,61	994,83	145,09	3,40	172,23	61,40	47,36	17,59
	Ende	149,6	0,21	1,61	965,47	140,81	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderes Maximum	Beginn	152,2	0,33	2,79	912,56	112,35	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,09	910,01	112,03	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
hinteres Maximum	Beginn	152,2	0,33	2,79	993,44	122,30	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,35	2,97	985,96	121,38	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	671,74	97,97			6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
	Minimum	149,0	658,78	89,58			0,13	176,28	134,24	115,47	115,91
	Maximum	149,6	659,70	89,76			0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
	Ende	149,6	659,70	89,76			0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
zweite Haltephase	Beginn	152,2	790,39	97,31			2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
	Ende	240,0	783,17	97,69			0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,37	41,48	715,56	104,36	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	68,2	4,86	37,56	806,00	117,55	0,57	168,35	112,11	93,32	94,08
	Ende	149,6	5,10	39,39	796,76	116,21	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
hinterer GF	Beginn	9,8	6,27	48,39	709,18	103,43	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	80,4	4,93	38,04	801,40	116,88	0,44	168,83	116,23	100,70	100,75
	Ende	149,6	5,14	39,71	795,35	116,00	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderer GF	Beginn	152,2	5,15	43,19	854,60	105,21	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,09	42,67	842,44	103,72	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
hinterer GF	Beginn	152,2	4,86	40,75	854,28	105,17	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,84	40,58	844,32	103,95	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	5,08	39,23	680,42	99,24	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	89,6	1,02	7,90	671,06	97,87	0,36	171,46	119,50	105,59	105,27
	Ende	149,6	1,00	7,72	669,43	97,63	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	5,85	45,18	681,58	99,41	6,91	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	78,6	2,00	15,43	673,68	98,25	0,46	169,16	115,64	99,70	99,83
	Ende	149,6	2,02	15,59	670,07	97,73	0,11	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderer Profilgrund	Beginn	152,2	3,78	31,68	801,69	98,70	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,47	20,68	792,08	97,51	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
hinterer Profilgrund	Beginn	152,2	2,25	18,83	794,13	97,77	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,05	17,19	790,40	97,31	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	152,0	[mm]	12,01	[%]	100,70	2,41	177,25	134,84	115,64	116,27
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	152,2	1,92	16,06	762,68	93,90	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,79	23,39	752,42	92,63	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04
vorderes Maximum	Beginn	152,2	2,56	21,47	755,33	92,99	2,18	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,35	19,72	752,42	92,63	0,15	182,56	145,88	122,57	123,04

Tab. P- 9:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 10

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	3,25	25,08	682,06	100,00	6,91	176,37	48,91	46,40	
erste Haltephase	Maximum	9,8	3,25	25,08	682,06	100,00	6,91	176,37	48,91	46,40	
	Ende	149,6	2,56	19,77	731,08	107,19	0,11	176,42	134,35	115,49	
hintere Peakbase	Beginn	9,8	2,81	21,70	682,06	100,00	6,91	176,37	48,91	46,40	
erste Haltephase	Maximum	10,0	2,98	21,70	682,06	100,00	6,89	176,01	49,27	46,51	
	Ende	149,6	2,37	18,33	731,08	107,19	0,11	176,42	134,35	115,49	
vordere Peakbase	Beginn	152,2	1,23	10,30	807,81	100,00	2,18	177,20	134,88	115,64	
zweite Haltephase	Ende	149,6	1,37	11,52	797,28	98,70	0,11	176,42	134,35	115,49	
hintere Peakbase	Beginn	152,2	1,58	13,26	807,81	100,00	2,18	177,20	134,88	115,64	
zweite Haltephase	Ende	149,6	1,56	13,09	797,28	98,70	0,11	182,56	145,88	122,57	
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	683,67	100,24			6,91	176,37	48,91	46,40	
	Minimum	28,2	681,34	93,18			1,46	166,97	92,74	54,58	
	Maximum	91,6	726,08	97,73			0,35	170,56	120,26	106,58	
	Ende	149,6	694,22	94,96			0,11	176,42	134,35	115,49	
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	670,39	98,29			6,91	176,37	48,91	46,40	
	Minimum	143,4	656,15	89,57			0,14	175,86	133,34	115,22	
	Maximum	148,0	664,64	90,78			0,13	176,40	134,07	115,42	
	Ende	149,6	658,13	90,02			0,11	176,42	134,35	115,49	
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	675,51	99,04			6,91	176,37	48,91	46,40	
	Minimum	9,8	675,51	99,04			6,91	176,37	48,91	46,40	
	Maximum	11,8	726,08	98,67			5,56	173,69	52,73	46,91	
	Ende	149,6	704,89	96,42			0,11	176,42	134,35	115,49	

Tab. P- 10:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

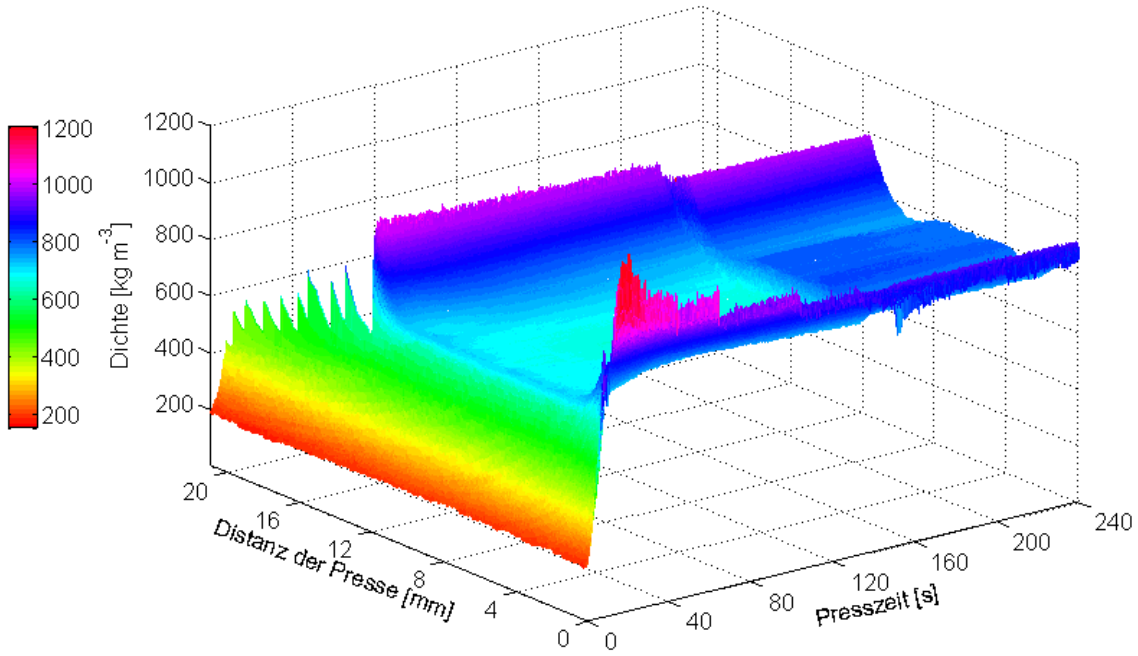


Abb. P- 22: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240.

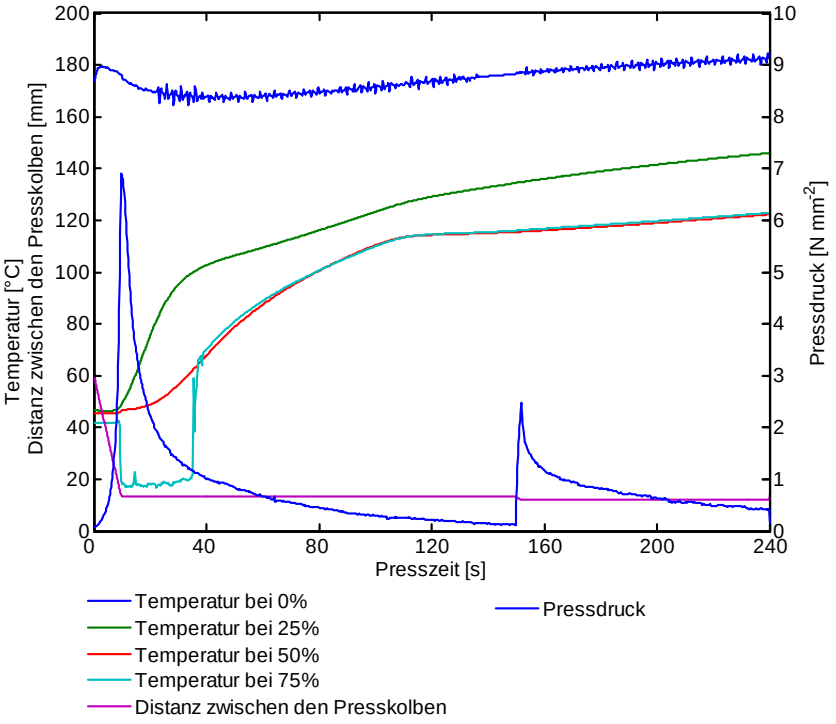


Abb. P- 23: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

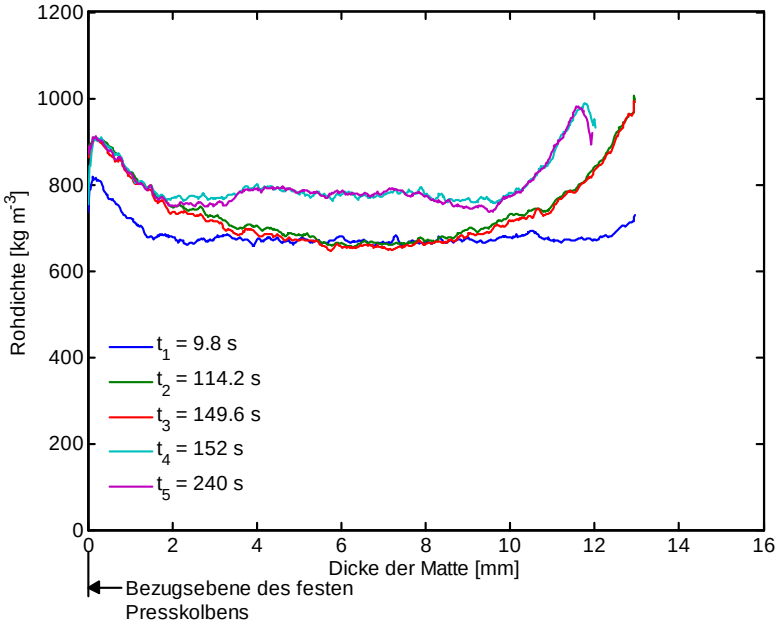


Abb. P- 24: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

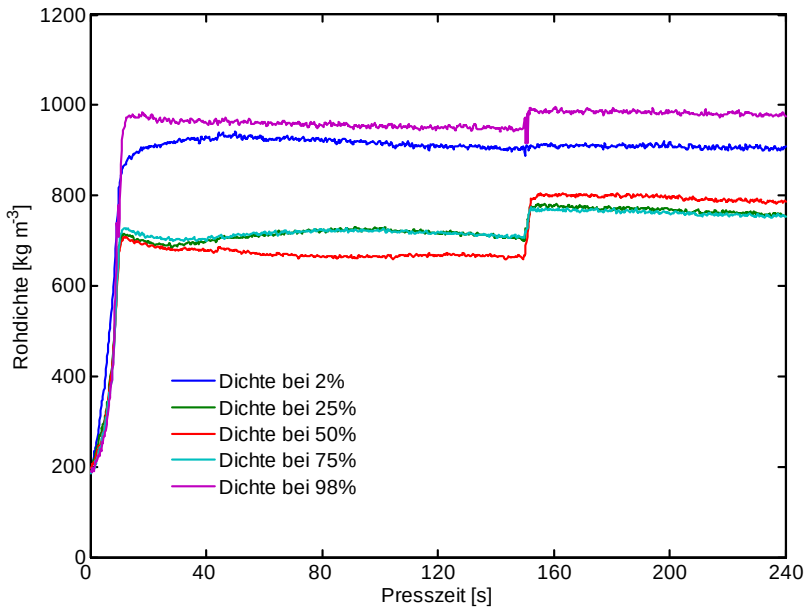


Abb. P- 25: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240.

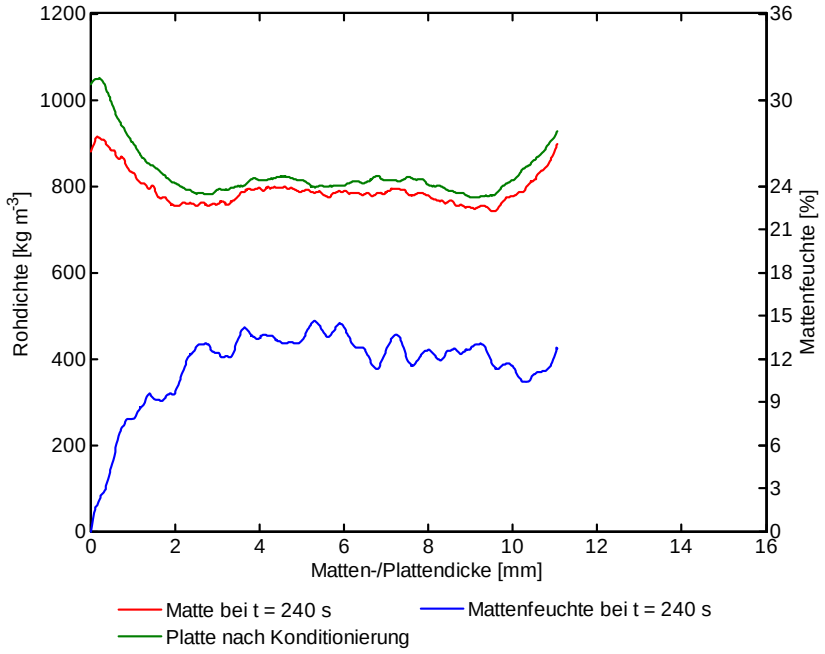


Abb. P- 26: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.6 Platte 12 mm_02_10_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m-3]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,62	gravim.	832,70	gravim.	0,55	radiom.	17,78				
Endwert	19,07		809,27								
mittlere Dichte		[kg m-3]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	813,75	115,03	radiom.	20,82	radiom.	-3,05				
	Endwert	706,99	99,94		18,09		-0,32				
zweite Haltephase	Startwert	780,46	101,36		18,35		-0,57				
	Endwert	769,98	100,00		18,10		-0,32				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,34	radiom.	-0,96	gravim.	3,02			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,29	2,24	937,04	115,15	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	30,0	0,67	5,11	1924,40	236,49	1,33	168,00	95,13	56,37	19,03
	Ende	149,6	0,29	3,19	922,89	113,41	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
hinteres Maximum	Beginn	9,8	1,42	10,86	855,78	105,17	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	30,4	1,44	11,02	1947,60	239,34	1,30	166,30	95,57	56,73	19,69
	Ende	149,6	0,25	1,92	984,97	121,04	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderes Maximum	Beginn	152,2	0,35	2,96	929,53	119,10	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,42	3,48	921,15	118,03	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
hinteres Maximum	Beginn	152,2	0,50	4,17	1004,87	128,75	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,37	3,13	998,97	128,00	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	798,11	98,08			6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
	Minimum	85,0	608,34	86,00			0,50	169,69	117,84	103,23	103,06
	Maximum	147,4	623,01	88,00			0,13	176,27	133,99	115,40	115,81
	Ende	149,6	621,76	87,94			0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
zweite Haltephase	Beginn	152,2	747,35	95,76			1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
	Ende	240,0	738,98	95,97			0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,70	43,77	847,06	104,09	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	58,2	4,59	35,24	928,52	114,10	0,84	167,48	108,86	85,95	87,49
	Ende	149,6	5,21	39,94	781,67	96,06	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
hinterer GF	Beginn	9,8	5,08	38,98	844,43	103,77	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	27,6	4,13	31,73	1633,46	200,73	2,43	169,07	91,87	54,01	17,73
	Ende	149,6	4,98	38,18	783,95	96,34	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderer GF	Beginn	152,2	5,05	42,17	839,43	107,56	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,05	42,17	825,76	105,80	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
hinterer GF	Beginn	152,2	4,51	37,65	839,12	107,52	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,49	37,48	827,27	106,00	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	5,25	40,26	806,00	99,05	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	111,0	1,74	13,31	624,16	76,70	0,30	173,59	126,93	113,64	113,60
	Ende	149,6	1,79	13,74	630,02	77,42	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	4,14	31,79	807,34	99,21	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	80,4	2,30	17,66	619,24	76,10	0,54	168,83	116,23	100,70	100,75
	Ende	149,6	2,66	20,45	631,70	77,63	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
vorderer Profilgrund	Beginn	152,2	2,30	19,22	756,53	96,93	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,26	18,87	743,56	95,27	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
hinterer Profilgrund	Beginn	152,2	1,67	13,97	753,44	96,54	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,22	10,17	746,32	95,63	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,4	[mm]	12,30	[%]	102,78	1,78	176,82	134,78	115,67	116,22
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	152,2	2,73	22,78	709,49	90,91	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,69	22,43	693,03	88,80	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04
vorderes Maximum	Beginn	152,2	3,27	27,30	714,62	91,56	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,29	27,48	693,03	88,80	0,09	182,56	145,88	122,57	123,04

Tab. P- 11:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 12

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	1,10	8,47	813,75	100,00	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	62,6	2,78	21,35	791,00	97,20	0,77	168,15	110,28	89,36	90,56
	Ende	149,6	2,00	15,34	706,99	86,88	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
hintere Peakbase	Beginn	9,8	5,00	38,34	813,75	100,00	6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
erste Haltephase	Maximum	28,4	5,81	15,74	791,00	97,20	1,87	164,55	93,02	54,76	18,58
	Ende	149,6	2,37	18,21	706,99	86,88	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
vordere Peakbase	Beginn	152,2	1,23	10,26	780,46	100,00	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	149,6	1,25	10,43	769,98	98,66	0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
hintere Peakbase	Beginn	152,2	1,87	15,65	780,46	100,00	1,71	177,20	134,88	115,64	116,28
zweite Haltephase	Ende	149,6	1,87	15,65	769,98	98,66	0,14	182,56	145,88	122,57	123,04
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	in [kg m-3	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	783,95	96,34			6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
	Minimum	76,0	649,61	91,78			0,58	169,35	114,76	98,21	98,49
	Maximum	101,0	666,76	94,13			0,38	171,74	123,62	110,74	110,31
	Ende	149,6	658,24	93,10			0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	in [kg m-3	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	799,88	98,30			6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
	Minimum	82,4	606,54	85,72			0,55	168,49	116,96	101,82	101,80
	Maximum	146,2	626,06	88,41			0,15	176,24	133,80	115,36	115,74
	Ende	149,6	623,14	88,14			0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m-3]	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	825,05	101,39			6,31	176,37	48,91	46,40	19,29
	Minimum	139,4	652,58	92,09			0,16	175,63	132,71	115,07	115,45
	Maximum	149,6	659,54	93,29			0,14	176,42	134,35	115,49	115,92
	Ende	149,6	659,54	93,29			0,14	176,42	134,35	115,49	115,92

Tab. P- 12:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

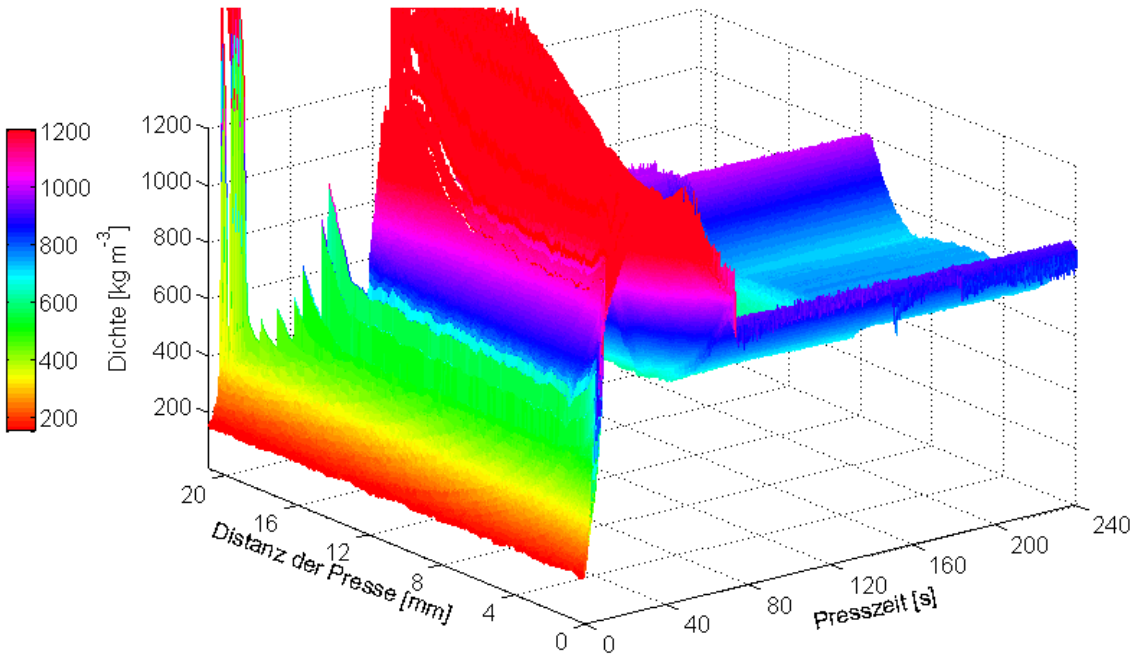


Abb. P- 27: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240.

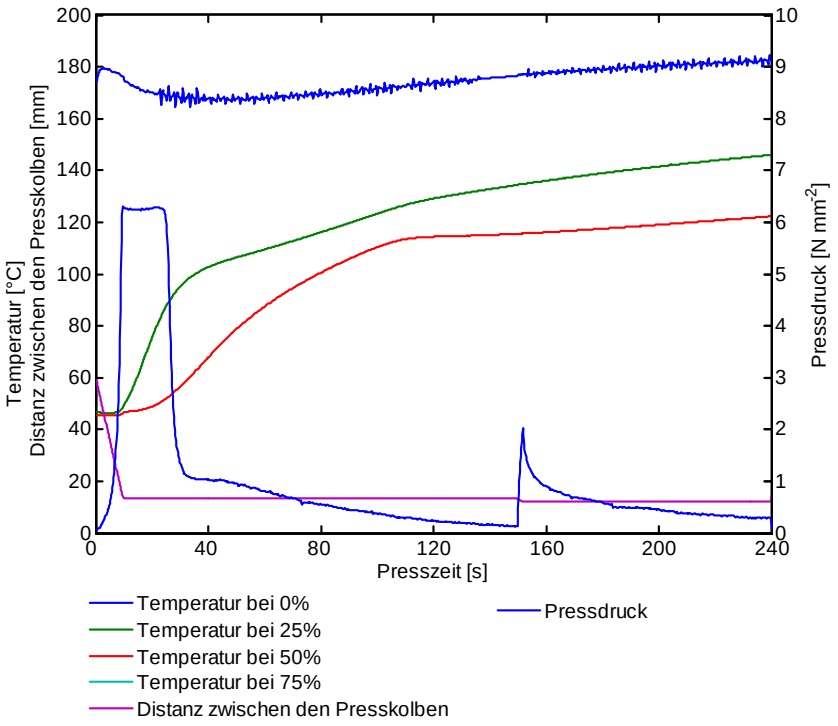


Abb. P- 28: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

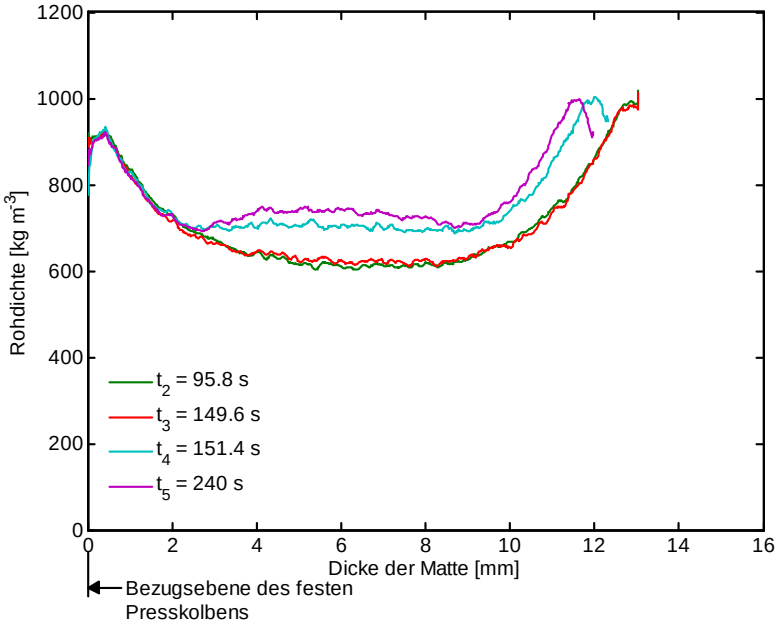


Abb. P- 29: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

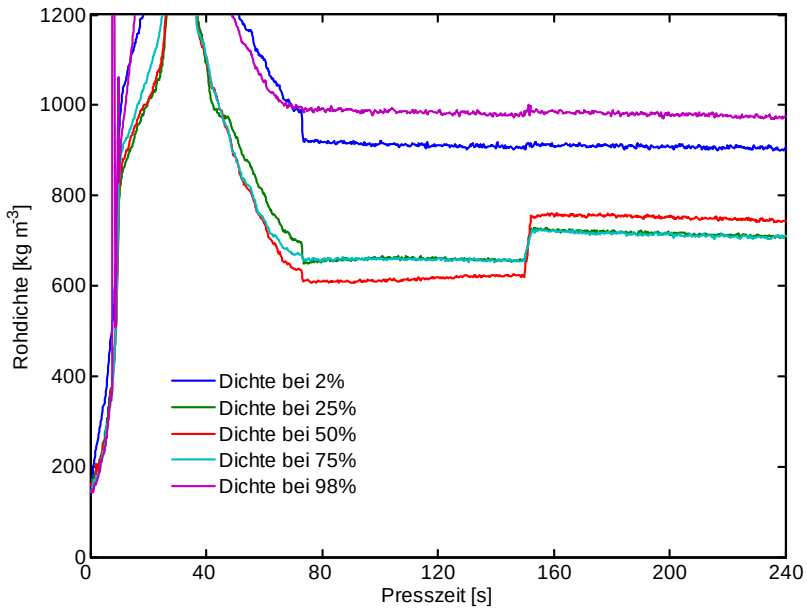


Abb. P- 30: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240.

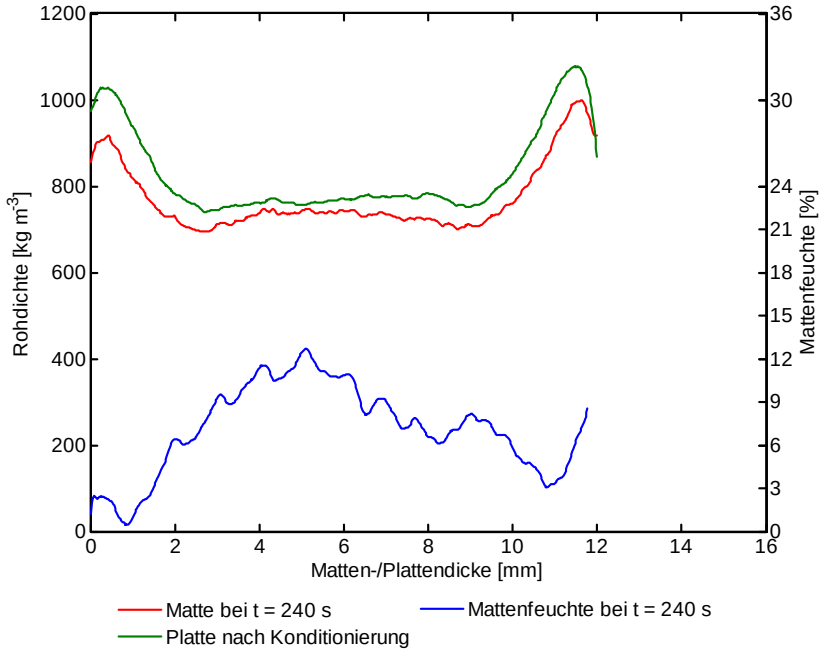


Abb. P- 31: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.7 Platte 12 mm_01_10_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,42	gravim.	824,21	gravim.	0,67	radiom.	20,67				
Endwert	18,75		795,77								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	670,43	95,16	radiom.	17,24	radiom.	3,43				
	Endwert	711,75	101,02		18,30		2,37				
zweite Haltephase	Startwert	776,29	100,20		18,15		2,52				
	Endwert	774,71	100,00		18,12		2,56				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,66	radiom.	0,15	gravim.	3,70			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,31	2,38	770,87	114,98	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	51,0	0,33	2,51	879,58	131,20	0,64	158,77	80,09	34,48	88,95
	Ende	169,6	0,31	2,70	850,33	126,83	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
hinteres Maximum	Beginn	9,8	0,21	1,59	769,72	114,81	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	19,8	0,25	1,91	955,14	142,47	1,75	163,77	37,35	34,80	49,84
	Ende	169,6	0,25	1,91	931,68	138,97	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderes Maximum	Beginn	172,0	0,25	2,10	853,96	110,00	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,29	2,45	861,83	111,02	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
hinteres Maximum	Beginn	172,0	0,48	4,02	942,98	121,47	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,35	2,97	938,96	120,95	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	657,36	98,05			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Minimum	167,6	647,45	90,96			0,09	170,55	120,20	127,00	124,90
	Maximum	169,0	649,41	91,22			0,09	170,70	120,35	126,21	125,05
	Ende	169,6	648,92	91,17			0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
zweite Haltephase	Beginn	172,0	774,29	99,74			2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
	Ende	240,0	782,12	100,96			0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,90	45,07	710,42	105,96	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	45,4	5,22	39,83	782,85	116,77	0,76	159,21	75,45	34,32	85,91
	Ende	169,6	5,51	42,05	767,95	114,55	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
hinterer GF	Beginn	9,8	6,09	46,50	712,05	106,21	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	61,6	4,72	36,07	783,40	116,85	0,55	158,36	86,63	34,26	93,37
	Ende	169,6	5,07	38,71	767,15	114,43	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderer GF	Beginn	172,0	5,31	44,58	809,86	104,32	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,18	43,53	802,74	103,41	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
hinterer GF	Beginn	172,0	4,71	39,51	809,47	104,27	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,60	38,64	806,00	103,83	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	5,47	41,73	667,04	99,50	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	90,0	1,87	14,32	665,30	99,23	0,29	160,13	99,05	38,76	103,01
	Ende	169,6	2,47	18,84	659,48	98,37	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	5,24	39,98	666,62	99,43	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	84,6	1,90	14,48	665,23	99,22	0,35	159,62	96,93	36,47	101,26
	Ende	169,6	2,36	18,04	659,34	98,35	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderer Profilgrund	Beginn	172,0	2,06	17,31	783,40	100,92	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,81	15,21	785,97	101,25	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
hinterer Profilgrund	Beginn	172,0	1,50	12,59	782,49	100,80	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,37	11,54	787,44	101,44	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	171,2	[mm]	12,43	[%]	104,37	2,43	171,15	120,67	161,72	125,47
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	172,0	2,91	24,48	727,32	93,69	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,42	20,28	719,42	92,67	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75
vorderes Maximum	Beginn	172,0	3,21	26,92	716,03	92,24	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,16	26,57	719,42	92,67	0,24	178,73	127,73	33,21	133,75

Tab. P- 13:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 14

Probenname	Platte 12mm_01_10_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	1,19	9,06	670,43	100,00	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	80,0	2,72	20,77	727,65	108,54	0,38	159,27	95,03	35,07	99,69
	Ende	169,6	2,04	15,58	711,75	106,16	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
hintere Peakbase	Beginn	9,8	4,93	37,68	670,43	100,00	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	9,8	4,93	20,17	727,65	108,54	6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Ende	169,6	2,56	19,55	711,75	106,16	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
vordere Peakbase	Beginn	172,0	1,00	8,39	776,29	100,00	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	169,6	0,87	7,34	774,71	99,80	0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
hintere Peakbase	Beginn	172,0	1,79	15,03	776,29	100,00	2,94	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	169,6	1,85	15,56	774,71	99,80	0,08	178,73	127,73	33,21	133,75
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	662,58	98,83			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Minimum	9,8	662,58	98,83			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Maximum	85,4	705,64	97,02			0,32	159,77	97,25	36,48	101,52
	Ende	169,6	677,11	95,13			0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	667,61	99,58			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Minimum	168,6	642,27	90,14			0,09	170,59	120,31	126,62	125,00
	Maximum	169,0	648,33	91,07			0,09	170,70	120,35	126,21	125,05
	Ende	169,6	646,13	90,78			0,08	170,87	120,43	125,42	125,13
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	653,19	97,43			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Minimum	9,8	653,19	97,43			6,57	171,10	30,41	31,19	31,33
	Maximum	73,0	711,19	97,64			0,45	158,71	92,03	33,96	97,37
	Ende	169,6	688,74	96,77			0,08	170,87	120,43	125,42	125,13

Tab. P- 14:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

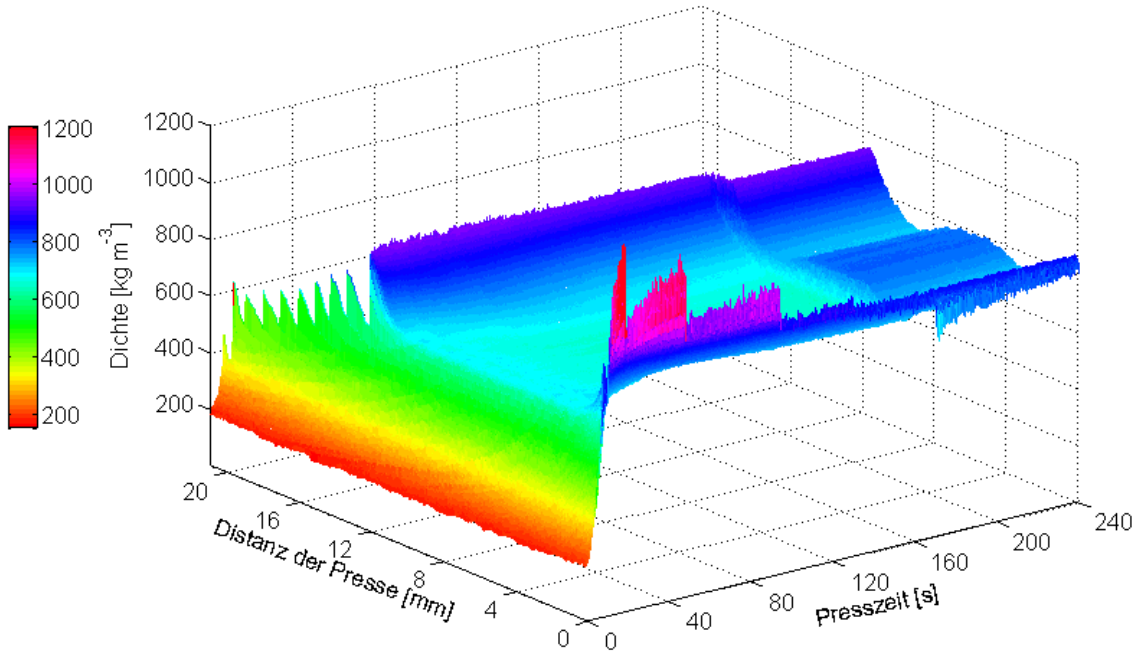


Abb. P- 32: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240.

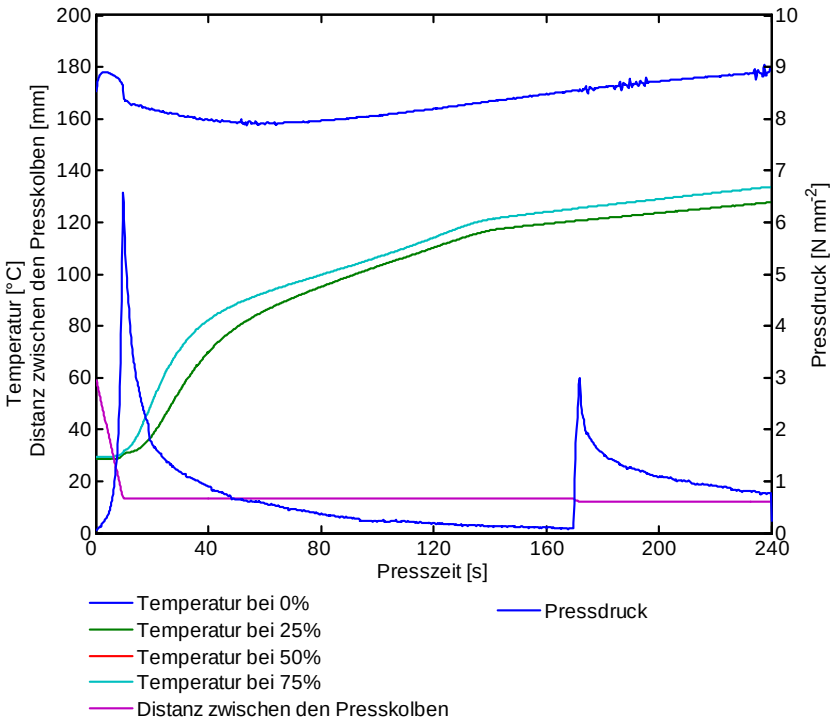


Abb. P- 33: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

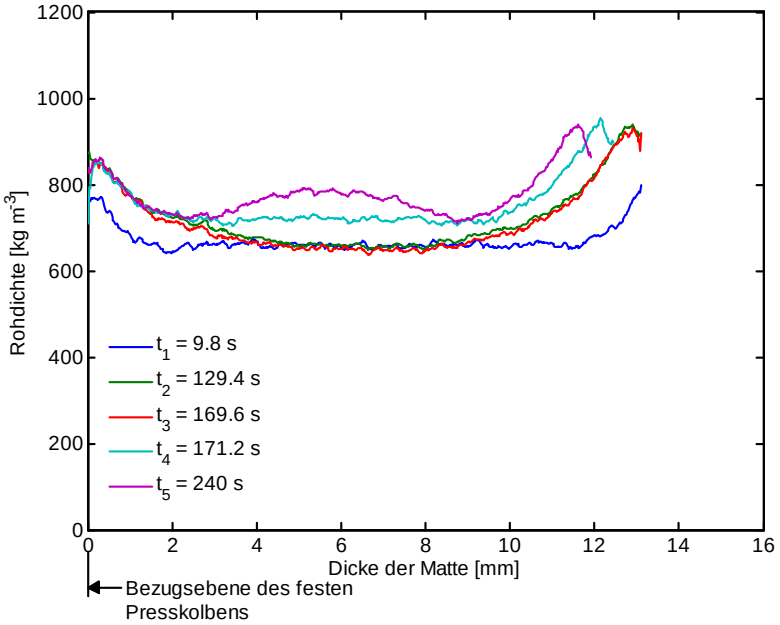


Abb. P- 34: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

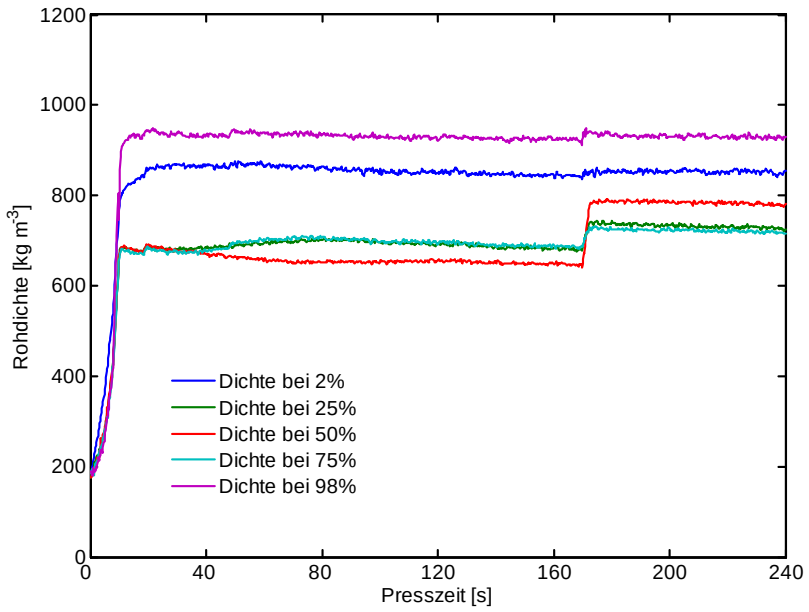


Abb. P- 35: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240.

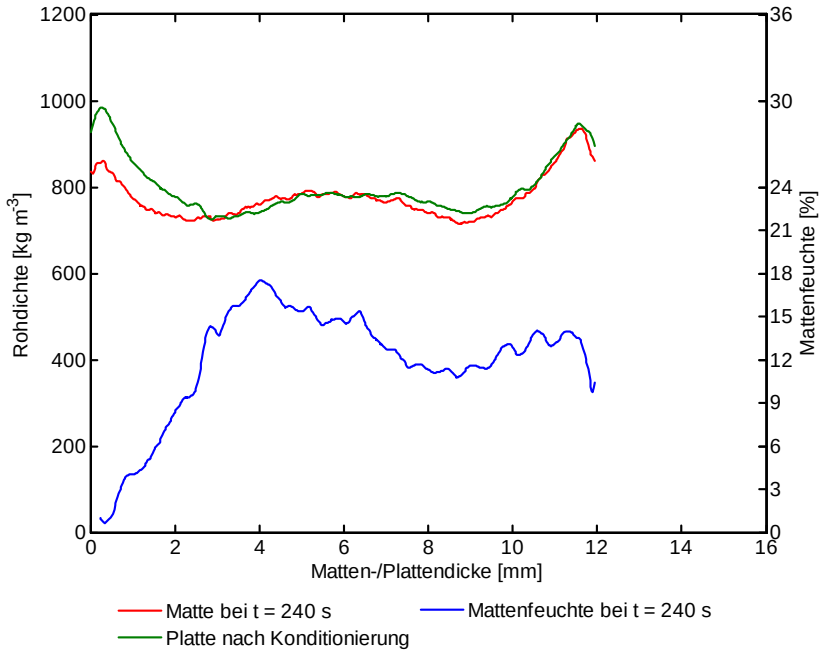


Abb. P- 36: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.8 Platte 12 mm_02_10_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,70	radiom.	18,66				
Endwert	18,80		797,98								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	669,05	95,63	radiom.	17,20	radiom.	1,46				
	Endwert	705,92	100,91		18,15		0,51				
zweite Haltephase	Startwert	765,98	99,71		17,94		0,72				
	Endwert	768,23	100,00		18,00		0,67				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,52	radiom.	-0,93	gravim.	3,84			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,8	0,25	1,91	790,22	118,11	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	32,8	0,27	2,07	877,45	131,15	1,00	160,99	59,91	34,51	75,01
	Ende	169,6	0,25	1,91	846,53	126,53	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
hinteres Maximum	Beginn	9,8	0,23	1,75	734,87	109,84	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	13,8	0,23	1,78	939,43	140,41	2,86	165,74	31,68	31,79	35,79
	Ende	169,6	0,25	1,91	895,13	133,79	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderes Maximum	Beginn	172,0	0,25	2,09	856,42	111,81	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,29	2,44	855,46	111,68	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
hinteres Maximum	Beginn	172,0	0,25	2,09	915,85	119,57	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,37	3,14	912,31	119,10	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	653,16	97,63			6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
	Minimum	169,0	637,34	90,24			0,08	170,70	120,35	126,21	125,05
	Maximum	169,6	639,35	90,57			0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
	Ende	169,6	639,35	90,57			0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
zweite Haltephase	Beginn	172,0	765,86	99,99			3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
	Ende	240,0	776,64	101,09			0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,8	5,59	42,69	707,56	105,76	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	63,4	4,97	37,95	762,59	113,98	0,50	158,46	87,59	34,87	94,06
	Ende	169,6	5,24	39,98	753,95	112,69	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
hinterer GF	Beginn	9,8	6,09	46,50	707,41	105,73	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	53,6	4,65	35,50	765,13	114,36	0,63	157,61	81,90	33,53	90,15
	Ende	169,6	4,97	37,92	752,25	112,44	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderer GF	Beginn	172,0	5,07	42,50	798,94	104,30	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,97	41,62	794,04	103,66	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
hinterer GF	Beginn	172,0	4,65	39,01	796,29	103,96	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,55	38,13	794,88	103,77	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,8	4,90	37,44	666,34	99,60	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	86,0	1,21	9,21	653,26	97,64	0,29	159,76	97,47	36,73	101,67
	Ende	169,6	2,40	18,36	648,94	96,99	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
hinterer Profilgrund	Beginn	9,8	5,53	42,21	667,04	99,70	6,51	171,10	30,41	31,19	31,33
erste Haltephase	Maximum	84,0	1,94	14,83	652,85	97,58	0,29	159,55	96,67	36,55	101,00
	Ende	169,6	2,47	18,84	648,74	96,96	0,09	170,87	120,43	125,42	125,13
vorderer Profilgrund	Beginn	172,0	1,80	15,10	772,38	100,84	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,72	14,40	784,41	102,41	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
hinterer Profilgrund	Beginn	172,0	1,18	9,86	774,44	101,10	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,13	9,51	785,51	102,55	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	171,2	[mm]	12,45	[%]	104,36	2,56	171,15	120,67	161,72	125,47
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	172,0	2,85	23,91	715,56	93,42	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,04	25,48	709,41	92,62	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75
vorderes Maximum	Beginn	172,0	2,69	22,51	709,03	92,57	3,16	171,59	120,75	195,58	125,60
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,66	22,34	709,41	92,62	0,27	178,73	127,73	33,21	133,75

Tab. P- 15:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 16

Probenname	Platte 12mm_02_10_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,8	5,48	41,81	669,05	100,00	6,51	171,10	30,41		31,33
erste Haltephase	Maximum	9,8	5,48	41,81	669,05	100,00	6,51	171,10	30,41		31,33
	Ende	169,6	2,27	17,33	705,92	105,51	0,09	170,87	120,43		125,13
hintere Peakbase	Beginn	9,8	1,27	9,70	669,05	100,00	6,51	171,10	30,41		31,33
erste Haltephase	Maximum	67,0	2,71	9,70	669,05	100,00	0,45	158,47	89,33		95,33
	Ende	169,6	2,39	18,28	705,92	105,51	0,09	170,87	120,43		125,13
vordere Peakbase	Beginn	172,0	1,27	10,65	765,98	100,00	3,16	171,59	120,75		125,60
zweite Haltephase	Ende	169,6	1,19	9,95	768,23	100,29	0,09	170,87	120,43		125,13
hintere Peakbase	Beginn	172,0	1,58	13,26	765,98	100,00	3,16	171,59	120,75		125,60
zweite Haltephase	Ende	169,6	1,64	13,79	768,23	100,29	0,09	178,73	127,73		133,75
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	660,37	98,70			6,51	171,10	30,41		31,33
	Minimum	9,8	660,37	98,70			6,51	171,10	30,41		31,33
	Maximum	74,2	692,96	96,31			0,38	158,81	92,58		97,76
	Ende	169,6	675,39	95,68			0,09	170,87	120,43		125,13
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	651,36	97,36			6,51	171,10	30,41		31,33
	Minimum	74,6	629,77	87,54			0,36	158,81	92,75		97,91
	Maximum	109,0	644,46	90,23			0,23	162,39	106,15		109,71
	Ende	169,6	637,21	90,27			0,09	170,87	120,43		125,13
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,8	658,86	98,48			6,51	171,10	30,41		31,33
	Minimum	9,8	658,86	98,48			6,51	171,10	30,41		31,33
	Maximum	73,8	714,00	99,17			0,37	158,86	92,47		97,69
	Ende	169,6	688,37	97,51			0,09	170,87	120,43		125,13

Tab. P- 16:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

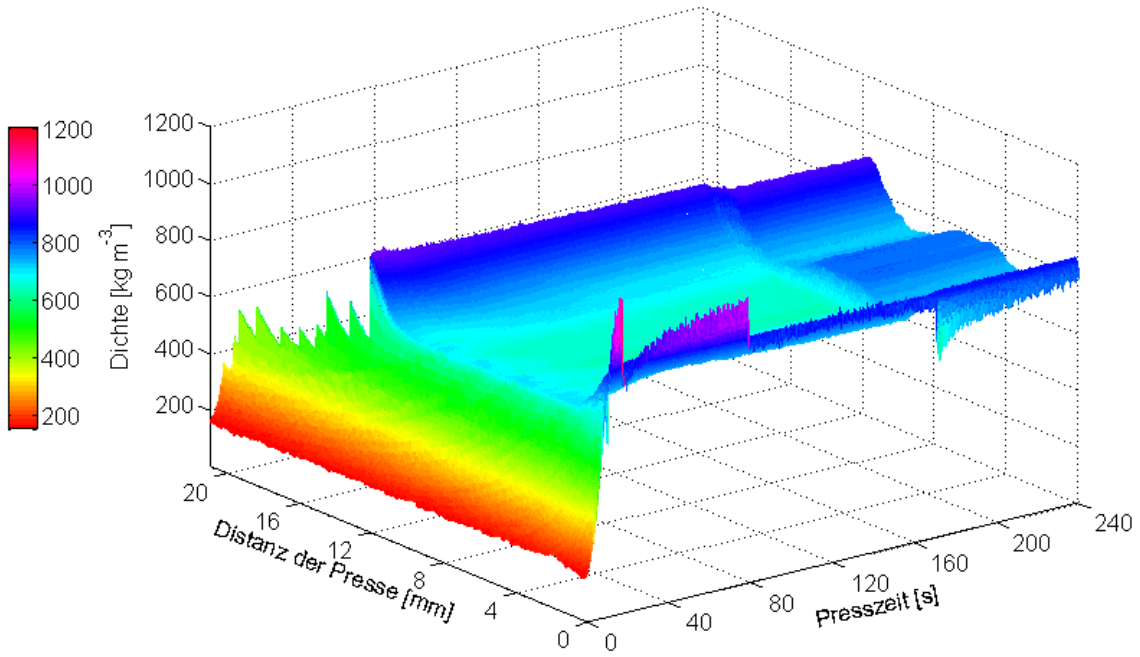


Abb. P- 37: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240.

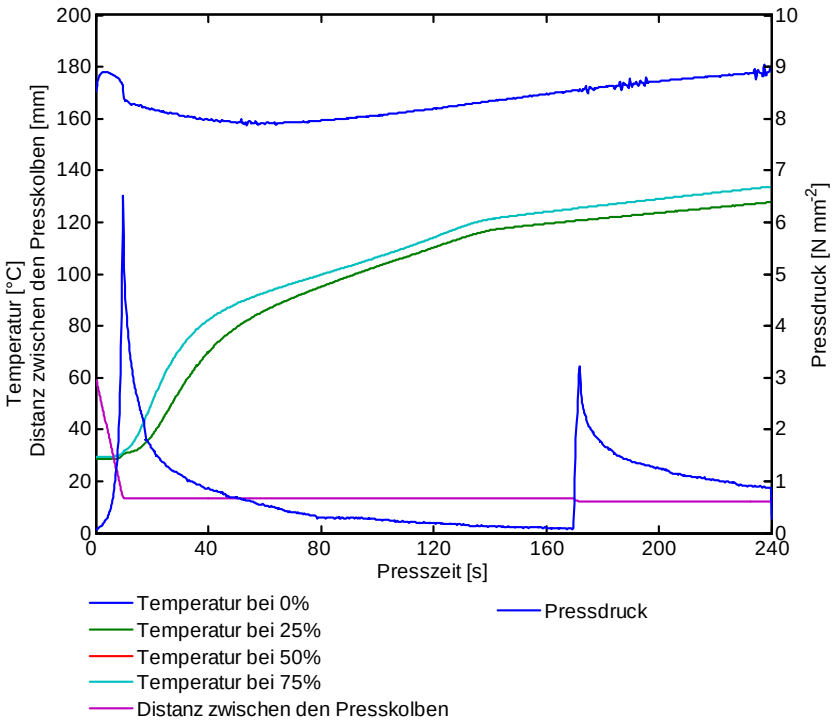


Abb. P- 38: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

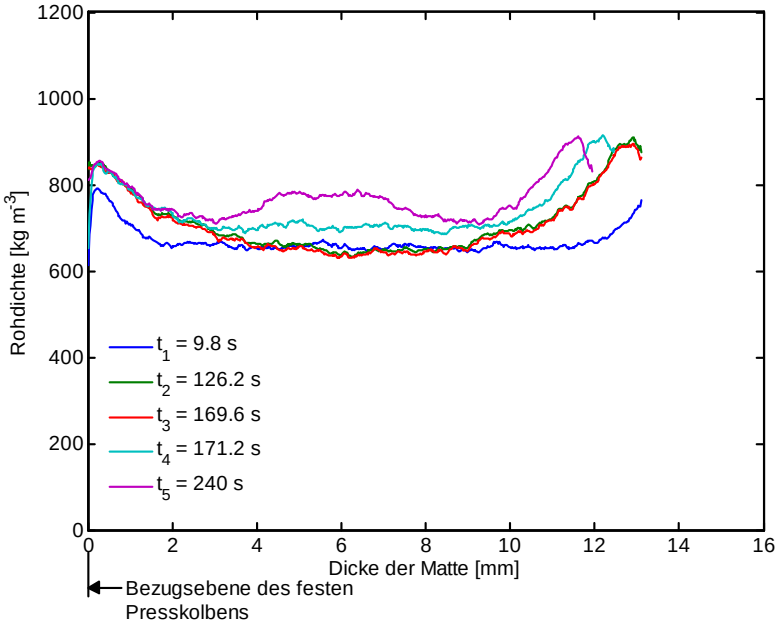


Abb. P- 39: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

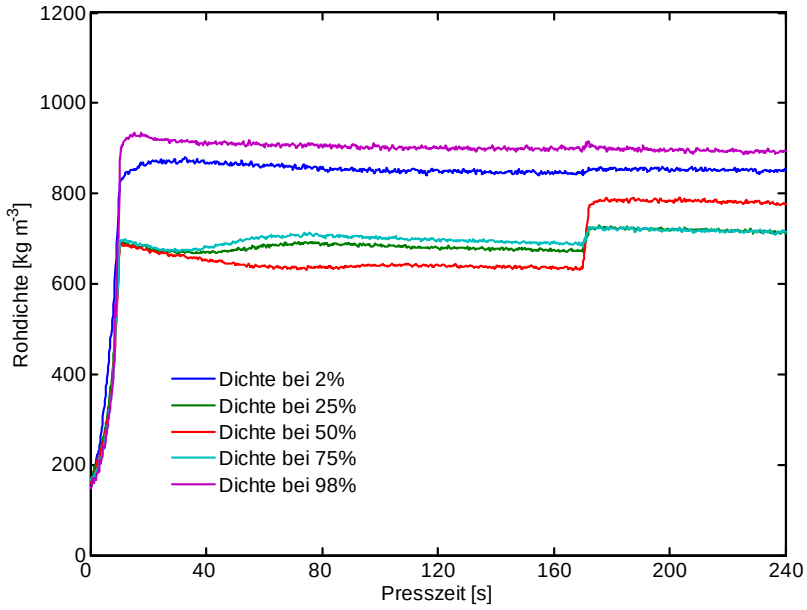


Abb. P- 40: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240.

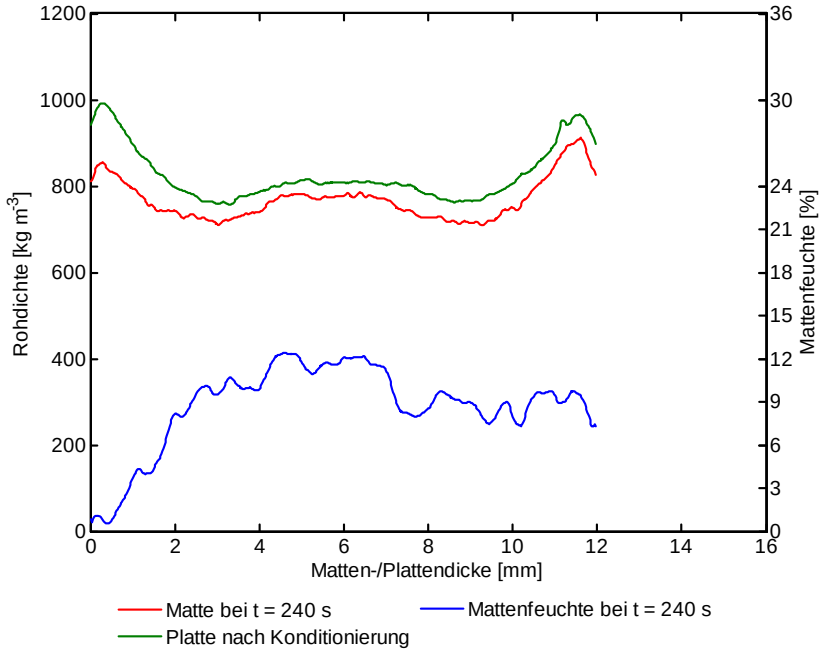


Abb. P- 41: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.9 Platte 12 mm_01_10_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,47	gravim.	826,33	gravim.	0,18	radiom.	20,77				
Endwert	19,29		818,69								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	623,64	91,85	radiom.	17,16	radiom.	3,61				
	Endwert	668,29	98,42		18,39		2,38				
zweite Haltephase	Startwert	798,15	98,76		18,44		2,34				
	Endwert	808,20	100,00		18,67		2,10				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	6,37	radiom.	2,93	gravim.	0,99			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,25	1,78	719,97	115,45	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	56,6	0,27	1,90	809,51	129,80	0,89	165,17	93,03	60,88	26,60
	Ende	129,4	0,25	1,78	800,74	128,40	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,21	1,49	637,15	102,17	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	72,0	0,21	1,49	802,42	128,67	0,78	165,20	99,02	74,85	26,69
	Ende	129,4	0,21	1,49	789,75	126,64	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
vorderes Maximum	Beginn	134,0	0,35	3,01	827,77	103,71	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,81	15,40	821,75	102,96	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
hinteres Maximum	Beginn	134,0	0,21	1,77	842,55	105,56	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,21	1,77	852,25	106,78	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	615,09	98,63			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Minimum	9,6	615,09	98,63			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Maximum	11,2	644,62	97,93			3,80	176,97	41,37	43,30	44,76
	Ende	129,4	621,36	92,98			0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
zweite Haltephase	Beginn	134,0	779,62	97,68			3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
	Ende	240,0	803,68	99,44			0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	5,65	40,34	643,00	103,10	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	115,2	5,44	38,83	707,02	113,37	0,45	169,05	112,03	107,80	26,63
	Ende	129,4	5,65	40,34	707,41	113,43	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
hinterer GF	Beginn	9,6	6,80	48,51	631,95	101,33	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	89,0	5,89	42,01	709,41	113,75	0,63	166,51	104,21	89,66	26,58
	Ende	129,4	6,01	42,87	706,03	113,21	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
vorderer GF	Beginn	134,0	5,42	46,11	803,79	100,71	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,32	11,24	820,46	102,79	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
hinterer GF	Beginn	134,0	5,38	45,75	804,17	100,75	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,38	45,75	804,75	100,83	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,28	37,67	624,22	100,09	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	110,8	1,71	12,23	629,38	100,92	0,48	168,57	110,71	105,36	26,60
	Ende	129,4	1,76	12,56	629,83	100,99	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	6,61	47,18	624,03	100,06	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	9,8	6,22	44,40	641,28	102,83	5,30	177,79	41,01	43,11	44,42
	Ende	129,4	3,05	21,77	628,10	100,72	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
vorderer Profilgrund	Beginn	134,0	4,88	41,50	788,55	98,80	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,20	10,18	813,85	101,97	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
hinterer Profilgrund	Beginn	134,0	5,32	45,19	787,44	98,66	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,30	28,05	809,47	101,42	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	137,4	[mm]	11,76	[%]	100,00	2,45	171,52	117,77	114,47	26,35
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	134,0					3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,68	39,82	810,44	101,54	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59
vorderes Maximum	Beginn	134,0					3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,27	10,80	810,44	101,54	0,28	181,74	128,95	117,38	26,59

Tab. P- 17:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 18

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	5,41	38,63	623,64	100,00	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	9,6	5,41	38,63	623,64	100,00	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Ende	129,4	3,25	23,18	668,29	107,16	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
hintere Peakbase	Beginn	9,6	0,40	2,82	623,64	100,00	5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
erste Haltephase	Maximum	120,8	2,21	2,82	623,64	100,00	0,43	169,74	113,69	110,38	26,54
	Ende	129,4	2,00	14,26	668,29	107,16	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
vordere Peakbase	Beginn	134,0	4,41	37,52	798,15	100,00	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	129,4	0,25	2,12	808,20	101,26	0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
hintere Peakbase	Beginn	134,0	0,50	4,25	798,15	100,00	3,79	171,19	117,13	114,09	26,59
zweite Haltephase	Ende	129,4	0,48	4,07	808,20	101,26	0,40	181,74	128,95	117,38	26,59
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	625,11	100,24			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Minimum	9,6	625,11	100,24			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Maximum	118,6	663,42	99,12			0,45	169,45	113,05	109,45	26,59
	Ende	129,4	662,03	99,06			0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	617,37	98,99			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Minimum	9,6	617,37	98,99			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Maximum	11,0	650,69	98,90			3,92	176,38	41,31	43,26	44,79
	Ende	129,4	623,40	93,28			0,40	170,71	115,96	113,06	26,47
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	615,19	98,65			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Minimum	9,6	615,19	98,65			5,96	178,18	40,94	43,04	44,30
	Maximum	121,2	653,39	97,69			0,42	169,76	113,79	110,52	26,53
	Ende	129,4	647,73	96,92			0,40	170,71	115,96	113,06	26,47

Tab. P- 18:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

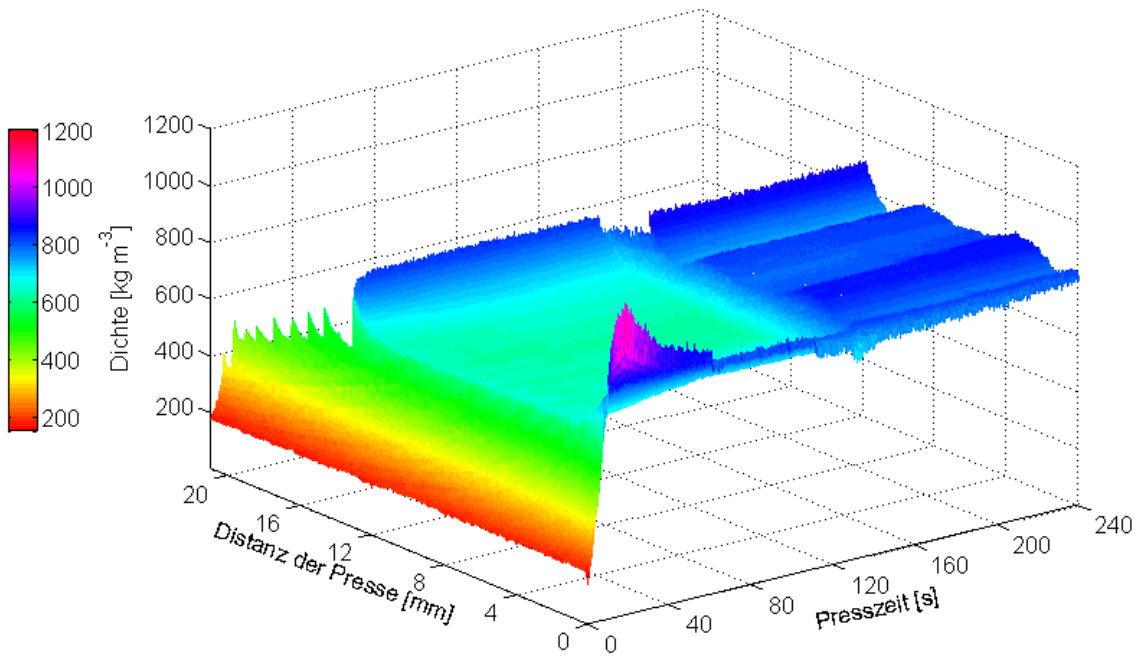


Abb. P- 42: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240.

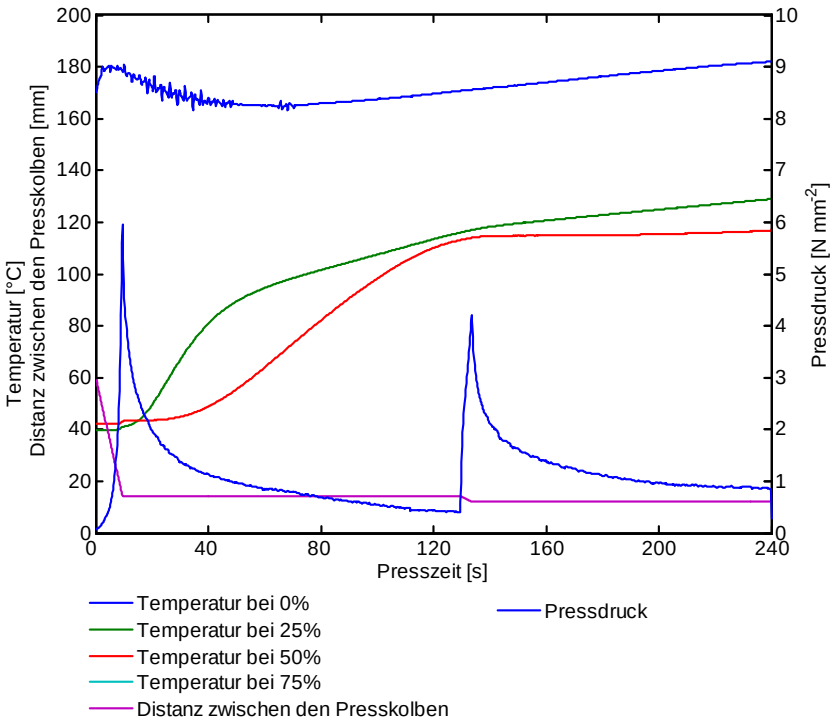


Abb. P- 43: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

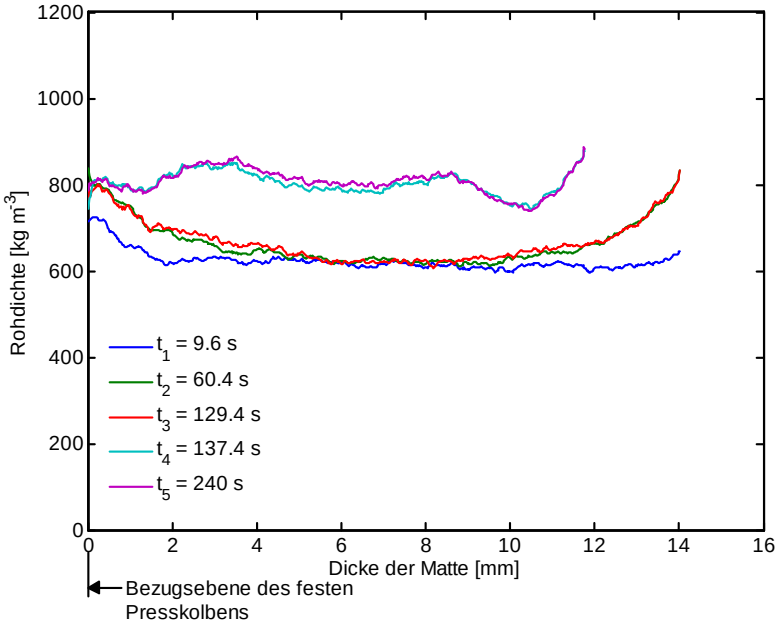


Abb. P- 44: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

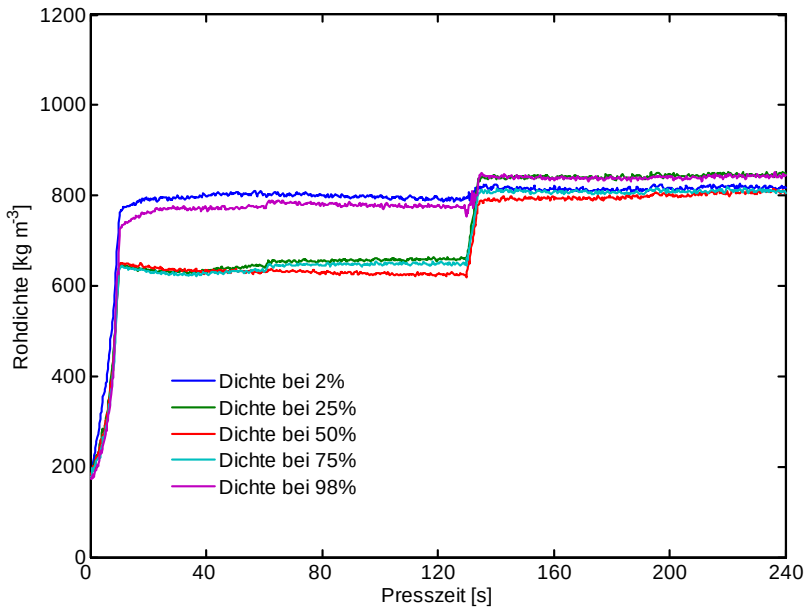


Abb. P- 45: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240.

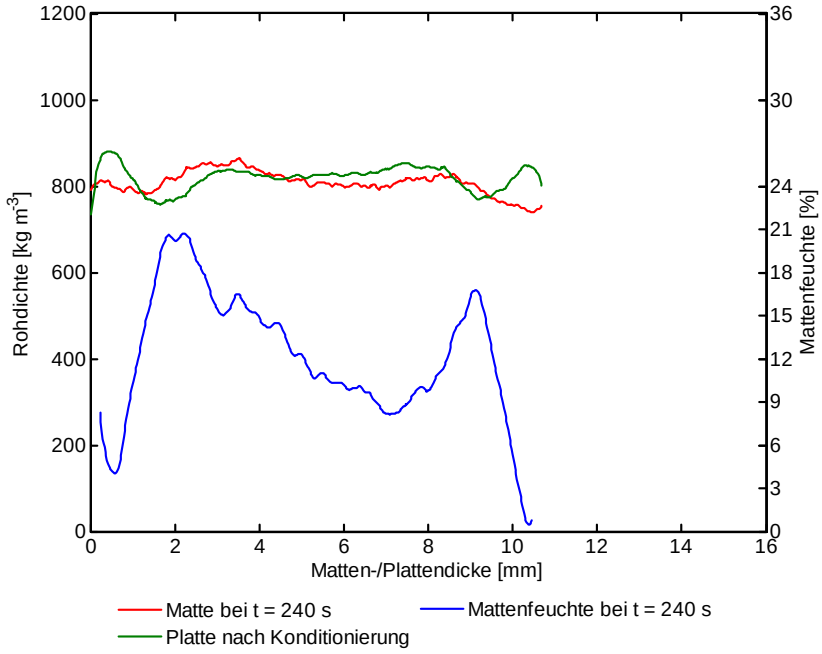


Abb. P- 46: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.10 Platte 12 mm_02_10_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,56	gravim.	830,15	gravim.	0,65	radiom.	16,07				
Endwert	18,91		802,44								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	608,25	94,57	radiom.	16,73	radiom.	-0,67				
	Endwert	634,28	98,61		17,45		-1,39				
zweite Haltephase	Startwert	766,67	101,46		17,96		-1,89				
	Endwert	755,61	100,00		17,70		-1,63				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,78	radiom.	-2,85	gravim.	3,58			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,27	1,93	712,20	117,09	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	26,0	0,27	1,96	788,11	129,57	1,02	170,26	59,88	44,04	
	Ende	129,4	0,27	2,38	767,95	126,26	0,15	170,71	115,96	113,06	
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,21	1,49	674,11	110,83	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	21,0	0,22	1,55	835,92	137,43	1,25	176,18	51,04	43,60	
	Ende	129,4	0,21	1,49	809,08	133,02	0,15	170,71	115,96	113,06	
vorderes Maximum	Beginn	134,0	0,29	2,44	787,44	102,71	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,27	2,27	773,19	100,85	0,15	181,74	128,95	117,38	
hinteres Maximum	Beginn	134,0	0,44	3,66	857,82	111,89	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,40	3,32	846,42	110,40	0,15	181,74	128,95	117,38	
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	591,36	97,22			5,07	178,18	40,94	43,04	
	Minimum	73,0	567,00	89,06			0,36	165,26	99,35	75,78	
	Maximum	116,4	578,87	90,86			0,17	169,19	112,40	108,42	
	Ende	129,4	576,91	90,96			0,15	170,71	115,96	113,06	
zweite Haltephase	Beginn	134,0	799,06	104,23			2,82	171,19	117,13	114,09	
	Ende	240,0	793,29	104,99			0,15	181,74	128,95	117,38	
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	6,05	43,16	641,15	105,41	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	69,2	5,22	37,25	677,83	111,44	0,37	165,45	98,11	72,26	
	Ende	129,4	5,47	39,00	681,07	111,97	0,15	170,71	115,96	113,06	
hinterer GF	Beginn	9,6	6,51	46,43	641,94	105,54	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	47,8	5,21	37,19	685,07	112,63	0,52	164,29	87,81	53,77	
	Ende	129,4	5,30	37,82	681,43	112,03	0,15	170,71	115,96	113,06	
vorderer GF	Beginn	134,0	5,28	44,24	755,07	98,49	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,28	44,24	740,14	96,54	0,15	181,74	128,95	117,38	
hinterer GF	Beginn	134,0	4,84	40,58	754,64	98,43	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,69	39,35	742,14	96,80	0,15	181,74	128,95	117,38	
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,32	37,96	603,39	99,20	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	84,0	1,91	13,65	582,86	95,83	0,37	166,16	102,73	85,50	
	Ende	129,4	2,32	16,57	588,93	96,82	0,15	170,71	115,96	113,06	
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	4,80	34,25	604,18	99,33	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	66,6	2,56	18,30	580,28	95,40	0,37	165,17	98,65	73,75	
	Ende	129,4	2,63	18,80	590,16	97,03	0,15	170,71	115,96	113,06	
vorderer Profilgrund	Beginn	134,0	2,57	21,55	792,64	103,39	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,32	19,46	782,30	102,04	0,15	181,74	128,95	117,38	
hinterer Profilgrund	Beginn	134,0	2,13	17,85	805,42	105,05	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,84	15,45	798,27	104,12	0,15	181,74	128,95	117,38	
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	131,6	[mm]	13,24	[%]	110,99	1,89	171,01	116,54	113,60	
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	134,0	1,73	14,49	694,60	90,60	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,92	16,06	678,62	88,52	0,15	181,74	128,95	117,38	
vorderes Maximum	Beginn	134,0	2,39	20,07	686,98	89,61	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,46	20,59	678,62	88,52	0,15	181,74	128,95	117,38	

Tab. P- 19:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 20

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	1,52	10,85	608,25	100,00	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	69,0	2,51	17,88	636,34	104,62	0,37	166,03	98,03	72,08	
	Ende	129,4	2,10	15,01	634,28	104,28	0,15	170,71	115,96	113,06	
hintere Peakbase	Beginn	9,6	2,60	18,57	608,25	100,00	5,07	178,18	40,94	43,04	
erste Haltephase	Maximum	70,8	2,73	19,37	636,34	104,62	0,37	165,17	98,65	73,75	
	Ende	129,4	2,60	18,57	634,28	104,28	0,15	170,71	115,96	113,06	
vordere Peakbase	Beginn	134,0	0,33	2,79	766,67	100,00	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	129,4	0,44	3,66	755,61	98,56	0,15	170,71	115,96	113,06	
hintere Peakbase	Beginn	134,0	1,06	8,90	766,67	100,00	2,82	171,19	117,13	114,09	
zweite Haltephase	Ende	129,4	1,19	9,95	755,61	98,56	0,15	181,74	128,95	117,38	
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	586,38	96,40			5,07	178,18	40,94	43,04	
	Minimum	9,6	586,38	96,40			5,07	178,18	40,94	43,04	
	Maximum	82,6	621,69	97,61			0,30	166,08	102,32	84,33	
	Ende	129,4	608,24	95,90			0,15	170,71	115,96	113,06	
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	591,74	97,29			5,07	178,18	40,94	43,04	
	Minimum	73,4	566,09	88,92			0,36	165,26	99,46	76,14	
	Maximum	120,2	583,26	91,76			0,17	169,61	113,49	110,13	
	Ende	129,4	582,17	91,78			0,15	170,71	115,96	113,06	
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	595,98	97,98			5,07	178,18	40,94	43,04	
	Minimum	34,6	579,83	91,15			0,74	163,37	74,05	46,29	
	Maximum	78,8	612,84	96,20			0,33	165,73	101,18	80,98	
	Ende	129,4	604,72	95,34			0,15	170,71	115,96	113,06	

Tab. P- 20:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

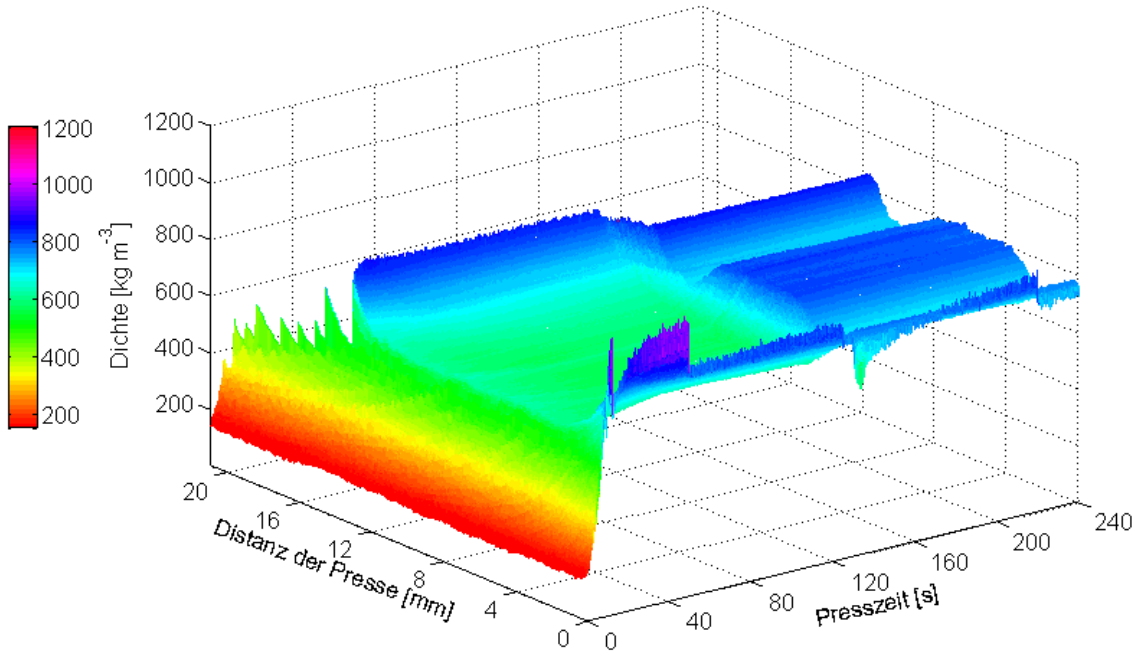


Abb. P- 47: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240.

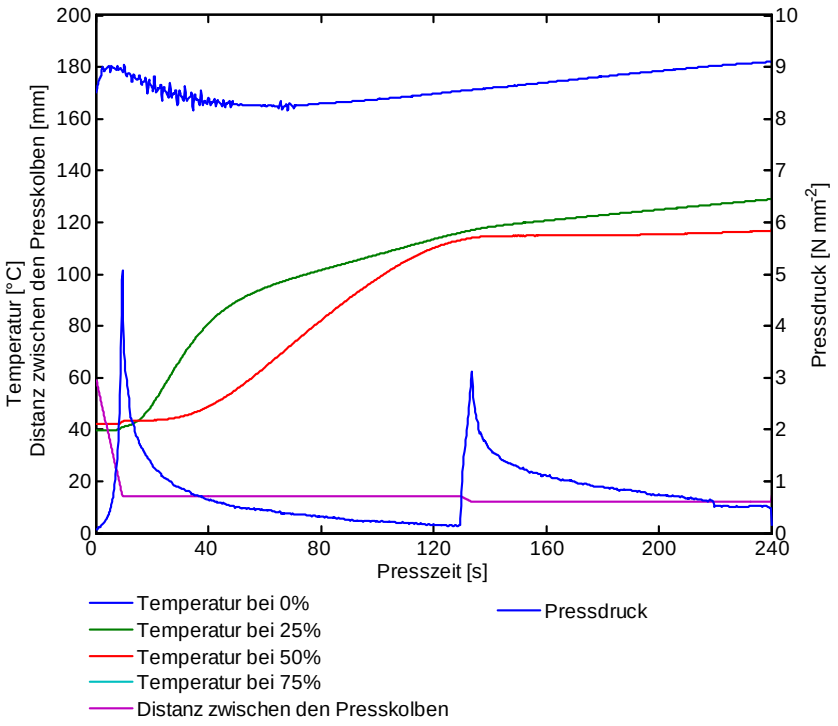


Abb. P- 48: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

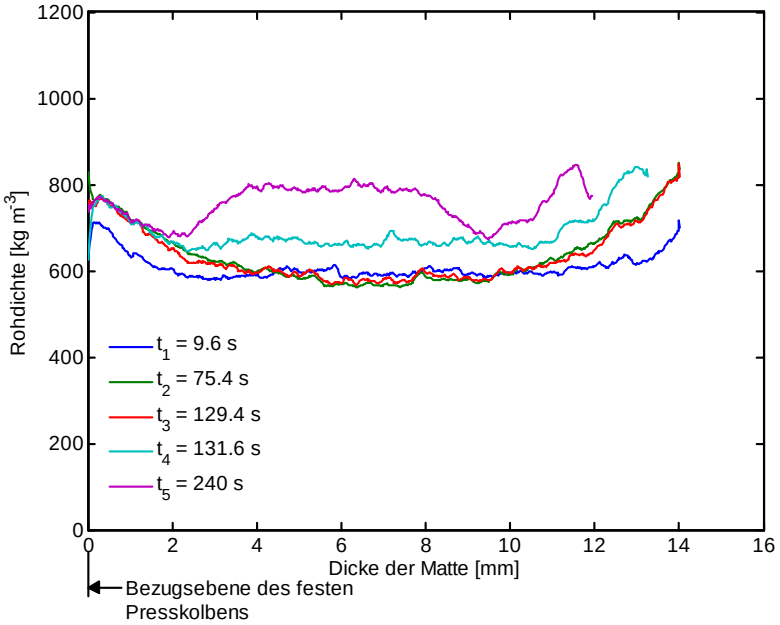


Abb. P- 49: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

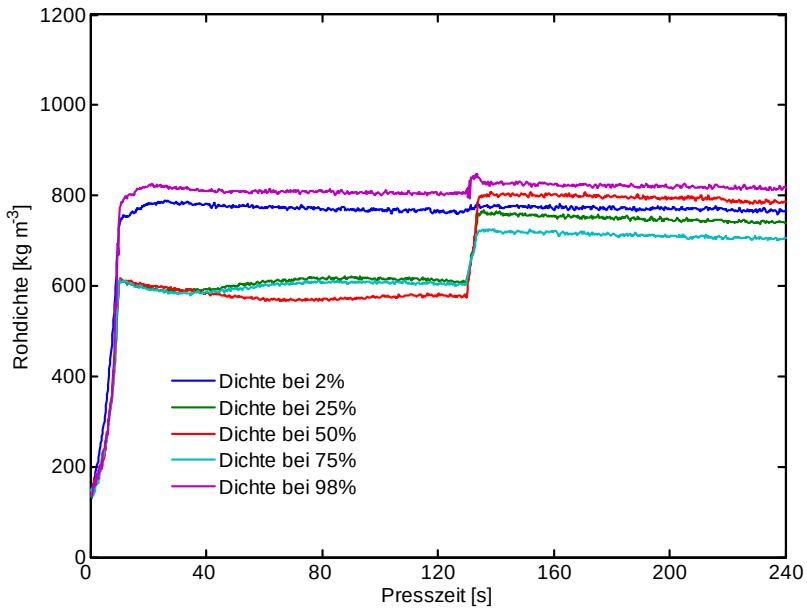


Abb. P- 50: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240.

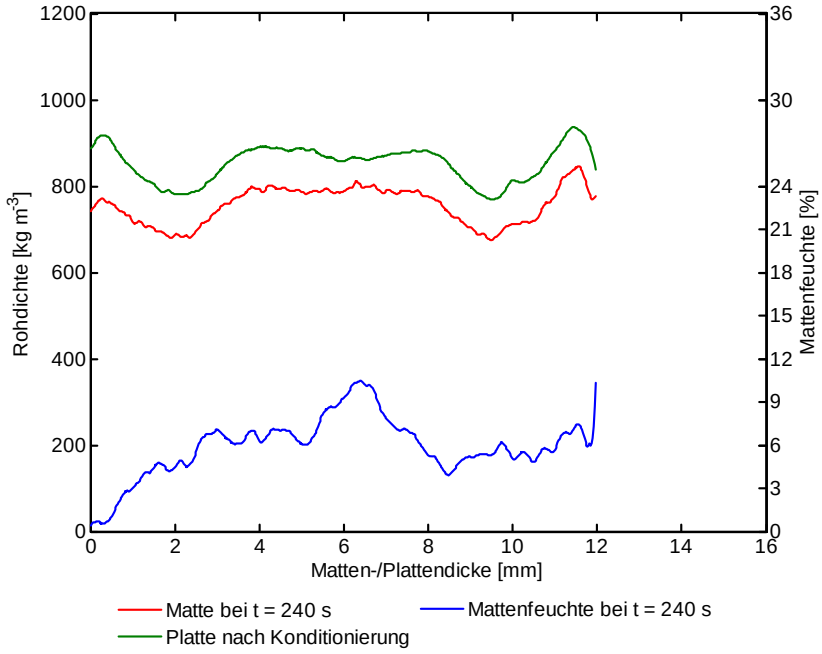


Abb. P- 51: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.11 Platte 12 mm_01_10_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,46	gravim.	825,91	gravim.	0,60	radiom.	21,76				
Endwert	18,86		800,44								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	644,17	96,64	radiom.	17,96	radiom.	3,80				
	Endwert	672,81	100,94		18,76		3,00				
zweite Haltephase	Startwert	798,06	100,62		18,69		3,07				
	Endwert	793,14	100,00		18,58		3,18				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,05	radiom.	2,50	gravim.	3,31			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,33	2,35	749,70	116,38	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	29,2	0,27	1,94	834,63	129,57	1,03	165,93	73,71	48,26	30,21
	Ende	149,4	0,33	2,05	807,25	125,32	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,23	1,61	715,72	111,11	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	20,0	0,22	1,58	889,30	138,05	1,39	165,95	58,66	46,27	30,10
	Ende	149,4	0,23	1,61	849,49	131,87	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
vorderes Maximum	Beginn	153,8	0,37	3,14	811,71	101,71	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,29	2,44	807,44	101,18	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
hinteres Maximum	Beginn	153,8	0,27	2,27	891,63	111,73	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,40	3,32	875,42	109,69	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	630,79	97,92			5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
	Minimum	101,4	611,92	90,32			0,22	165,04	110,38	98,82	32,45
	Maximum	127,8	619,70	91,35			0,17	167,47	118,74	108,70	30,41
	Ende	149,4	614,48	91,33			0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
zweite Haltephase	Beginn	153,8	832,81	104,35			3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
	Ende	240,0	836,33	105,44			0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	6,14	43,26	678,40	105,31	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	68,4	5,41	38,09	729,01	113,17	0,44	162,81	99,66	77,79	30,63
	Ende	149,4	5,87	41,35	719,34	111,67	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
hinterer GF	Beginn	9,6	6,70	47,21	681,72	105,83	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	61,0	5,16	36,30	731,12	113,50	0,45	162,69	96,99	71,49	30,20
	Ende	149,4	5,75	40,47	720,37	111,83	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
vorderer GF	Beginn	153,8	5,42	45,46	791,89	99,23	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,28	44,24	776,51	97,30	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
hinterer GF	Beginn	153,8	5,01	41,97	791,43	99,17	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,76	39,88	780,94	97,86	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,62	39,59	638,19	99,07	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	93,6	2,25	15,87	624,60	96,96	0,27	165,00	107,82	94,81	34,13
	Ende	149,4	2,96	20,82	628,16	97,52	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	5,70	40,18	636,82	98,86	5,52	171,32	45,78	45,39	29,82
erste Haltephase	Maximum	100,8	2,48	17,48	625,36	97,08	0,21	164,87	110,16	98,52	30,39
	Ende	149,4	2,48	17,45	625,11	97,04	0,12	170,00	124,33	112,94	30,69
vorderer Profilgrund	Beginn	153,8	2,09	17,54	826,56	103,57	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,07	17,36	826,26	103,53	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
hinterer Profilgrund	Beginn	153,8	2,05	17,23	839,12	105,15	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,76	14,75	839,22	105,16	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,8	[mm]	13,12	[%]	109,95	2,02	170,46	124,87	113,25	30,07
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	153,8	1,35	11,34	729,33	91,39	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,64	13,79	719,18	90,12	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82
vorderes Maximum	Beginn	153,8	2,50	20,94	735,53	92,16	3,17	171,34	125,22	113,59	29,55
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,44	20,42	719,18	90,12	0,20	178,65	134,98	117,17	30,82

Tab. P- 21:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 22

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	4,3	30,1	644,2	100,0	5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
erste Haltephase	Maximum	9,6	4,3	30,1	644,2	100,0	5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
	Ende	149,4	2,8	19,5	672,8	104,4	0,1	170,0	124,3	112,9	30,7
hintere Peakbase	Beginn	9,6	2,5	17,6	644,2	100,0	5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
erste Haltephase	Maximum	87,0	3,1	17,6	644,2	100,0	0,3	163,5	105,7	91,0	30,2
	Ende	149,4	2,8	19,8	672,8	104,4	0,1	170,0	124,3	112,9	30,7
vordere Peakbase	Beginn	153,8	0,3	2,8	798,1	100,0	3,2	171,3	125,2	113,6	29,6
zweite Haltephase	Ende	149,4	0,5	4,0	793,1	99,4	0,1	170,0	124,3	112,9	30,7
hintere Peakbase	Beginn	153,8	0,9	7,2	798,1	100,0	3,2	171,3	125,2	113,6	29,6
zweite Haltephase	Ende	149,4	1,1	9,2	793,1	99,4	0,1	178,7	135,0	117,2	30,8
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	632,5	98,2			5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
	Minimum	9,6	632,5	98,2			5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
	Maximum	97,2	672,0	98,7			0,2	164,5	109,0	96,7	30,6
	Ende	149,4	651,1	96,8			0,1	170,0	124,3	112,9	30,7
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	630,6	97,9			5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
	Minimum	84,2	600,1	87,9			0,3	163,6	104,9	89,3	30,4
	Maximum	128,6	615,0	90,7			0,2	167,7	119,0	109,0	30,3
	Ende	149,4	609,5	90,6			0,1	170,0	124,3	112,9	30,7
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	633,6	98,4			5,5	171,3	45,8	45,4	29,8
	Minimum	33,8	628,9	92,4			0,9	163,4	79,5	50,3	30,6
	Maximum	85,0	658,6	96,5			0,3	163,4	105,1	89,8	31,8
	Ende	149,4	644,5	95,8			0,1	170,0	124,3	112,9	30,7

Tab. P- 22:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

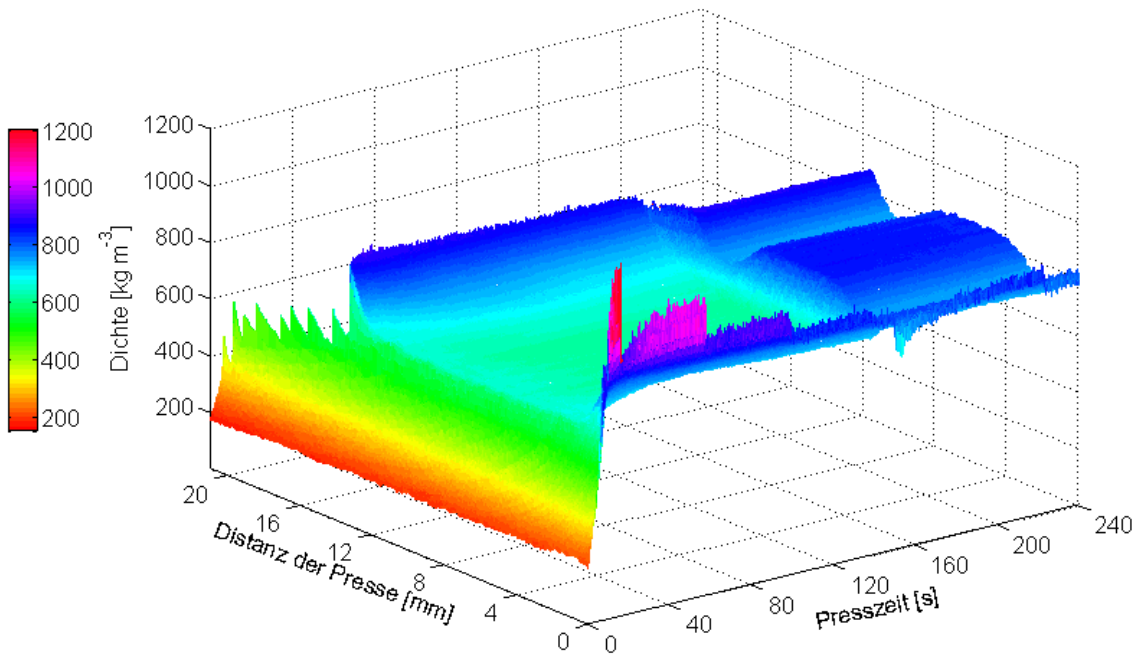


Abb. P- 52: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240.

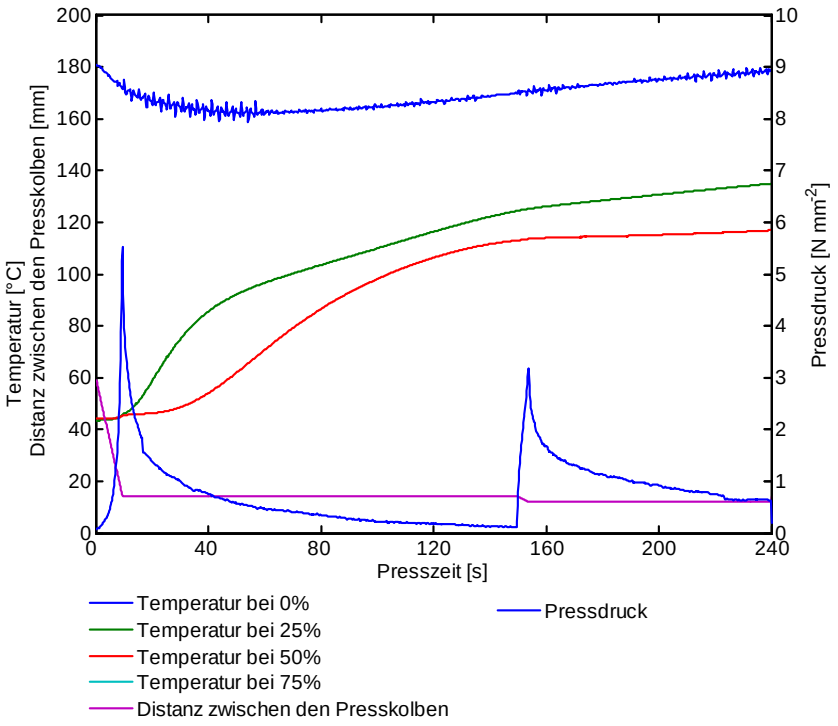


Abb. P- 53: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

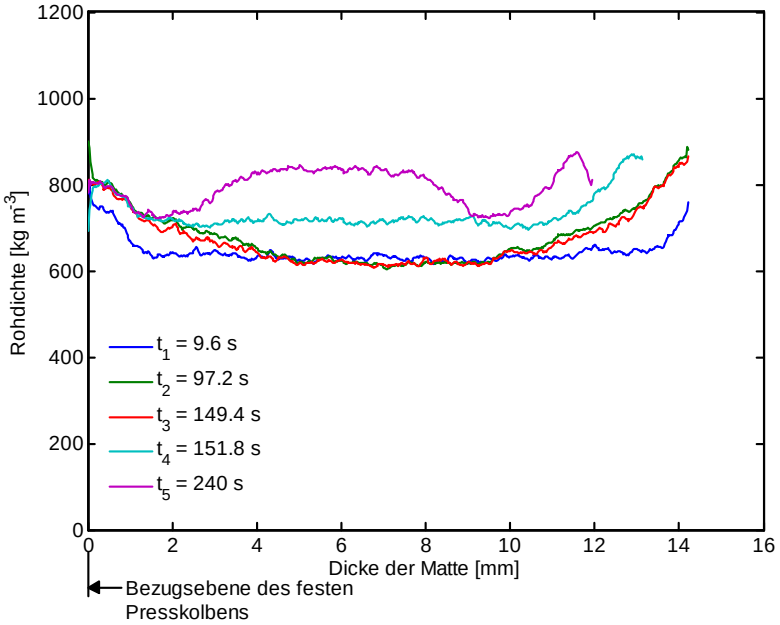


Abb. P- 54: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

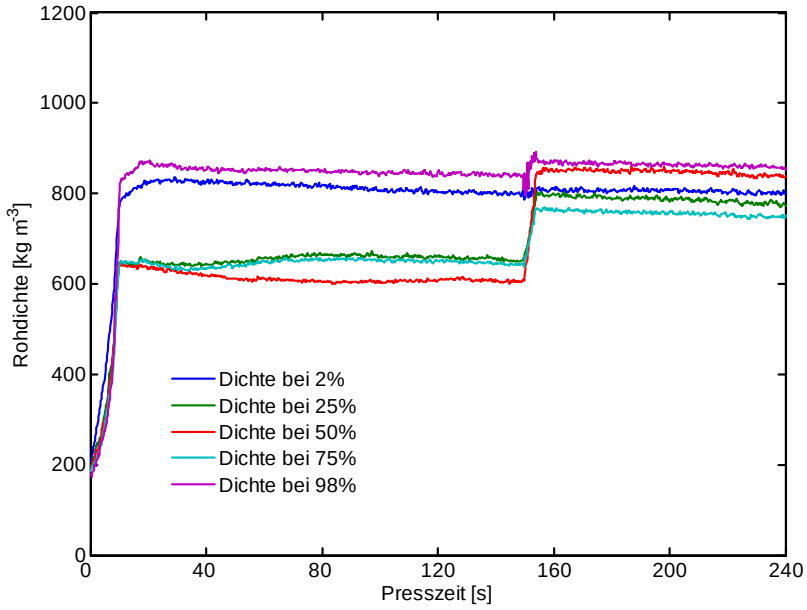


Abb. P- 55: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240.

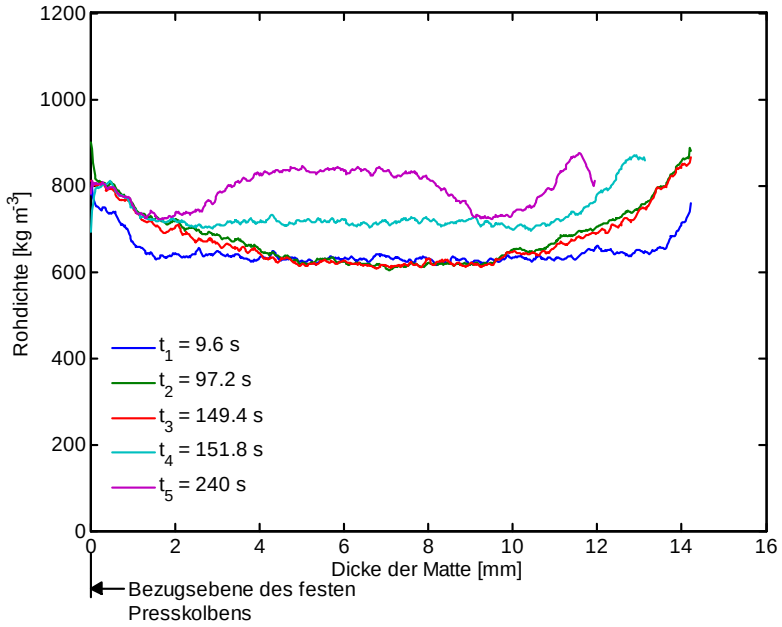


Abb. P- 56: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.12 Platte 12 mm_02_10_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m-3]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,65	gravim.	0,61	radiom.	15,70				
Endwert	18,89		801,59								
mittlere Dichte		[kg m-3]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	599,84	97,30	radiom.	16,75	radiom.	-1,05				
	Endwert	614,24	99,64		17,15		-1,45				
zweite Haltephase	Startwert	735,33	100,10		17,22		-1,52				
	Endwert	734,59	100,00		17,21		-1,51				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,98	radiom.	-5,27	gravim.	3,38			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,25	1,76	713,53	118,95	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	23,4	0,25	1,76	776,74	129,49	1,18	163,54	64,64	46,74	
	Ende	149,4	0,25	1,76	752,16	125,39	0,13	170,00	124,33	112,94	
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,21	1,46	731,52	121,95	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	18,6	0,23	1,61	839,31	139,92	1,53	168,76	56,22	46,17	
	Ende	149,4	0,27	1,90	806,67	134,48	0,13	170,00	124,33	112,94	
vorderes Maximum	Beginn	153,8	0,33	2,79	770,60	104,80	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,09	770,34	104,76	0,25	178,65	134,98	117,17	
hinteres Maximum	Beginn	153,8	0,35	2,97	830,10	112,89	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,54	4,54	821,85	111,77	0,25	178,65	134,98	117,17	
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m-3]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	581,58	96,96			5,21	171,32	45,78	45,39	
	Minimum	75,2	545,94	88,21			0,38	162,34	101,93	83,05	
	Maximum	116,4	556,83	90,02			0,19	166,18	115,25	105,07	
	Ende	149,4	552,55	89,96			0,13	170,00	124,33	112,94	
zweite Haltephase	Beginn	153,8	771,53	104,92			3,54	171,34	125,22	113,59	
	Ende	240,0	778,26	105,94			0,25	178,65	134,98	117,17	
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	6,32	44,44	651,36	108,59	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	72,2	5,43	38,20	663,76	110,66	0,39	163,07	100,95	80,79	
	Ende	149,4	5,78	40,63	662,58	110,46	0,13	170,00	124,33	112,94	
hinterer GF	Beginn	9,6	6,40	45,02	650,82	108,50	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	62,8	5,19	36,50	667,61	111,30	0,45	162,65	97,67	73,07	
	Ende	149,4	5,53	38,87	662,31	110,41	0,13	170,00	124,33	112,94	
vorderer GF	Beginn	153,8	5,34	44,76	729,25	99,17	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,26	44,07	726,75	98,83	0,25	178,65	134,98	117,17	
hinterer GF	Beginn	153,8	4,80	40,23	731,85	99,53	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,67	39,18	723,63	98,41	0,25	178,65	134,98	117,17	
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,47	38,43	591,97	98,69	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	83,4	2,42	17,01	558,55	93,12	0,37	163,89	104,60	88,79	
	Ende	149,4	2,68	18,81	563,29	93,91	0,13	170,00	124,33	112,94	
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	4,99	35,07	590,04	98,37	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	67,6	2,17	15,25	558,39	93,09	0,41	163,19	100,01	78,61	
	Ende	149,4	2,28	16,03	562,91	93,84	0,13	170,00	124,33	112,94	
vorderer Profilgrund	Beginn	153,8	2,28	19,11	770,60	104,80	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,88	15,79	770,34	104,76	0,25	178,65	134,98	117,17	
hinterer Profilgrund	Beginn	153,8	1,79	14,99	780,67	106,17	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,45	12,13	788,27	107,20	0,25	178,65	134,98	117,17	
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,6	[mm]	13,20	[%]	110,65	2,12	170,45	124,82	113,23	
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	153,8	1,81	15,18	667,68	90,80	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,81	15,18	661,89	90,01	0,25	178,65	134,98	117,17	
vorderes Maximum	Beginn	153,8	2,62	21,99	661,48	89,96	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,77	23,21	661,89	90,01	0,25	178,65	134,98	117,17	

Tab. P- 23:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 1

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	1,39	9,81	599,84	100,00	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	75,0	2,73	19,21	619,07	103,21	0,37	162,16	101,87	82,90	
	Ende	149,4	2,33	16,40	614,24	102,40	0,13	170,00	124,33	112,94	
hintere Peakbase	Beginn	9,6	1,79	12,59	599,84	100,00	5,21	171,32	45,78	45,39	
erste Haltephase	Maximum	69,4	3,01	21,03	619,07	103,21	0,41	163,19	100,01	78,61	
	Ende	149,4	2,85	20,06	614,24	102,40	0,13	170,00	124,33	112,94	
vordere Peakbase	Beginn	153,8	0,46	3,84	735,33	100,00	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	149,4	0,54	4,54	734,59	99,90	0,13	170,00	124,33	112,94	
hintere Peakbase	Beginn	153,8	1,10	9,25	735,33	100,00	3,54	171,34	125,22	113,59	
zweite Haltephase	Ende	149,4	1,23	10,30	734,59	99,90	0,13	178,65	134,98	117,17	
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	587,13	97,88			5,21	171,32	45,78	45,39	
	Minimum	39,2	565,98	91,44			0,70	164,65	84,81	53,45	
	Maximum	94,0	601,95	97,16			0,26	164,53	107,94	95,05	
	Ende	149,4	588,35	95,78			0,13	170,00	124,33	112,94	
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	585,85	97,67			5,21	171,32	45,78	45,39	
	Minimum	71,2	542,52	87,60			0,39	162,60	100,62	80,04	
	Maximum	120,2	557,15	90,15			0,18	166,55	116,44	106,42	
	Ende	149,4	554,14	90,22			0,13	170,00	124,33	112,94	
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	583,38	97,26			5,21	171,32	45,78	45,39	
	Minimum	31,4	571,87	92,49			0,90	163,43	76,59	49,10	
	Maximum	83,8	607,08	98,02			0,32	163,55	104,72	89,01	
	Ende	149,4	593,20	96,58			0,13	170,00	124,33	112,94	

Tab. P- 24:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

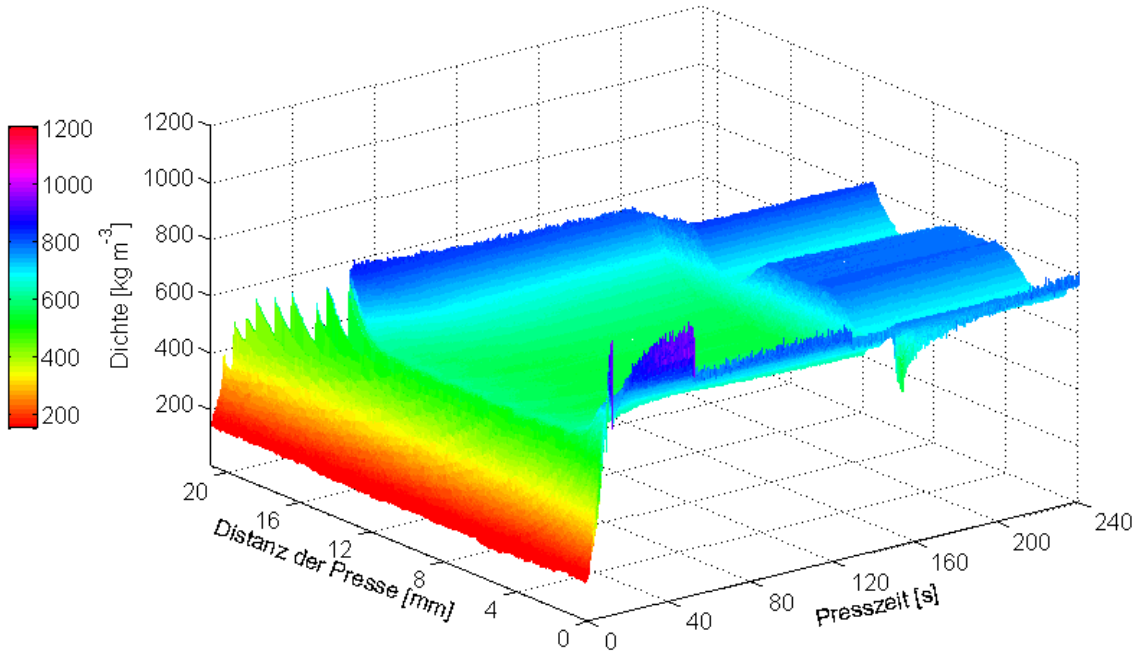


Abb. P- 57: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240.

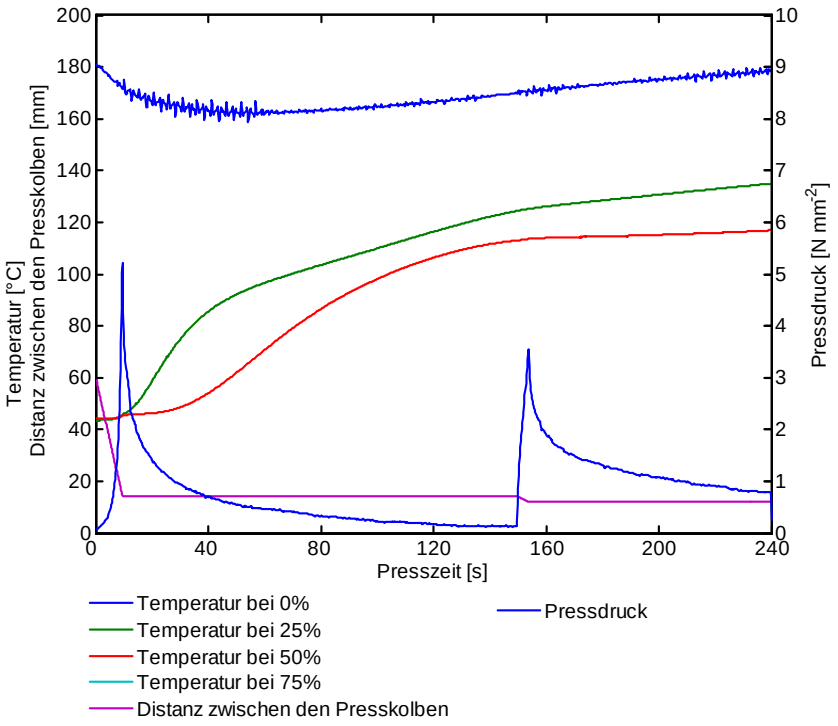


Abb. P- 58: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

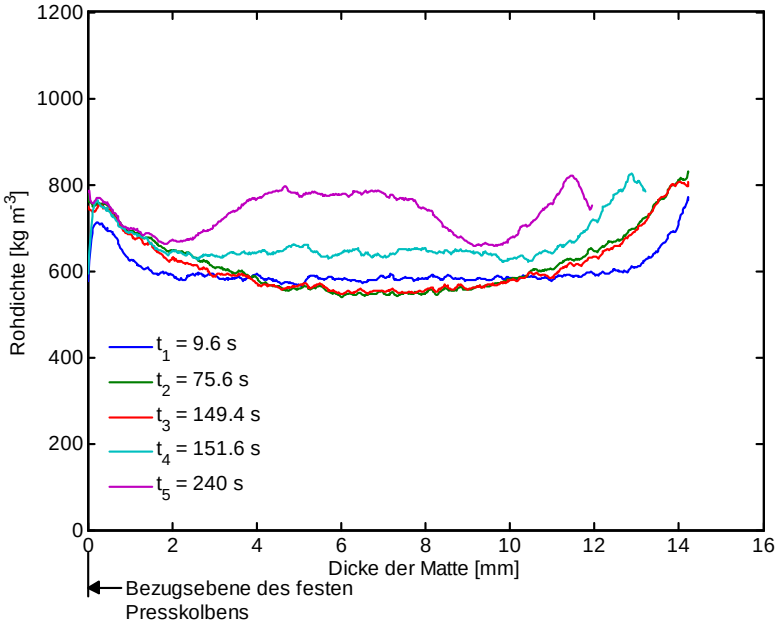


Abb. P- 59: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

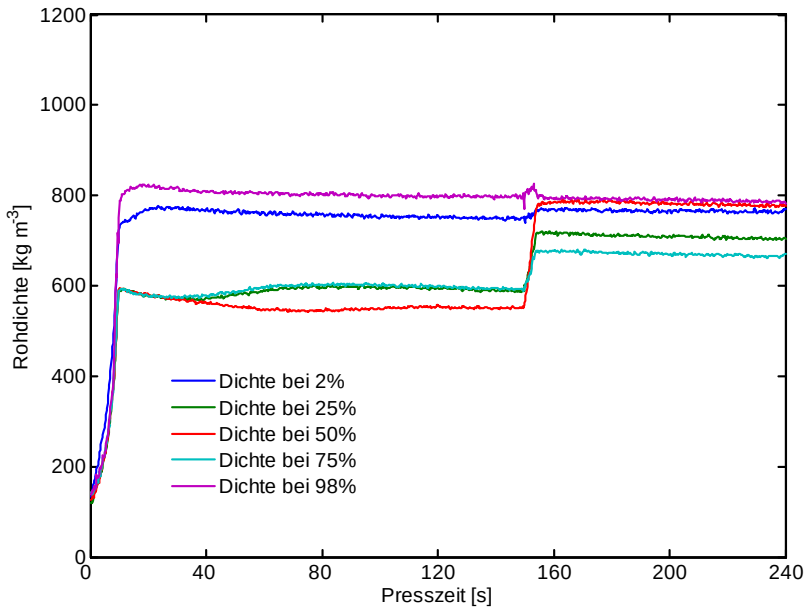


Abb. P- 60: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240.

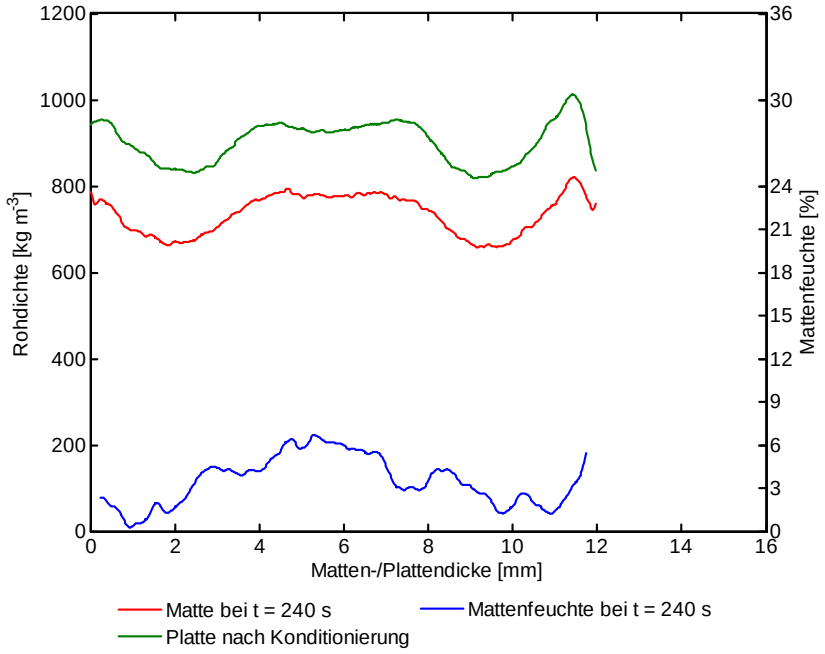


Abb. P- 61: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.13 Platte 12 mm_01_10_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,48	gravim.	826,76	gravim.	0,59	radiom.	18,57				
Endwert	18,89		801,80								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	612,90	95,75	radiom.	17,01	radiom.	1,56				
	Endwert	634,88	99,19		17,62		0,95				
zweite Haltephase	Startwert	769,42	101,28		17,99		0,58				
	Endwert	759,67	100,00		17,76		0,81				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,12	radiom.	-2,10	gravim.	3,24			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,27	1,91	743,39	121,29	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	26,8	0,47	3,36	825,46	134,68	1,14	159,20	68,68	45,54	64,15
	Ende	169,2	0,27	1,77	786,98	128,40	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,21	1,47	699,63	114,15	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	18,6	0,21	1,47	859,45	140,23	1,63	159,95	54,72	44,92	51,04
	Ende	169,2	0,21	1,47	822,05	134,13	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderes Maximum	Beginn	174,0	0,40	3,32	806,19	104,78	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,10	802,64	104,32	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
hinteres Maximum	Beginn	174,0	0,35	2,97	864,34	112,34	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,44	3,67	851,72	110,70	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	588,01	95,94			5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
	Minimum	90,2	568,42	87,97			0,29	161,52	103,77	90,13	109,46
	Maximum	132,8	578,74	89,86			0,16	166,43	118,66	112,88	118,69
	Ende	169,2	570,13	89,80			0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
zweite Haltephase	Beginn	174,0	818,17	106,34			3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
	Ende	240,0	811,87	106,87			0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	6,07	42,93	653,87	106,68	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	67,6	5,30	37,51	698,35	113,94	0,48	159,59	94,93	70,85	100,83
	Ende	169,2	5,67	40,13	687,12	112,11	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
hinterer GF	Beginn	9,6	6,38	45,14	650,62	106,15	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	59,4	5,34	37,81	697,15	113,75	0,54	158,87	91,75	63,67	96,19
	Ende	169,2	5,65	39,99	685,51	111,85	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderer GF	Beginn	174,0	5,14	43,18	759,72	98,74	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,18	43,53	748,26	97,25	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
hinterer GF	Beginn	174,0	4,83	40,56	762,33	99,08	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,79	40,21	750,63	97,56	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,24	37,04	602,43	98,29	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	107,2	2,25	15,88	589,80	96,23	0,23	163,39	110,01	102,07	113,88
	Ende	169,2	2,90	20,54	585,62	95,55	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	5,07	35,86	601,83	98,19	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	88,6	1,76	12,48	585,91	95,60	0,30	161,18	103,18	88,88	109,00
	Ende	169,2	2,05	14,51	585,45	95,52	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderer Profilgrund	Beginn	174,0	1,94	16,26	809,47	105,21	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,98	16,61	802,64	104,32	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
hinterer Profilgrund	Beginn	174,0	1,64	13,78	824,75	107,19	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,62	13,64	819,17	106,47	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	171,0	[mm]	13,60	[%]	114,16	1,71	170,67	123,91	114,02	123,32
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	174,0	2,10	17,66	690,29	89,72	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,17	18,18	674,18	87,62	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22
vorderes Maximum	Beginn	174,0	2,56	21,50	689,11	89,56	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,73	22,90	674,18	87,62	0,25	175,77	129,97	116,00	131,22

Tab. P- 25:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 26

Probenname	Platte 12mm_01_10_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	1,54	10,90	612,90	100,00	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	89,8	2,71	19,19	646,10	105,42	0,29	161,43	103,62	89,82	109,34
	Ende	169,2	2,37	16,79	634,88	103,59	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
hintere Peakbase	Beginn	9,6	6,27	44,33	612,90	100,00	5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	9,8	6,29	21,13	646,10	105,42	5,11	161,46	45,36	44,59	42,28
	Ende	169,2	2,66	18,85	634,88	103,59	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
vordere Peakbase	Beginn	174,0	0,65	5,42	769,42	100,00	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	169,2	0,58	4,90	759,67	98,73	0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
hintere Peakbase	Beginn	174,0	1,10	9,27	769,42	100,00	3,14	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	169,2	1,06	8,92	759,67	98,73	0,10	175,77	129,97	116,00	131,22
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	597,76	97,53			5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
	Minimum	36,2	588,06	91,34			0,87	162,52	79,20	48,06	76,51
	Maximum	101,6	627,85	97,20			0,25	162,72	107,69	98,48	112,56
	Ende	169,2	602,19	94,85			0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	592,50	96,67			5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
	Minimum	90,2	554,78	85,85			0,29	161,52	103,77	90,13	109,46
	Maximum	136,4	570,08	88,54			0,16	166,95	119,53	113,41	119,16
	Ende	169,2	558,39	87,95			0,10	169,72	123,75	113,98	123,02
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	595,92	97,23			5,86	161,06	45,29	44,49	42,26
	Minimum	39,6	592,50	92,08			0,79	160,32	81,82	49,65	80,26
	Maximum	92,8	626,95	96,93			0,30	161,70	104,40	92,17	110,25
	Ende	169,2	604,30	95,18			0,10	169,72	123,75	113,98	123,02

Tab. P- 26:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

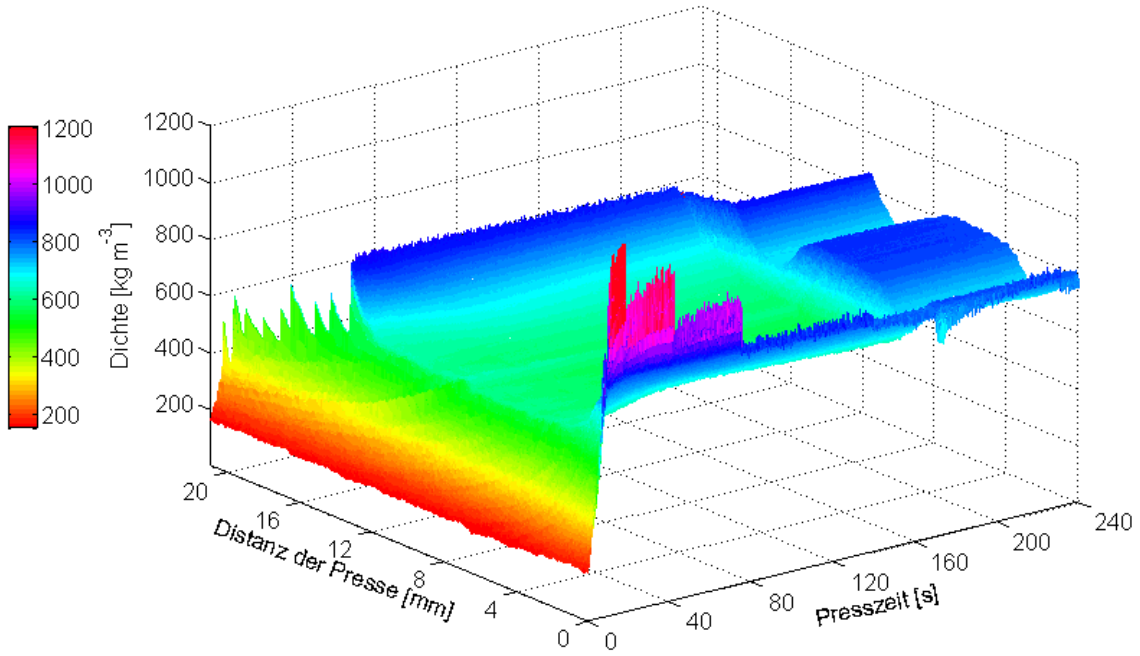


Abb. P- 62: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240.

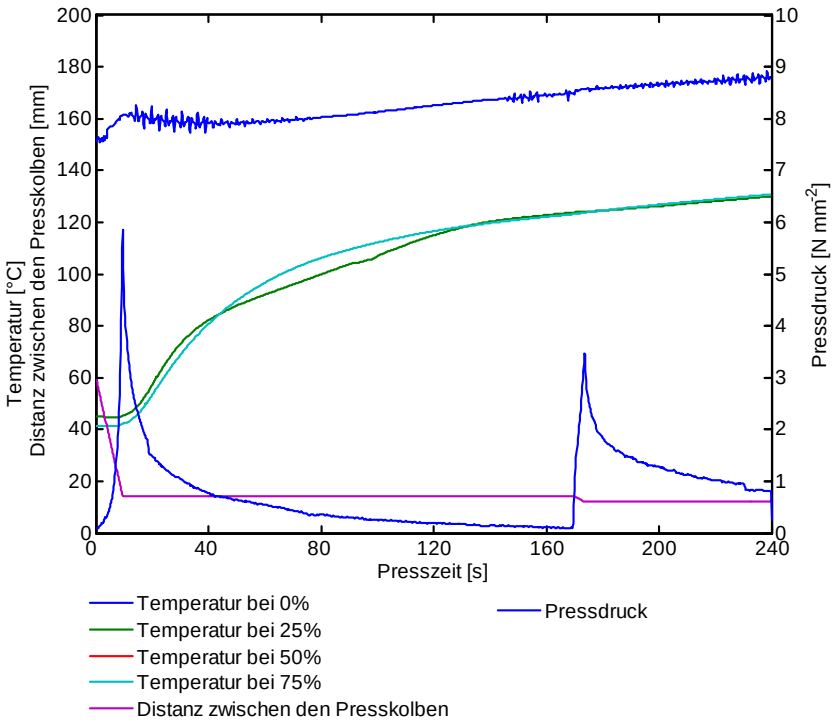


Abb. P- 63: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

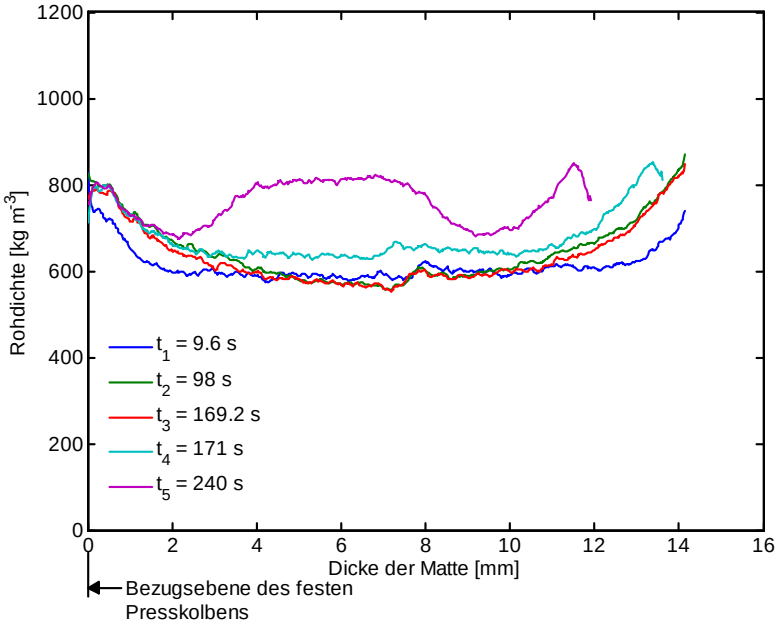


Abb. P- 64: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

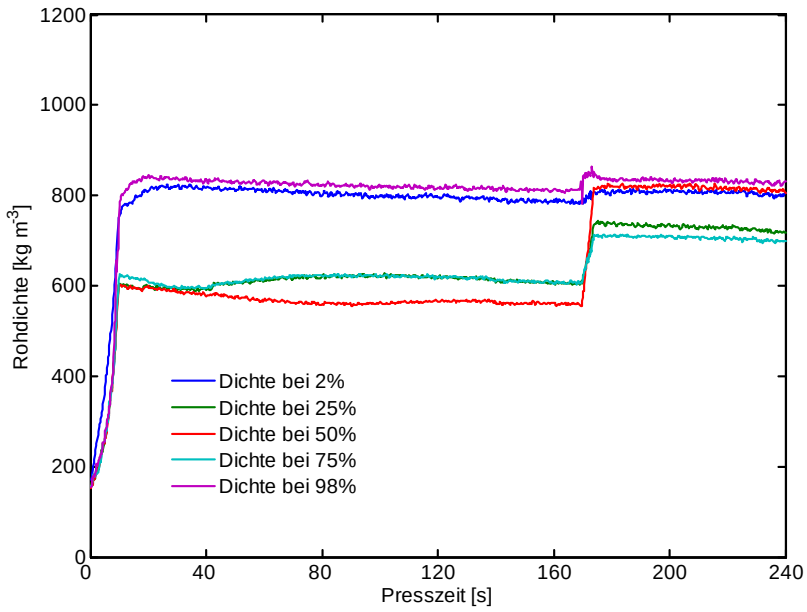


Abb. P- 65: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240.

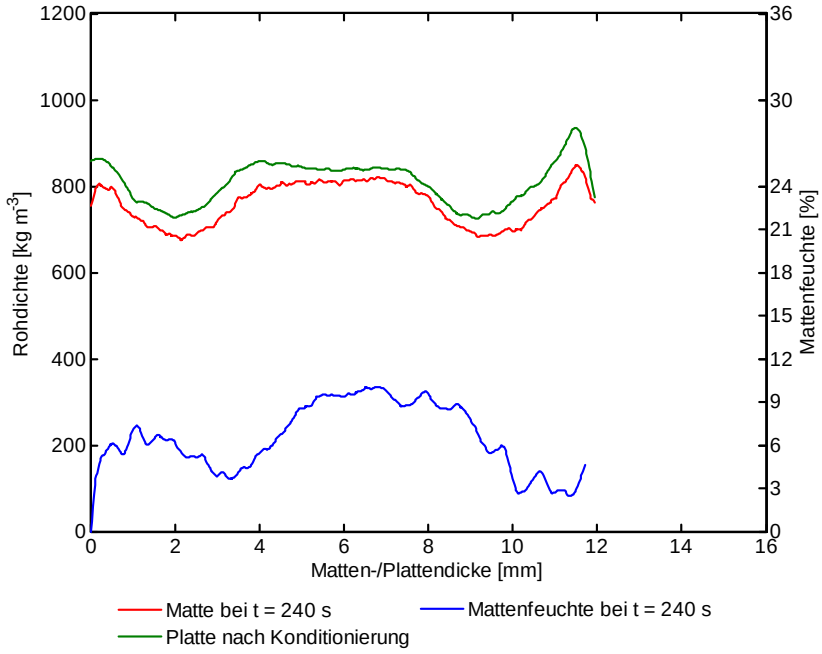


Abb. P- 66: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_10_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.14 Platte 12 mm_02_10_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,57	radiom.	18,02				
Endwert	18,93		803,41								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	631,47	95,73	radiom.	17,53	radiom.	0,49				
	Endwert	654,68	99,25		18,17		-0,15				
zweite Haltephase	Startwert	781,34	99,96		18,30		-0,28				
	Endwert	781,68	100,00		18,31		-0,29				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,22	radiom.	0,81	gravim.	3,14			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	9,6	0,25	1,77	750,63	118,87	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	31,0	0,25	1,77	825,11	130,67	0,88	158,29	74,13	46,38	70,10
	Ende	169,2	0,25	2,95	792,26	125,46	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
hinteres Maximum	Beginn	9,6	0,21	1,47	702,74	111,29	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	15,4	0,21	1,50	854,60	135,34	1,86	159,98	49,71	44,83	46,41
	Ende	169,2	0,23	1,62	818,28	129,58	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderes Maximum	Beginn	174,0	0,37	3,14	817,98	104,69	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,09	811,12	103,81	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
hinteres Maximum	Beginn	174,0	0,48	4,01	867,53	111,03	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,50	4,19	858,58	109,89	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	616,90	97,69			5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
	Minimum	71,4	595,46	89,90			0,34	160,11	96,44	74,24	102,65
	Maximum	121,4	606,90	91,74			0,19	165,22	115,34	109,41	116,81
	Ende	169,2	599,52	91,57			0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
zweite Haltephase	Beginn	174,0	837,73	107,22			3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
	Ende	240,0	844,72	108,06			0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	9,6	6,05	42,78	668,03	105,79	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	62,8	5,31	37,54	705,87	111,78	0,41	159,31	93,06	66,60	98,24
	Ende	169,2	5,72	40,43	702,13	111,19	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
hinterer GF	Beginn	9,6	6,63	46,91	671,69	106,37	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	58,6	5,42	38,37	709,72	112,39	0,47	158,38	91,40	62,98	95,68
	Ende	169,2	5,47	38,66	698,65	110,64	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderer GF	Beginn	174,0	5,19	43,54	767,42	98,22	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,15	43,19	764,17	97,80	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
hinterer GF	Beginn	174,0	4,78	40,05	771,14	98,69	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,67	39,18	761,46	97,46	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	9,6	5,42	38,37	625,87	99,11	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	82,2	1,97	13,97	606,23	96,00	0,32	160,60	100,70	83,65	106,91
	Ende	169,2	2,57	18,19	608,24	96,32	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
hinterer Profilgrund	Beginn	9,6	5,92	41,90	625,23	99,01	5,14	161,06	45,29	44,49	42,26
erste Haltephase	Maximum	70,4	2,24	15,83	604,18	95,68	0,36	159,50	96,05	73,35	102,17
	Ende	169,2	2,70	19,07	607,21	96,16	0,09	169,72	123,75	113,98	123,02
vorderer Profilgrund	Beginn	174,0	1,70	14,22	826,26	105,75	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,68	14,05	833,87	106,72	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
hinterer Profilgrund	Beginn	174,0	1,38	11,54	840,05	107,51	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,22	10,21	848,85	108,64	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	171,4	[mm]	13,35	[%]	111,87	2,23	170,98	123,90	113,96	123,32
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	174,0	2,17	18,15	709,26	90,77	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,23	18,67	702,36	89,89	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22
vorderes Maximum	Beginn	174,0	2,42	20,24	697,15	89,22	3,50	171,48	124,04	114,07	123,84
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,87	24,08	702,36	89,89	0,32	175,77	129,97	116,00	131,22

Tab. P- 27:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 28

Probenname	Platte 12mm_02_10_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	9,6	3,98	28,13	631,47	100,00	5,14	161,06	45,29		42,26
erste Haltephase	Maximum	9,6	3,98	28,13	631,47	100,00	5,14	161,06	45,29		42,26
	Ende	169,2	3,10	21,94	654,68	103,68	0,09	169,72	123,75		123,02
hintere Peakbase	Beginn	9,6	2,73	19,29	631,47	100,00	5,14	161,06	45,29		42,26
erste Haltephase	Maximum	9,6	2,73	19,29	631,47	100,00	5,14	161,06	45,29		42,26
	Ende	169,2	2,33	16,49	654,68	103,68	0,09	169,72	123,75		123,02
vordere Peakbase	Beginn	174,0	0,52	4,36	781,34	100,00	3,50	171,48	124,04		123,84
zweite Haltephase	Ende	169,2	0,56	4,71	781,68	100,04	0,09	169,72	123,75		123,02
hintere Peakbase	Beginn	174,0	1,08	9,08	781,34	100,00	3,50	171,48	124,04		123,84
zweite Haltephase	Ende	169,2	0,96	8,03	781,68	100,04	0,09	175,77	129,97		131,22
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	642,14	101,69			5,14	161,06	45,29		42,26
	Minimum	34,8	632,34	95,26			0,79	158,44	78,00		74,91
	Maximum	113,2	658,92	99,52			0,21	164,24	112,51		115,24
	Ende	169,2	635,65	97,09			0,09	169,72	123,75		123,02
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	615,50	97,47			5,14	161,06	45,29		42,26
	Minimum	69,0	593,62	89,69			0,38	159,36	95,49		101,53
	Maximum	121,0	609,59	92,17			0,19	165,18	115,22		116,75
	Ende	169,2	598,00	91,34			0,09	169,72	123,75		123,02
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	9,6	619,93	98,17			5,14	161,06	45,29		42,26
	Minimum	32,6	609,77	91,99			0,86	159,70	75,87		72,19
	Maximum	86,0	640,49	96,75			0,28	161,12	102,21		108,19
	Ende	169,2	620,62	94,80			0,09	169,72	123,75		123,02

Tab. P- 28:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

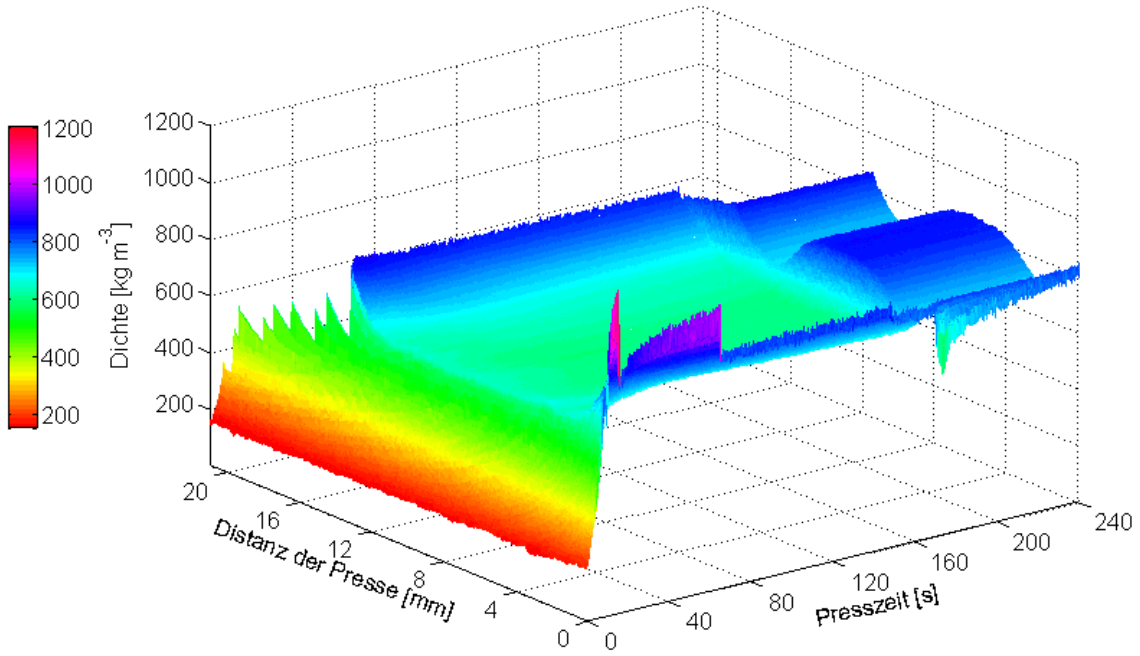


Abb. P- 67: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240.

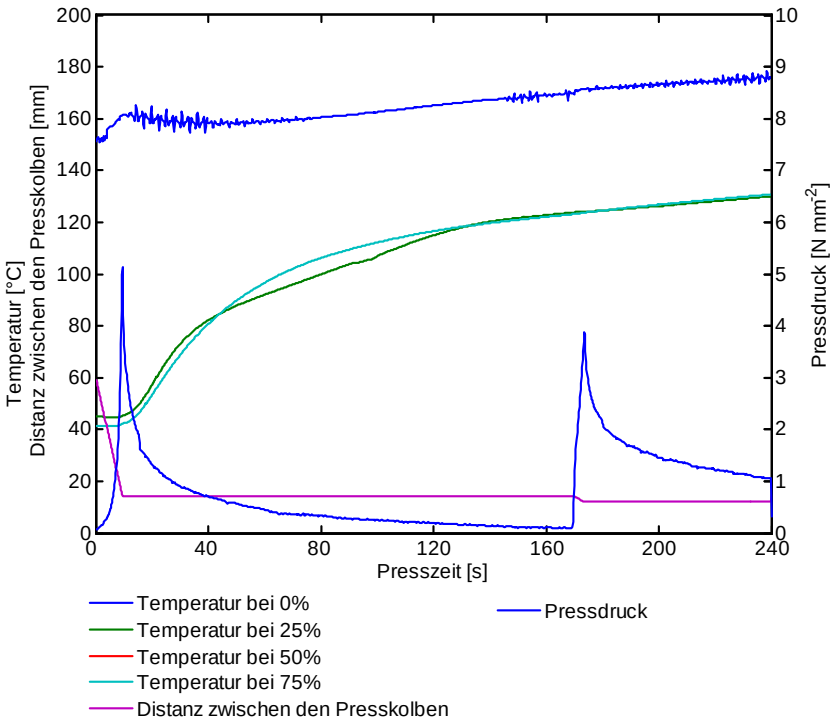


Abb. P- 68: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

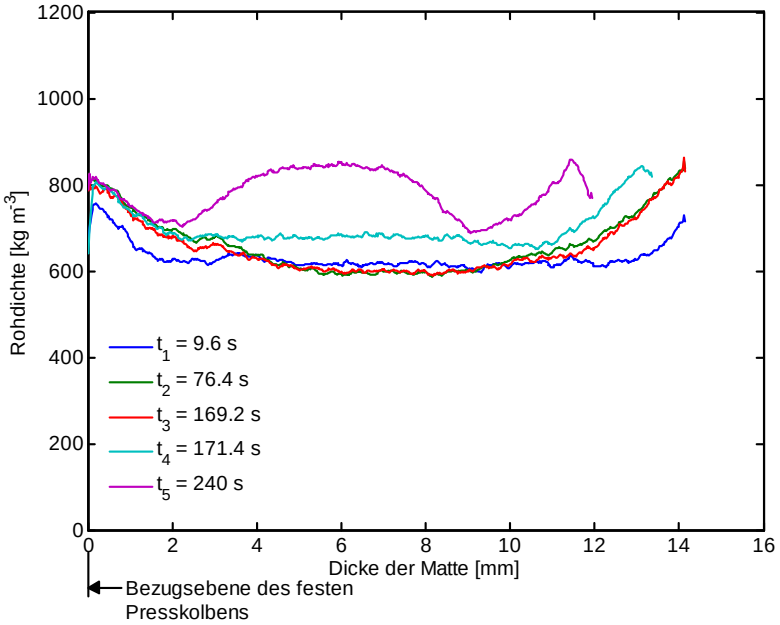


Abb. P- 69: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

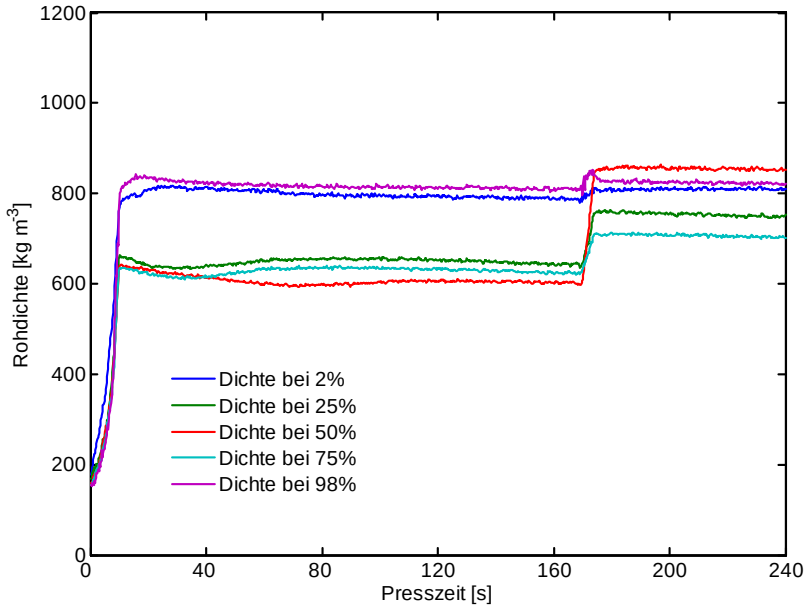


Abb. P- 70: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240.

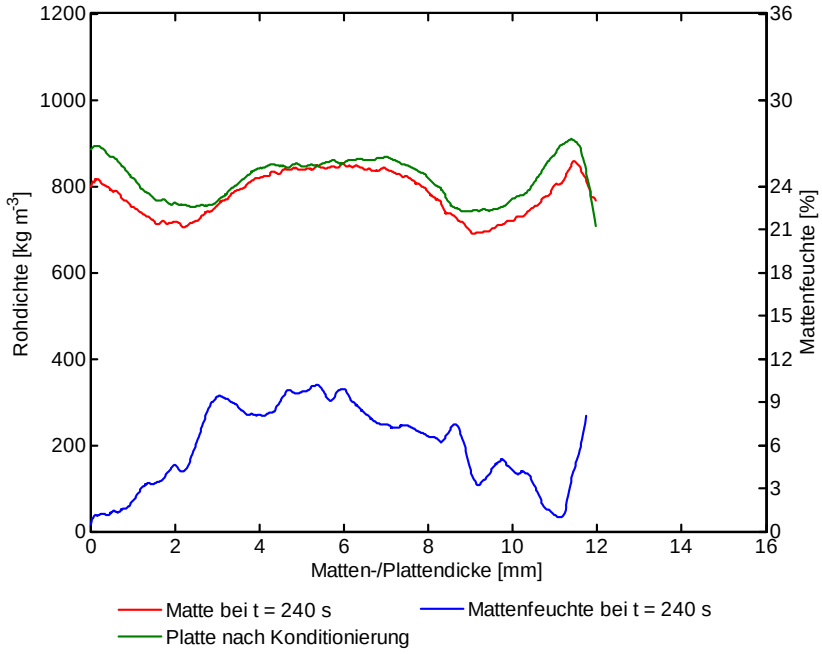


Abb. P- 71: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_10_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.15 Platte 12 mm_01_20_100_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,71	radiom.	22,34				
Endwert	18,79		797,47								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	747,89	94,42	radiom.	17,52	radiom.	4,82				
	Endwert	792,17			18,56		3,78				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,45	radiom.	2,16	gravim.	3,91			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	20,2	0,33	2,79	874,19	116,89	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	48,6	0,52	4,33	964,82	129,01	1,42	156,91	88,88	43,89	97,07
	Ende	240,0	0,33	5,41	937,55	125,36	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinteres Maximum	Beginn	20,2	0,21	1,75	905,20	121,03	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	36,4	0,62	5,24	1014,65	135,67	1,88	159,95	71,30	35,72	88,01
	Ende	240,0	0,77	6,46	983,26	131,47	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	710,46	95,00			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	69,8	721,44	88,73			0,76	156,65	102,71	65,96	107,81
	Maximum	104,6	739,40	90,11			0,36	161,70	115,68	99,94	122,23
	Ende	240,0	709,12	89,52			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	20,2	4,90	41,10	794,79	106,27	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	69,2	4,14	34,68	840,36	112,36	0,78	156,39	102,47	65,27	107,54
	Ende	240,0	4,40	36,91	834,18	111,54	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer GF	Beginn	20,2	5,05	42,32	796,67	106,52	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	65,6	3,85	32,23	848,11	113,40	0,86	155,55	100,85	61,26	105,88
	Ende	240,0	4,05	33,94	834,18	111,54	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	20,2	3,36	28,18	721,24	96,44	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	87,8	1,36	11,43	741,64	99,16	0,50	158,89	109,49	84,93	115,58
	Ende	240,0	1,84	15,45	719,50	96,20	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer Profilgrund	Beginn	20,2	3,92	32,90	721,24	96,44	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	231,8	1,67	13,97	715,56	95,68	0,64	156,30	103,52	68,17	108,69
	Ende	240,0	1,76	14,75	719,26	96,17	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18

Tab. P- 29:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 30

Probenname	Platte 12mm_01_20_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	20,2	1,77	14,83	747,89	100,00	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	88,2	2,37	19,86	820,03	109,65	0,50	158,97	109,65	85,33	115,73
	Ende	240,0	2,08	17,45	792,17	105,92	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hintere Peakbase	Beginn	20,2	1,48	12,39	747,89	100,00	6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	71,8	2,67	22,13	820,03	109,65	0,64	156,30	103,52	68,17	108,69
	Ende	240,0	2,62	21,99	792,17	105,92	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	735,61	98,36			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	20,2	735,61	98,36			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Maximum	89,0	795,82	96,90			0,50	159,01	109,93	86,10	116,05
	Ende	240,0	757,48	95,62			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	706,56	94,47			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	231,6	704,50	89,03			0,05	177,70	140,16	116,27	146,10
	Maximum	236,2	717,37	90,55			0,04	178,01	140,77	116,53	146,69
	Ende	240,0	706,49	89,18			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	726,03	97,08			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	20,2	726,03	97,08			6,92	172,77	35,68	32,42	57,23
	Maximum	86,8	802,93	97,80			0,50	157,65	109,14	83,96	115,15
	Ende	240,0	764,60	96,52			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18

Tab. P- 30:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

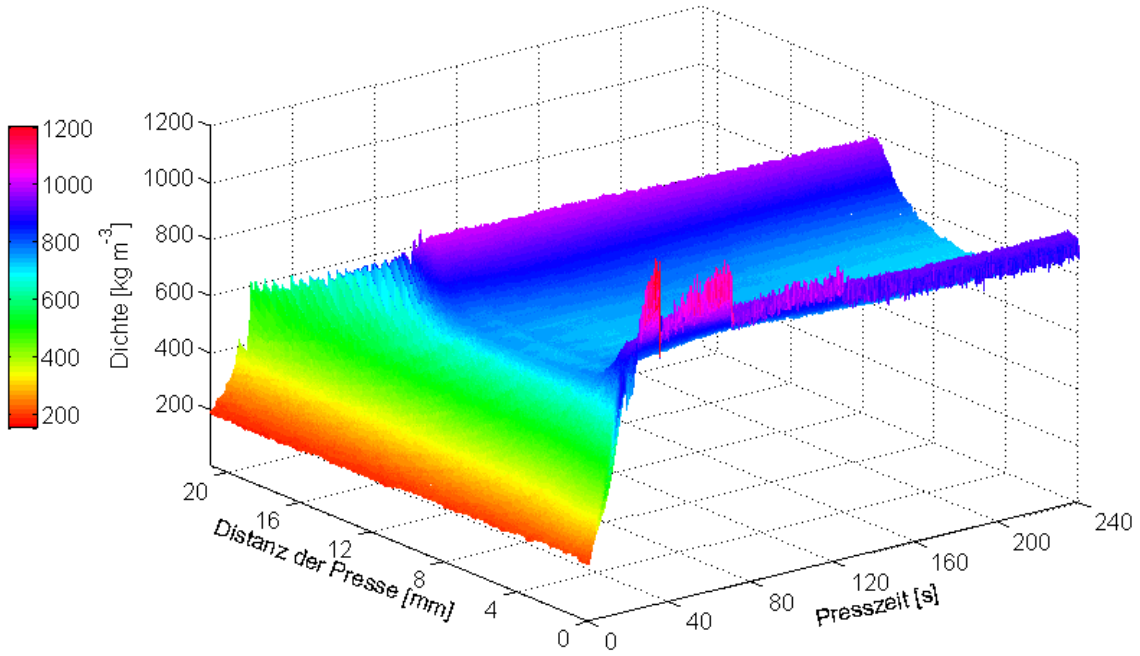


Abb. P- 72: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240.

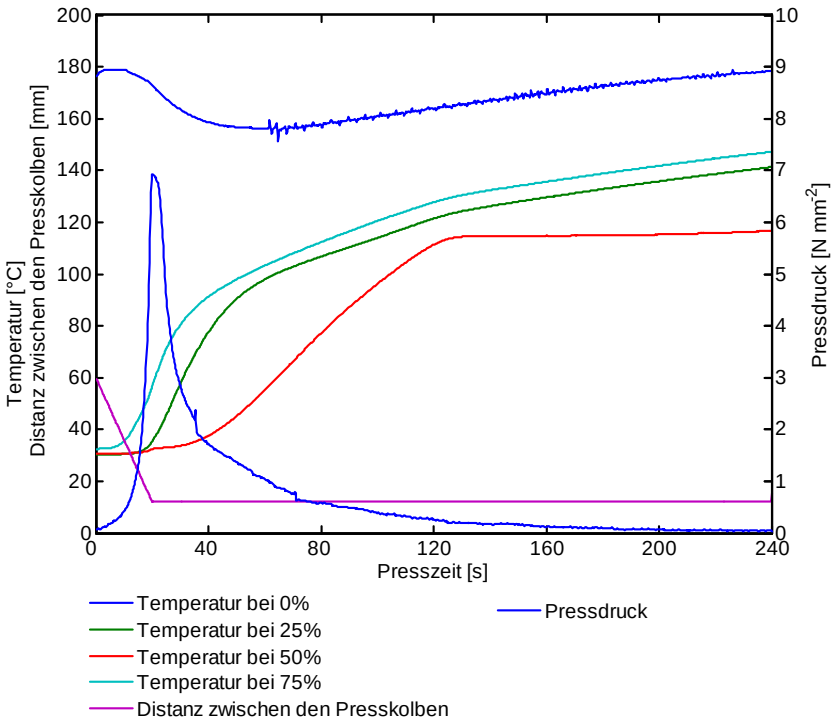


Abb. P- 73: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

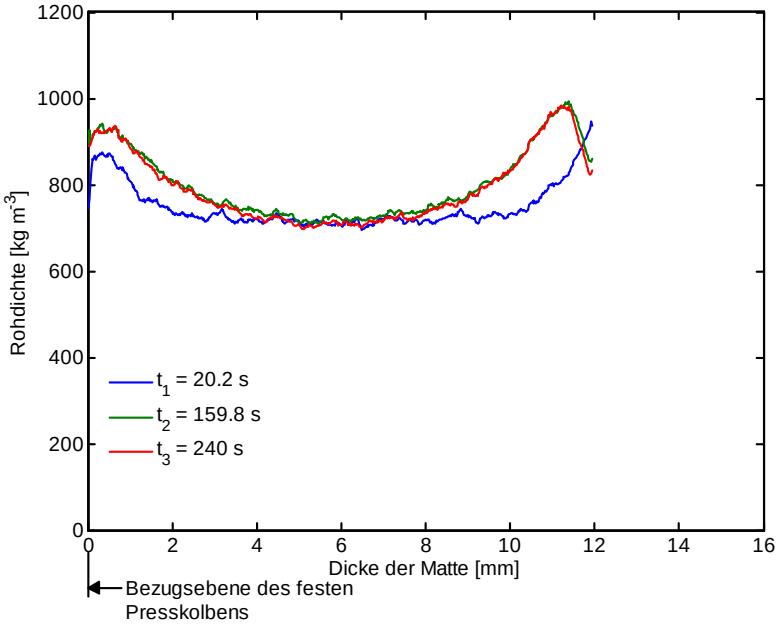


Abb. P- 74: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

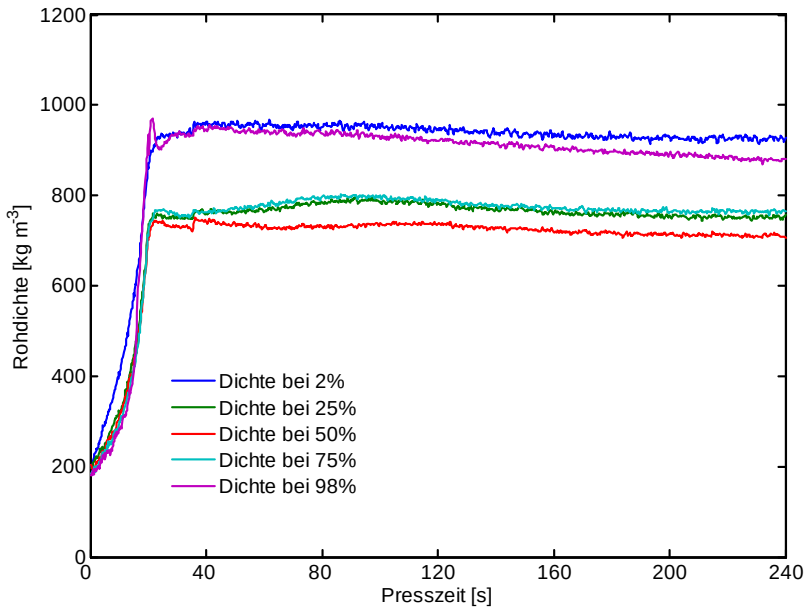


Abb. P- 75: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240.

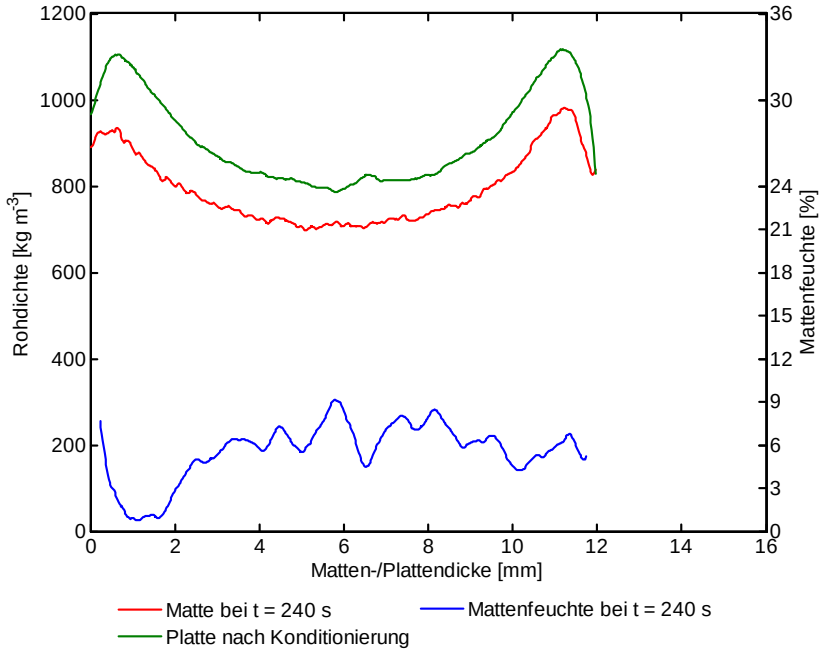


Abb. P- 76: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.16 Platte 12 mm_02_20_100_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,75	gravim.	838,22	gravim.	0,70	radiom.	18,62				
Endwert	19,05		808,51								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	767,62	95,78	radiom.	17,98	radiom.	0,64				
	Endwert	801,62			18,78		-0,15				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,55	radiom.	2,07	gravim.	3,81			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	20,2	0,33	2,79	897,01	116,86	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	32,6	0,27	2,27	1010,67	131,66	2,62	161,80	63,53	34,27	83,91
	Ende	240,0	0,33	2,44	944,15	123,00	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinteres Maximum	Beginn	20,2	0,21	1,75	926,39	120,68	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	32,8	0,59	4,92	1043,66	135,96	2,59	161,72	63,99	34,34	84,15
	Ende	240,0	0,77	6,46	997,51	129,95	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	730,29	95,14			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	79,0	730,73	88,91			0,67	157,49	106,31	76,00	111,84
	Maximum	104,6	738,62	90,11			0,32	161,70	115,68	99,94	122,23
	Ende	240,0	719,39	89,74			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	20,2	4,88	40,92	817,49	106,50	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	73,2	4,30	36,00	857,18	111,67	0,80	157,05	104,08	69,71	109,34
	Ende	240,0	4,45	37,26	844,12	109,96	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer GF	Beginn	20,2	5,01	41,97	819,77	106,79	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	74,0	3,62	30,38	858,58	111,85	0,77	155,40	104,39	70,59	109,68
	Ende	240,0	3,80	31,85	842,76	109,79	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	20,2	3,18	26,61	742,80	96,77	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	98,6	1,74	14,55	748,43	97,50	0,59	160,14	113,40	94,90	119,94
	Ende	240,0	2,26	18,94	729,01	94,97	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer Profilgrund	Beginn	20,2	3,40	28,53	741,72	96,63	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	83,0	1,81	15,21	743,56	96,86	0,56	158,52	108,62	82,39	114,46
	Ende	240,0	2,01	16,84	728,04	94,84	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18

Tab. P- 31:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 32

Probenname	Platte 12mm_02_20_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	20,2	1,67	13,96	767,62	100,00	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	82,8	2,10	17,59	822,16	107,10	0,59	158,12	107,79	79,96	113,48
	Ende	240,0	1,98	16,58	801,62	104,43	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
hintere Peakbase	Beginn	20,2	2,23	18,67	767,62	100,00	7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
erste Haltephase	Maximum	85,2	3,00	25,01	822,16	107,10	0,56	158,52	108,62	82,39	114,46
	Ende	240,0	2,98	24,96	801,62	104,43	0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	739,65	96,36			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	20,2	739,65	96,36			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Maximum	22,4	805,90	96,90			6,59	170,33	39,64	32,77	63,96
	Ende	240,0	763,47	95,24			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	725,87	94,56			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	227,8	713,06	88,88			0,06	177,39	139,67	116,12	145,59
	Maximum	234,4	720,69	89,80			0,05	177,95	140,52	116,43	146,46
	Ende	240,0	718,39	89,62			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	20,2	737,99	96,14			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Minimum	20,2	737,99	96,14			7,20	172,77	35,68	32,42	57,23
	Maximum	82,8	828,98	100,83			0,59	158,12	107,79	79,96	113,48
	Ende	240,0	802,45	100,10			0,02	178,48	141,25	116,71	147,18

Tab. P- 32:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

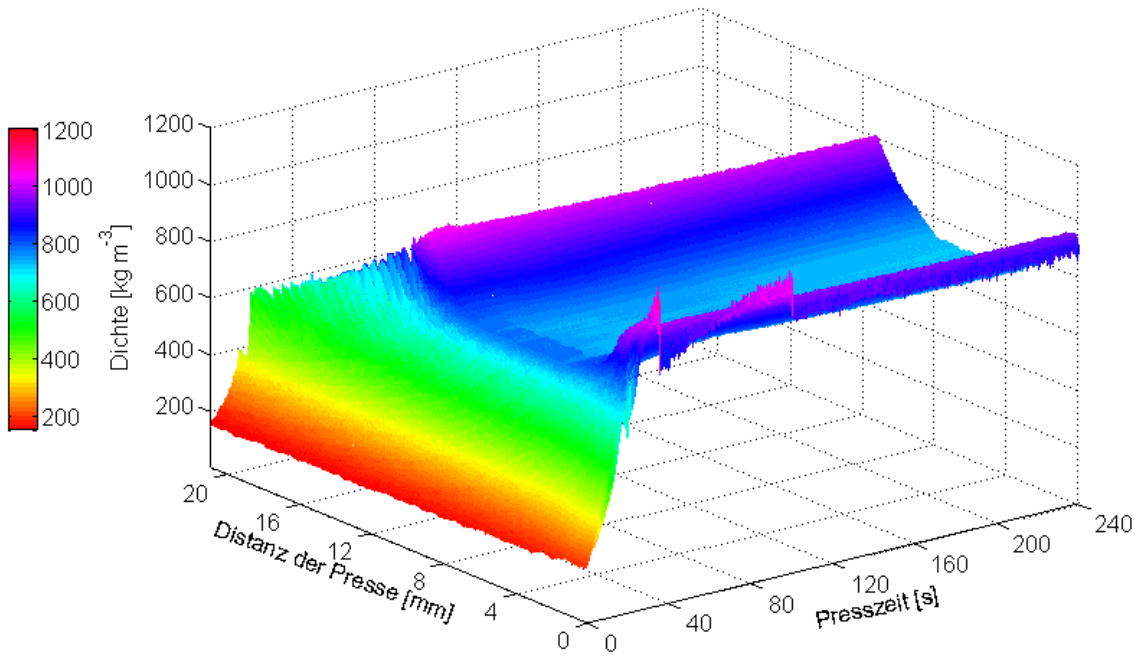


Abb. P- 77: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240.

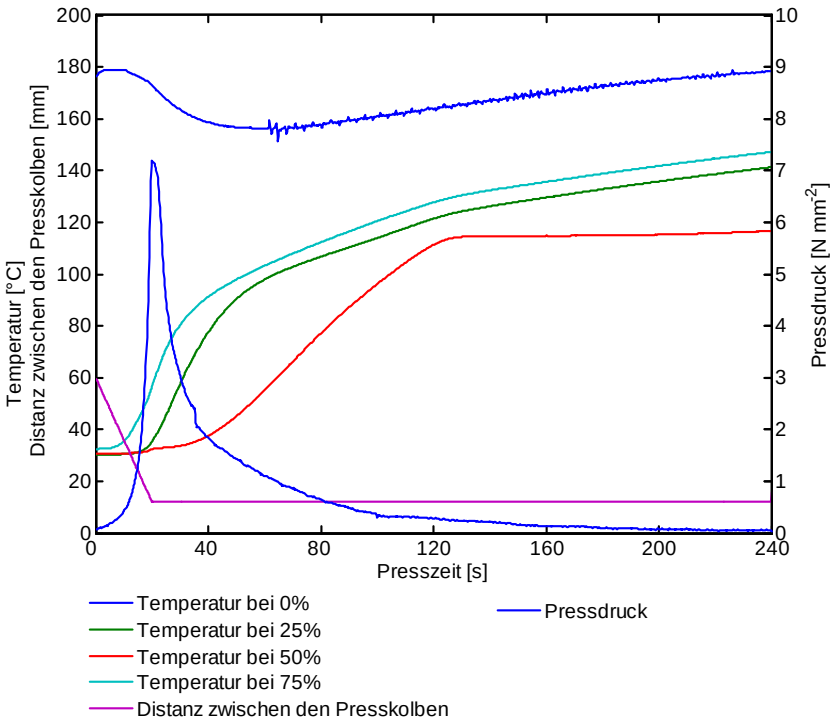


Abb. P- 78: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

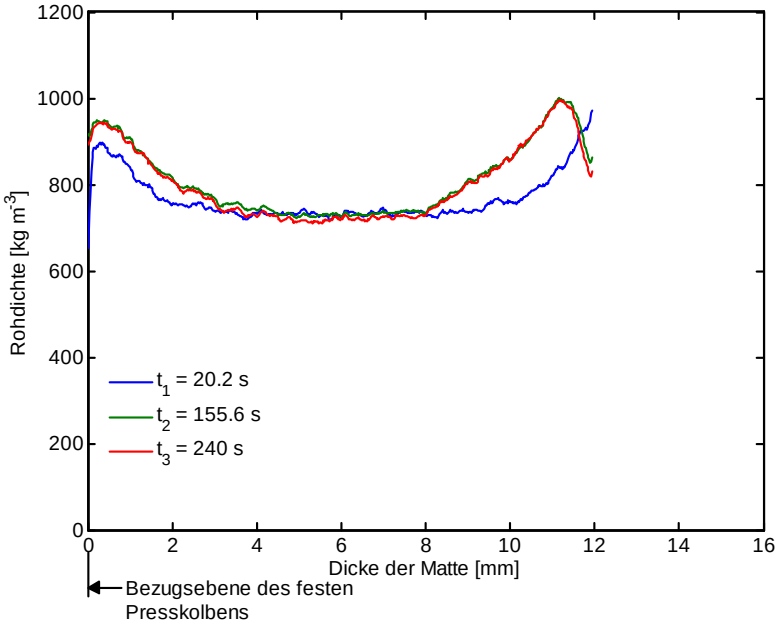


Abb. P- 79: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

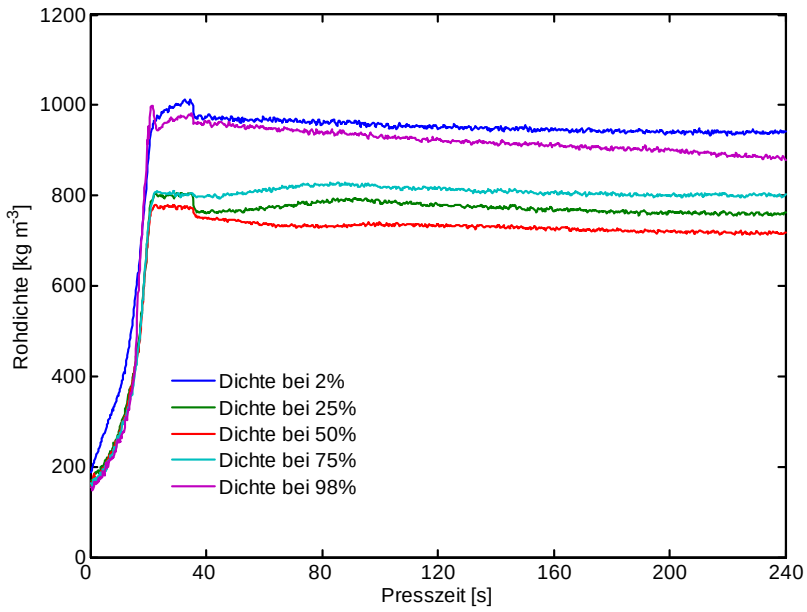


Abb. P- 80: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240.

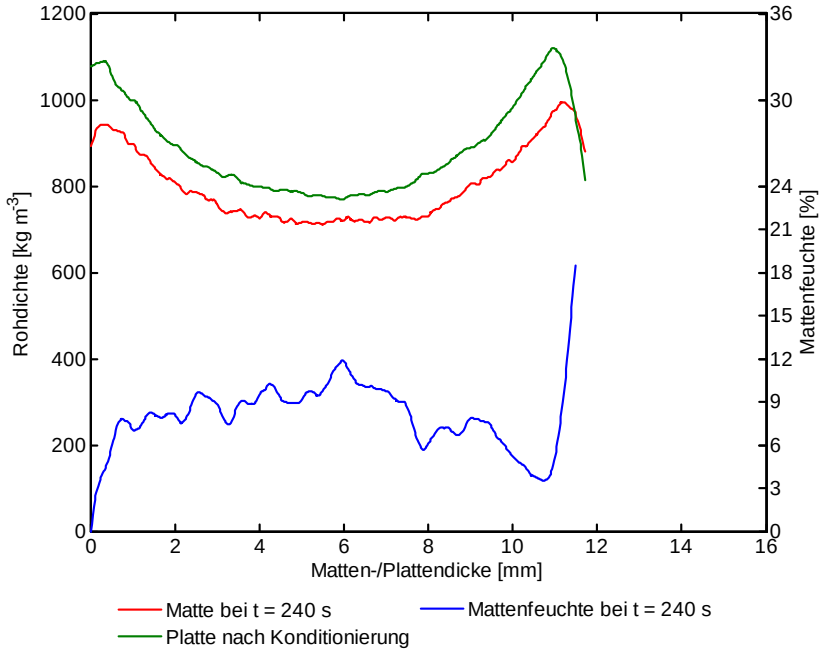


Abb. P- 81: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.17 Platte 12 mm_01_20_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,45	gravim.	825,48	gravim.	0,67	radiom.	19,39				
Endwert	18,78		797,22								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	672,89	98,93	radiom.	17,36	radiom.	2,03				
	Endwert	693,29	101,93		17,88		1,51				
zweite Haltephase	Startwert	755,10	100,60		17,66		1,73				
	Endwert	750,62	100,00		17,55		1,84				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,68	radiom.	-3,12	gravim.	3,68			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,42	3,17	781,67	116,17	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	44,4	0,43	3,26	837,82	124,51	1,17	161,78	81,51	39,62	89,56
	Ende	139,4	0,42	3,17	818,97	121,71	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,42	3,17	860,20	127,84	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	30,2	0,62	4,75	892,75	132,67	1,82	163,04	60,80	34,09	77,78
	Ende	139,4	0,69	5,23	869,19	129,17	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderes Maximum	Beginn	141,8	0,35	2,97	822,65	108,95	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,35	2,97	817,49	108,26	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
hinteres Maximum	Beginn	141,8	0,65	5,42	877,79	116,25	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,75	6,29	878,12	116,29	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	637,88	94,80			5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	85,8	621,31	88,45			0,45	164,58	104,28	72,66	105,43
	Maximum	115,0	632,47	90,20			0,26	166,99	115,70	95,25	115,81
	Ende	139,4	627,76	90,55			0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
zweite Haltephase	Beginn	141,8	741,35	98,18			2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
	Ende	240,0	739,69	98,54			0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,72	43,50	726,43	107,96	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	74,0	4,84	36,85	735,94	109,37	0,58	162,02	99,42	62,71	101,30
	Ende	139,4	5,13	39,06	735,36	109,28	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
hinterer GF	Beginn	19,6	5,11	38,91	720,29	107,04	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	70,8	4,36	33,17	738,41	109,74	0,60	163,65	98,05	59,99	100,19
	Ende	139,4	4,86	37,00	735,53	109,31	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderer GF	Beginn	141,8	5,16	43,36	778,85	103,15	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,10	42,83	775,97	102,76	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
hinterer GF	Beginn	141,8	4,46	37,41	775,70	102,73	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,43	37,24	774,71	102,60	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,63	35,26	646,19	96,03	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	81,4	1,79	13,66	633,44	94,14	0,47	164,58	102,53	69,01	103,91
	Ende	139,4	2,20	16,72	636,89	94,65	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	3,55	27,02	646,13	96,02	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	71,2	1,52	11,54	634,15	94,24	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
	Ende	139,4	2,24	17,04	637,02	94,67	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderer Profilgrund	Beginn	141,8	2,83	23,78	752,08	99,60	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,44	20,45	751,31	99,50	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
hinterer Profilgrund	Beginn	141,8	2,99	25,10	749,87	99,31	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,54	21,33	748,94	99,18	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	141,6	[mm]	12,03	[%]	101,05	2,81	171,90	124,88	112,16	125,43
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	141,8	2,06	17,31	707,87	93,75	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,06	17,31	700,99	92,84	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29
vorderes Maximum	Beginn	141,8	2,56	21,50	717,84	95,07	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,85	23,95	700,99	92,84	0,14	182,20	139,56	116,79	139,29

Tab. P- 33:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 34

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,29	9,83	672,89	100,00	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	85,0	2,49	18,96	702,73	104,43	0,47	164,87	103,96	72,02	105,14
	Ende	139,4	2,00	15,21	693,29	103,03	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
hintere Peakbase	Beginn	19,6	2,21	16,80	672,89	100,00	5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	139,4	3,31	24,26	702,73	104,43	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
	Ende	139,4	3,31	25,20	693,29	103,03	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
vordere Peakbase	Beginn	141,8	1,23	10,31	755,10	100,00	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	139,4	1,29	10,84	750,62	99,41	0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
hintere Peakbase	Beginn	141,8	1,77	14,86	755,10	100,00	2,58	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	139,4	1,67	13,99	750,62	99,41	0,18	182,20	139,56	116,79	139,29
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	638,00	94,81			5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	23,2	635,00	92,59			2,99	165,45	46,73	33,33	62,92
	Maximum	90,8	676,97	96,25			0,41	163,43	106,28	76,74	107,20
	Ende	139,4	654,68	94,43			0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	648,13	96,32			5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	78,8	622,20	88,49			0,52	164,28	101,43	66,82	102,98
	Maximum	115,2	641,48	91,52			0,26	168,35	115,79	95,39	115,88
	Ende	139,4	628,29	90,63			0,18	171,69	123,99	111,05	124,54
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	657,62	97,73			5,95	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	24,6	654,62	95,47			2,65	165,04	49,36	33,42	66,81
	Maximum	84,6	707,25	100,64			0,47	163,70	103,84	71,71	105,00
	Ende	139,4	692,81	99,93			0,18	171,69	123,99	111,05	124,54

Tab. P- 34:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

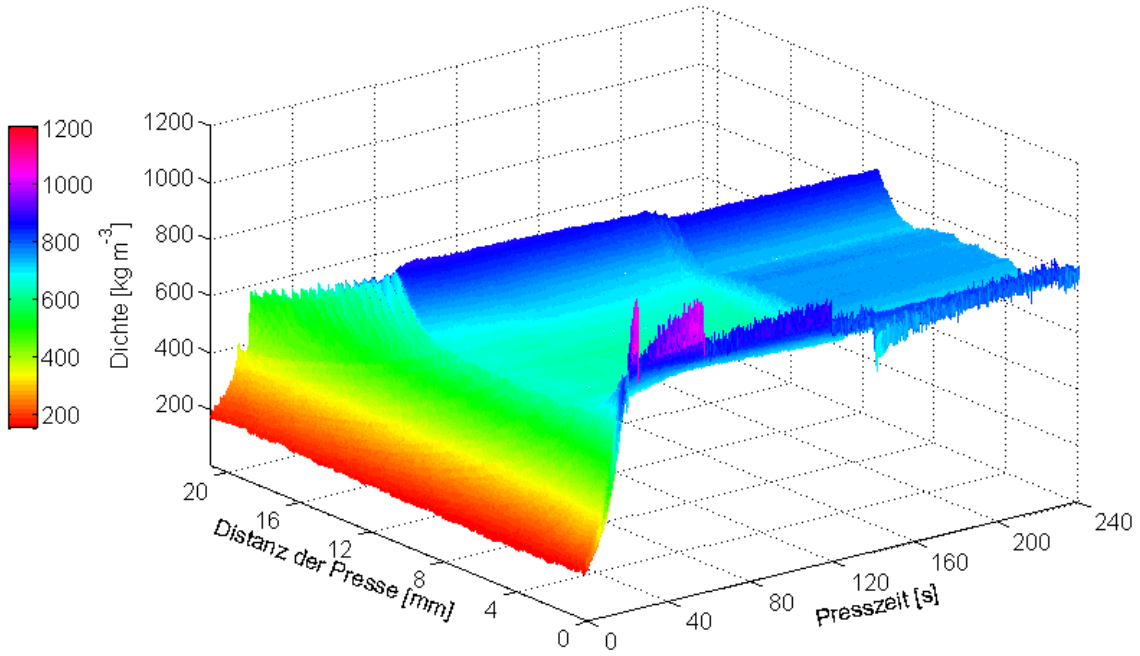


Abb. P- 82: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240.

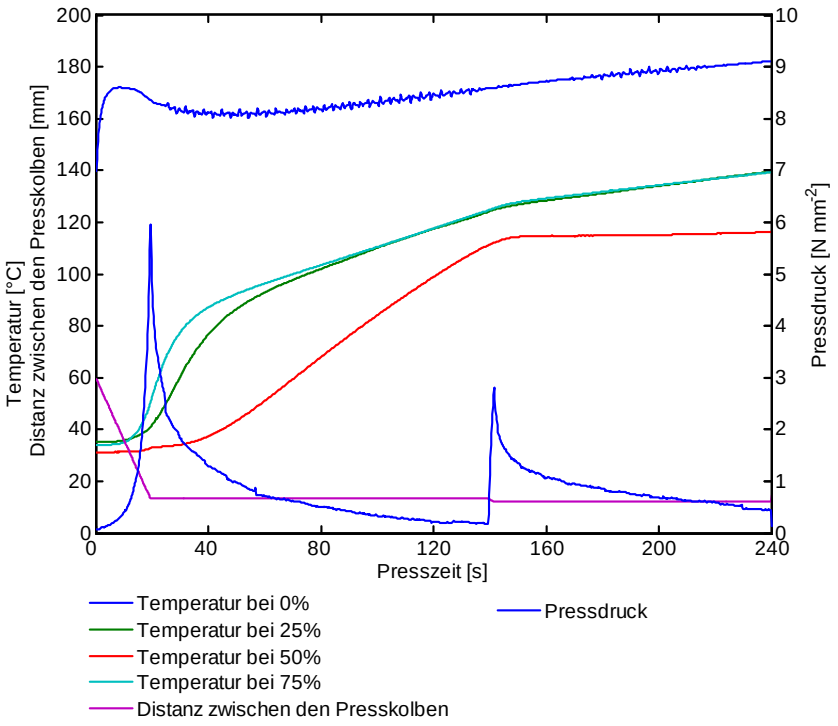


Abb. P- 83: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

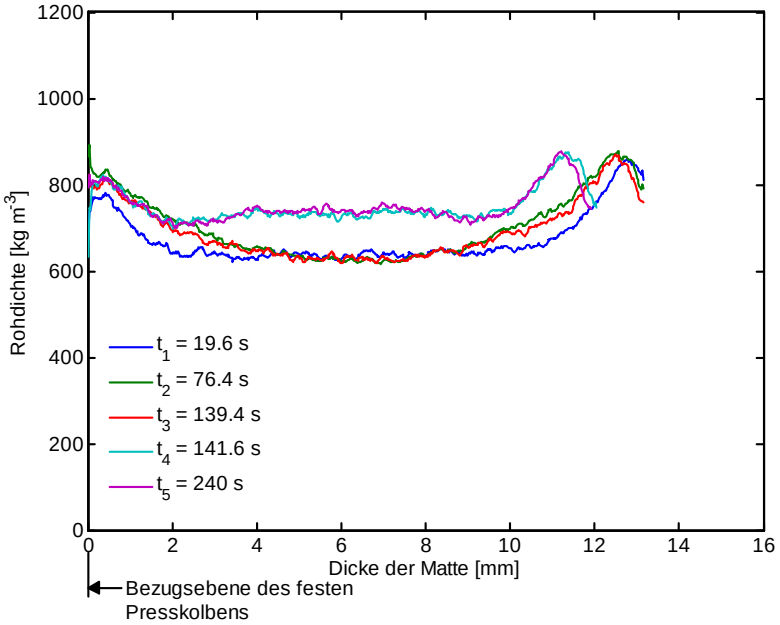


Abb. P- 84: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

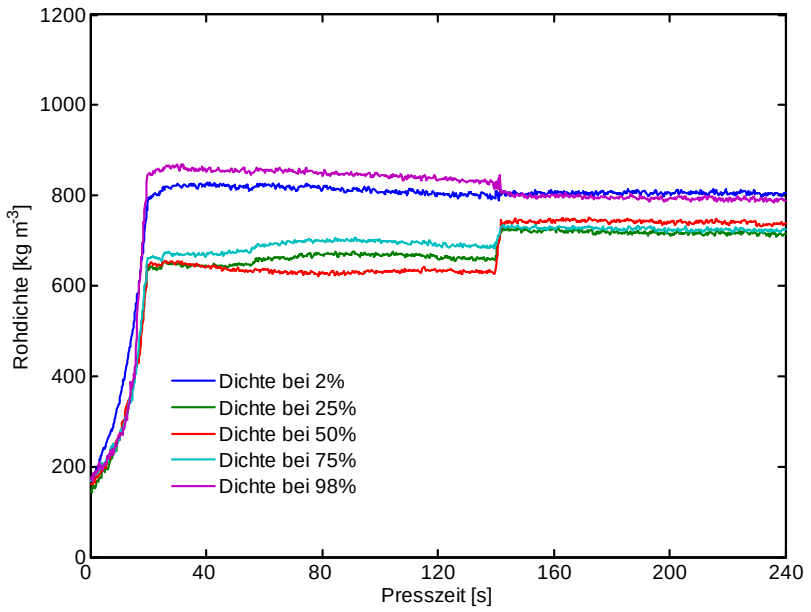


Abb. P- 85: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240.

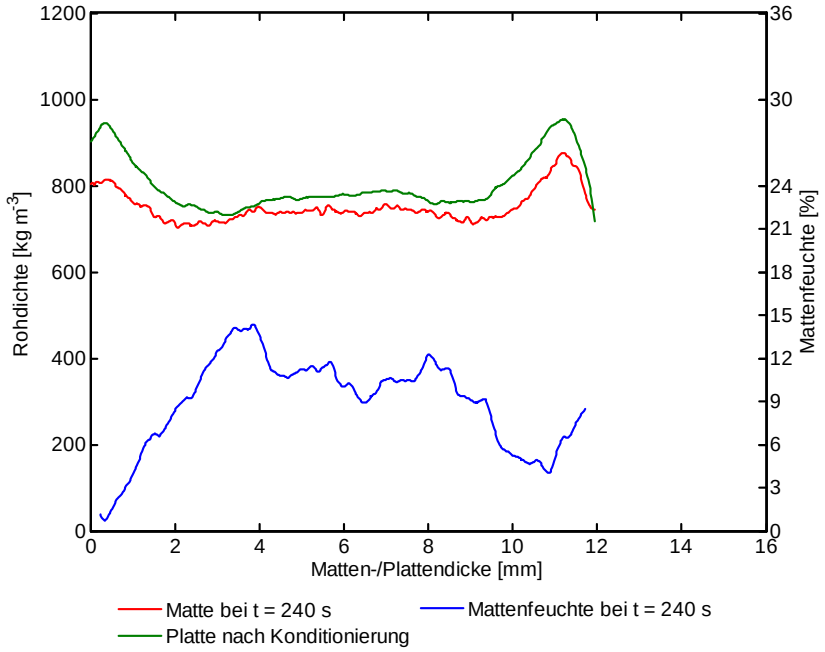


Abb. P- 86: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.18 Platte 12 mm_02_20_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,53	gravim.	828,88	gravim.	0,69	radiom.	18,69				
Endwert	18,84		799,59								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	734,80	104,79	radiom.	18,95	radiom.	-0,26				
	Endwert	716,29	102,15		18,48		0,21				
zweite Haltephase	Startwert	779,74	100,62		18,20		0,49				
	Endwert	774,94	100,00		18,09		0,60				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,57	radiom.	-0,56	gravim.	3,79			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,29	2,22	882,09	120,05	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	23,6	0,30	2,28	965,76	131,43	2,72	165,29	47,45	33,31	64,04
	Ende	139,4	0,29	3,17	845,16	115,02	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,23	1,74	918,43	124,99	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	23,4	0,61	4,66	951,74	129,52	2,74	165,35	47,08	33,31	63,49
	Ende	139,4	0,69	5,23	896,66	122,03	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderes Maximum	Beginn	141,8	0,42	3,50	856,85	109,89	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,46	3,85	852,25	109,30	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
hinteres Maximum	Beginn	141,8	0,56	4,73	908,08	116,46	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,73	6,13	902,81	115,78	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	696,93	94,85			5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	78,4	640,33	88,58			0,53	163,88	101,26	66,47	102,87
	Maximum	116,8	653,90	90,52			0,25	168,28	116,34	96,55	116,46
	Ende	139,4	647,88	90,45			0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
zweite Haltephase	Beginn	141,8	764,97	98,11			2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
	Ende	240,0	768,81	99,21			0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,57	42,39	798,18	108,63	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	54,6	4,64	35,36	804,94	109,55	0,85	161,00	89,66	46,69	94,20
	Ende	139,4	5,13	39,06	757,91	103,15	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
hinterer GF	Beginn	19,6	5,53	42,08	796,20	108,36	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	67,4	4,52	34,44	761,11	103,58	0,63	161,84	96,49	57,06	99,00
	Ende	139,4	4,65	35,42	756,44	102,95	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderer GF	Beginn	141,8	5,01	42,12	807,92	103,61	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,90	41,24	800,17	102,62	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
hinterer GF	Beginn	141,8	4,45	37,39	807,83	103,60	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,40	37,04	798,18	102,36	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	3,01	22,90	700,69	95,36	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	89,2	1,80	13,67	654,07	89,01	0,82	165,08	105,64	75,42	106,63
	Ende	139,4	2,01	15,29	655,02	89,14	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	4,01	30,51	705,57	96,02	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	75,4	1,39	10,56	651,90	88,72	0,55	163,57	100,38	64,59	102,09
	Ende	139,4	1,53	11,65	658,31	89,59	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
vorderer Profilgrund	Beginn	141,8	3,36	28,28	774,35	99,31	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,86	24,08	776,87	99,63	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
hinterer Profilgrund	Beginn	141,8	2,28	19,18	771,85	98,99	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,99	16,73	774,62	99,34	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	141,6	[mm]	12,03	[%]	101,23	2,88	171,90	124,88	112,16	125,43
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	141,8	2,39	20,14	739,90	94,89	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,14	18,04	730,79	93,72	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
vorderes Maximum	Beginn	141,8	2,96	24,87	730,14	93,64	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,04	25,57	730,79	93,72	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29

Tab. P- 35:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 36

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,81	13,79	734,80	100,00	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	55,6	2,82	21,45	758,41	103,21	0,82	161,88	90,25	47,41	94,55
	Ende	139,4	2,69	20,44	716,29	97,48	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
hintere Peakbase	Beginn	19,6	1,73	13,15	734,80	100,00	5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
erste Haltephase	Maximum	76,2	2,83	18,31	758,41	103,21	0,55	163,57	100,38	64,59	102,09
	Ende	139,4	2,73	20,76	716,29	97,48	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
vordere Peakbase	Beginn	141,8	1,23	10,33	779,74	100,00	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	139,4	1,23	10,33	774,94	99,38	0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
hintere Peakbase	Beginn	141,8	1,69	14,19	779,74	100,00	2,65	171,86	124,94	112,25	125,50
zweite Haltephase	Ende	139,4	1,56	13,13	774,94	99,38	0,17	182,20	139,56	116,79	139,29
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	717,52	97,65			5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	57,2	687,05	95,15			0,79	161,74	91,21	48,66	95,23
	Maximum	100,2	711,35	98,29			0,33	165,96	110,19	84,17	110,52
	Ende	139,4	695,42	97,09			0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	697,82	94,97			5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	71,8	630,41	87,22			0,60	163,41	98,45	60,83	100,53
	Maximum	117,4	651,02	90,11			0,24	168,79	116,54	96,96	116,67
	Ende	139,4	641,88	89,61			0,17	171,69	123,99	111,05	124,54
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	692,07	94,19			5,99	167,11	41,22	32,89	51,00
	Minimum	129,4	685,00	95,43			0,18	169,98	120,45	105,23	121,00
	Maximum	131,0	691,03	96,42			0,18	170,16	121,00	106,25	121,59
	Ende	139,4	690,59	96,41			0,17	171,69	123,99	111,05	124,54

Tab. P- 36:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

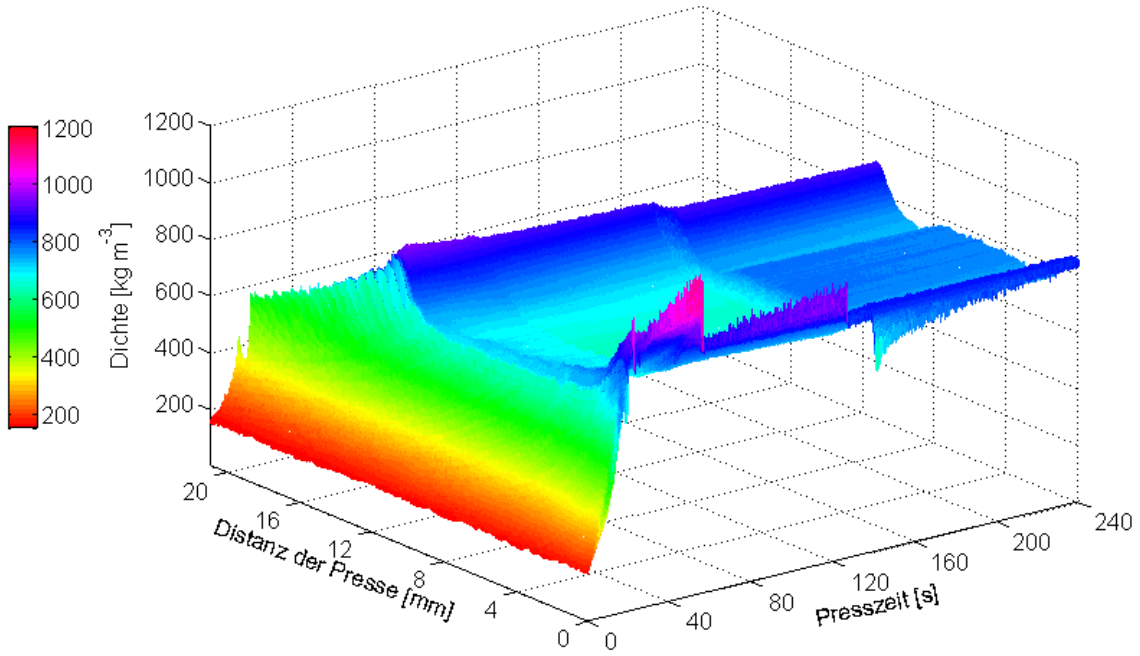


Abb. P- 87: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240.

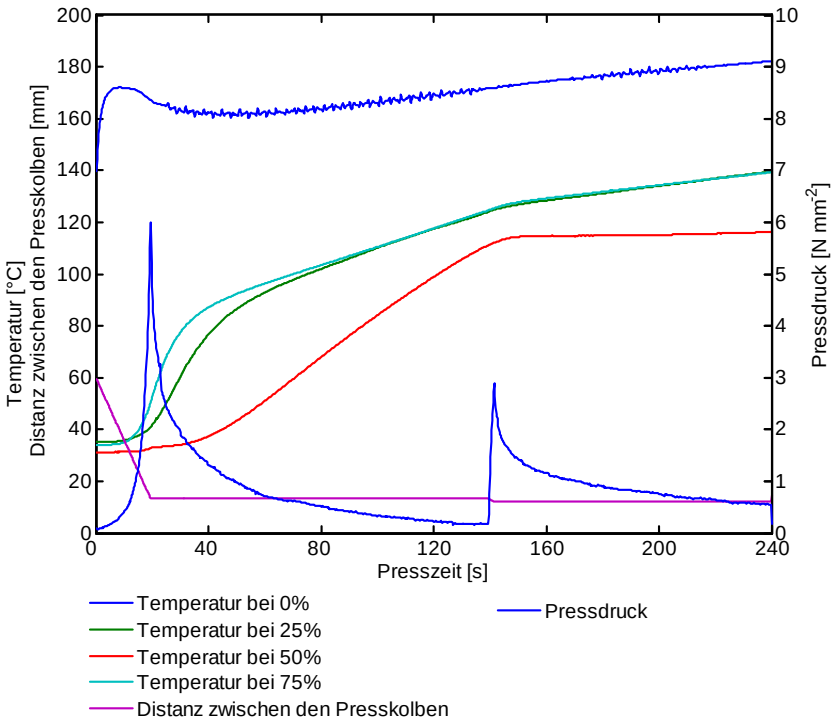


Abb. P- 88: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

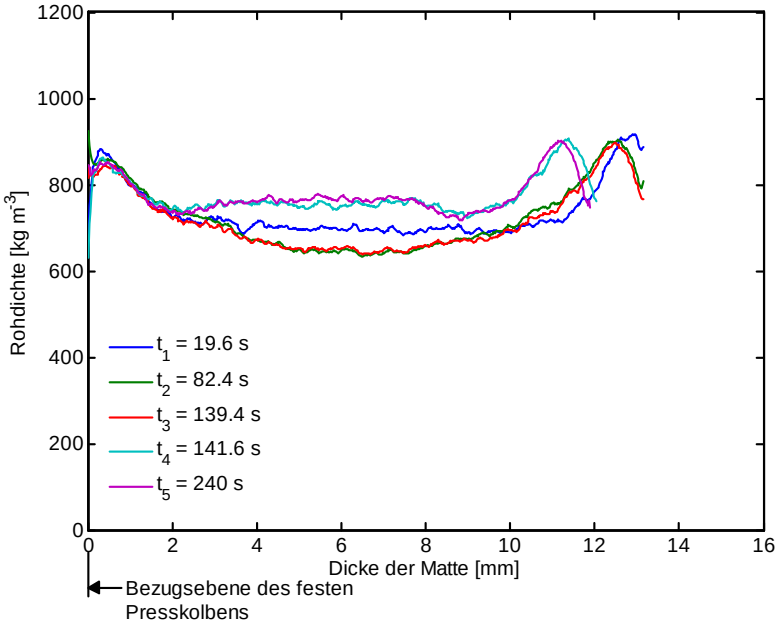


Abb. P- 89: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

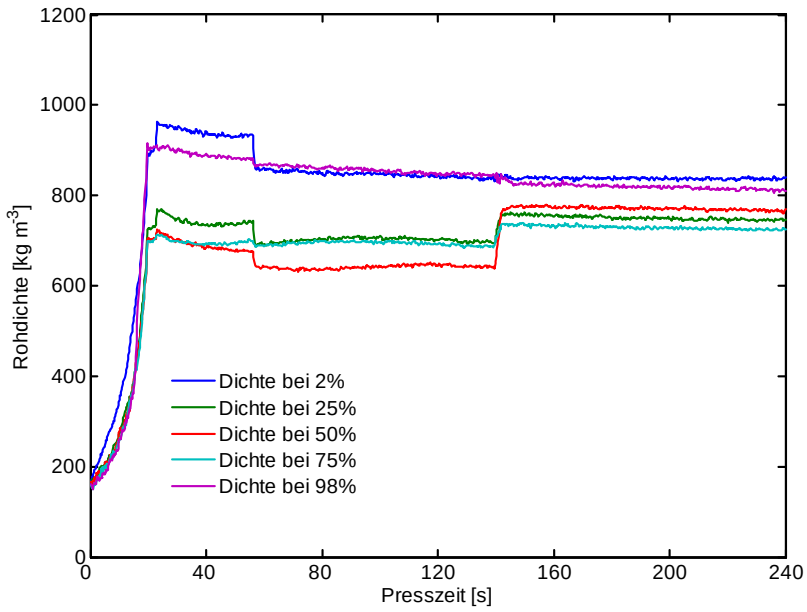


Abb. P- 90: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240.

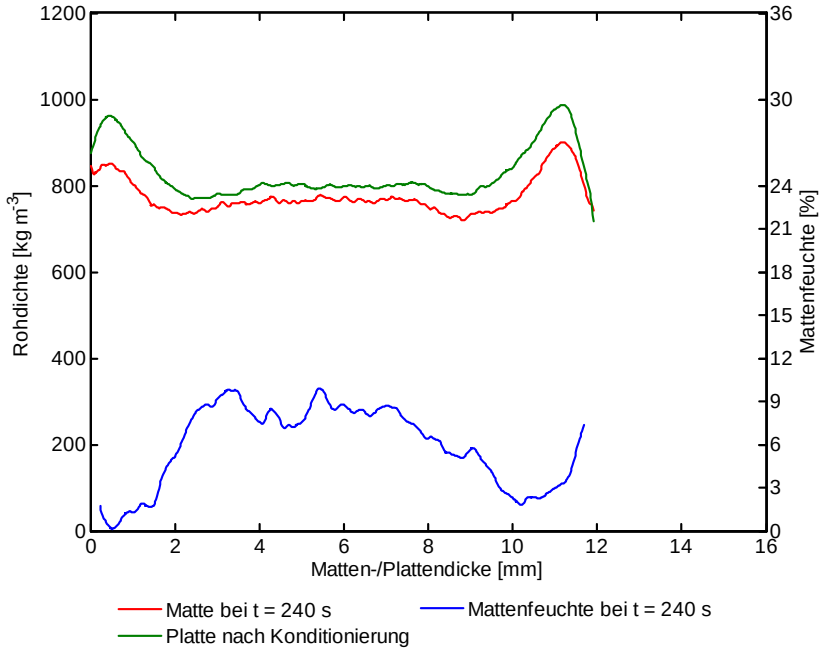


Abb. P- 91: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.19 Platte 12 mm_01_20_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,46	gravim.	825,91	gravim.	0,59	radiom.	21,93				
Endwert	18,87		800,87								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	702,79	96,26	radiom.	18,13	radiom.	3,80				
	Endwert	741,19	101,52		19,12		2,81				
zweite Haltephase	Startwert	804,02	99,80		18,80		3,13				
	Endwert	805,63	100,00		18,84		3,09				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,10	radiom.	3,93	gravim.	3,26			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,40	3,01	836,02	118,96	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	56,6	0,48	3,68	916,60	130,42	0,98	162,50	92,71	54,89	95,59
	Ende	159,2	0,40	3,01	885,06	125,93	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,21	1,58	881,75	125,46	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	34,0	0,54	4,09	970,74	138,13	1,95	163,99	69,04	42,80	77,62
	Ende	159,2	0,54	4,12	937,04	133,33	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderes Maximum	Beginn	161,8	0,25	2,10	885,40	110,12	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,37	3,15	892,22	110,97	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
hinteres Maximum	Beginn	161,8	0,48	4,02	949,25	118,06	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,56	4,72	944,93	117,52	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	685,62	97,56			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	154,6	679,77	91,75			0,14	171,95	123,76	114,43	125,26
	Maximum	155,8	682,83	92,17			0,14	172,29	123,97	114,48	125,45
	Ende	159,2	682,27	92,05			0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
zweite Haltephase	Beginn	161,8	795,30	98,91			2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
	Ende	240,0	805,22	99,95			0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,67	43,19	768,12	109,30	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	86,8	4,91	37,39	804,56	114,48	0,49	163,68	105,49	81,06	105,10
	Ende	159,2	5,24	39,86	792,17	112,72	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer GF	Beginn	19,6	5,76	43,82	770,07	109,57	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	73,4	4,74	36,05	807,34	114,88	0,68	162,73	100,50	69,30	101,13
	Ende	159,2	4,86	37,00	793,48	112,90	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer GF	Beginn	161,8	4,91	41,26	827,77	102,95	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,91	41,26	827,77	102,95	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer GF	Beginn	161,8	4,52	37,94	824,05	102,49	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,50	37,76	829,69	103,19	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,61	35,10	688,45	97,96	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	101,2	2,32	17,69	689,92	98,17	0,49	166,15	110,48	92,82	109,58
	Ende	159,2	3,18	24,17	690,59	98,26	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	4,78	36,37	690,36	98,23	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	92,4	1,83	13,94	689,18	98,06	0,57	163,43	103,33	75,68	103,25
	Ende	159,2	2,30	17,51	689,77	98,15	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer Profilgrund	Beginn	161,8	2,50	20,98	805,04	100,13	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,35	19,76	810,83	100,85	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer Profilgrund	Beginn	161,8	2,12	17,80	803,89	99,98	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,04	17,13	814,64	101,32	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	161,0	[mm]	12,33	[%]	103,50	2,13	173,23	125,02	114,57	126,31
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	161,8	2,77	23,25	746,24	92,81	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,81	23,60	742,47	92,34	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24
vorderes Maximum	Beginn	161,8	2,85	23,95	739,40	91,96	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,02	25,35	742,47	92,34	0,16	180,66	135,31	116,60	136,24

Tab. P- 37:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 38

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,77	13,47	702,79	100,00	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	87,0	2,31	17,57	753,39	107,20	0,49	163,15	105,55	81,19	105,15
	Ende	159,2	2,02	15,37	741,19	105,46	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
hintere Peakbase	Beginn	19,6	1,52	11,57	702,79	100,00	6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	80,6	2,63	19,92	753,39	107,20	0,57	163,43	103,33	75,68	103,25
	Ende	159,2	2,56	19,49	741,19	105,46	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
vordere Peakbase	Beginn	161,8	1,37	11,54	804,02	100,00	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	159,2	1,15	9,62	805,63	100,20	0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
hintere Peakbase	Beginn	161,8	1,69	14,16	804,02	100,00	2,46	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	159,2	1,69	14,16	805,63	100,20	0,14	180,66	135,31	116,60	136,24
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	663,49	94,41			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	19,6	663,49	94,41			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Maximum	97,0	721,32	95,94			0,41	165,44	109,08	89,47	108,24
	Ende	159,2	700,09	94,45			0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	685,95	97,60			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	98,0	672,40	89,44			0,40	164,81	109,41	90,25	108,57
	Maximum	133,4	689,26	92,22			0,20	169,21	119,91	112,82	120,99
	Ende	159,2	677,68	91,43			0,14	172,92	124,53	114,47	125,89
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	663,56	94,42			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	19,6	663,56	94,42			6,55	168,56	44,13	40,96	46,09
	Maximum	84,6	726,83	96,43			0,51	165,57	104,77	79,18	104,44
	Ende	159,2	700,31	94,49			0,14	172,92	124,53	114,47	125,89

Tab. P- 38:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

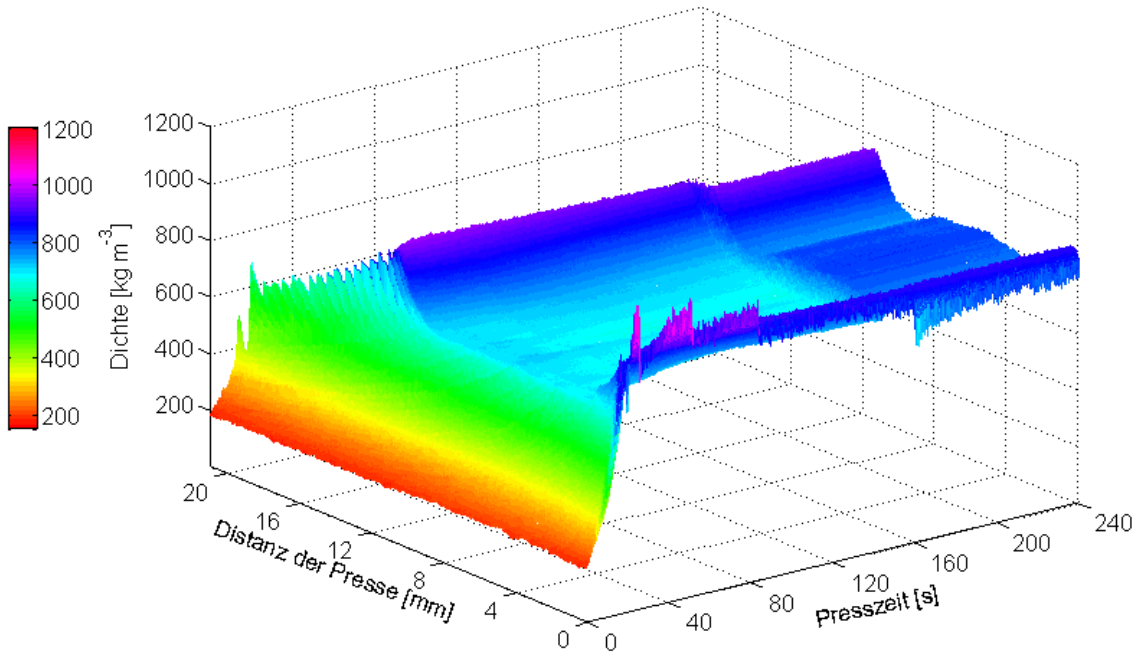


Abb. P- 92: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240.

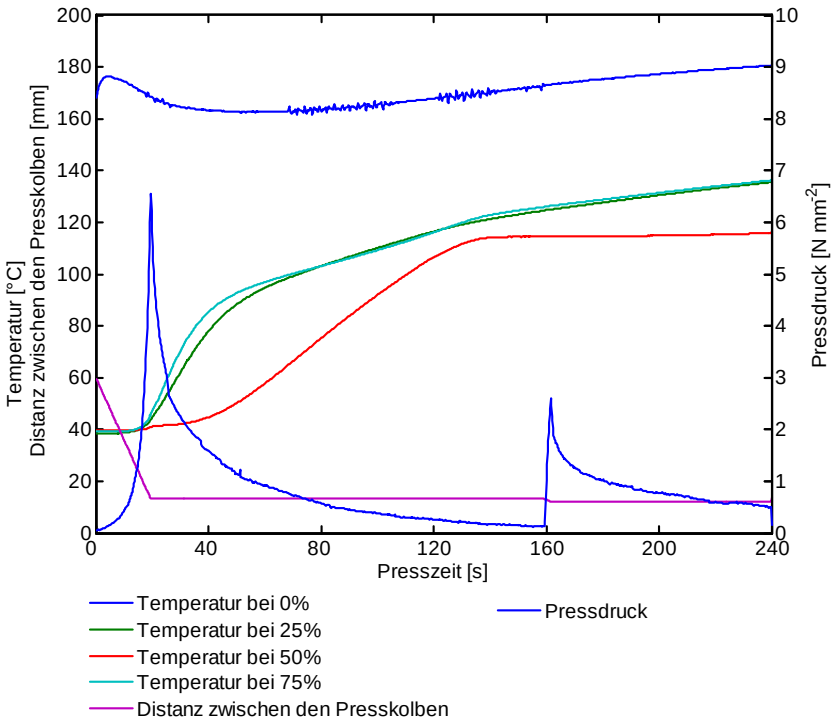


Abb. P- 93: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

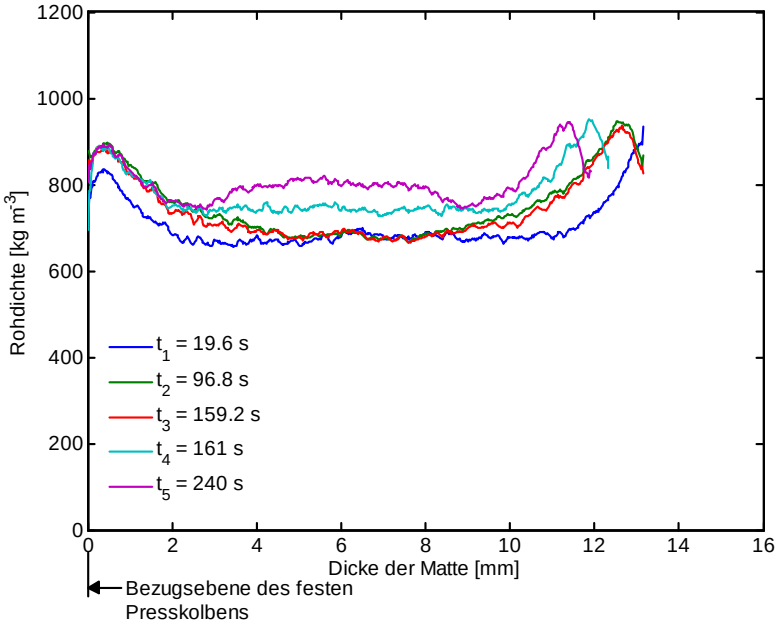


Abb. P- 94: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

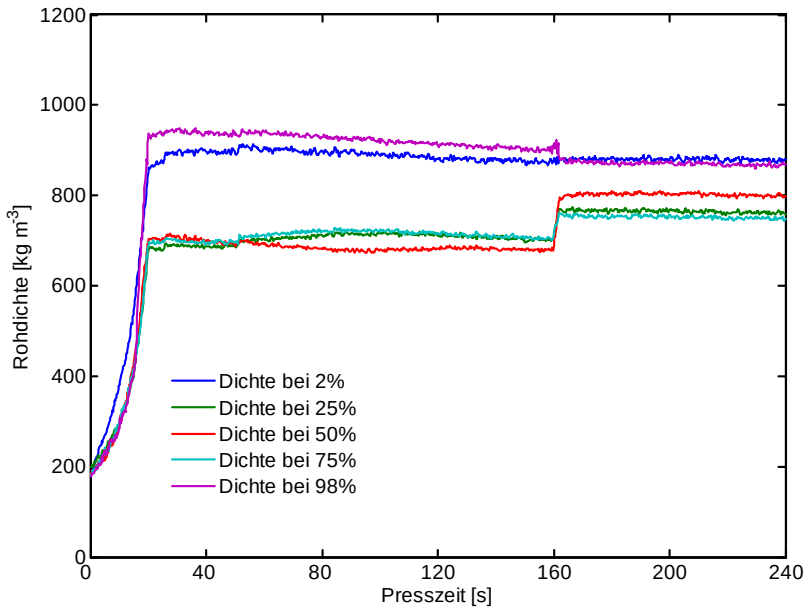


Abb. P- 95: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240.

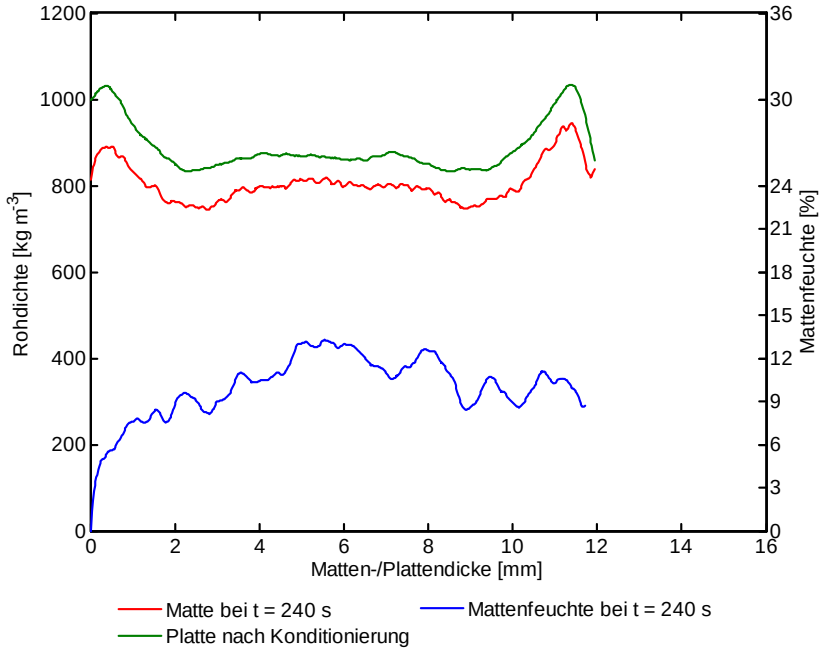


Abb. P- 96: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.20 Platte 12 mm_02_20_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,62	gravim.	832,70	gravim.	0,55	radiom.	19,29				
Endwert	19,07		809,27								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	734,62	99,76	radiom.	18,92	radiom.	0,37				
	Endwert	750,25	101,88		19,32		-0,03				
zweite Haltephase	Startwert	813,10	100,05		18,98		0,31				
	Endwert	812,67	100,00		18,97		0,32				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,34	radiom.	3,80	gravim.	3,02			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,25	1,90	857,93	116,79	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	37,4	0,33	2,54	907,53	123,54	1,44	163,40	74,38	43,75	82,40
	Ende	159,2	0,25	2,22	883,80	120,31	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,25	1,90	928,40	126,38	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	28,2	0,68	5,17	972,29	132,35	2,04	165,21	58,70	41,87	66,38
	Ende	159,2	0,67	5,08	950,57	129,40	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderes Maximum	Beginn	161,8	0,46	3,85	897,60	110,39	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,27	2,28	889,89	109,44	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinteres Maximum	Beginn	161,8	0,52	4,38	953,75	117,30	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,65	5,43	950,71	116,92	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtdichte		Position	0,0				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	698,42	95,07			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	80,6	674,84	89,01			0,44	163,43	103,33	75,68	103,25
	Maximum	114,0	685,21	90,51			0,26	167,10	114,65	102,41	113,93
	Ende	159,2	679,64	90,59			0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
zweite Haltephase	Beginn	161,8	803,46	98,81			2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
	Ende	240,0	812,53	99,98			0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Gradientfaktor		Position	0,0		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,60	42,70	795,45	108,28	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	73,0	4,81	36,63	800,83	109,01	0,54	163,23	100,36	68,94	101,02
	Ende	159,2	5,08	38,73	795,07	108,23	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer GF	Beginn	19,6	5,39	41,11	795,26	108,25	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	75,8	4,49	34,22	800,55	108,97	0,48	163,17	101,46	71,46	101,84
	Ende	159,2	4,71	35,87	795,16	108,24	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer GF	Beginn	161,8	4,88	41,07	834,28	102,60	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,88	41,07	832,13	102,34	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer GF	Beginn	161,8	4,32	36,34	837,16	102,96	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,26	35,81	829,29	101,99	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,37	33,33	706,49	96,17	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	98,6	1,75	13,35	689,70	93,88	0,43	165,13	109,62	90,75	108,75
	Ende	159,2	2,19	16,67	688,74	93,75	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	3,96	30,16	709,72	96,61	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	79,0	1,47	11,18	685,36	93,29	0,52	162,73	100,50	69,30	101,13
	Ende	159,2	1,62	12,38	688,74	93,75	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vorderer Profilgrund	Beginn	161,8	2,38	20,05	808,50	99,43	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,95	16,37	820,56	100,92	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
hinterer Profilgrund	Beginn	161,8	1,88	15,85	811,61	99,82	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,59	13,40	818,87	100,71	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	161,2	[mm]	12,26	[%]	103,15	2,83	173,23	125,01	114,59	126,35
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	161,8	2,60	21,89	747,50	91,93	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,69	22,59	743,81	91,48	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24
vorderes Maximum	Beginn	161,8	3,35	28,20	754,30	92,77	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,41	28,72	743,81	91,48	0,23	180,66	135,31	116,60	136,24

Tab. P- 39:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 40

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,42	10,79	734,62	100,00	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	82,0	2,22	16,91	757,59	103,13	0,43	162,43	103,82	76,87	103,66
	Ende	159,2	2,12	16,19	750,25	102,13	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hintere Peakbase	Beginn	19,6	1,83	13,97	734,62	100,00	6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
erste Haltephase	Maximum	73,4	2,85	21,52	757,59	103,13	0,52	162,73	100,50	69,30	101,13
	Ende	159,2	2,58	19,68	750,25	102,13	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
vordere Peakbase	Beginn	161,8	1,29	10,86	813,10	100,00	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	159,2	1,27	10,68	812,67	99,95	0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
hintere Peakbase	Beginn	161,8	1,85	15,59	813,10	100,00	2,90	173,18	125,00	114,60	126,48
zweite Haltephase	Ende	159,2	1,83	15,41	812,67	99,95	0,12	180,66	135,31	116,60	136,24
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	in [kg m-3]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	694,38	94,52			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	19,6	694,38	94,52			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Maximum	96,6	728,37	96,11			0,37	165,80	108,94	89,15	108,11
	Ende	159,2	705,03	93,97			0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	in [kg m-3]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	694,82	94,58			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	76,6	670,63	88,45			0,46	162,74	101,75	72,14	102,08
	Maximum	125,6	687,27	91,00			0,23	168,80	117,98	109,55	118,20
	Ende	159,2	681,51	90,84			0,12	172,92	124,53	114,47	125,89
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m-3]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	698,20	95,04			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Minimum	19,6	698,20	95,04			6,12	168,56	44,13	40,96	46,09
	Maximum	91,6	731,52	96,47			0,38	164,47	107,21	85,06	106,54
	Ende	159,2	711,82	94,88			0,12	172,92	124,53	114,47	125,89

Tab. P- 40:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

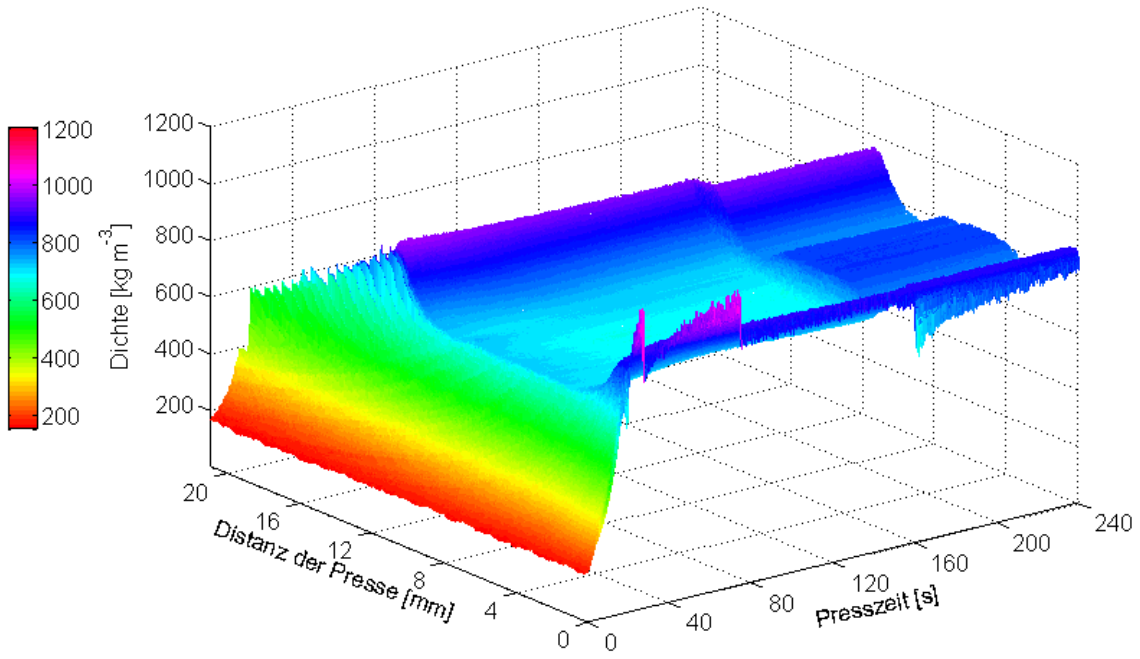


Abb. P- 97: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240.

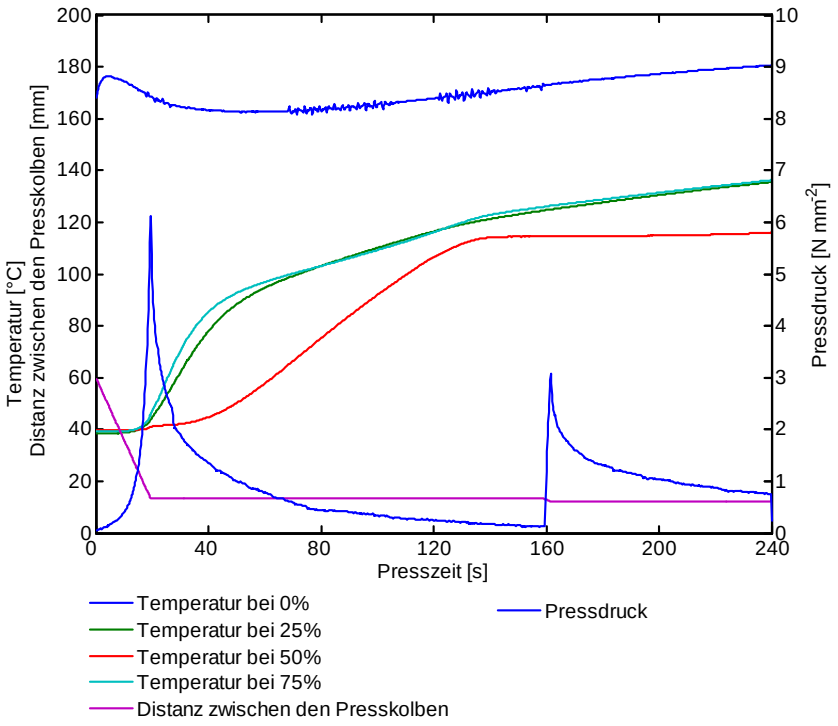


Abb. P- 98: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

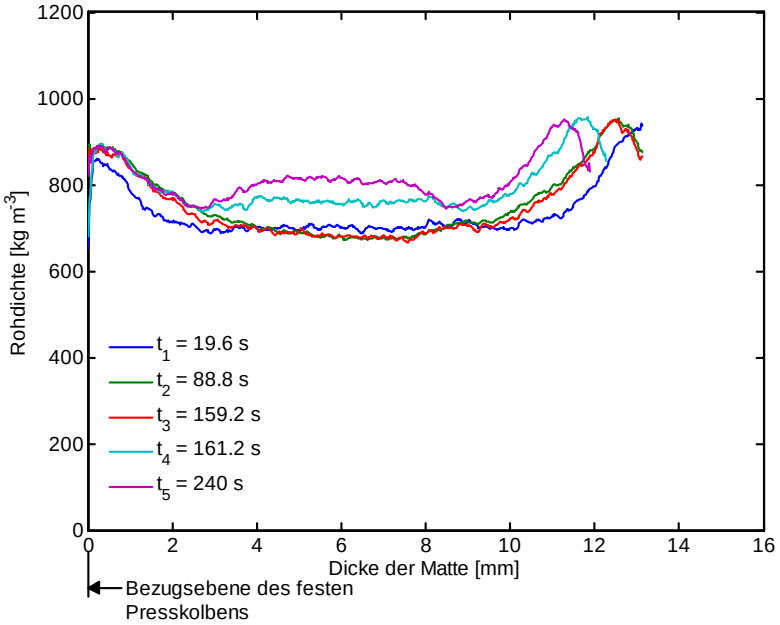


Abb. P- 99: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

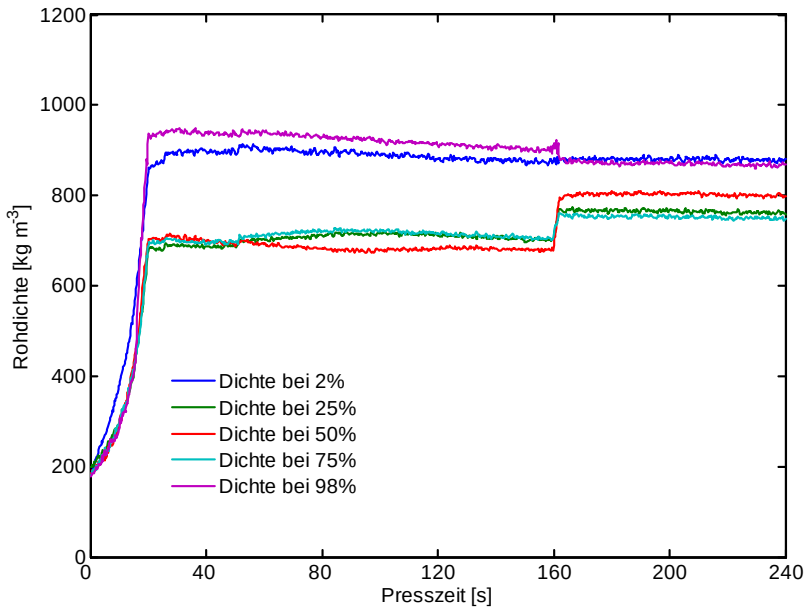


Abb. P- 100: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240.

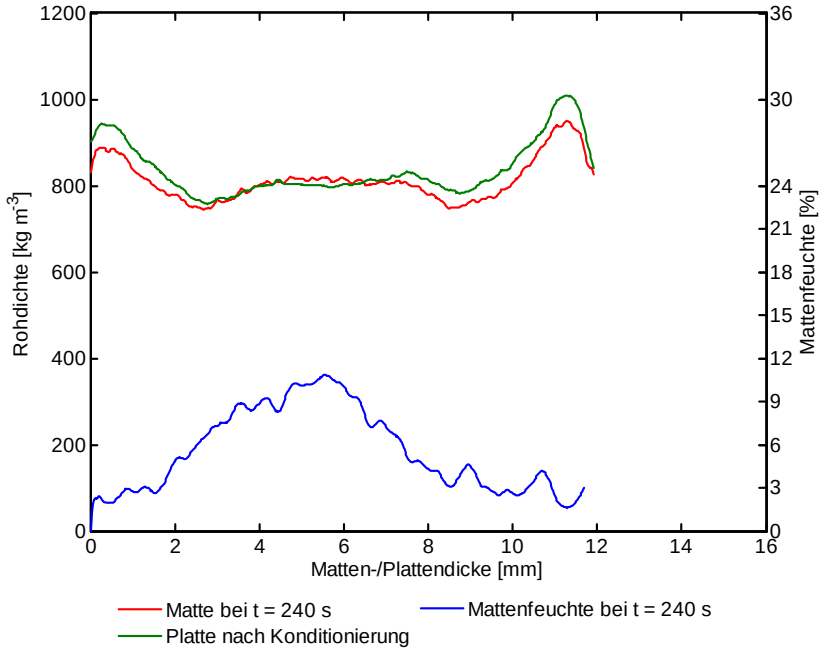


Abb. P- 101: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.21 Platte 12 mm_01_20_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,40	gravim.	823,36	gravim.	0,67	radiom.	21,62				
Endwert	18,73		795,10								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	708,14	98,36	radiom.	18,24	radiom.	3,38				
	Endwert	727,91	101,10		18,75		2,87				
zweite Haltephase	Startwert	787,31	99,17		18,38		3,24				
	Endwert	793,92	100,00		18,53		3,09				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,67	radiom.	2,56	gravim.	3,69			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,33	2,54	854,28	120,64	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	36,8	0,30	2,29	910,30	128,55	1,46	154,32	71,51		69,46
	Ende	179,4	0,33	3,17	876,55	123,78	0,08	172,82	124,41		121,19
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,37	2,86	892,80	126,08	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	31,2	0,52	4,00	948,05	133,88	1,74	153,57	62,55		62,64
	Ende	179,4	0,56	4,29	905,32	127,85	0,08	172,82	124,41		121,19
vorderes Maximum	Beginn	181,8	0,25	2,10	891,98	113,30	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,10	884,71	112,37	0,28	180,20	131,62		127,84
hinteres Maximum	Beginn	181,8	0,67	5,60	925,76	117,59	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,81	6,83	924,88	117,47	0,28	180,20	131,62		127,84
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	667,19	94,22			5,94	153,56	45,63		48,25
	Minimum	177,4	661,73	90,99			0,10	172,27	124,19		121,00
	Maximum	179,4	664,01	91,22			0,08	172,82	124,41		121,19
	Ende	179,4	664,01	91,22			0,08	172,82	124,41		121,19
zweite Haltephase	Beginn	181,8	782,86	99,43			2,98	174,03	124,76		121,49
	Ende	240,0	802,28	101,05			0,28	180,20	131,62		127,84
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,56	42,38	765,22	108,06	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	69,6	4,85	36,95	793,38	112,04	0,57	156,62	98,18		91,46
	Ende	179,4	5,18	39,52	776,78	109,69	0,08	172,82	124,41		121,19
hinterer GF	Beginn	19,6	5,45	41,59	766,36	108,22	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	65,0	4,60	35,05	791,61	111,79	0,63	155,58	96,06		89,22
	Ende	179,4	4,83	36,83	773,10	109,17	0,08	172,82	124,41		121,19
vorderer GF	Beginn	181,8	4,94	41,59	819,47	104,08	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,72	39,67	807,44	102,56	0,28	180,20	131,62		127,84
hinterer GF	Beginn	181,8	4,61	38,79	817,59	103,85	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,55	38,27	817,29	103,81	0,28	180,20	131,62		127,84
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,33	33,02	674,61	95,27	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	91,2	2,06	15,73	682,01	96,31	0,48	160,74	106,14		101,23
	Ende	179,4	2,58	19,68	673,47	95,10	0,08	172,82	124,41		121,19
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	3,93	30,00	676,89	95,59	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	177,8	1,84	14,00	671,48	94,82	0,45	160,47	103,06		97,44
	Ende	179,4	1,92	14,60	672,33	94,94	0,08	172,82	124,41		121,19
vorderer Profilgrund	Beginn	181,8	2,13	17,95	789,29	100,25	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,32	11,12	807,44	102,56	0,28	180,20	131,62		127,84
hinterer Profilgrund	Beginn	181,8	1,81	15,25	787,90	100,08	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,63	13,75	809,38	102,80	0,28	180,20	131,62		127,84
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	181,0	[mm]	12,43	[%]	104,55	2,54	173,69	124,70		121,42
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	181,8	2,89	24,34	728,85	92,57	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,64	22,24	727,08	92,35	0,28	180,20	131,62		127,84
vorderes Maximum	Beginn	181,8	2,52	21,19	733,48	93,16	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,29	27,67	727,08	92,35	0,28	180,20	131,62		127,84

Tab. P- 41:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 42

Probenname	Platte 12mm_01_20_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,60	12,22	708,14	100,00	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	80,8	2,40	18,32	748,51	105,70	0,48	158,99	102,44		96,61
	Ende	179,4	2,31	17,62	727,91	102,79	0,08	172,82	124,41		121,19
hintere Peakbase	Beginn	19,6	2,00	15,24	708,14	100,00	5,94	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	82,6	2,91	21,59	748,51	105,70	0,45	160,47	103,06		97,44
	Ende	179,4	2,66	20,32	727,91	102,79	0,08	172,82	124,41		121,19
vordere Peakbase	Beginn	181,8	1,31	11,03	787,31	100,00	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	179,4	1,27	10,68	793,92	100,84	0,08	172,82	124,41		121,19
hintere Peakbase	Beginn	181,8	1,81	15,24	787,31	100,00	2,98	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	179,4	1,69	14,19	793,92	100,84	0,08	180,20	131,62		127,84
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	684,41	96,65			5,94	153,56	45,63		48,25
	Minimum	26,0	681,58	93,72			2,42	153,83	53,99		55,58
	Maximum	92,8	724,83	96,78			0,38	160,66	106,76		101,92
	Ende	179,4	692,96	95,20			0,08	172,82	124,41		121,19
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	664,81	93,88			5,94	153,56	45,63		48,25
	Minimum	172,6	658,58	90,34			0,11	170,27	123,55		120,53
	Maximum	174,6	671,55	92,18			0,10	171,74	123,82		120,74
	Ende	179,4	662,17	90,97			0,08	172,82	124,41		121,19
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	683,83	96,57			5,94	153,56	45,63		48,25
	Minimum	19,6	683,83	96,57			5,94	153,56	45,63		48,25
	Maximum	88,4	733,72	97,99			0,39	161,10	105,10		99,99
	Ende	179,4	707,56	97,20			0,08	172,82	124,41		121,19

Tab. P- 42:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

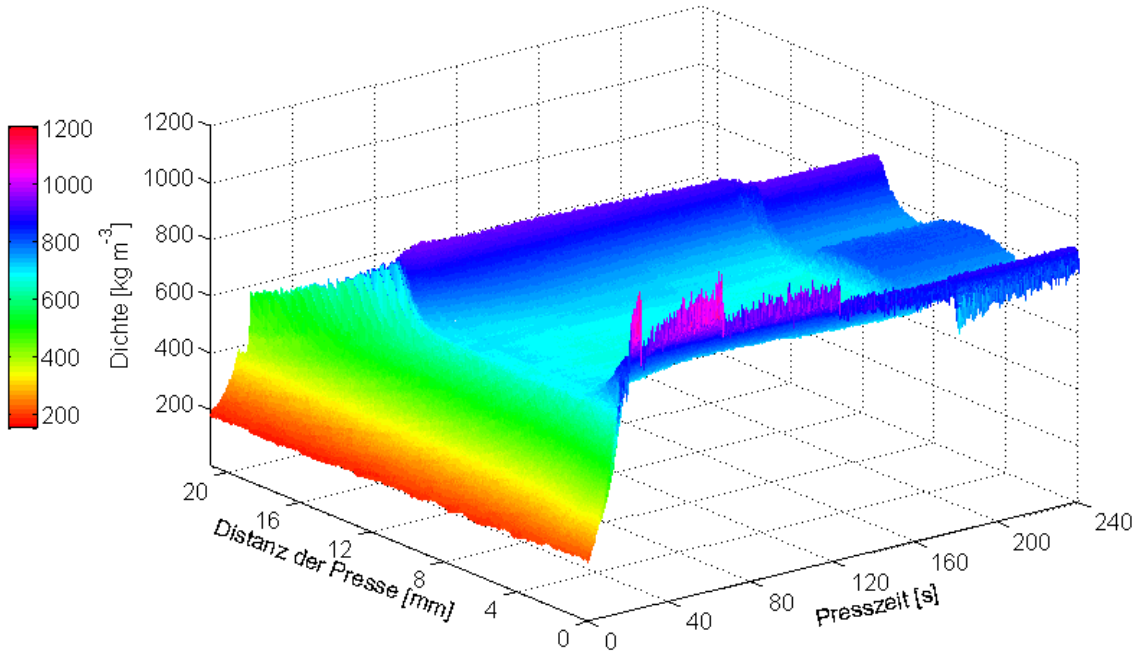


Abb. P- 102: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240.

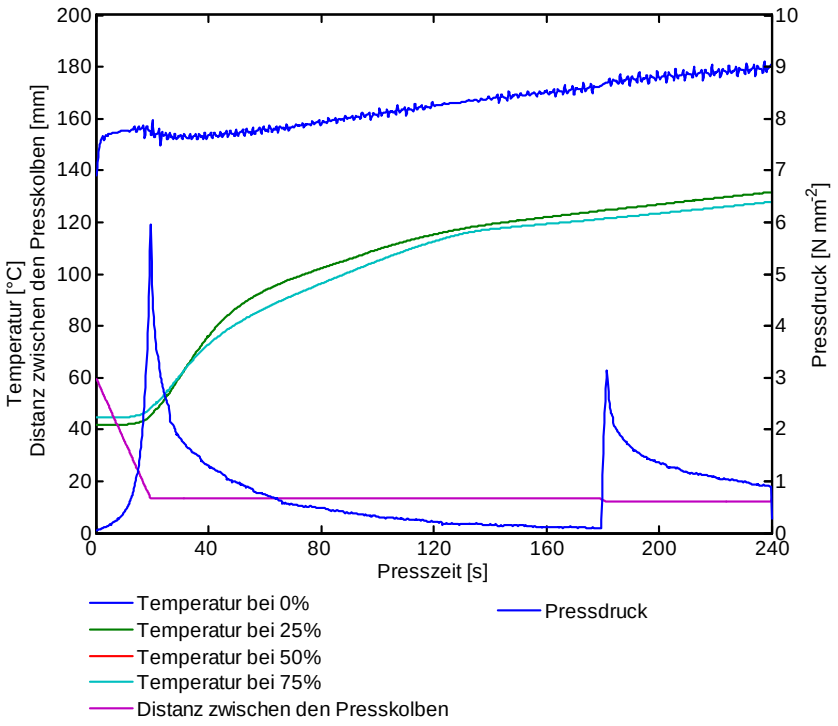


Abb. P- 103: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

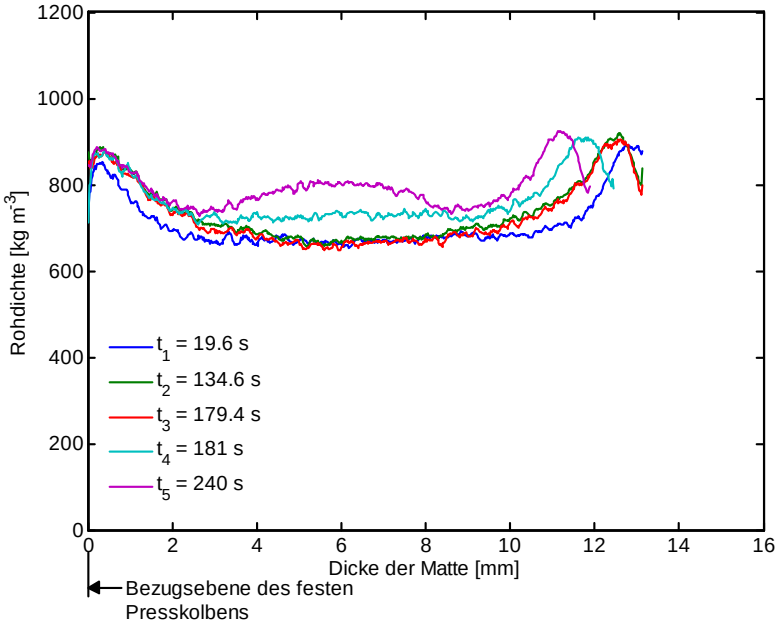


Abb. P- 104: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

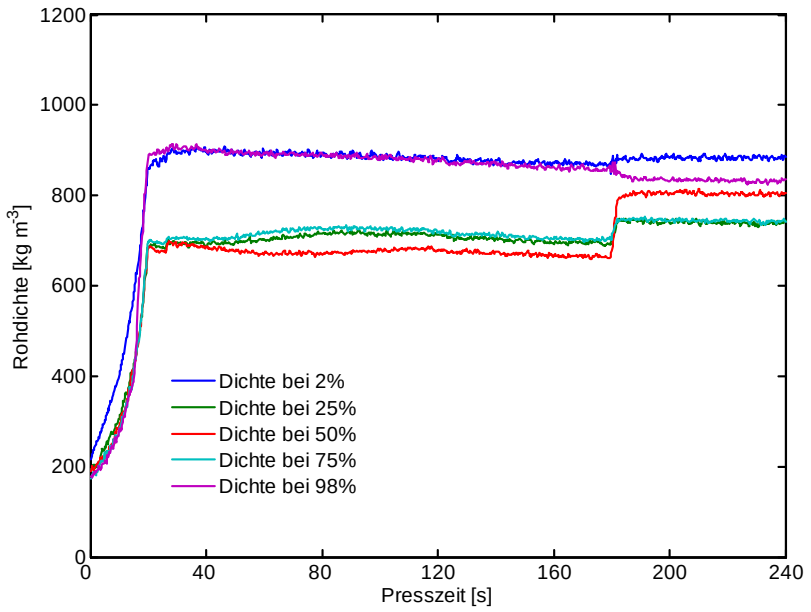


Abb. P- 105: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240.

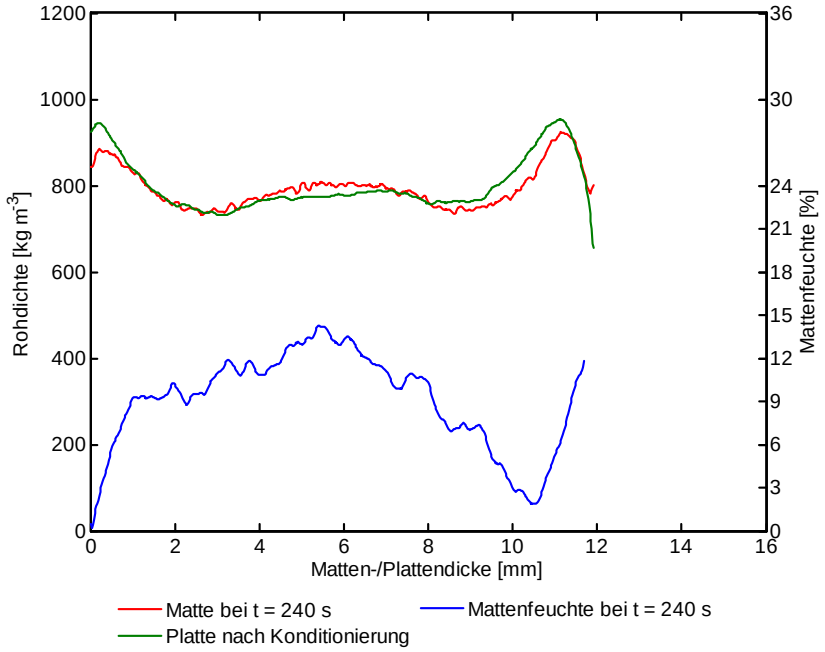


Abb. P- 106: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.22 Platte 12 mm_02_20_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,46	gravim.	825,91	gravim.	0,65	radiom.	18,61				
Endwert	18,81		798,32								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	712,56	99,70	radiom.	18,35	radiom.	0,26				
	Endwert	727,04	101,72		18,72		-0,11				
zweite Haltephase	Startwert	785,13	99,53		18,33		0,29				
	Endwert	788,83	100,00		18,41		0,20				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,77	radiom.	1,58	gravim.	3,59			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,6	0,27	2,06	817,59	114,74	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	44,2	0,71	5,40	863,78	121,22	1,13	155,01	81,22		76,43
	Ende	179,4	0,27	5,40	839,01	117,75	0,11	172,82	124,41		121,19
hinteres Maximum	Beginn	19,6	0,25	1,90	876,10	122,95	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	33,8	0,71	5,40	910,43	127,77	1,55	152,69	66,85		66,03
	Ende	179,4	0,73	5,56	875,98	122,94	0,11	172,82	124,41		121,19
vorderes Maximum	Beginn	181,8	0,71	5,95	846,63	107,83	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,71	5,95	842,13	107,26	0,30	180,20	131,62		127,84
hinteres Maximum	Beginn	181,8	0,62	5,25	894,55	113,94	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,75	6,30	887,35	113,02	0,30	180,20	131,62		127,84
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	683,21	95,88			5,72	153,56	45,63		48,25
	Minimum	76,2	664,22	90,12			0,55	157,70	100,72		94,54
	Maximum	117,8	676,43	91,79			0,27	164,52	114,70		111,78
	Ende	179,4	668,40	91,93			0,11	172,82	124,41		121,19
zweite Haltephase	Beginn	181,8	790,33	100,66			3,15	174,03	124,76		121,49
	Ende	240,0	808,03	102,43			0,30	180,20	131,62		127,84
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,6	5,58	42,54	760,76	106,77	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	73,4	4,51	34,38	764,87	107,34	0,58	158,07	99,60		93,23
	Ende	179,4	5,00	38,10	762,42	107,00	0,11	172,82	124,41		121,19
hinterer GF	Beginn	19,6	5,37	40,95	759,20	106,55	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	73,0	4,14	31,56	766,62	107,59	0,57	157,49	99,46		93,06
	Ende	179,4	4,52	34,44	762,42	107,00	0,11	172,82	124,41		121,19
vorderer GF	Beginn	181,8	4,92	41,42	802,83	102,26	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,90	41,24	797,33	101,55	0,30	180,20	131,62		127,84
hinterer GF	Beginn	181,8	4,32	36,34	796,29	101,42	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,20	35,29	796,20	101,41	0,30	180,20	131,62		127,84
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,6	4,54	34,60	691,99	97,11	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	93,0	2,42	18,45	681,72	95,67	0,49	160,57	106,82		102,02
	Ende	179,4	2,71	20,63	679,99	95,43	0,11	172,82	124,41		121,19
hinterer Profilgrund	Beginn	19,6	4,06	30,95	692,89	97,24	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	82,2	1,80	13,72	678,55	95,23	0,51	158,62	102,82		97,15
	Ende	179,4	2,33	17,78	678,91	95,28	0,11	172,82	124,41		121,19
vorderer Profilgrund	Beginn	181,8	1,61	13,57	797,14	101,53	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,59	13,40	815,13	103,82	0,30	180,20	131,62		127,84
hinterer Profilgrund	Beginn	181,8	1,39	11,72	796,29	101,42	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,20	10,07	816,31	103,97	0,30	180,20	131,62		127,84
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	180,8	[mm]	12,51	[%]	105,25	2,48	173,53	124,68		121,40
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	181,8	3,06	25,74	734,21	93,52	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,02	25,39	729,82	92,96	0,30	180,20	131,62		127,84
vorderes Maximum	Beginn	181,8	2,69	22,59	740,39	94,30	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,71	22,77	729,82	92,96	0,30	180,20	131,62		127,84

Tab. P- 43:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 44

Probenname	Platte 12mm_02_20_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,6	1,44	10,95	712,56	100,00	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	84,0	2,60	19,84	737,83	103,55	0,49	159,35	103,52		98,04
	Ende	179,4	2,29	17,46	727,04	102,03	0,11	172,82	124,41		121,19
hintere Peakbase	Beginn	19,6	2,12	16,19	712,56	100,00	5,72	153,56	45,63		48,25
erste Haltephase	Maximum	82,0	3,06	22,40	737,83	103,55	0,51	158,62	102,82		97,15
	Ende	179,4	2,54	19,37	727,04	102,03	0,11	172,82	124,41		121,19
vordere Peakbase	Beginn	181,8	1,19	9,98	785,13	100,00	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	179,4	1,08	9,11	788,83	100,47	0,11	172,82	124,41		121,19
hintere Peakbase	Beginn	181,8	1,73	14,54	785,13	100,00	3,15	174,03	124,76		121,49
zweite Haltephase	Ende	179,4	1,56	13,13	788,83	100,47	0,11	180,20	131,62		127,84
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	681,80	95,68			5,72	153,56	45,63		48,25
	Minimum	19,6	681,80	95,68			5,72	153,56	45,63		48,25
	Maximum	101,6	716,11	97,08			0,36	161,31	109,91		105,62
	Ende	179,4	700,46	96,34			0,11	172,82	124,41		121,19
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	681,94	95,70			5,72	153,56	45,63		48,25
	Minimum	77,0	659,82	89,42			0,55	158,93	101,05		94,89
	Maximum	142,2	678,76	92,39			0,19	168,33	119,53		117,54
	Ende	179,4	666,48	91,67			0,11	172,82	124,41		121,19
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,6	680,42	95,49			5,72	153,56	45,63		48,25
	Minimum	19,6	680,42	95,49			5,72	153,56	45,63		48,25
	Maximum	89,2	729,01	98,83			0,45	159,95	105,37		100,35
	Ende	179,4	712,36	97,98			0,11	172,82	124,41		121,19

Tab. P- 44:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

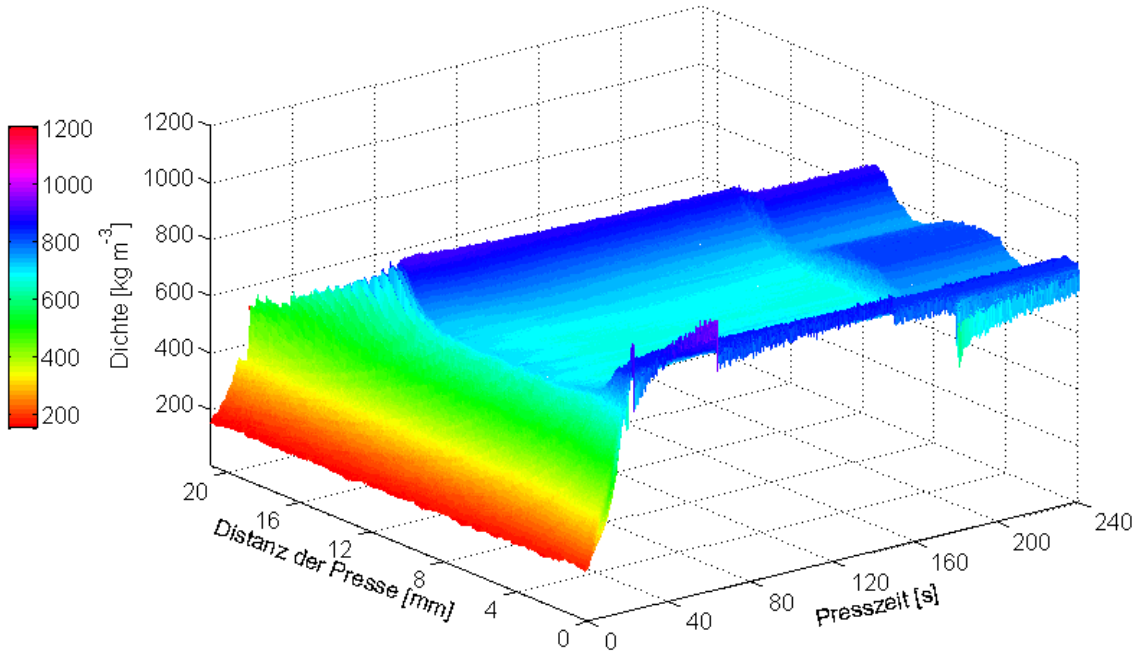


Abb. P- 107: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240.

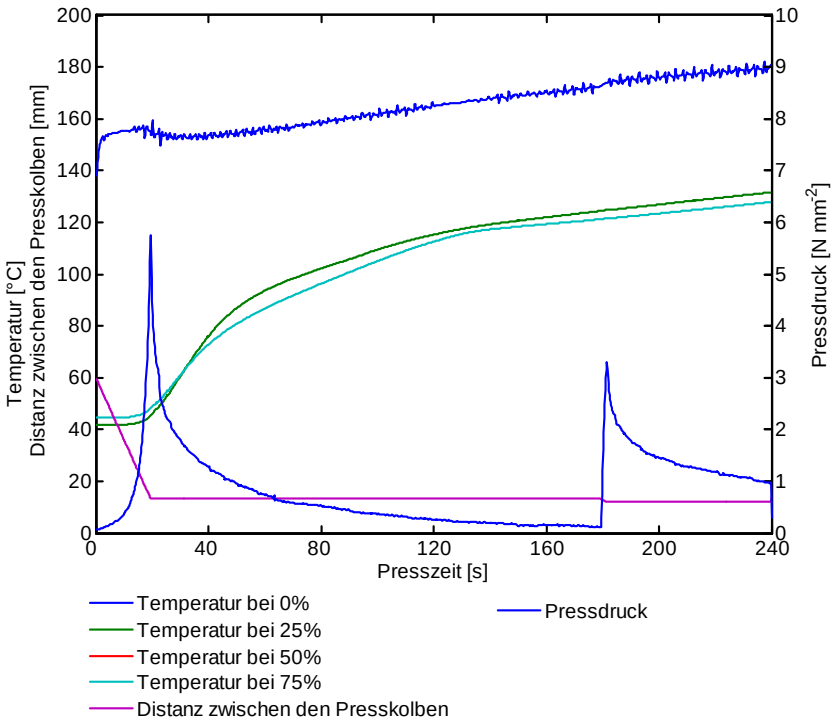


Abb. P- 108: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

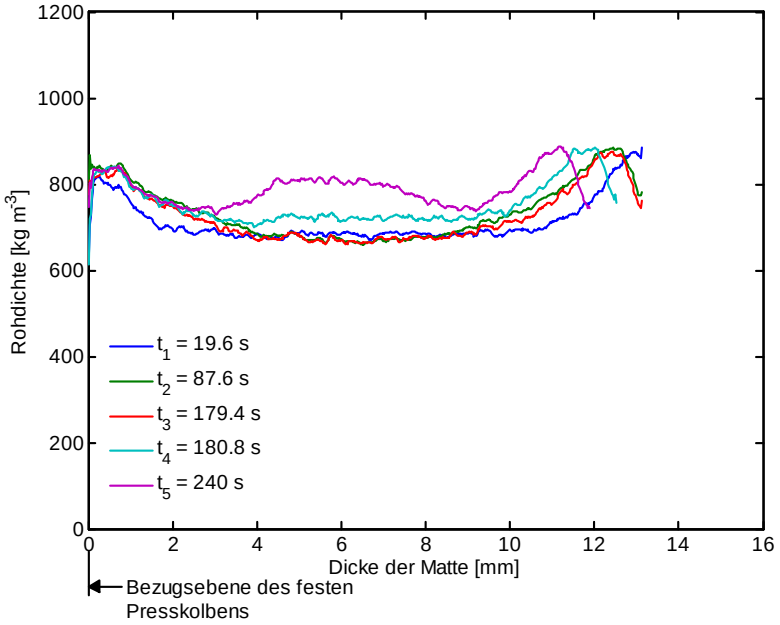


Abb. P- 109: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

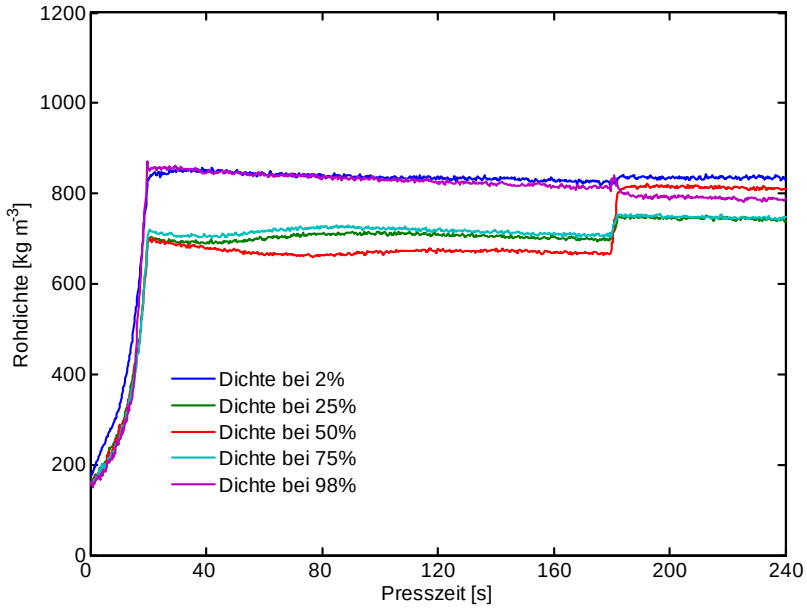


Abb. P- 110: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240.

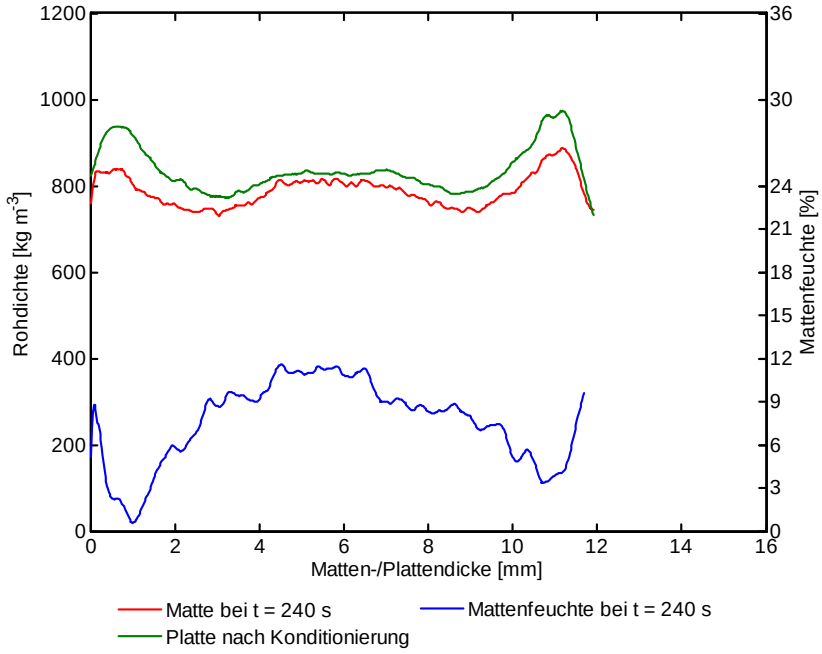


Abb. P- 111: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.23 Platte 12 mm_01_20_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,42	gravim.	824,21	gravim.	0,60	radiom.	27,91				
Endwert	18,82		798,62								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	725,28	101,72	radiom.	20,40	radiom.	7,51				
	Endwert	739,46	103,71		20,80		7,11				
zweite Haltephase	Startwert	862,16	100,57		20,16		7,75				
	Endwert	857,26	100,00		20,05		7,87				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,03	radiom.	10,82	gravim.	3,33			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,25	1,74	859,45	118,50	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	61,0	0,67	4,71	892,40	123,04	0,58	28,45	28,88	26,85	28,47
	Ende	138,8	0,25	4,36	869,19	119,84	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,42	2,91	893,96	123,26	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	34,6	0,69	4,83	923,04	127,27	1,23	28,46	28,77	26,93	28,33
	Ende	138,8	0,71	4,94	900,32	124,13	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
vorderes Maximum	Beginn	143,4	0,62	5,24	884,03	102,54	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,75	6,29	881,63	102,26	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
hinteres Maximum	Beginn	143,4	0,58	4,90	927,89	107,62	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,77	6,47	916,96	106,36	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	689,80	95,11			4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
	Minimum	81,4	672,38	89,97			0,41	28,14	29,05	27,36	27,64
	Maximum	124,6	685,74	91,64			0,19	28,32	28,83	27,25	28,30
	Ende	138,8	676,10	91,43			0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
zweite Haltephase	Beginn	143,4	884,39	102,58			2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
	Ende	240,0	885,92	103,34			0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,02	42,01	779,12	107,42	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	81,8	5,05	35,26	781,39	107,74	0,41	28,25	29,01	27,32	27,78
	Ende	138,8	5,50	38,37	778,22	107,30	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
hinterer GF	Beginn	19,2	5,81	40,55	782,21	107,85	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	64,8	5,21	36,34	783,49	108,03	0,54	28,29	29,26	26,97	28,03
	Ende	138,8	5,48	38,23	779,94	107,54	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
vorderer GF	Beginn	143,4	4,81	40,38	839,84	97,41	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,89	41,08	839,22	97,34	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
hinterer GF	Beginn	143,4	4,58	38,46	843,28	97,81	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,58	38,46	838,91	97,30	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,85	33,87	704,04	97,07	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	112,4	1,26	8,80	690,81	95,25	0,32	28,37	28,99	27,14	27,98
	Ende	138,8	2,35	16,42	690,51	95,21	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	4,96	34,59	701,98	96,79	4,21	28,29	29,07	27,33	27,99
erste Haltephase	Maximum	87,6	2,82	19,70	688,15	94,88	0,41	28,09	29,09	27,32	27,67
	Ende	138,8	3,23	22,53	691,10	95,29	0,16	28,44	28,81	27,36	28,03
vorderer Profilgrund	Beginn	143,4	2,66	22,38	884,03	102,54	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,56	21,50	881,63	102,26	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
hinterer Profilgrund	Beginn	143,4	2,38	20,00	897,84	104,14	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,17	18,18	893,26	103,61	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	141,6	[mm]	12,93	[%]	108,57	2,06	28,45	28,94	27,03	27,29
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	143,4	1,81	15,21	797,52	92,50	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,81	15,21	789,29	91,55	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22
vorderes Maximum	Beginn	143,4	2,19	18,36	782,12	90,72	2,82	28,37	29,04	26,49	27,61
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,14	18,01	789,29	91,55	0,16	28,40	29,07	26,89	28,22

Tab. P- 45:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 46Tab. P- 46

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,7	11,8	725,3	100,0	4,2	28,3	29,1	27,3	28,0
erste Haltephase	Maximum	92,4	2,8	19,7	748,3	103,2	0,3	28,2	28,5	26,8	27,6
	Ende	138,8	2,7	19,0	739,5	102,0	0,2	28,4	28,8	27,4	28,0
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,0	13,7	725,3	100,0	4,2	28,3	29,1	27,3	28,0
erste Haltephase	Maximum	81,2	2,9	19,7	748,3	103,2	0,4	28,1	29,1	27,3	27,7
	Ende	138,8	2,6	18,3	739,5	102,0	0,2	28,4	28,8	27,4	28,0
vordere Peakbase	Beginn	143,4	1,0	8,0	862,2	100,0	2,8	28,4	29,0	26,5	27,6
zweite Haltephase	Ende	138,8	0,7	6,1	857,3	99,4	0,2	28,4	28,8	27,4	28,0
hintere Peakbase	Beginn	143,4	1,0	8,2	862,2	100,0	2,8	28,4	29,0	26,5	27,6
zweite Haltephase	Ende	138,8	0,9	7,2	857,3	99,4	0,2	28,4	29,1	26,9	28,2
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	692,6	95,5			4,2	28,3	29,1	27,3	28,0
	Minimum	20,4	689,1	94,1			2,9	28,4	29,0	27,3	27,8
	Maximum	101,6	730,4	97,6			0,3	28,4	29,2	26,6	27,1
	Ende	138,8	710,3	96,1			0,2	28,4	28,8	27,4	28,0
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	684,7	94,4			4,2	28,3	29,1	27,3	28,0
	Minimum	56,2	667,7	90,0			0,6	28,6	29,1	27,2	28,4
	Maximum	128,2	689,4	92,2			0,2	28,4	29,0	27,1	27,9
	Ende	138,8	676,1	91,4			0,2	28,4	28,8	27,4	28,0
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	705,6	97,3			4,2	28,3	29,1	27,3	28,0
	Minimum	19,8	698,0	95,3			3,3	28,2	29,0	27,4	27,9
	Maximum	86,8	737,4	98,5			0,4	28,5	28,9	27,3	27,3
	Ende	138,8	720,4	97,4			0,2	28,4	28,8	27,4	28,0

Tab. P- 46:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

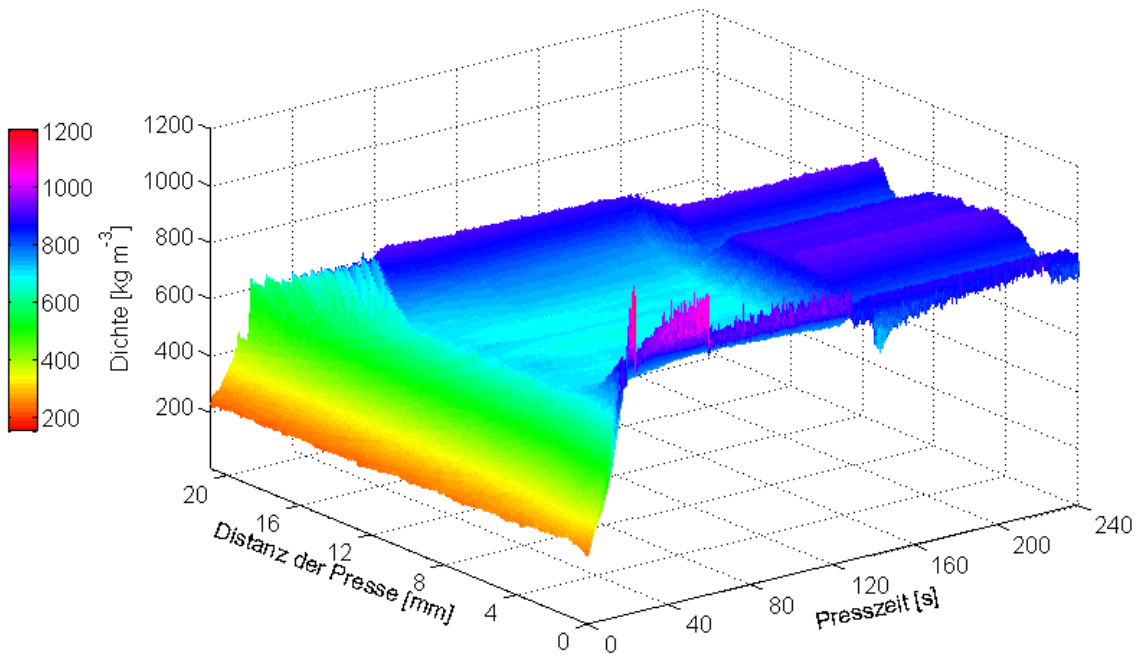


Abb. P- 112: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240.

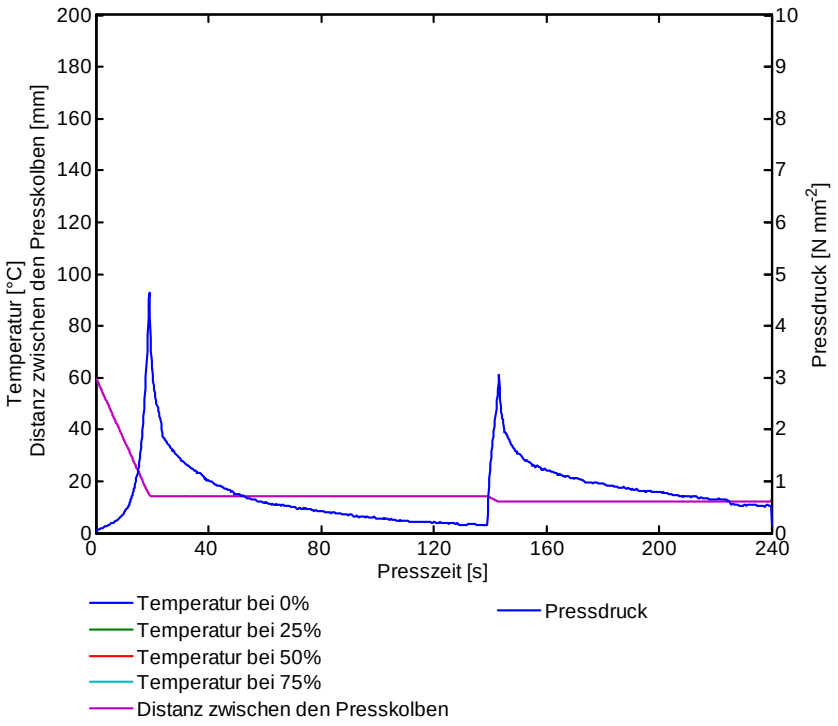


Abb. P- 113: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

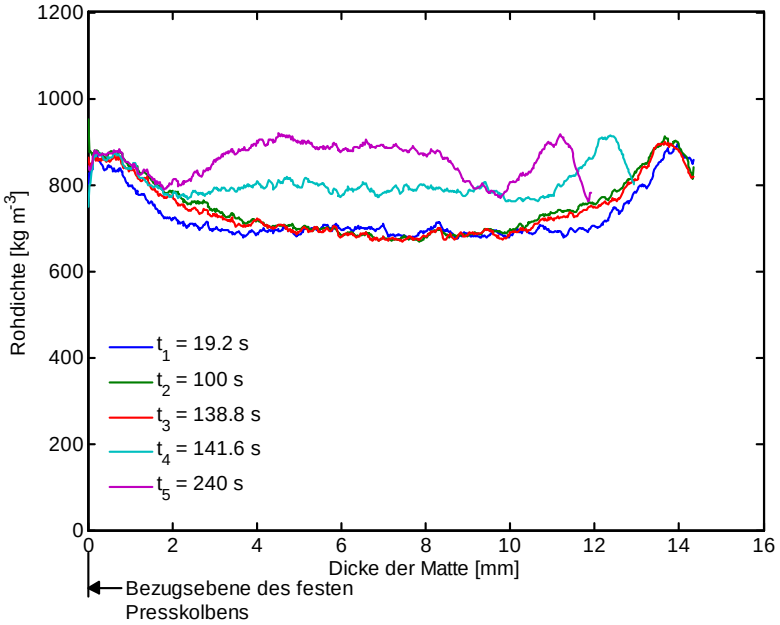


Abb. P- 114: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

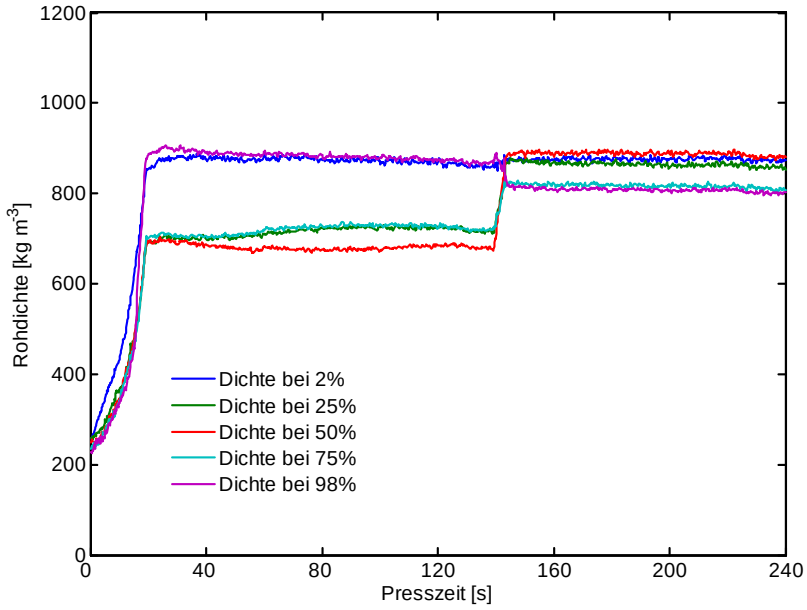


Abb. P- 115: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240.

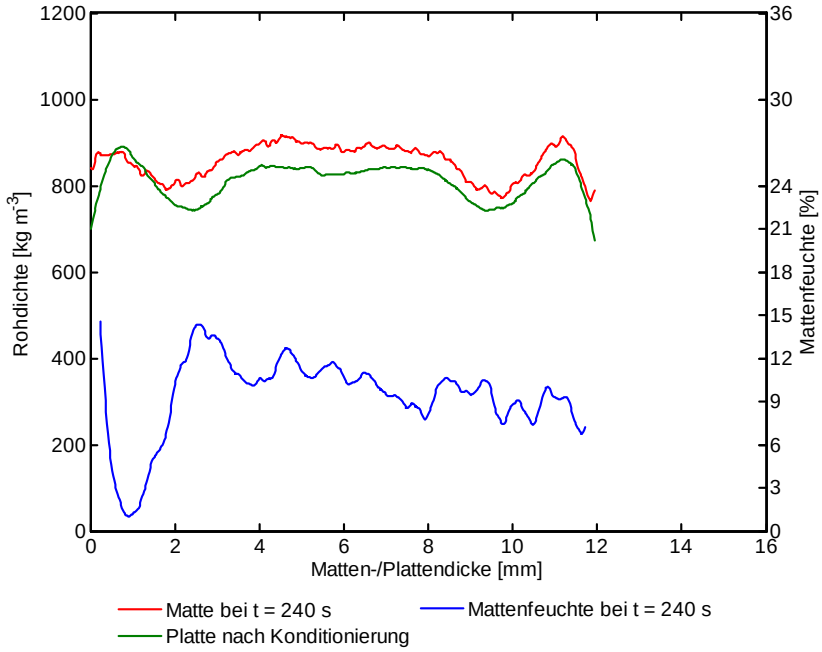


Abb. P- 116: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.24 Platte 12 mm_02_20_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,45	gravim.	825,48	gravim.	0,63	radiom.	18,73				
Endwert	18,82		798,83								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	660,91	102,33	radiom.	18,59	radiom.	0,15				
	Endwert	661,34	102,40		18,60		0,13				
zweite Haltephase	Startwert	785,43	101,04		18,37		0,37				
	Endwert	777,35	100,00		18,18		0,56				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,89	radiom.	0,33	gravim.	3,47			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,29	2,03	789,75	119,49	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	25,4	0,29	2,03	816,19	123,49	1,85	167,29	46,35	33,02	71,91
	Ende	138,8	0,29	3,20	797,71	120,70	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,44	3,05	836,74	126,60	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	22,8	0,45	3,11	860,16	130,15	2,23	169,87	40,44	32,81	65,12
	Ende	138,8	0,67	4,65	834,69	126,29	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
vorderes Maximum	Beginn	143,4	0,25	2,10	805,71	102,58	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,52	4,37	800,17	101,88	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
hinteres Maximum	Beginn	143,4	0,67	5,59	849,06	108,10	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,69	5,77	842,97	107,32	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	620,82	93,93			4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
	Minimum	81,4	583,32	88,22			0,36	158,13	107,28	78,51	112,87
	Maximum	137,8	597,19	90,28			0,17	166,98	125,78	114,69	131,98
	Ende	138,8	596,00	90,12			0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
zweite Haltephase	Beginn	143,4	813,27	103,54			2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
	Ende	240,0	808,63	104,02			0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,04	42,15	714,93	108,17	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	72,4	5,38	37,53	698,80	105,73	0,47	156,78	103,75	68,85	108,96
	Ende	138,8	5,68	39,68	704,72	106,63	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
hinterer GF	Beginn	19,2	5,68	39,68	711,50	107,65	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	67,8	5,15	35,96	700,16	105,94	0,53	154,23	101,84	63,72	106,90
	Ende	138,8	5,39	37,65	703,73	106,48	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
vorderer GF	Beginn	143,4	4,98	41,78	763,82	97,25	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,96	41,61	758,94	96,63	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer GF	Beginn	143,4	4,58	38,46	770,43	98,09	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,52	37,94	758,17	96,53	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,35	30,38	628,80	95,14	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	107,8	1,38	9,61	603,93	91,38	0,34	162,15	116,88	102,60	123,39
	Ende	138,8	1,50	10,47	607,94	91,98	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	4,31	30,09	630,47	95,39	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	81,2	2,20	15,34	594,68	89,98	0,34	158,13	108,35	81,58	114,14
	Ende	138,8	2,23	15,55	607,69	91,95	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
vorderer Profilgrund	Beginn	143,4	2,54	21,33	805,71	102,58	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,37	19,93	801,50	102,05	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
hinterer Profilgrund	Beginn	143,4	2,04	17,10	825,05	105,04	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,04	17,13	820,06	104,41	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	141,6	[mm]	12,93	[%]	108,57	2,17	167,41	126,50	114,76	132,64
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	143,4	1,79	15,03	716,90	91,27	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,94	16,26	699,41	89,05	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18
vorderes Maximum	Beginn	143,4	2,19	18,36	712,75	90,75	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,19	18,36	699,41	89,05	0,18	178,48	141,25	116,71	147,18

Tab. P- 47:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 48

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,64	11,48	660,91	100,00	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	86,0	2,96	20,69	661,47	100,08	0,34	158,81	108,89	83,18	114,82
	Ende	138,8	2,44	17,01	661,34	100,07	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,12	14,83	660,91	100,00	4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
erste Haltephase	Maximum	84,4	2,98	19,95	661,47	100,08	0,34	158,13	108,35	81,58	114,14
	Ende	138,8	2,66	18,60	661,34	100,07	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
vordere Peakbase	Beginn	143,4	0,69	5,77	785,43	100,00	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	138,8	0,73	6,12	777,35	98,97	0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
hintere Peakbase	Beginn	143,4	1,00	8,39	785,43	100,00	2,95	167,51	126,82	114,75	132,96
zweite Haltephase	Ende	138,8	1,02	8,57	777,35	98,97	0,17	178,48	141,25	116,71	147,18
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	630,60	95,41			4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
	Minimum	43,4	614,82	92,93			0,92	157,75	82,72	39,78	93,70
	Maximum	97,8	640,62	96,73			0,29	160,71	113,14	94,20	119,65
	Ende	138,8	631,50	95,49			0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	619,12	93,68			4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
	Minimum	81,6	575,12	86,99			0,35	158,00	107,35	78,71	112,96
	Maximum	128,4	595,09	89,92			0,20	165,31	123,83	114,22	130,05
	Ende	138,8	592,67	89,62			0,17	166,73	125,96	114,69	132,16
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	623,33	94,31			4,23	173,85	34,08	32,01	54,02
	Minimum	35,2	607,51	91,90			1,18	160,54	68,98	35,19	86,81
	Maximum	94,4	636,69	96,15			0,30	160,10	111,89	91,15	118,23
	Ende	138,8	624,35	94,41			0,17	166,73	125,96	114,69	132,16

Tab. P- 48:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

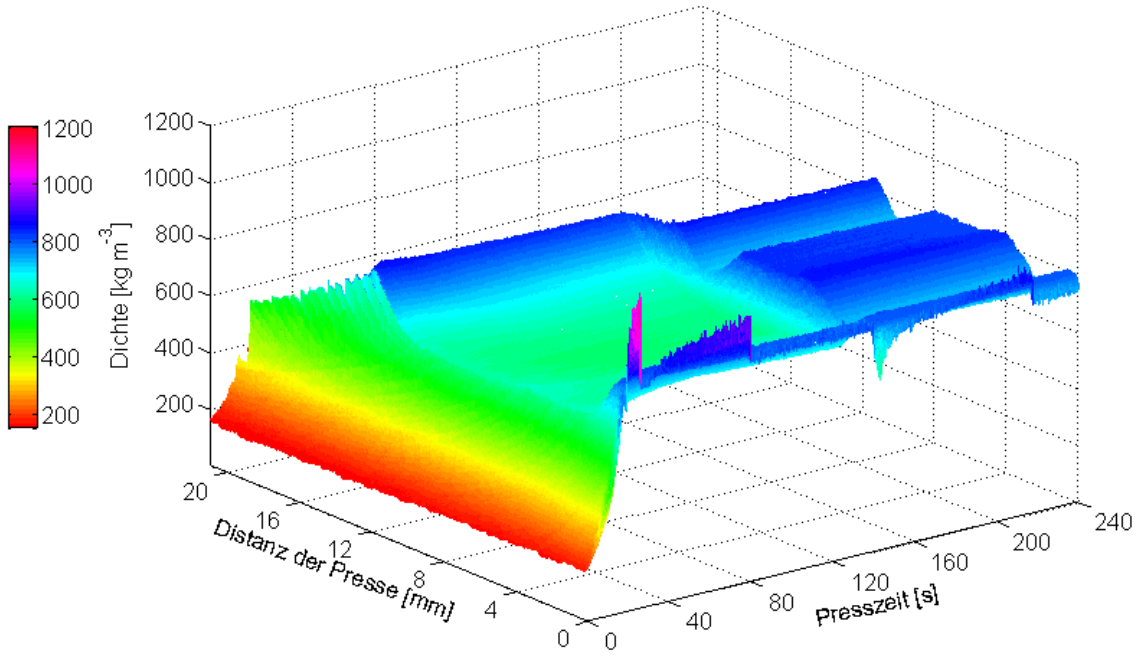


Abb. P- 117: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240.

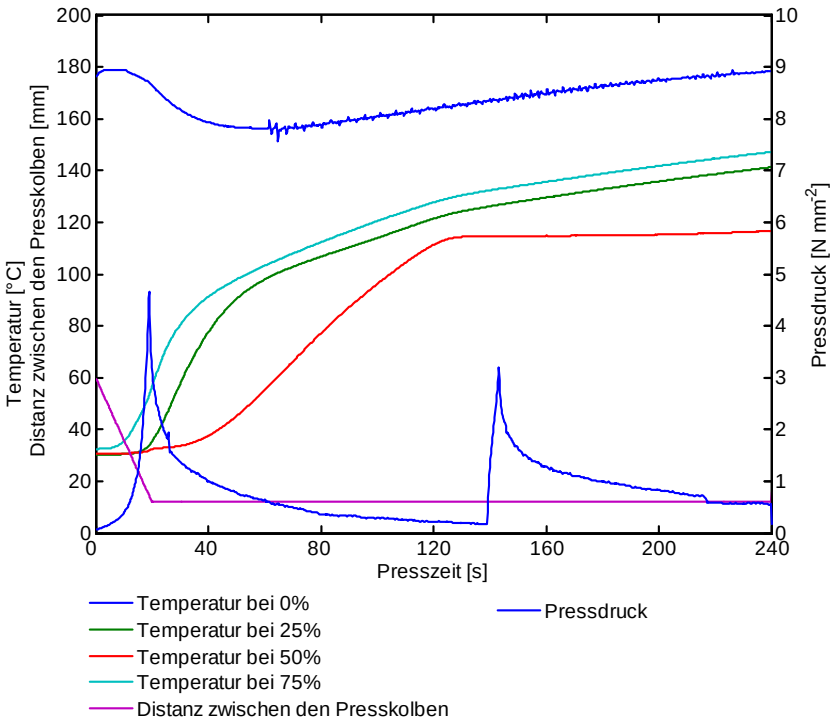


Abb. P- 118: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

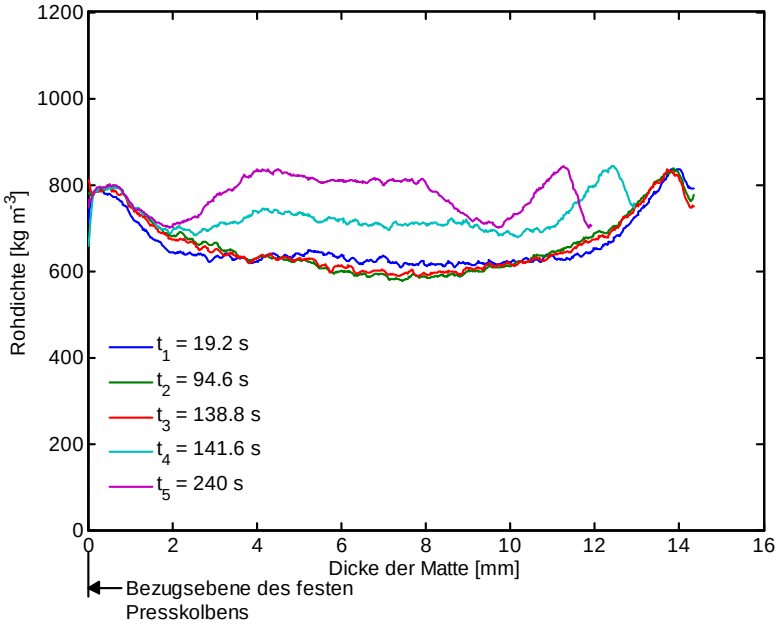


Abb. P- 119: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

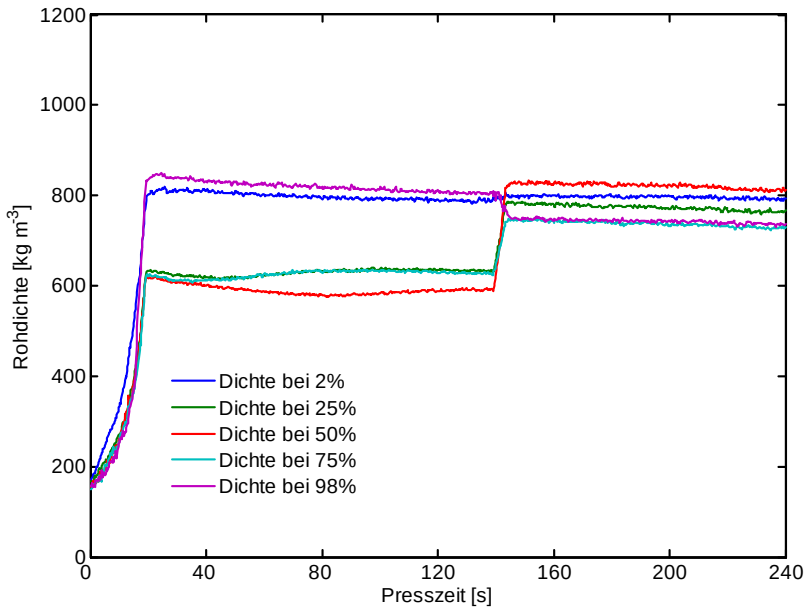


Abb. P- 120: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240.

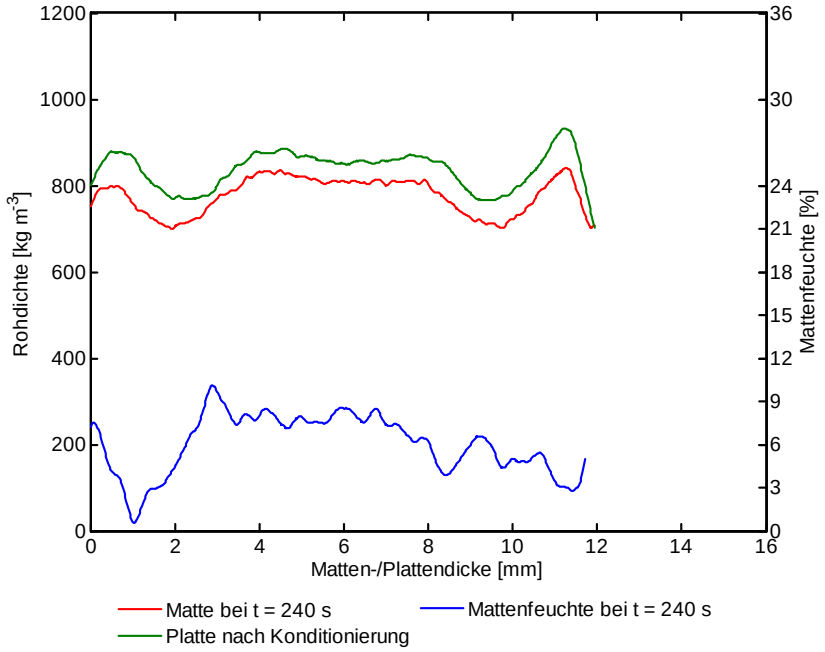


Abb. P- 121: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.25 Platte 12 mm_01_20_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,63	radiom.	21,98				
Endwert	18,87		800,87								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	686,05	101,74	radiom.	19,30	radiom.	2,69				
	Endwert	690,70	102,43		19,43		2,56				
zweite Haltephase	Startwert	812,76	100,00		18,97		3,01				
	Endwert	812,76	100,00		18,97		3,01				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,89	radiom.	4,45	gravim.	3,47			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,50	3,49	814,34	118,70	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	45,8	0,50	3,49	864,30	125,98	0,82	159,09	72,38	45,12	84,32
	Ende	158,8	0,50	4,36	828,48	120,76	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,44	3,05	845,69	123,27	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	28,6	0,50	3,46	869,77	126,78	1,54	160,59	50,04	40,48	62,54
	Ende	158,8	0,46	3,20	848,11	123,62	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderes Maximum	Beginn	163,4	0,50	4,20	853,53	105,02	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,50	4,20	845,69	104,05	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
hinteres Maximum	Beginn	163,4	0,67	5,60	873,74	107,50	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,81	6,83	869,85	107,02	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	649,15	94,62			4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
	Minimum	87,4	621,88	89,20			0,36	161,57	97,86	78,07	99,15
	Maximum	131,4	635,57	91,15			0,18	166,61	110,11	107,01	113,31
	Ende	158,8	629,69	91,17			0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
zweite Haltephase	Beginn	163,4	852,01	104,83			3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
	Ende	240,0	861,14	105,95			0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,02	42,01	736,92	107,41	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	76,4	5,17	36,08	738,16	107,60	0,46	160,02	93,31	68,56	96,17
	Ende	158,8	5,48	38,23	732,83	106,82	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
hinterer GF	Beginn	19,2	5,81	40,55	739,56	107,80	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	77,2	5,03	35,09	736,84	107,40	0,45	160,50	93,69	69,29	96,38
	Ende	158,8	5,18	36,19	731,12	106,57	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderer GF	Beginn	163,4	5,05	42,47	798,46	98,24	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,01	42,12	796,10	97,95	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
hinterer GF	Beginn	163,4	4,59	38,62	799,41	98,36	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,53	38,09	794,51	97,75	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,68	32,70	659,75	96,17	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	93,0	2,32	16,17	638,13	93,01	0,37	162,42	99,91	82,60	100,70
	Ende	158,8	2,52	17,59	643,07	93,73	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	4,62	32,27	659,61	96,15	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	77,2	2,61	18,25	633,51	92,34	0,37	161,61	97,19	76,58	98,68
	Ende	158,8	2,83	19,77	642,67	93,68	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderer Profilgrund	Beginn	163,4	2,07	17,43	853,53	105,02	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,84	15,50	852,89	104,94	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
hinterer Profilgrund	Beginn	163,4	1,75	14,69	863,14	106,20	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,57	13,22	863,80	106,28	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	161,0	[mm]	13,26	[%]	111,56	2,03	170,40	115,75	113,38	121,74
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	163,4	1,89	15,94	746,24	91,81	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,37	19,96	737,50	90,74	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67
vorderes Maximum	Beginn	163,4	2,64	22,24	737,00	90,68	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,71	22,77	737,50	90,74	0,26	177,28	125,21	115,32	129,67

Tab. P- 49:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1) → Fortsetzung siehe Tab. P- 50Tab. P- 50

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,94	13,52	686,05	100,00	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	82,8	3,00	20,95	698,03	101,75	0,37	161,10	96,06	74,16	97,91
	Ende	158,8	2,89	20,20	690,70	100,68	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,37	16,57	686,05	100,00	4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	85,6	3,05	20,72	698,03	101,75	0,37	161,61	97,19	76,58	98,68
	Ende	158,8	2,52	17,59	690,70	100,68	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
vordere Peakbase	Beginn	163,4	0,58	4,90	812,76	100,00	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	158,8	0,75	6,30	812,76	100,00	0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
hintere Peakbase	Beginn	163,4	1,06	8,93	812,76	100,00	3,27	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	158,8	0,90	7,53	812,76	100,00	0,14	177,28	125,21	115,32	129,67
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	650,82	94,86			4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
	Minimum	34,6	639,18	92,70			1,21	159,80	58,43	41,29	72,76
	Maximum	111,4	680,06	97,51			0,26	164,30	105,58	95,86	106,27
	Ende	158,8	665,02	96,28			0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	654,62	95,42			4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
	Minimum	87,4	615,13	88,24			0,36	161,57	97,86	78,07	99,15
	Maximum	135,0	638,92	91,84			0,19	167,08	110,90	108,49	114,59
	Ende	158,8	625,68	90,59			0,14	170,11	115,34	113,23	121,32
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	660,23	96,24			4,23	161,88	40,22	39,75	44,78
	Minimum	37,4	636,82	92,36			1,09	159,65	62,32	42,00	76,50
	Maximum	79,6	677,68	97,17			0,43	160,75	94,74	71,41	97,03
	Ende	158,8	660,58	95,64			0,14	170,11	115,34	113,23	121,32

Tab. P- 50:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2)

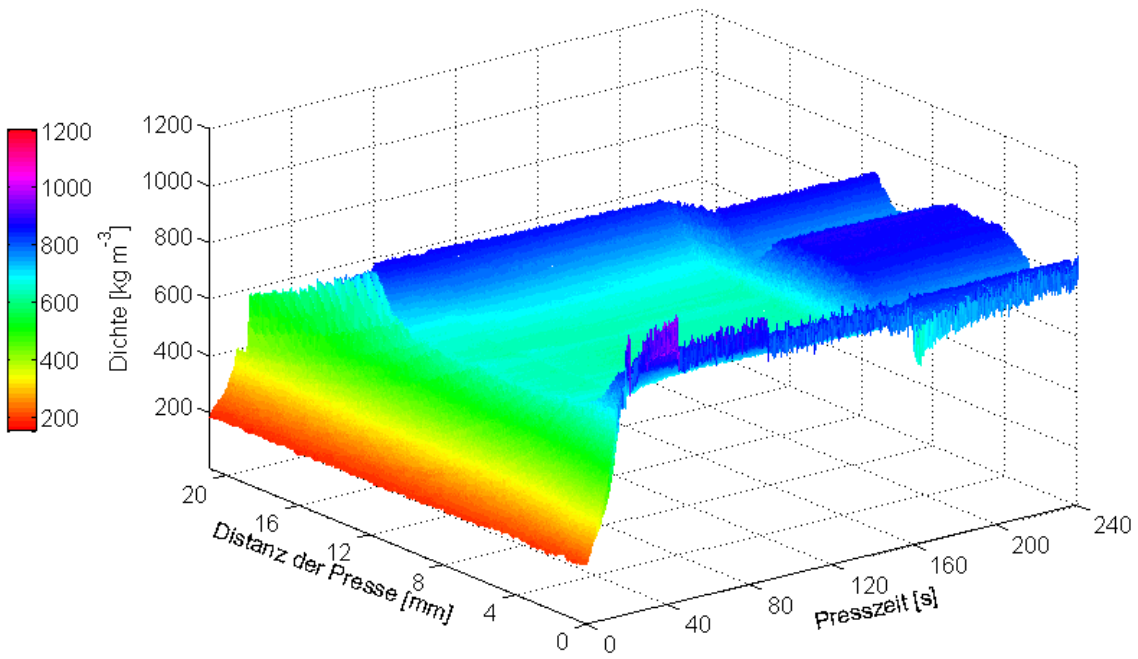


Abb. P- 122: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240.

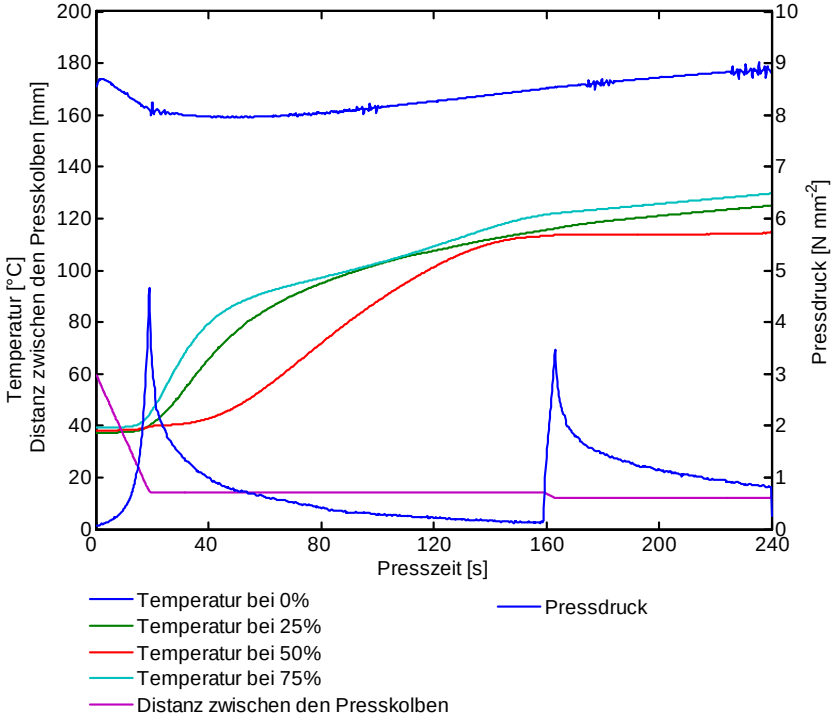


Abb. P- 123: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

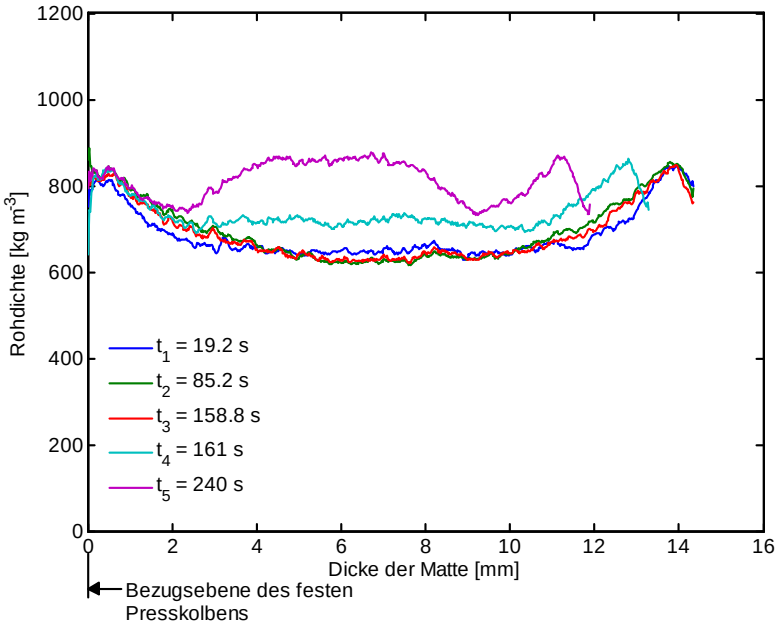


Abb. P- 124: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

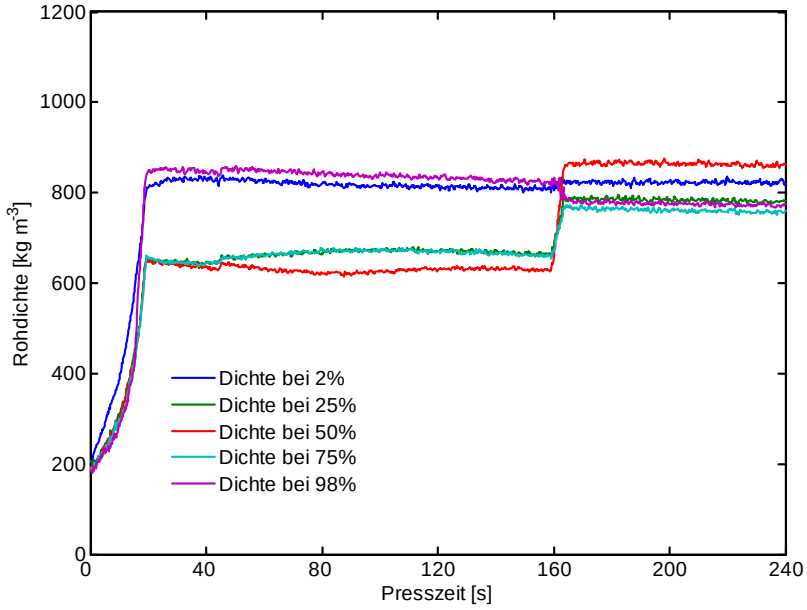


Abb. P- 125: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240.

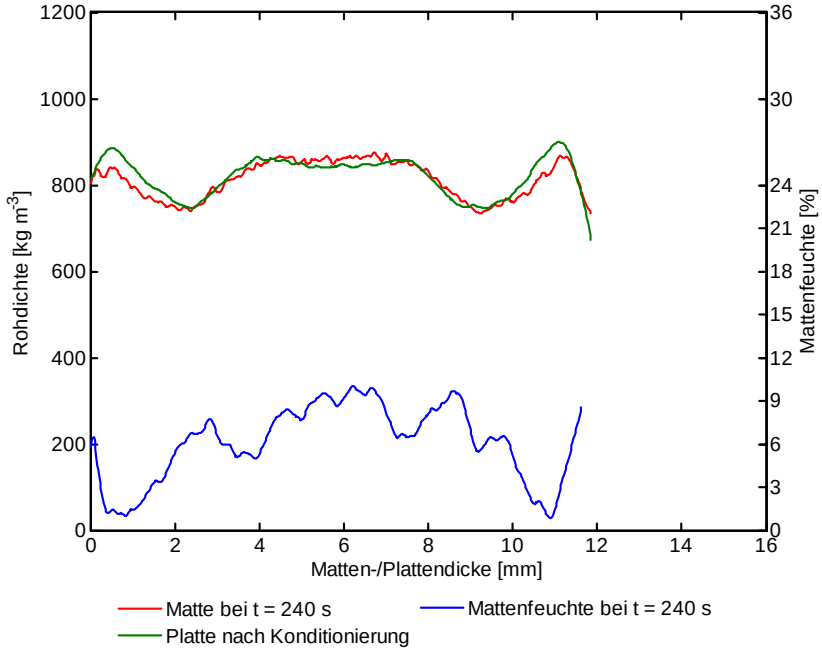


Abb. P- 126: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.26 Platte 12 mm_02_20_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,60	radiom.	18,17				
Endwert	18,90		802,14								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	655,13	101,63	radiom.	18,43	radiom.	-0,25				
	Endwert	654,52	101,53		18,41		-0,24				
zweite Haltephase	Startwert	777,79	100,10		18,16		0,02				
	Endwert	777,03	100,00		18,14		0,03				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,06	radiom.	-0,14	gravim.	3,30			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,48	3,34	770,16	117,56	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	34,0	0,56	3,90	798,57	121,89	1,29	159,96	57,62	41,18	71,88
	Ende	158,8	0,48	2,91	774,35	118,20	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,46	3,20	842,55	128,61	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	28,4	0,58	4,07	865,77	132,15	1,61	160,50	49,75	40,46	62,15
	Ende	158,8	0,58	4,07	828,17	126,41	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderes Maximum	Beginn	163,4	0,54	4,55	797,99	102,60	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,62	5,25	785,87	101,04	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
hinteres Maximum	Beginn	163,4	0,69	5,78	861,29	110,74	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,75	6,30	857,29	110,22	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm-2]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	614,08	93,73			4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
	Minimum	81,8	580,69	87,98			0,42	160,67	95,64	73,30	97,61
	Maximum	124,8	592,84	89,79			0,20	165,83	108,54	103,81	110,89
	Ende	158,8	588,57	89,92			0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
zweite Haltephase	Beginn	163,4	816,01	104,91			3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
	Ende	240,0	821,96	105,78			0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,06	42,30	709,41	108,29	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	77,6	5,27	36,80	693,56	105,86	0,46	160,40	93,84	69,65	96,51
	Ende	158,8	5,68	39,68	691,92	105,61	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
hinterer GF	Beginn	19,2	5,70	39,83	709,03	108,23	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	77,4	4,87	34,01	694,90	106,07	0,47	160,52	93,78	69,49	96,46
	Ende	158,8	5,12	35,76	692,96	105,77	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderer GF	Beginn	163,4	5,13	43,17	764,87	98,34	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,13	43,17	762,33	98,01	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
hinterer GF	Beginn	163,4	4,59	38,62	767,33	98,66	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,40	37,04	761,72	97,93	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,91	34,30	621,57	94,88	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	94,2	1,91	13,34	594,86	90,80	0,34	162,26	100,31	83,55	101,02
	Ende	158,8	2,37	16,57	599,43	91,50	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	3,85	26,89	622,13	94,96	4,31	161,88	40,22	39,75	44,78
erste Haltephase	Maximum	73,8	1,74	12,13	591,62	90,30	0,38	161,57	97,86	78,07	99,15
	Ende	158,8	2,10	14,68	598,83	91,41	0,13	170,11	115,34	113,23	121,32
vorderer Profilgrund	Beginn	163,4	2,18	18,30	809,96	104,14	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,95	16,37	813,17	104,55	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
hinterer Profilgrund	Beginn	163,4	1,86	15,64	823,05	105,82	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,80	15,15	830,61	106,79	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	161,2	[mm]	13,10	[%]	110,16	2,20	170,45	115,81	113,39	121,75
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	163,4	1,98	16,64	696,62	89,56	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,25	18,91	699,71	89,96	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67
vorderes Maximum	Beginn	163,4	2,25	18,91	715,56	92,00	3,34	170,80	116,17	113,63	122,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,62	22,07	699,71	89,96	0,27	177,28	125,21	115,32	129,67

Tab. P- 51:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 52

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,56	10,90	655,13	100,00	4,31	161,88	40,22	39,75	
erste Haltephase	Maximum	91,4	2,99	20,88	660,35	100,80	0,34	161,85	99,34	81,37	
	Ende	158,8	2,87	20,06	654,52	99,91	0,13	170,11	115,34	113,23	
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,66	18,60	655,13	100,00	4,31	161,88	40,22	39,75	
erste Haltephase	Maximum	87,4	3,25	22,37	660,35	100,80	0,38	161,57	97,86	78,07	
	Ende	158,8	2,96	20,64	654,52	99,91	0,13	170,11	115,34	113,23	
vordere Peakbase	Beginn	163,4	0,37	3,15	777,79	100,00	3,34	170,80	116,17	113,63	
zweite Haltephase	Ende	158,8	0,48	4,03	777,03	99,90	0,13	170,11	115,34	113,23	
hintere Peakbase	Beginn	163,4	1,04	8,76	777,79	100,00	3,34	170,80	116,17	113,63	
zweite Haltephase	Ende	158,8	1,00	8,41	777,03	99,90	0,13	177,28	125,21	115,32	
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	609,83	93,08			4,31	161,88	40,22	39,75	
	Minimum	45,6	598,59	90,92			0,87	159,15	72,18	45,02	
	Maximum	101,0	629,57	95,35			0,28	162,66	102,54	88,69	
	Ende	158,8	619,12	94,59			0,13	170,11	115,34	113,23	
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	615,25	93,91			4,31	161,88	40,22	39,75	
	Minimum	75,8	580,11	87,96			0,47	160,78	93,05	68,03	
	Maximum	121,0	596,87	90,40			0,21	165,45	107,70	101,71	
	Ende	158,8	589,34	90,04			0,13	170,11	115,34	113,23	
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	635,39	96,99			4,31	161,88	40,22	39,75	
	Minimum	40,0	616,93	93,86			1,07	159,41	65,63	42,72	
	Maximum	99,8	641,61	97,16			0,29	161,90	102,17	87,84	
	Ende	158,8	629,38	96,16			0,13	170,11	115,34	113,23	

Tab. P- 52:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

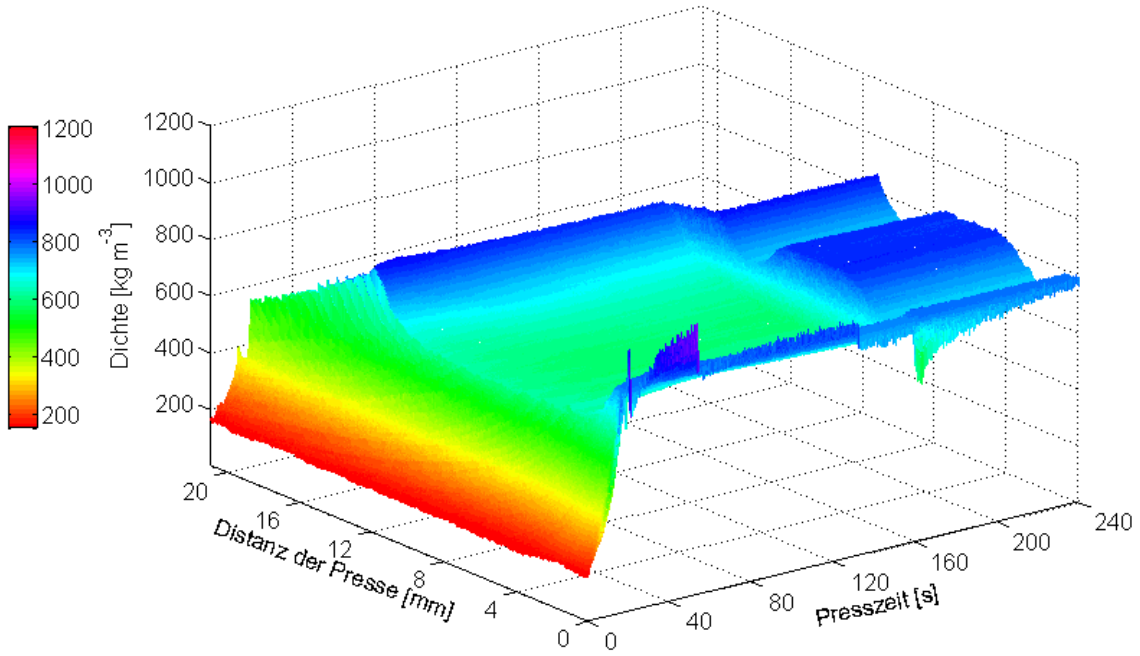


Abb. P- 127: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240

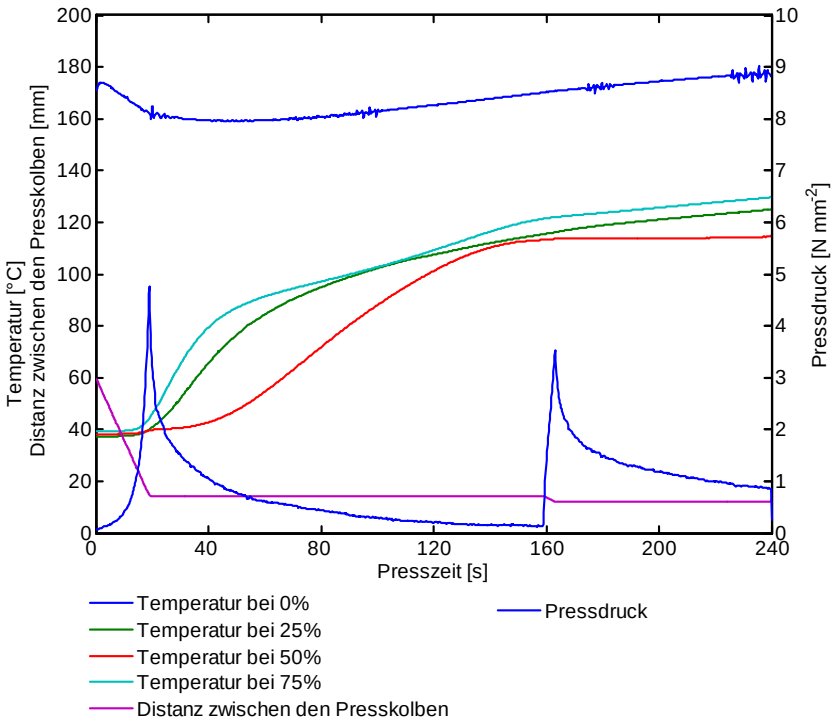


Abb. P- 128: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

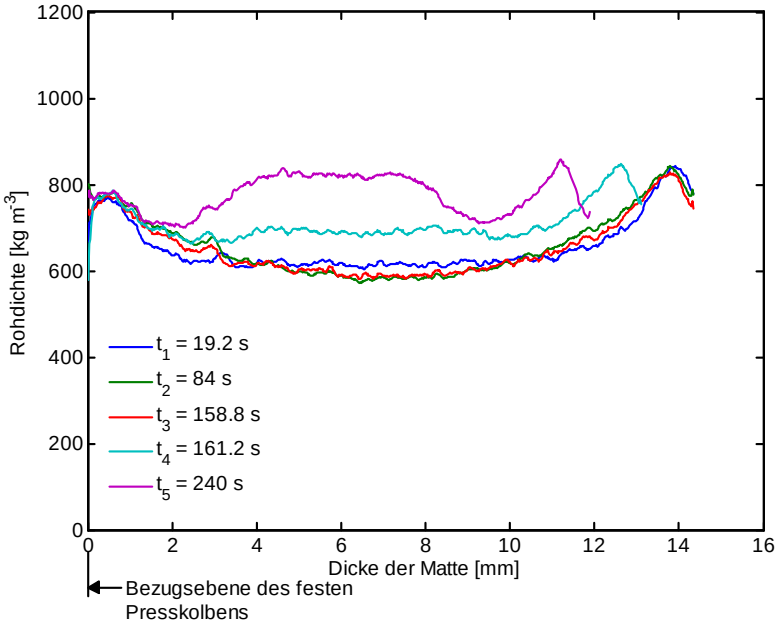


Abb. P- 129: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

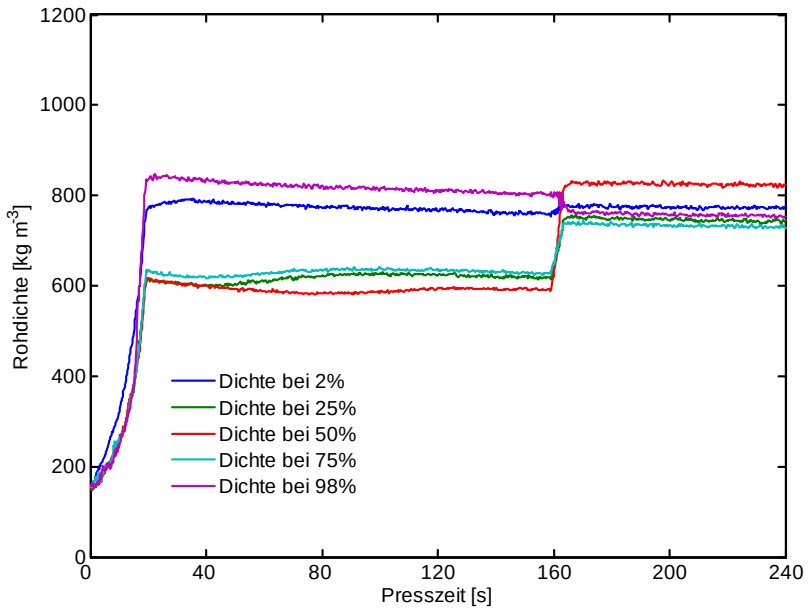


Abb. P- 130: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240

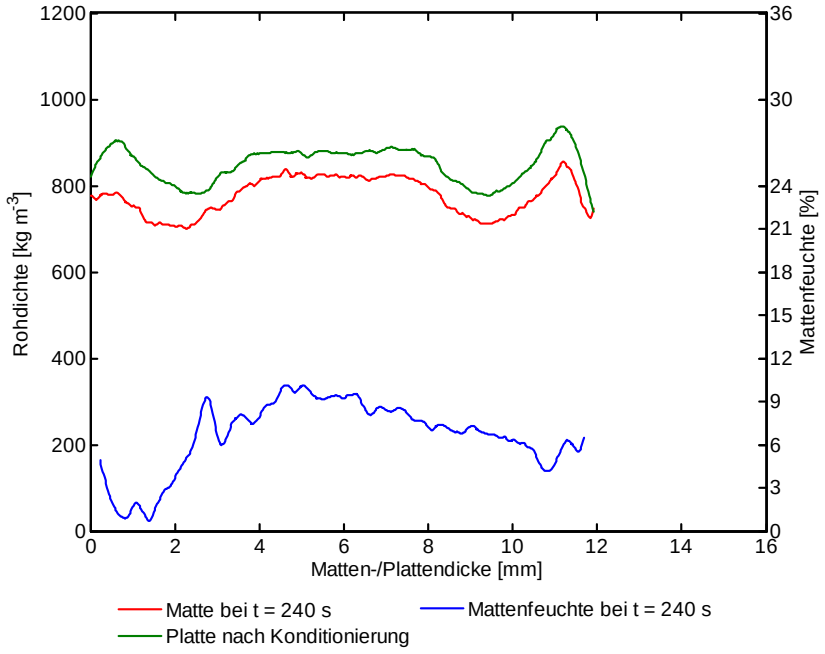


Abb. P- 131: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.27 Platte 12 mm_01_20_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,36	gravim.	821,66	gravim.	0,60	radiom.	22,79				
Endwert	18,76		796,28								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	688,86	103,17	radiom.	19,37	radiom.	3,41				
	Endwert	684,14	102,46		19,24		3,54				
zweite Haltephase	Startwert	810,07	100,67		18,91		3,88				
	Endwert	804,71	100,00		18,78		4,00				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,04	radiom.	4,17	gravim.	3,32			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,25	1,74	825,66	119,86	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	56,6	0,67	4,65	854,55	124,05	0,66	164,20	89,70	56,51	93,00
	Ende	178,8	0,25	1,74	820,56	119,12	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,62	4,36	862,60	125,22	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	26,2	0,62	4,36	885,57	128,56	1,70	163,71	51,40	44,09	65,03
	Ende	178,8	0,71	4,94	844,01	122,52	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderes Maximum	Beginn	183,4	0,46	3,85	846,74	104,53	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,67	5,60	828,48	102,27	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
hinteres Maximum	Beginn	183,4	0,62	5,25	882,66	108,96	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,75	6,30	874,53	107,96	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	649,64	94,31			4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	89,8	613,47	88,91			0,32	165,67	101,40	83,46	105,31
	Maximum	158,4	625,06	90,96			0,13	174,81	121,17	113,22	124,50
	Ende	178,8	620,86	90,75			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
zweite Haltephase	Beginn	183,4	858,92	106,03			3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
	Ende	240,0	859,39	106,79			0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,02	42,01	746,07	108,31	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	81,6	5,23	36,54	732,99	106,41	0,38	164,86	99,30	76,77	102,57
	Ende	178,8	5,43	37,94	723,79	105,07	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinterer GF	Beginn	19,2	5,81	40,55	739,48	107,35	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	71,8	4,90	34,22	732,01	106,26	0,48	164,56	96,10	68,42	99,14
	Ende	178,8	5,33	37,21	726,43	105,45	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderer GF	Beginn	183,4	4,94	41,59	795,73	98,23	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,97	41,77	788,09	97,29	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
hinterer GF	Beginn	183,4	4,65	39,14	794,88	98,12	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,57	38,44	787,99	97,27	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,54	31,69	661,55	96,03	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	90,4	2,14	14,95	629,57	91,39	0,29	165,66	101,56	84,00	105,52
	Ende	178,8	2,37	16,57	634,09	92,05	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	4,25	29,65	656,94	95,37	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	90,2	2,26	15,81	627,97	91,16	0,46	162,42	96,94	70,63	100,08
	Ende	178,8	2,77	19,33	634,54	92,12	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderer Profilgrund	Beginn	183,4	2,05	17,25	852,46	105,23	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,70	14,27	852,35	105,22	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
hinterer Profilgrund	Beginn	183,4	1,49	12,56	870,52	107,46	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,47	12,35	866,87	107,01	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	180,6	[mm]	13,43	[%]	112,96	1,85	177,54	124,09	113,42	127,17
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	183,4	1,98	16,64	728,20	89,89	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,31	19,44	725,23	89,53	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54
vorderes Maximum	Beginn	183,4	2,81	23,64	728,77	89,96	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,81	23,64	725,23	89,53	0,32	182,72	130,06	115,63	133,54

Tab. P- 53:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 54

Probenname	Platte 12mm_01_20_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,73	12,06	688,86	100,00	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	92,6	2,86	19,99	690,42	100,23	0,29	164,65	102,05	85,73	106,23
	Ende	178,8	2,56	17,88	684,14	99,32	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,37	16,57	688,86	100,00	4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	74,4	2,80	18,88	690,42	100,23	0,46	162,42	96,94	70,63	100,08
	Ende	178,8	2,60	18,17	684,14	99,32	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vordere Peakbase	Beginn	183,4	0,65	5,43	810,07	100,00	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	178,8	0,69	5,78	804,71	99,34	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hintere Peakbase	Beginn	183,4	0,94	7,88	810,07	100,00	3,46	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	178,8	0,92	7,71	804,71	99,34	0,11	182,72	130,06	115,63	133,54
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	660,37	95,86			4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	43,6	632,92	91,85			0,88	162,18	78,69	49,00	85,54
	Maximum	85,6	675,75	97,58			0,35	166,50	100,54	80,10	103,91
	Ende	178,8	650,89	95,14			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	642,87	93,32			4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	79,8	612,78	88,46			0,39	165,43	98,72	75,20	101,96
	Maximum	165,6	632,60	92,20			0,12	175,66	122,17	113,35	125,37
	Ende	178,8	620,37	90,68			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	648,74	94,18			4,12	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	35,4	630,47	91,80			1,16	163,01	66,15	45,98	78,23
	Maximum	74,0	672,83	97,08			0,46	164,83	96,83	70,29	99,92
	Ende	178,8	648,87	94,84			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84

Tab. P- 54:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

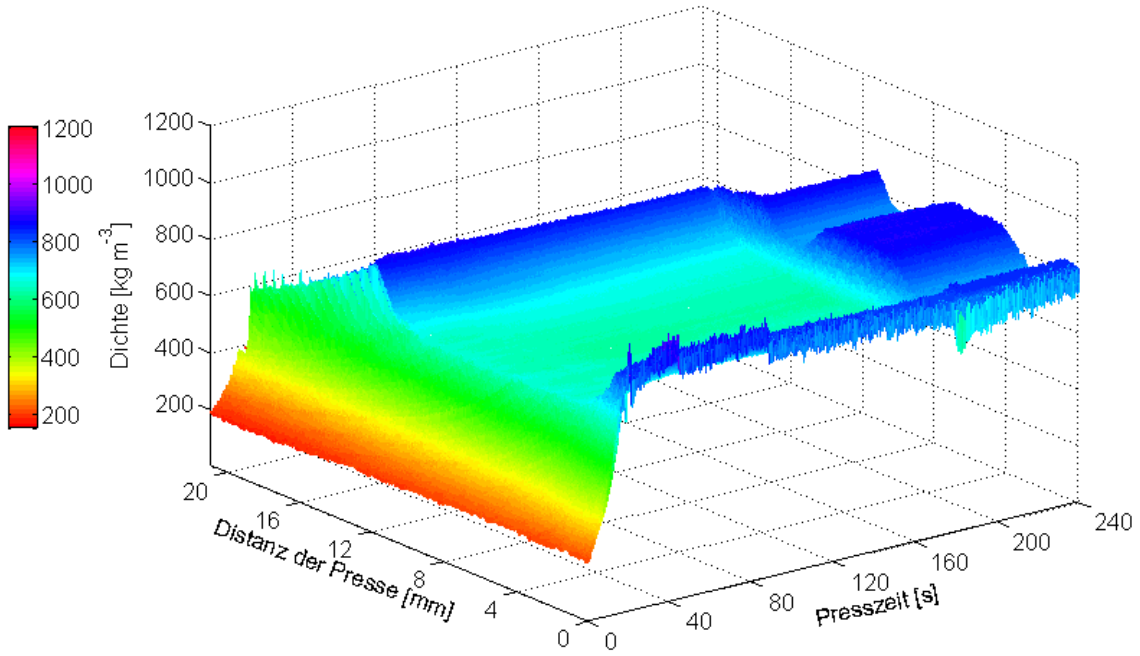


Abb. P- 132: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240.

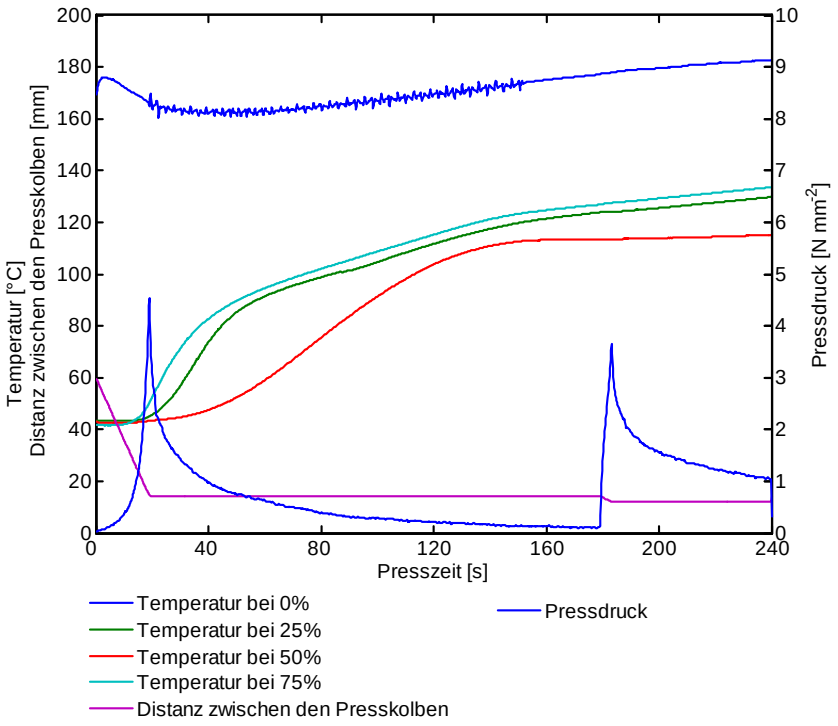


Abb. P- 133: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

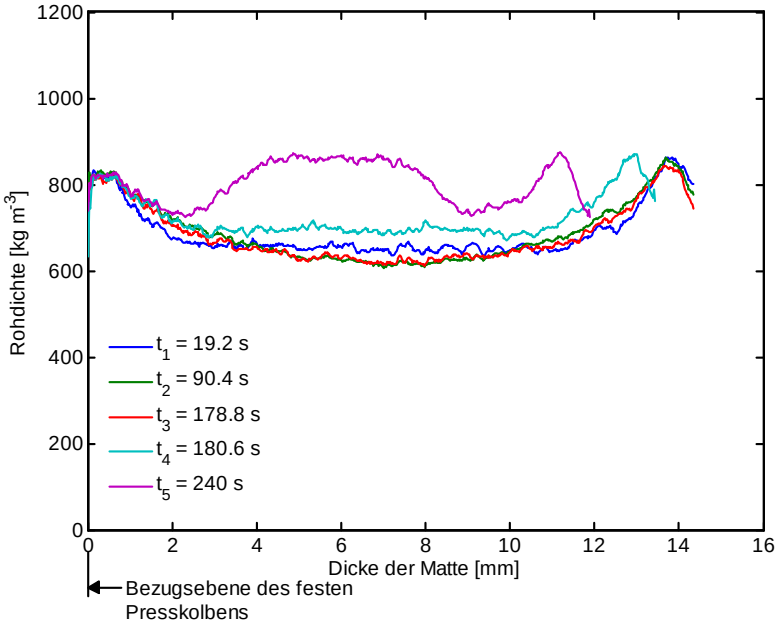


Abb. P- 134: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

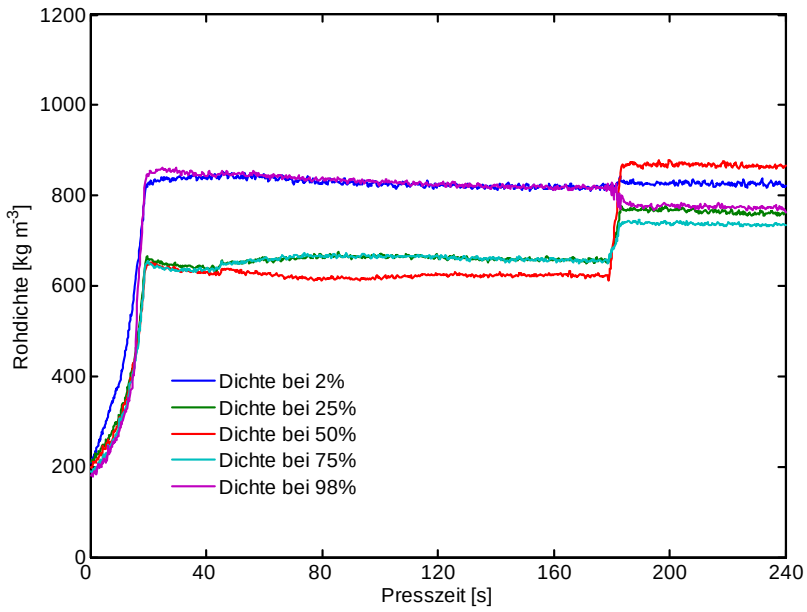


Abb. P- 135: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240.

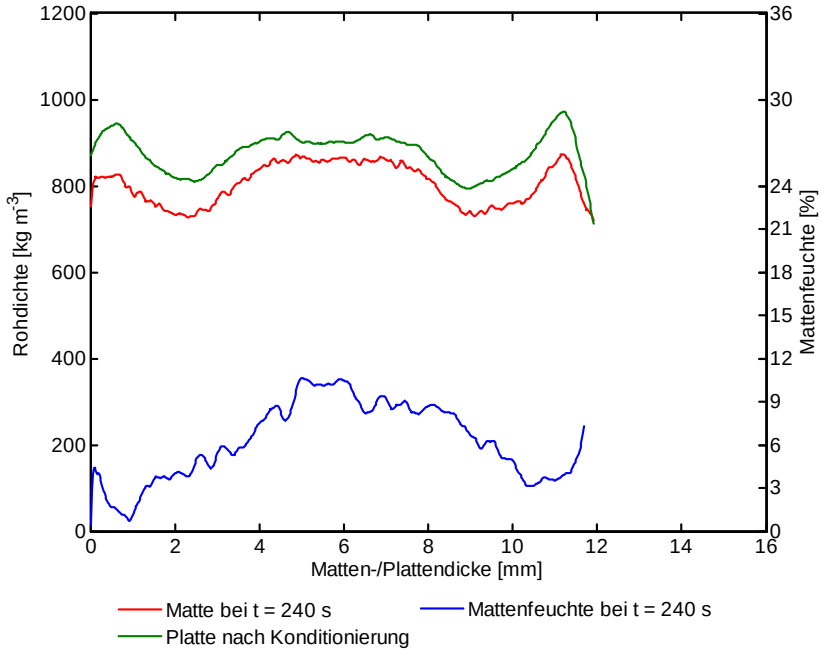


Abb. P- 136: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_20_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.28 Platte 12 mm_02_20_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,59	gravim.	831,43	gravim.	0,64	radiom.	19,48				
Endwert	18,95		804,39								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	681,47	101,68	radiom.	19,17	radiom.	0,31				
	Endwert	679,23	101,34		19,10		0,38				
zweite Haltephase	Startwert	803,67	99,73		18,79		0,69				
	Endwert	805,86	100,00		18,84		0,64				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,87	radiom.	3,27	gravim.	3,49			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	19,2	0,50	3,49	813,95	119,44	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	32,6	0,45	3,14	840,22	123,29	1,29	162,60	61,26	45,24	74,90
	Ende	178,8	0,50	3,78	811,71	119,11	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinteres Maximum	Beginn	19,2	0,42	2,91	884,71	129,82	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	27,0	0,50	3,49	900,68	132,17	1,65	163,13	52,44	44,17	66,45
	Ende	178,8	0,67	4,65	860,10	126,21	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderes Maximum	Beginn	183,4	0,25	2,10	834,28	103,81	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,25	2,10	831,52	103,47	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
hinteres Maximum	Beginn	183,4	0,62	5,24	888,28	110,53	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,67	5,59	885,17	110,14	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	641,22	94,09			4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	80,6	607,20	88,19			0,42	164,46	98,91	75,93	102,24
	Maximum	128,0	620,87	90,11			0,19	171,33	114,16	107,21	117,80
	Ende	178,8	611,87	90,08			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
zweite Haltephase	Beginn	183,4	852,44	106,07			3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
	Ende	240,0	865,78	107,44			0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	19,2	6,12	42,73	744,48	109,25	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	69,4	5,30	37,01	729,17	107,00	0,50	163,83	95,25	66,40	98,25
	Ende	178,8	5,58	38,95	721,56	105,88	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinterer GF	Beginn	19,2	5,83	40,70	745,06	109,33	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	69,4	4,97	34,68	728,93	106,96	0,50	163,83	95,25	66,40	98,25
	Ende	178,8	5,21	36,34	723,71	106,20	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderer GF	Beginn	183,4	5,02	42,13	787,63	98,00	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	5,00	41,96	791,80	98,52	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
hinterer GF	Beginn	183,4	4,35	36,54	791,80	98,52	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,41	37,06	789,20	98,20	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	19,2	4,71	32,85	653,94	95,96	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	97,6	1,50	10,45	624,47	91,64	0,44	167,09	103,70	89,53	107,90
	Ende	178,8	2,14	14,97	622,20	91,30	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hinterer Profilgrund	Beginn	19,2	3,69	25,73	651,56	95,61	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	82,4	1,92	13,40	619,93	90,97	0,34	165,14	101,51	83,66	105,38
	Ende	178,8	1,98	13,81	623,08	91,43	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vorderer Profilgrund	Beginn	183,4	1,96	16,43	844,74	105,11	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,79	15,03	855,24	106,42	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
hinterer Profilgrund	Beginn	183,4	1,19	10,00	856,21	106,54	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,00	8,39	872,96	108,62	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	180,8	[mm]	13,43	[%]	112,76	2,22	177,55	124,06	113,42	127,19
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	183,4	2,23	18,71	724,91	90,20	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,23	18,71	723,87	90,07	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54
vorderes Maximum	Beginn	183,4	2,44	20,45	729,58	90,78	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,60	21,85	723,87	90,07	0,36	182,72	130,06	115,63	133,54

Tab. P- 55:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 56

Probenname	Platte 12mm_02_20_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	19,2	1,64	11,48	681,47	100,00	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	78,2	2,64	18,46	688,99	101,10	0,44	164,11	98,19	73,86	101,41
	Ende	178,8	2,19	15,26	679,23	99,67	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hintere Peakbase	Beginn	19,2	2,27	15,84	681,47	100,00	4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
erste Haltephase	Maximum	90,0	3,31	22,45	688,99	101,10	0,34	165,14	101,51	83,66	105,38
	Ende	178,8	2,75	19,19	679,23	99,67	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
vordere Peakbase	Beginn	183,4	0,67	5,59	803,67	100,00	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	178,8	0,65	5,42	805,86	100,27	0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
hintere Peakbase	Beginn	183,4	1,25	10,49	803,67	100,00	3,80	177,93	124,05	113,52	127,57
zweite Haltephase	Ende	178,8	0,96	8,04	805,86	100,27	0,11	182,72	130,06	115,63	133,54
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	644,33	94,55			4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	41,0	628,29	91,54			0,97	162,61	75,14	47,90	83,56
	Maximum	112,2	662,51	96,00			0,23	167,86	109,02	99,36	112,66
	Ende	178,8	635,06	93,50			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	635,91	93,31			4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	79,6	600,27	87,15			0,42	165,52	98,65	75,05	101,89
	Maximum	125,8	619,68	89,95			0,19	170,16	113,49	106,31	117,13
	Ende	178,8	609,10	89,67			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	19,2	658,79	96,67			4,20	167,78	45,10	43,40	50,99
	Minimum	35,4	640,95	93,45			1,19	163,01	66,15	45,98	78,23
	Maximum	86,6	671,98	97,43			0,39	165,16	100,86	80,93	104,24
	Ende	178,8	654,07	96,30			0,11	177,09	123,83	113,43	126,84

Tab. P- 56:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

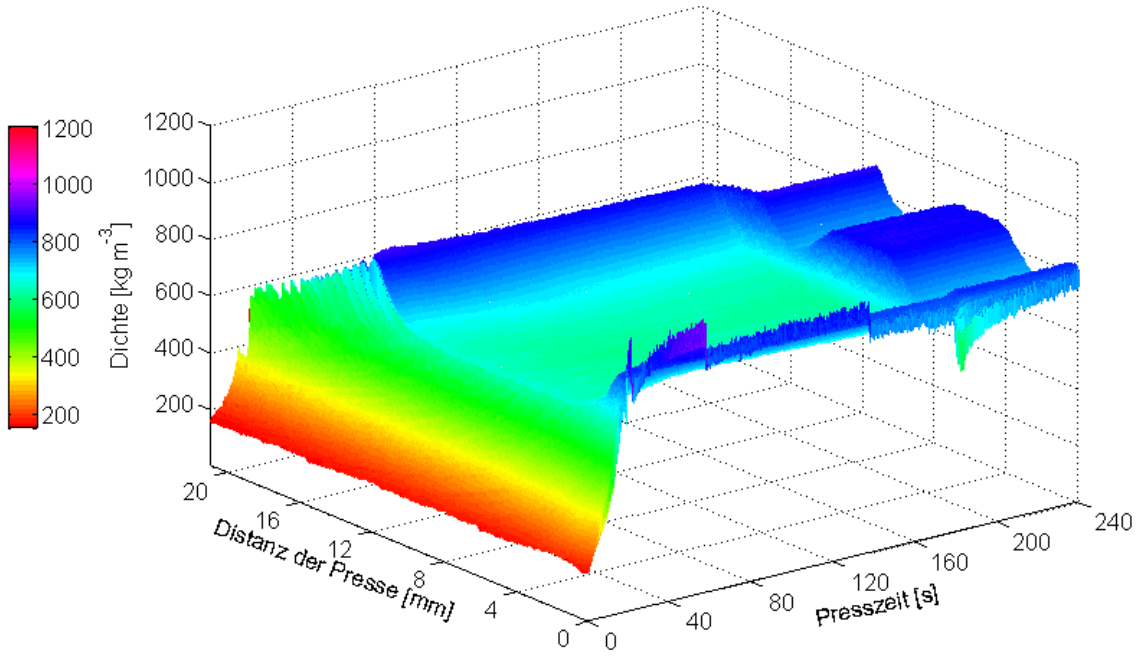


Abb. P- 137: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240.

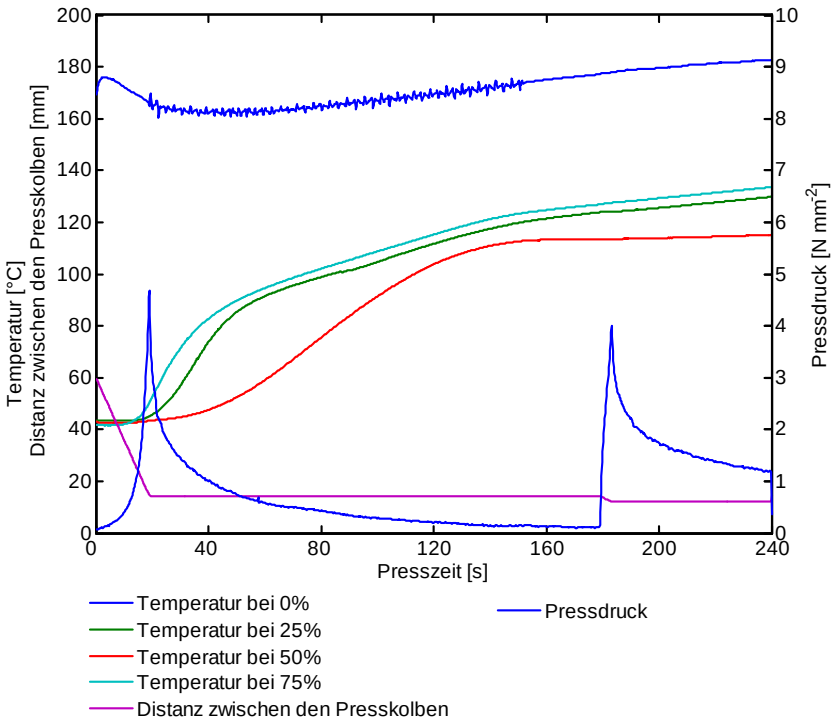


Abb. P- 138: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

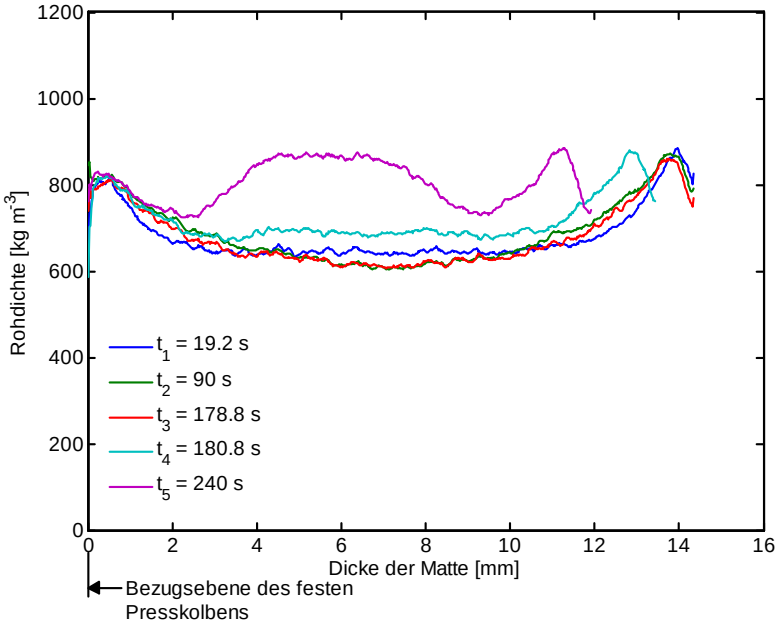


Abb. P- 139: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

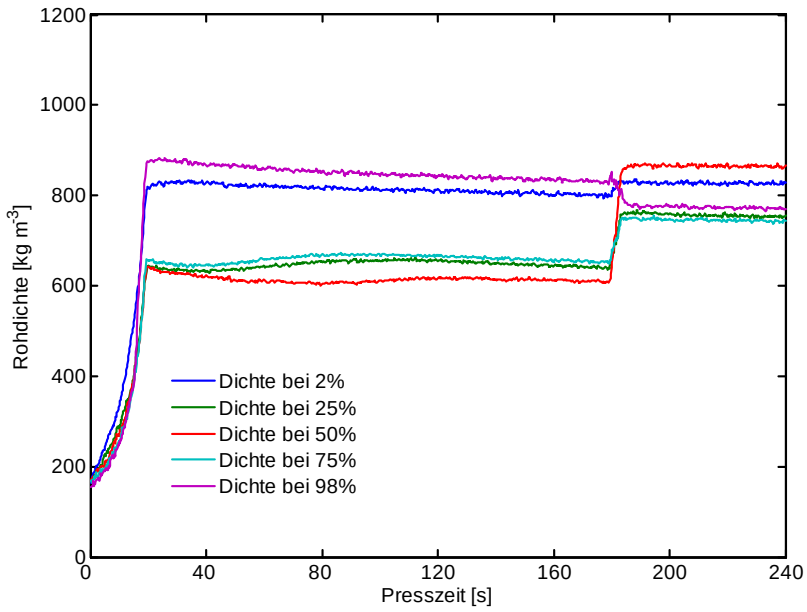


Abb. P- 140: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240.

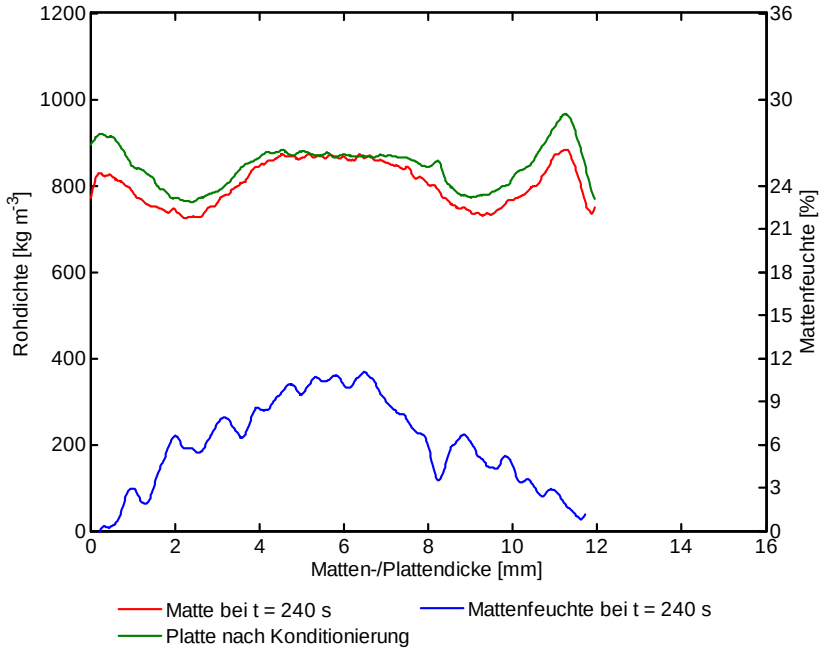


Abb. P- 141: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_20_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.29 Platte 12 mm_01_30_100_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,45	gravim.	825,48	gravim.	0,72	radiom.	20,06				
Endwert	18,73		794,93								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	768,35	99,09	radiom.	17,97	radiom.	2,09				
	Endwert	776,00			18,15		1,91				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,39	radiom.	0,16	gravim.	3,97			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	30,2	0,42	3,50	880,50	114,60	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	54,0	0,56	4,72	937,30	121,99	1,51	160,57	88,86	48,70	103,42
	Ende	240,0	0,42	4,72	891,87	116,08	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinteres Maximum	Beginn	30,2	0,46	3,85	938,19	122,10	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	37,4	0,72	6,08	963,43	125,39	2,85	163,01	62,63	40,03	88,56
	Ende	240,0	0,92	7,69	928,65	120,86	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	720,83	93,81			6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	77,0	715,79	89,47			0,88	162,64	104,33	68,88	110,87
	Maximum	106,8	729,63	90,78			0,41	166,28	115,48	97,59	119,78
	Ende	240,0	701,56	90,41			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	30,2	4,75	39,86	814,74	106,04	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	86,6	3,84	32,24	823,65	107,20	0,69	163,92	108,20	78,25	113,65
	Ende	240,0	4,14	34,79	805,04	104,77	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinterer GF	Beginn	30,2	4,35	36,54	814,93	106,06	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	77,0	3,45	28,99	826,86	107,62	0,88	162,64	104,33	68,88	110,87
	Ende	240,0	3,69	30,94	803,79	104,61	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	30,2	2,81	23,60	730,87	95,12	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	101,0	1,50	12,57	738,41	96,10	0,67	165,39	113,42	92,09	118,00
	Ende	240,0	1,73	14,51	715,72	93,15	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinterer Profilgrund	Beginn	30,2	2,87	24,13	728,61	94,83	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	80,0	1,62	13,58	727,32	94,66	0,78	163,06	105,71	71,99	111,76
	Ende	240,0	1,81	15,21	714,23	92,96	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50

Tab. P- 57:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 58

Probenname	Platte 12mm_01_30_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	30,2	1,56	13,11	768,35	100,00	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	87,4	2,39	20,10	800,54	104,19	0,67	164,04	108,52	79,04	113,89
	Ende	240,0	2,23	18,71	776,00	100,99	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hintere Peakbase	Beginn	30,2	2,46	20,63	768,35	100,00	6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	80,2	2,74	22,73	800,54	104,19	0,78	163,06	105,71	71,99	111,76
	Ende	240,0	2,46	20,63	776,00	100,99	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	737,17	95,94			6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	215,6	732,58	94,20			0,11	180,23	137,91	115,72	140,38
	Maximum	219,6	744,81	95,83			0,10	180,58	138,49	115,83	140,90
	Ende	240,0	738,24	95,13			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	714,93	93,05			6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	221,6	696,02	89,51			0,09	180,79	138,77	115,89	141,19
	Maximum	223,2	706,49	90,92			0,09	180,90	138,99	115,95	141,39
	Ende	240,0	699,26	90,11			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	741,31	96,48			6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	30,2	741,31	96,48			6,67	164,67	49,16	38,72	69,73
	Maximum	93,0	801,31	99,74			0,58	163,54	110,57	84,47	115,58
	Ende	240,0	769,98	99,23			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50

Tab. P- 58:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

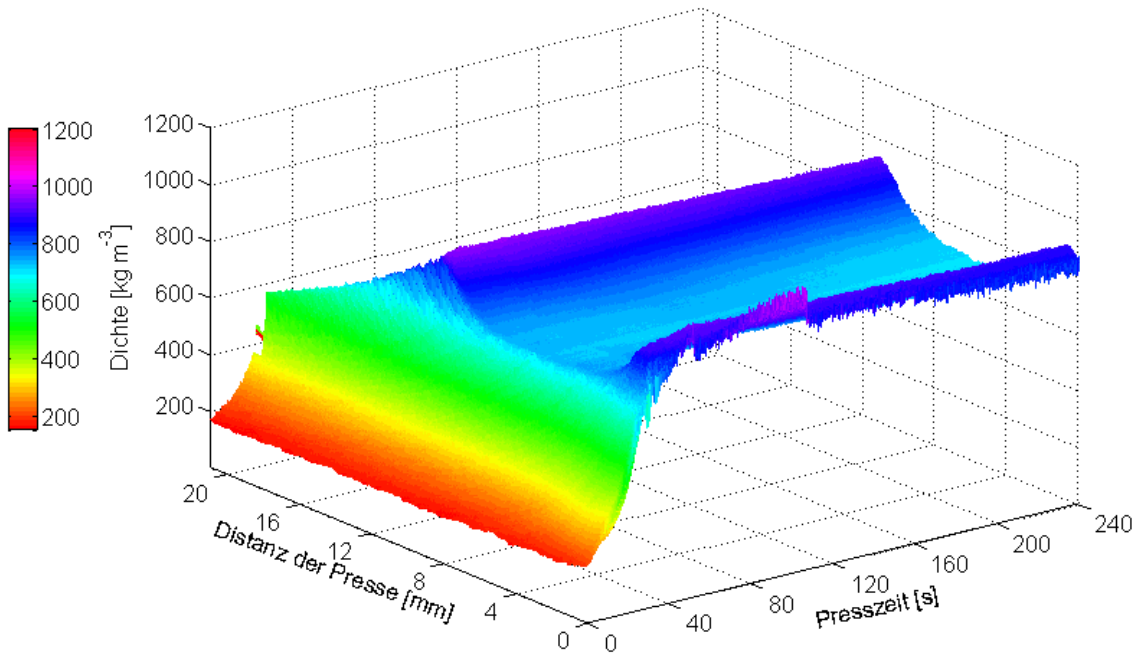


Abb. P- 142: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240.

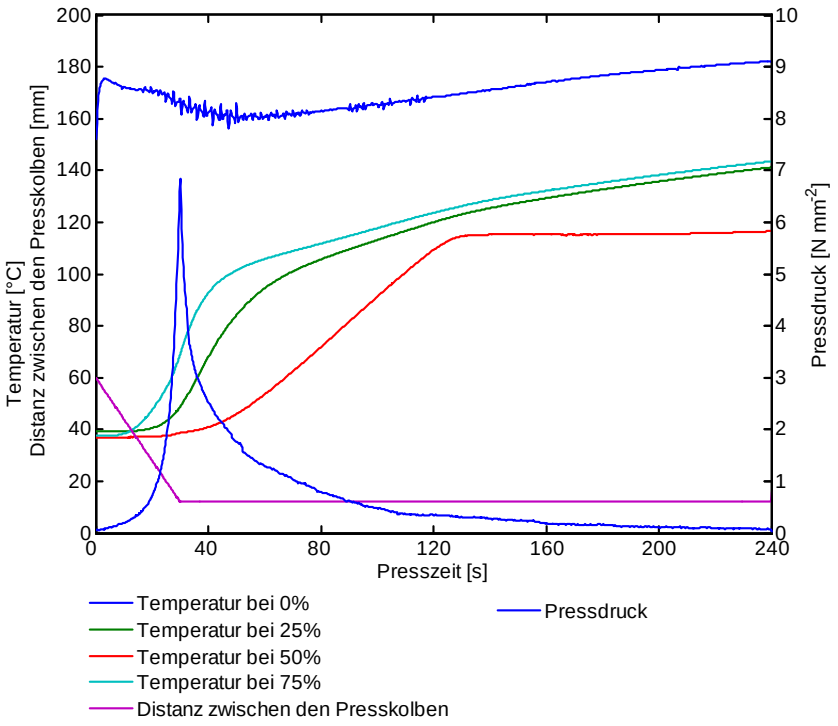


Abb. P- 143: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

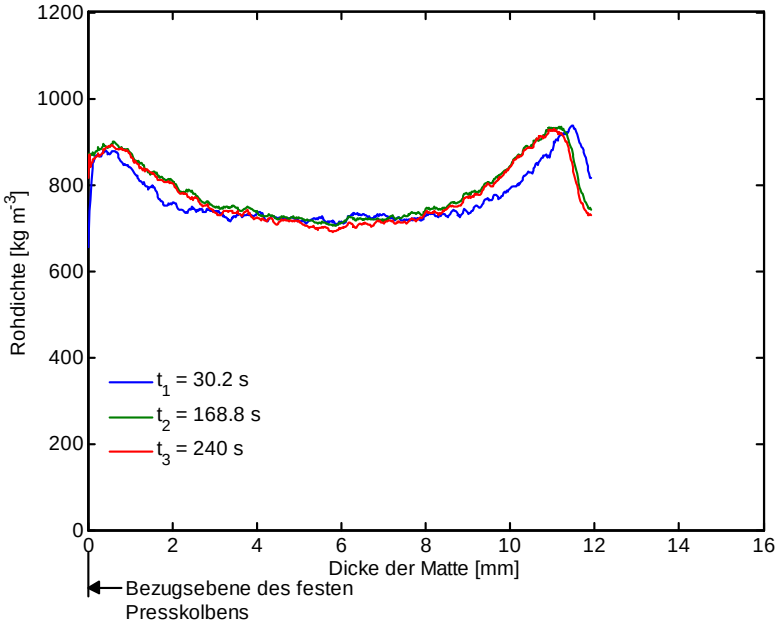


Abb. P- 144: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

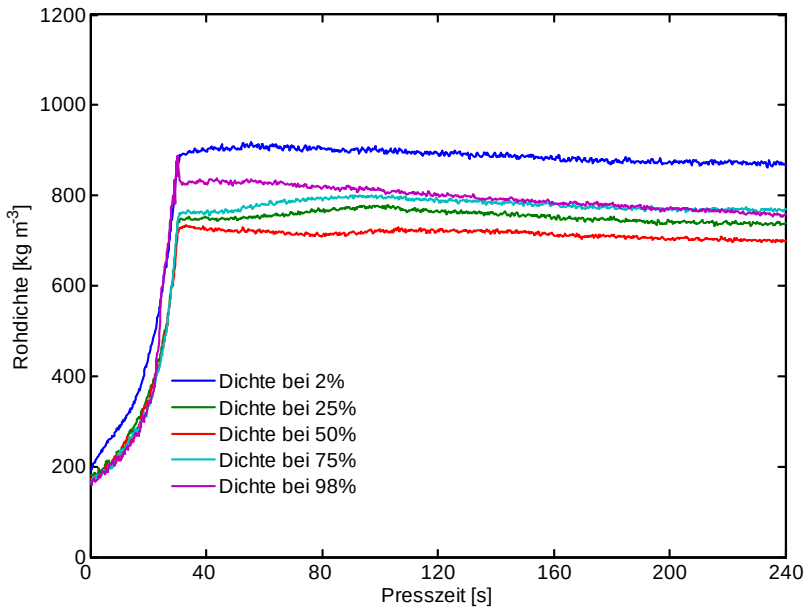


Abb. P- 145: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240.

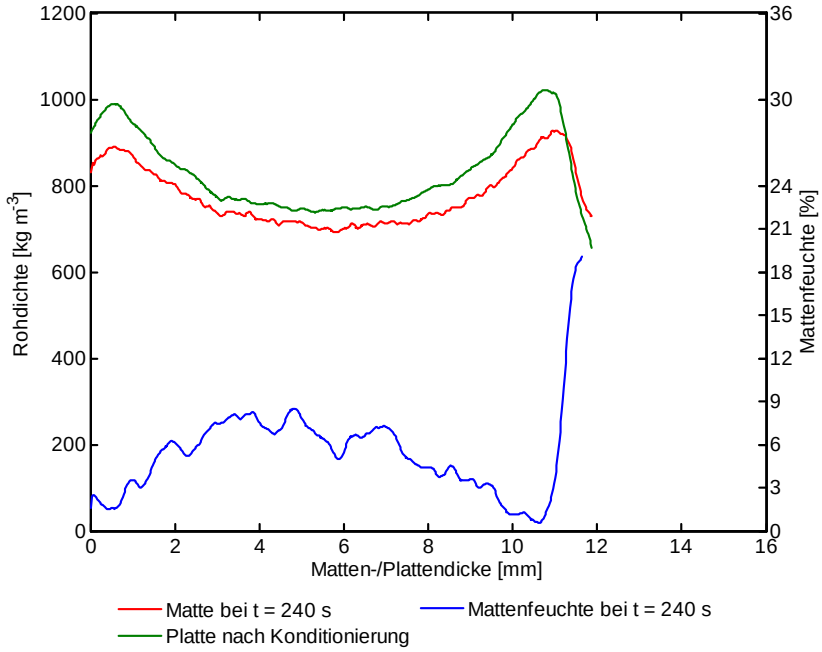


Abb. P- 146: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.30 Platte 12 mm_02_30_100_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_100_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,53	gravim.	828,88	gravim.	0,79	radiom.	17,95				
Endwert	18,74		795,48								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	755,67	99,07	radiom.	17,64	radiom.	0,31				
	Endwert	762,41			17,80		0,15				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,03	radiom.	-2,17	gravim.	4,33			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	30,2	0,50	4,20	878,80	116,29	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	50,6	0,48	4,06	921,87	121,99	1,86	159,91	84,94	46,29	101,70
	Ende	240,0	0,50	4,90	886,55	117,32	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinteres Maximum	Beginn	30,2	0,42	3,50	936,01	123,86	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	43,2	0,86	7,25	973,06	128,77	2,31	161,48	73,90	42,08	96,35
	Ende	240,0	0,81	6,83	932,70	123,43	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	701,69	92,86			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	78,2	685,83	87,80			0,84	162,96	104,86	70,03	111,20
	Maximum	122,8	697,64	89,43			0,34	168,57	120,88	111,27	124,36
	Ende	240,0	679,93	89,18			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	30,2	4,78	40,19	802,64	106,22	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	78,8	3,95	33,26	810,35	107,23	0,83	162,84	105,12	70,63	111,38
	Ende	240,0	4,11	34,59	793,57	105,02	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinterer GF	Beginn	30,2	4,32	36,34	802,64	106,22	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	81,4	3,52	29,65	806,48	106,72	0,74	163,10	106,20	73,18	112,14
	Ende	240,0	3,67	30,91	794,13	105,09	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	30,2	2,97	24,96	707,10	93,57	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	94,2	1,79	15,07	701,60	92,84	0,79	164,69	110,98	85,63	115,97
	Ende	240,0	2,03	17,08	690,81	91,42	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hinterer Profilgrund	Beginn	30,2	2,45	20,58	709,10	93,84	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	81,4	0,91	7,68	698,58	92,44	0,55	164,01	110,11	83,31	115,21
	Ende	240,0	1,07	9,02	692,59	91,65	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50

Tab. P- 59:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 60

Probenname	Platte 12mm_02_30_100_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	30,2	1,73	14,54	755,67	100,00	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	80,4	2,30	19,36	782,08	103,49	0,79	162,99	105,80	72,19	111,85
	Ende	240,0	2,23	18,74	762,41	100,89	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
hintere Peakbase	Beginn	30,2	2,14	18,04	755,67	100,00	6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
erste Haltephase	Maximum	91,8	2,96	24,13	782,08	103,49	0,55	164,01	110,11	83,31	115,21
	Ende	240,0	2,66	22,42	762,41	100,89	0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	707,10	93,57			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	30,2	707,10	93,57			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Maximum	100,0	750,12	95,94			0,51	165,45	113,07	91,19	117,69
	Ende	240,0	722,19	94,72			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	707,79	93,66			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	236,4	677,97	88,89			0,07	181,92	140,74	116,40	143,07
	Maximum	239,2	684,20	89,69			0,07	182,11	141,05	116,53	143,40
	Ende	240,0	679,48	89,12			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	30,2	731,04	96,74			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Minimum	30,2	731,04	96,74			6,95	164,67	49,16	38,72	69,73
	Maximum	101,0	787,53	100,75			0,50	165,39	113,42	92,09	118,00
	Ende	240,0	757,56	99,36			0,03	181,78	141,16	116,57	143,50

Tab. P- 60:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

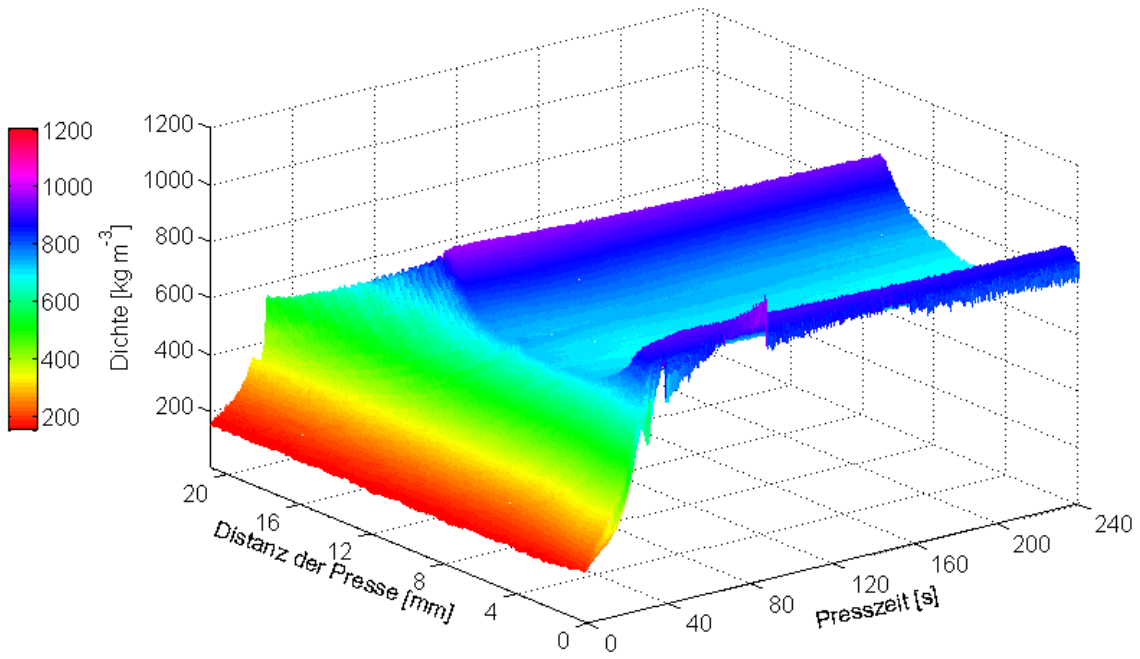


Abb. P- 147: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240.

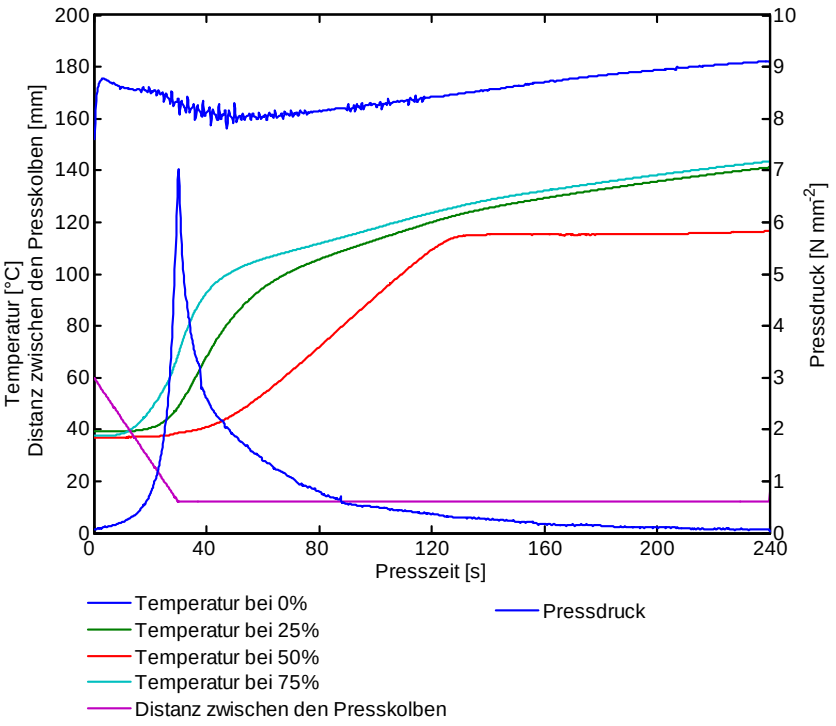


Abb. P- 148: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

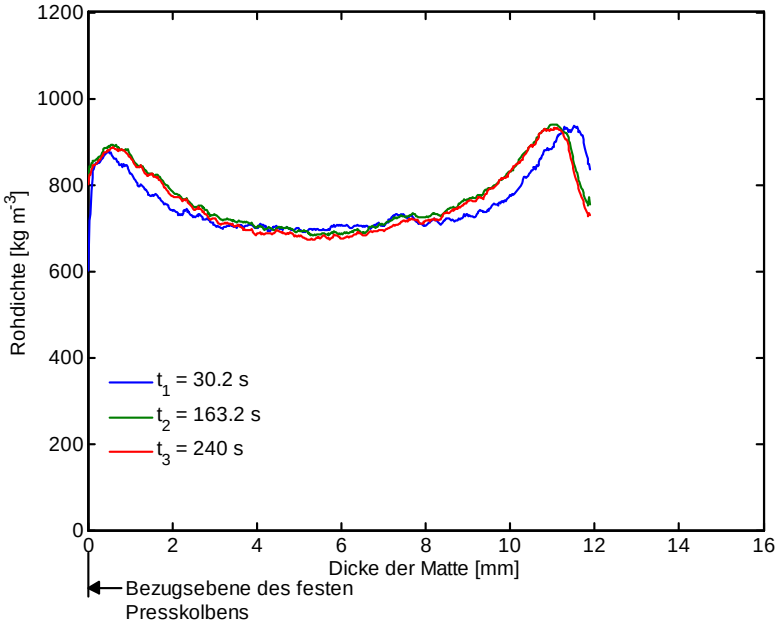


Abb. P- 149: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende des Heißpressvorgangs (t_3), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der Haltephase (t_2).

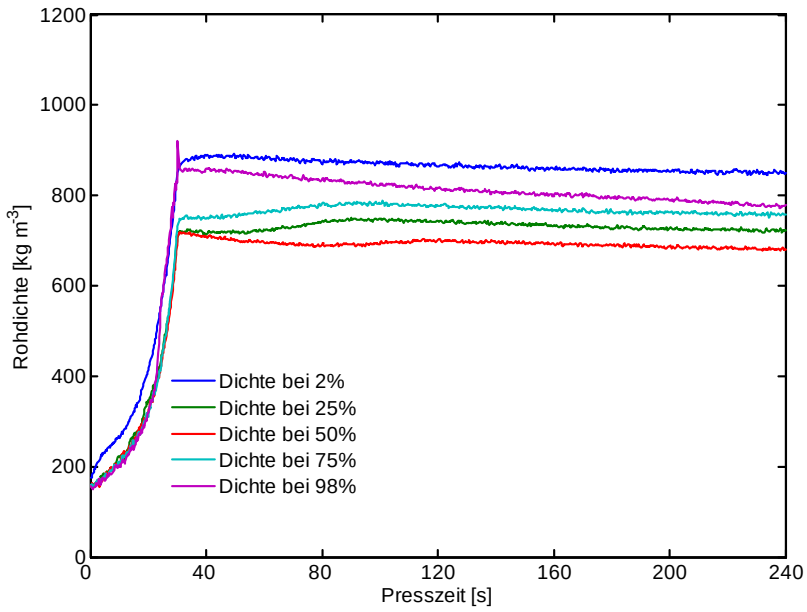


Abb. P- 150: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240.

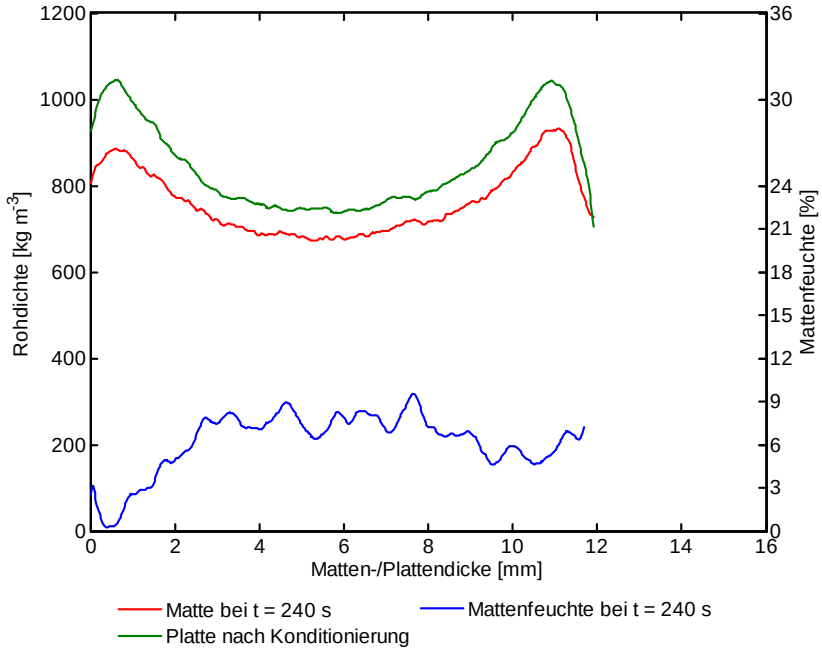


Abb. P- 151: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_100_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.31 Platte 12 mm_01_30_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,37	gravim.	822,09	gravim.	0,64	radiom.	19,81				
Endwert	18,73		795,01								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	723,80	101,49	radiom.	18,61	radiom.	1,20				
	Endwert	731,71	102,60		18,81		1,00				
zweite Haltephase	Startwert	792,19	100,83		18,49		1,32				
	Endwert	785,69	100,00		18,34		1,47				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,82	radiom.	1,65	gravim.	3,54			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,54	4,13	845,90	116,87	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	55,4	0,57	4,36	875,09	120,90	1,19	167,44	95,49	55,43	73,08
	Ende	149,2	0,54	4,45	852,14	117,73	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,65	4,93	900,91	124,47	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	35,8	0,75	5,72	924,19	127,69	2,32	168,89	72,98	46,18	51,50
	Ende	149,2	0,96	7,31	886,89	122,53	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderes Maximum	Beginn	151,6	0,42	3,50	861,83	108,79	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,62	5,25	851,29	107,46	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
hinteres Maximum	Beginn	151,6	0,81	6,83	911,34	115,04	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,98	8,23	893,50	112,79	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	678,94	93,80			5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
	Minimum	94,0	657,48	89,63			0,49	170,74	112,04	89,21	99,85
	Maximum	143,4	670,85	91,48			0,22	175,50	126,58	113,03	117,17
	Ende	149,2	670,13	91,58			0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
zweite Haltephase	Beginn	151,6	780,27	98,50			2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
	Ende	240,0	782,40	99,58			0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,26	40,14	775,16	107,10	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	77,0	4,72	36,04	768,83	106,22	0,68	170,07	106,44	73,68	90,40
	Ende	149,2	4,97	37,92	767,95	106,10	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
hinterer GF	Beginn	29,4	4,88	37,28	774,26	106,97	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	91,2	4,06	30,99	766,01	105,83	0,52	168,91	111,19	86,70	98,48
	Ende	149,2	4,34	33,15	769,27	106,28	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderer GF	Beginn	151,6	4,97	41,77	817,69	103,22	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,76	40,02	807,44	101,92	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
hinterer GF	Beginn	151,6	4,24	35,64	820,06	103,52	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,09	34,41	806,67	101,83	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	4,15	31,72	688,37	95,11	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	108,2	1,98	15,11	671,55	92,78	0,47	170,42	116,61	100,86	106,45
	Ende	149,2	2,88	22,02	680,06	93,96	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	2,68	20,43	686,24	94,81	5,23	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	84,0	2,14	16,37	669,15	92,45	0,47	170,63	113,35	92,64	101,76
	Ende	149,2	2,43	18,52	679,48	93,88	0,19	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderer Profilgrund	Beginn	151,6	2,74	23,03	789,38	99,65	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,43	20,40	789,75	99,69	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
hinterer Profilgrund	Beginn	151,6	2,46	20,68	788,92	99,59	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,76	14,80	791,52	99,91	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,2	[mm]	12,10	[%]	101,75	2,75	176,43	127,66	113,24	117,99
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	151,6	2,83	23,82	744,56	93,99	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,77	23,29	737,42	93,09	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76
vorderes Maximum	Beginn	151,6	3,14	26,44	762,77	96,29	2,51	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,12	26,27	737,42	93,09	0,17	183,52	140,68	116,63	125,76

Tab. P- 61:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 62

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	1,6	12,6	723,8	100,0	5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
erste Haltephase	Maximum	96,4	2,5	19,1	733,7	101,4	0,5	171,6	112,8	91,3	101,0
	Ende	149,2	2,5	18,9	731,7	101,1	0,2	176,1	127,7	113,1	117,7
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,5	19,4	723,8	100,0	5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
erste Haltephase	Maximum	98,0	3,0	22,7	733,7	101,4	0,5	170,6	113,4	92,6	101,8
	Ende	149,2	2,8	21,6	731,7	101,1	0,2	176,1	127,7	113,1	117,7
vordere Peakbase	Beginn	151,6	1,4	11,4	792,2	100,0	2,5	176,3	128,1	113,2	118,0
zweite Haltephase	Ende	149,2	1,3	11,2	785,7	99,2	0,2	176,1	127,7	113,1	117,7
hintere Peakbase	Beginn	151,6	1,7	14,7	792,2	100,0	2,5	176,3	128,1	113,2	118,0
zweite Haltephase	Ende	149,2	1,6	13,8	785,7	99,2	0,2	183,5	140,7	116,6	125,8
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	675,2	93,3			5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
	Minimum	36,2	673,0	91,7			2,3	169,0	73,7	46,2	51,9
	Maximum	111,2	707,7	96,6			0,4	172,5	117,6	103,1	107,7
	Ende	149,2	699,3	95,6			0,2	176,1	127,7	113,1	117,7
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	683,0	94,4			5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
	Minimum	102,8	653,1	89,1			0,4	170,6	114,8	96,6	104,0
	Maximum	144,6	673,0	91,8			0,2	175,5	126,8	113,1	117,3
	Ende	149,2	671,6	91,8			0,2	176,1	127,7	113,1	117,7
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	695,7	96,1			5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
	Minimum	29,4	695,7	96,1			5,2	172,5	61,3	45,1	45,6
	Maximum	106,0	722,0	98,4			0,4	171,2	115,9	99,2	105,4
	Ende	149,2	710,7	97,1			0,2	176,1	127,7	113,1	117,7

Tab. P- 62:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

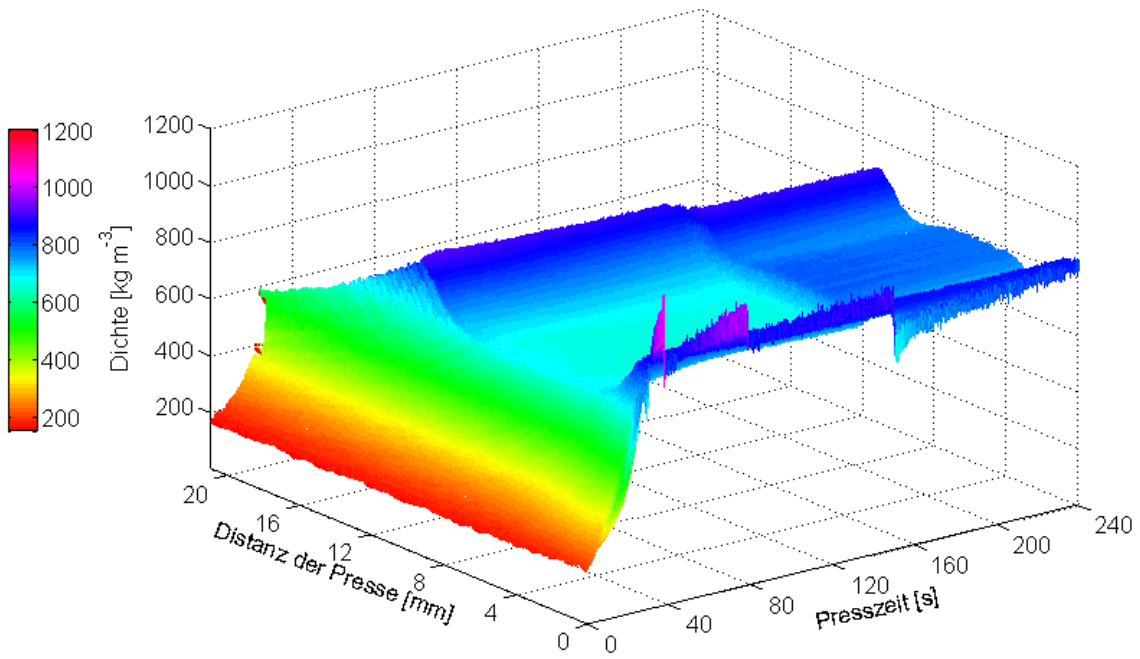


Abb. P- 152: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240.

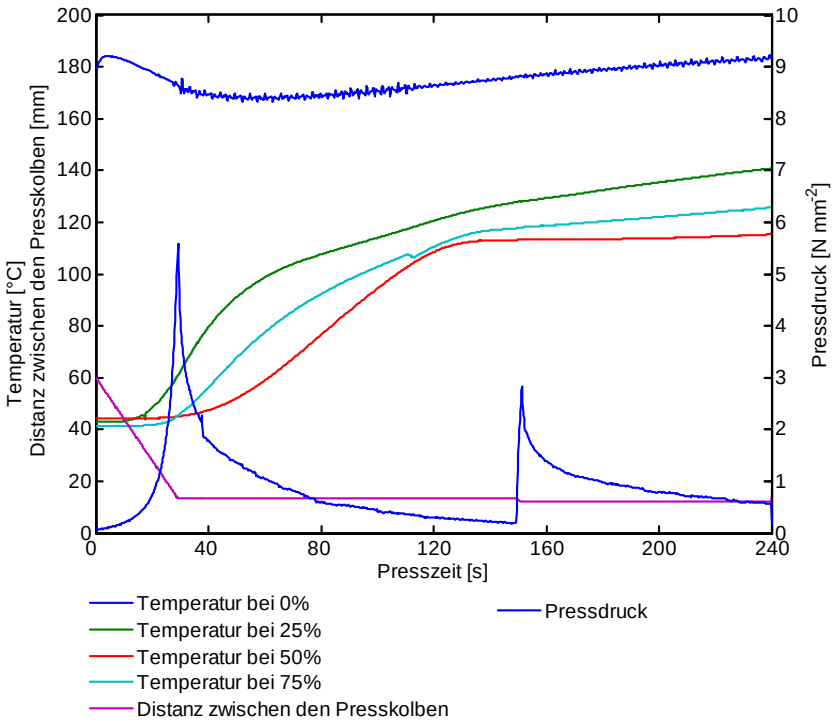


Abb. P- 153: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

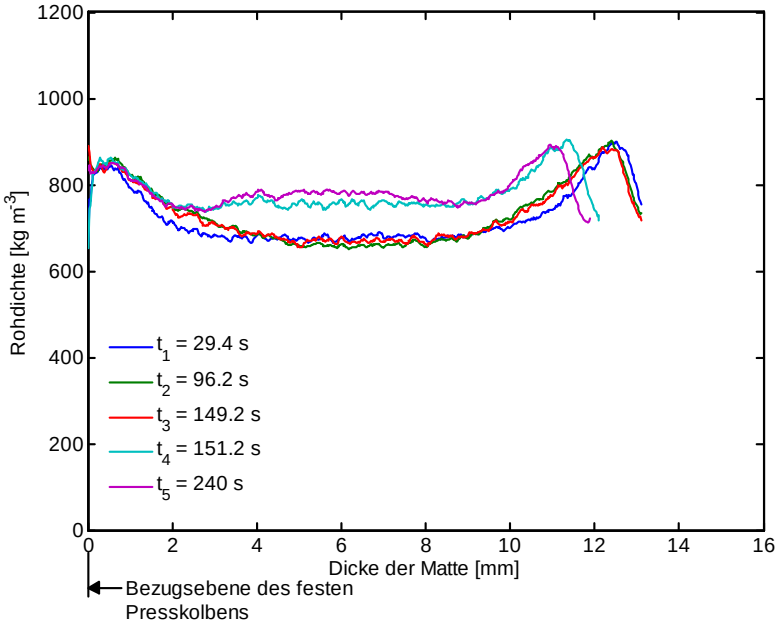


Abb. P- 154: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

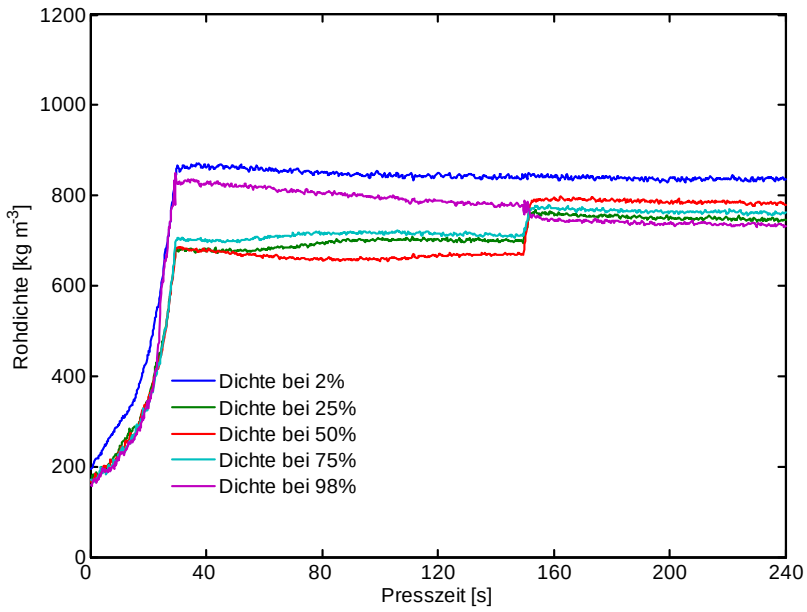


Abb. P- 155: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240.

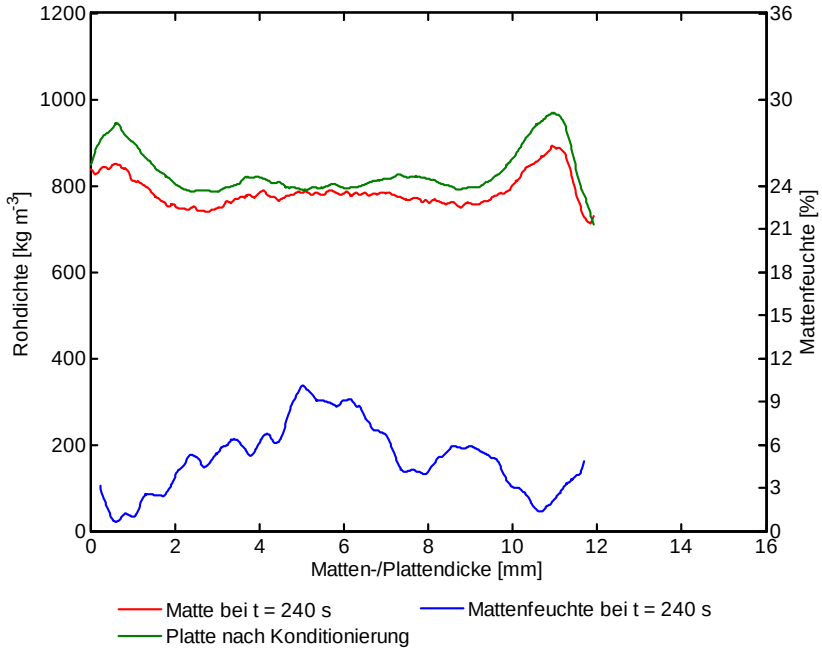


Abb. P- 156: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.32 Platte 12 mm_02_30_110_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,64	gravim.	833,55	gravim.	0,61	radiom.	19,21				
Endwert	19,03		807,74								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	728,77	101,49	radiom.	18,74	radiom.	0,47				
	Endwert	734,97	102,35		18,90		0,31				
zweite Haltephase	Startwert	798,00	100,68		18,59		0,62				
	Endwert	792,61	100,00		18,47		0,74				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,04	radiom.	0,96	gravim.	3,32			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,48	3,66	863,58	118,50	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	45,0	0,54	4,13	912,12	125,16	1,63	168,29	85,86	49,39	61,96
	Ende	149,2	0,48	4,13	868,41	119,16	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,79	6,04	884,37	121,35	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	38,2	0,85	6,52	902,21	123,80	2,09	168,95	76,85	46,81	54,11
	Ende	149,2	0,85	6,52	883,91	121,29	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderes Maximum	Beginn	151,6	0,48	4,04	869,08	108,91	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,54	4,56	865,88	108,51	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
hinteres Maximum	Beginn	151,6	0,83	7,02	887,01	111,15	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,90	7,54	875,65	109,73	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	680,00	93,31			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Minimum	87,4	658,61	89,38			0,62	170,68	109,94	83,32	96,50
	Maximum	131,8	674,25	91,33			0,30	174,24	124,02	112,25	115,19
	Ende	149,2	670,43	91,22			0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
zweite Haltephase	Beginn	151,6	788,34	98,79			2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
	Ende	240,0	792,96	100,04			0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,11	39,03	776,33	106,53	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	87,6	4,31	32,93	764,43	104,89	0,63	169,72	110,00	83,50	96,58
	Ende	149,2	4,82	36,80	772,83	106,05	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
hinterer GF	Beginn	29,4	4,88	37,28	775,07	106,35	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	84,2	4,25	32,48	767,33	105,29	0,68	169,19	108,95	80,39	94,74
	Ende	149,2	4,51	34,42	770,60	105,74	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderer GF	Beginn	151,6	4,79	40,35	819,96	102,75	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,77	40,18	809,96	101,50	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
hinterer GF	Beginn	151,6	4,35	36,67	820,36	102,80	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,33	36,49	812,49	101,82	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	3,51	26,79	690,51	94,75	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	101,6	1,86	14,21	676,11	92,77	0,62	171,91	114,50	95,65	103,45
	Ende	149,2	2,15	16,45	682,74	93,68	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	2,74	20,91	690,29	94,72	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	78,0	2,29	17,50	671,98	92,21	0,62	169,07	110,20	84,07	96,92
	Ende	149,2	2,32	17,73	681,00	93,45	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
vorderer Profilgrund	Beginn	151,6	2,66	22,46	798,27	100,03	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,12	17,89	802,83	100,61	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
hinterer Profilgrund	Beginn	151,6	2,54	21,37	798,65	100,08	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,31	19,47	803,69	100,71	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,4	[mm]	11,93	[%]	100,53	2,99	176,43	128,08	113,23	118,03
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	151,6	2,27	19,12	764,87	95,85	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,35	19,82	756,27	94,77	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76
vorderes Maximum	Beginn	151,6	2,77	23,33	762,85	95,60	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,81	23,68	756,27	94,77	0,20	183,52	140,68	116,63	125,76

Tab. P- 63:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 64

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	2,08	15,90	728,77	100,00	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	88,8	2,69	20,54	737,19	101,16	0,62	169,99	110,37	84,58	97,22
	Ende	149,2	2,60	19,87	734,97	100,85	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,37	18,12	728,77	100,00	5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
erste Haltephase	Maximum	88,2	2,88	21,44	737,19	101,16	0,62	169,07	110,20	84,07	96,92
	Ende	149,2	2,69	20,51	734,97	100,85	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
vordere Peakbase	Beginn	151,6	1,39	11,75	798,00	100,00	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	149,2	1,33	11,23	792,61	99,33	0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
hintere Peakbase	Beginn	151,6	1,44	12,11	798,00	100,00	2,67	176,34	128,12	113,24	118,04
zweite Haltephase	Ende	149,2	1,37	11,58	792,61	99,33	0,21	183,52	140,68	116,63	125,76
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	691,40	94,87			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Minimum	29,4	691,40	94,87			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Maximum	65,4	725,07	96,84			0,94	168,53	101,72	63,26	82,02
	Ende	149,2	710,03	96,61			0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	686,68	94,22			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Minimum	88,4	658,79	89,39			0,62	170,07	110,27	84,24	97,03
	Maximum	135,6	677,97	92,02			0,30	174,99	124,97	112,71	116,19
	Ende	149,2	672,97	91,56			0,21	176,13	127,69	113,11	117,65
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	695,42	95,42			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Minimum	29,4	695,42	95,42			5,42	172,46	61,31	45,12	45,57
	Maximum	101,6	731,85	99,12			0,49	171,91	114,50	95,65	103,45
	Ende	149,2	711,97	96,87			0,21	176,13	127,69	113,11	117,65

Tab. P- 64:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

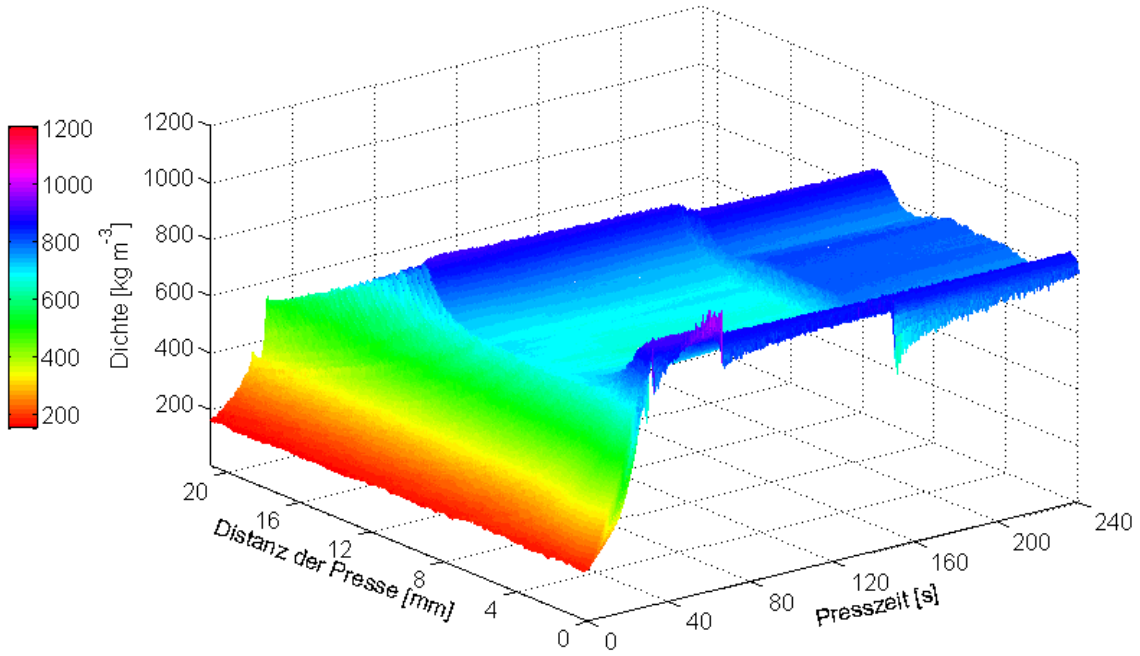


Abb. P- 157: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240.

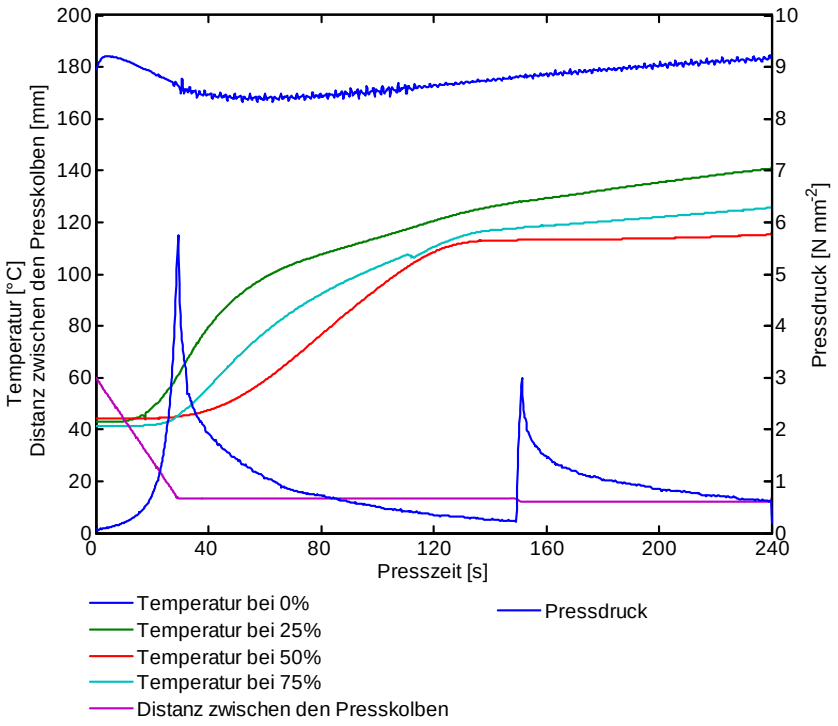


Abb. P- 158: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

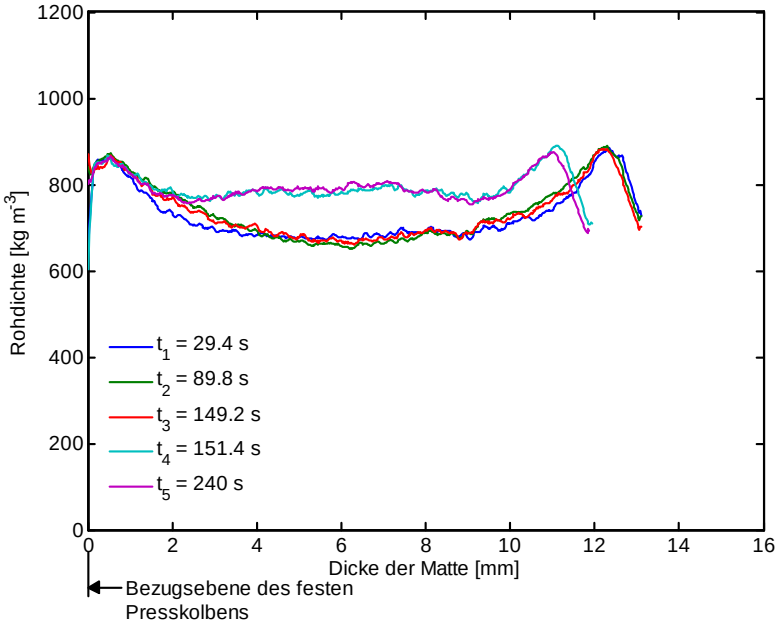


Abb. P- 159: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

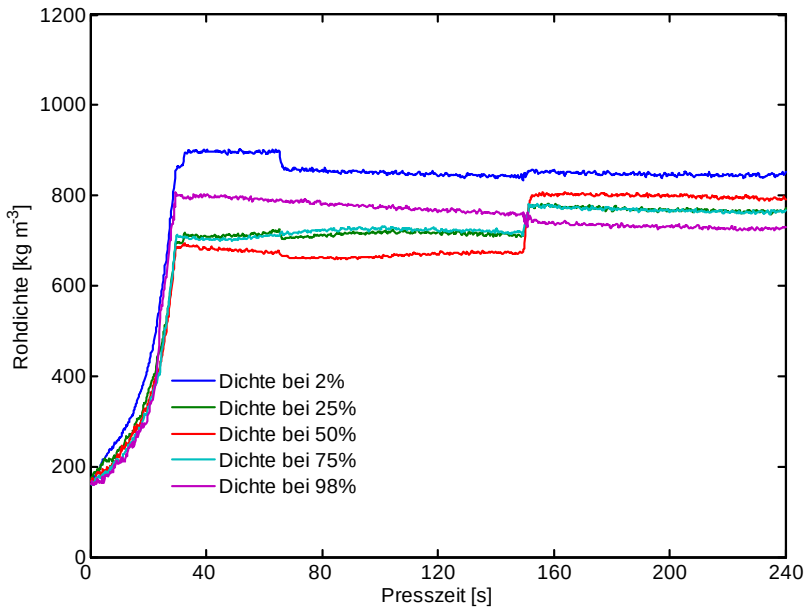


Abb. P- 160: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240.

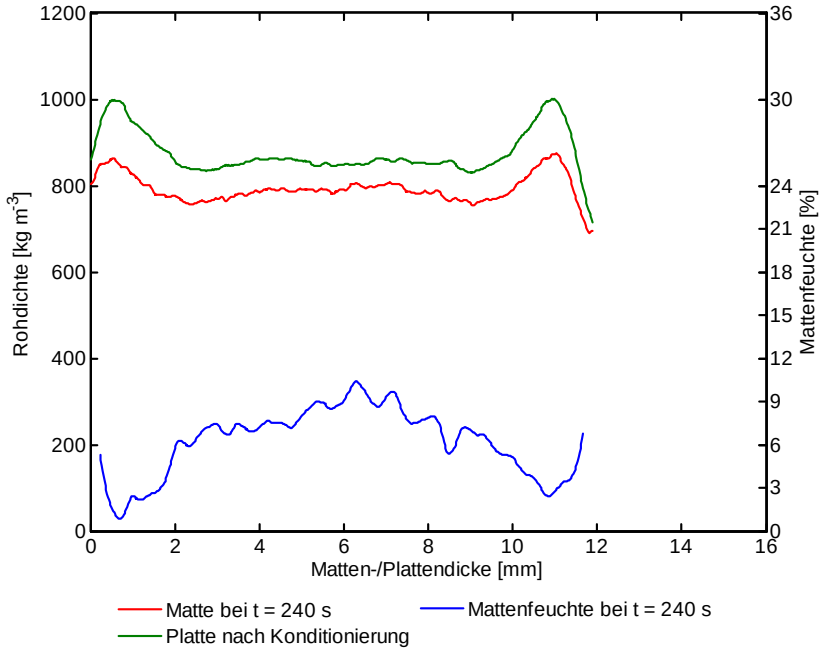


Abb. P- 161: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.33 Platte 12 mm_01_30_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,50	gravim.	827,61	gravim.	0,62	radiom.	19,76				
Endwert	18,88		801,29								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	715,77	101,41	radiom.	18,43	radiom.	1,33				
	Endwert	722,68	102,39		18,61		1,15				
zweite Haltephase	Startwert	786,04	100,44		18,25		1,51				
	Endwert	782,63	100,00		18,17		1,59				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,95	radiom.	0,05	gravim.	3,41			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,62	4,76	840,15	117,38	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	54,8	0,64	4,89	875,58	122,33	1,26	167,80	89,12	48,02	86,26
	Ende	169,0	0,62	4,76	849,80	118,73	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,81	6,19	869,30	121,45	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	42,2	0,96	7,33	902,17	126,04	1,72	169,00	71,52	41,17	72,69
	Ende	169,0	1,00	7,62	876,55	122,46	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderes Maximum	Beginn	171,6	0,67	5,63	861,83	109,64	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,62	5,28	847,79	107,86	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
hinteres Maximum	Beginn	171,6	0,92	7,75	888,28	113,01	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,96	8,10	881,52	112,15	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	664,72	92,87			5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
	Minimum	88,0	645,65	88,52			0,57	166,68	105,66	80,86	103,86
	Maximum	133,8	661,01	90,50			0,26	170,60	118,63	113,36	118,00
	Ende	169,0	654,54	90,57			0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
zweite Haltephase	Beginn	171,6	774,72	98,56			2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
	Ende	240,0	780,18	99,69			0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,04	38,41	753,53	105,28	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	84,2	4,20	32,00	757,04	105,77	0,58	166,14	104,35	76,95	102,41
	Ende	169,0	4,48	34,13	756,79	105,73	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
hinterer GF	Beginn	29,4	4,81	36,67	758,86	106,02	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	96,2	4,21	32,10	755,50	105,55	0,50	167,11	108,20	88,85	106,66
	Ende	169,0	4,43	33,81	758,68	106,00	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderer GF	Beginn	171,6	4,58	38,73	805,32	102,45	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,39	37,15	797,33	101,44	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
hinterer GF	Beginn	171,6	4,31	36,44	803,12	102,17	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,18	35,39	794,70	101,10	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	3,54	26,98	676,18	94,47	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	114,8	1,76	13,39	666,97	93,18	0,43	168,79	113,85	104,41	112,41
	Ende	169,0	2,19	16,67	666,62	93,13	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	3,46	26,35	676,11	94,46	5,49	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	90,0	2,40	18,29	661,89	92,47	0,58	164,67	104,77	78,19	102,86
	Ende	169,0	2,96	22,54	669,79	93,58	0,17	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderer Profilgrund	Beginn	171,6	2,79	23,59	786,98	100,12	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,69	22,71	792,92	100,88	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
hinterer Profilgrund	Beginn	171,6	1,55	13,10	787,44	100,18	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,25	10,56	791,15	100,65	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	170,6	[mm]	12,45	[%]	105,28	2,29	174,83	124,87	113,75	123,75
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	171,6	2,73	23,06	747,42	95,09	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,73	23,06	739,90	94,13	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75
vorderes Maximum	Beginn	171,6	2,89	24,47	728,77	92,71	2,69	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,02	25,53	739,90	94,13	0,22	180,97	134,54	115,36	132,75

Tab. P- 65:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 66

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	2,4	18,3	715,8	100,0	5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
erste Haltephase	Maximum	104,4	2,8	21,3	730,1	102,0	0,4	168,9	110,7	96,2	109,3
	Ende	169,0	2,6	19,5	722,7	101,0	0,2	174,5	124,5	113,6	123,4
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,3	17,8	715,8	100,0	5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
erste Haltephase	Maximum	85,4	2,8	21,2	730,1	102,0	0,6	164,7	104,8	78,2	102,9
	Ende	169,0	2,6	19,5	722,7	101,0	0,2	174,5	124,5	113,6	123,4
vordere Peakbase	Beginn	171,6	1,9	16,4	786,0	100,0	2,7	174,6	125,1	113,8	123,9
zweite Haltephase	Ende	169,0	1,7	14,8	782,6	99,6	0,2	174,5	124,5	113,6	123,4
hintere Peakbase	Beginn	171,6	1,7	14,3	786,0	100,0	2,7	174,6	125,1	113,8	123,9
zweite Haltephase	Ende	169,0	1,6	13,4	782,6	99,6	0,2	181,0	134,5	115,4	132,7
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	688,7	96,2			5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
	Minimum	36,4	685,3	94,5			2,3	171,2	60,4	39,8	63,8
	Maximum	109,2	727,6	99,5			0,4	168,2	112,2	100,1	110,7
	Ende	169,0	701,2	97,0			0,2	174,5	124,5	113,6	123,4
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	661,0	92,3			5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
	Minimum	90,4	637,0	87,3			0,6	166,5	106,4	83,3	104,7
	Maximum	141,8	657,1	90,1			0,2	171,7	120,1	113,7	119,5
	Ende	169,0	647,4	89,6			0,2	174,5	124,5	113,6	123,4
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	677,6	94,7			5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
	Minimum	29,4	677,6	94,7			5,5	172,6	47,4	39,0	51,5
	Maximum	114,2	706,9	96,7			0,4	168,8	113,7	104,0	112,3
	Ende	169,0	692,2	95,8			0,2	174,5	124,5	113,6	123,4

Tab. P- 66:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

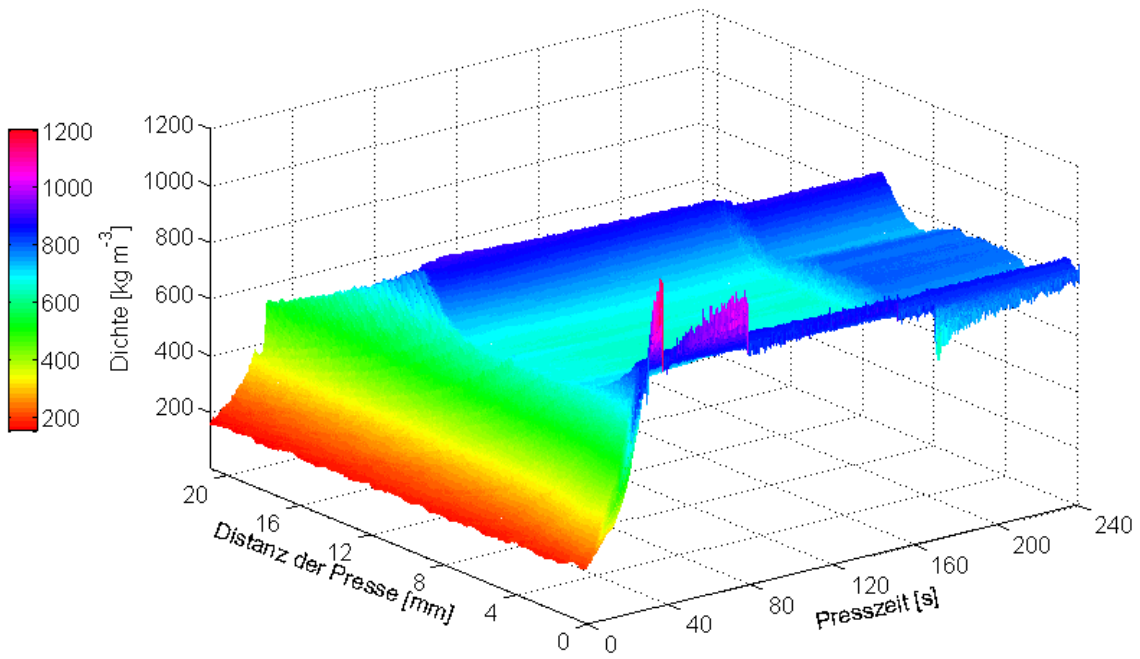


Abb. P- 162: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240.

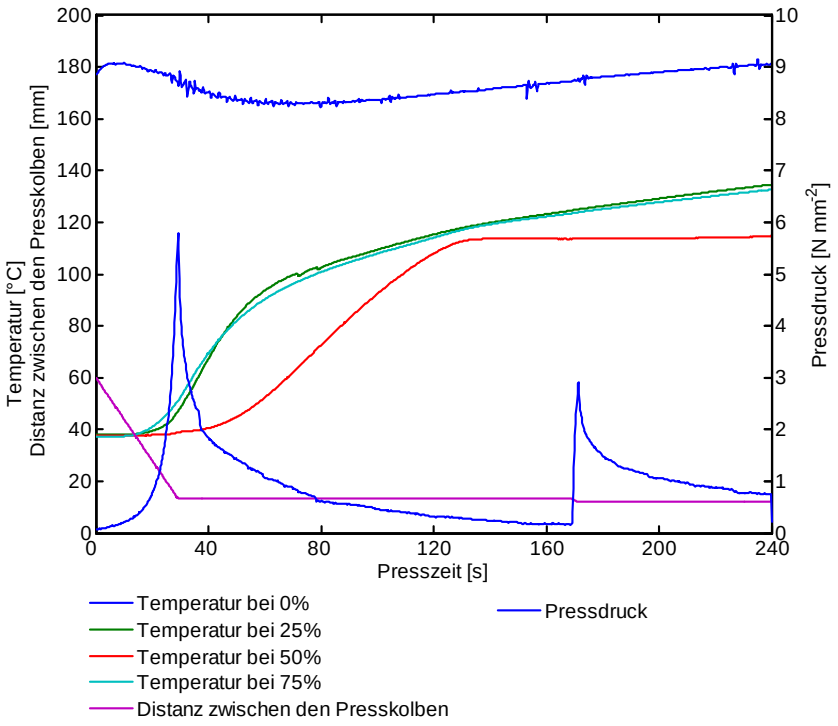


Abb. P- 163: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

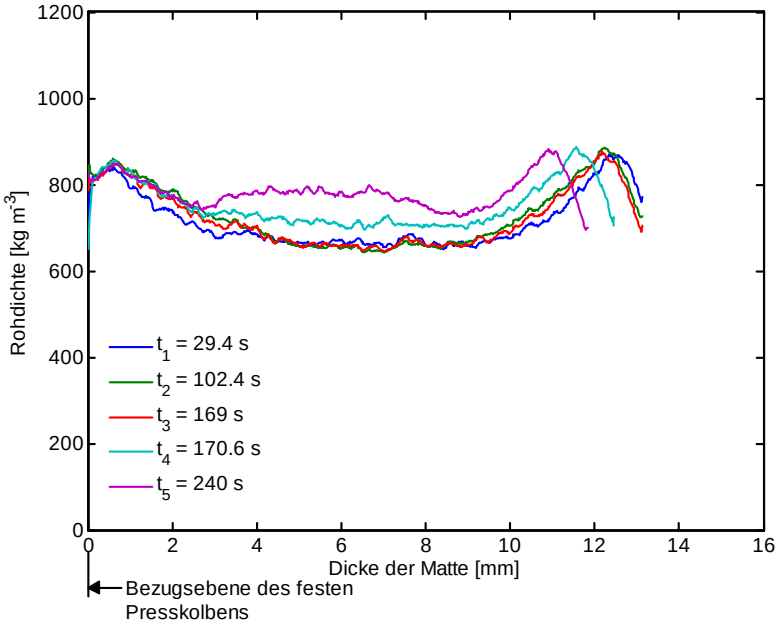


Abb. P- 164: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

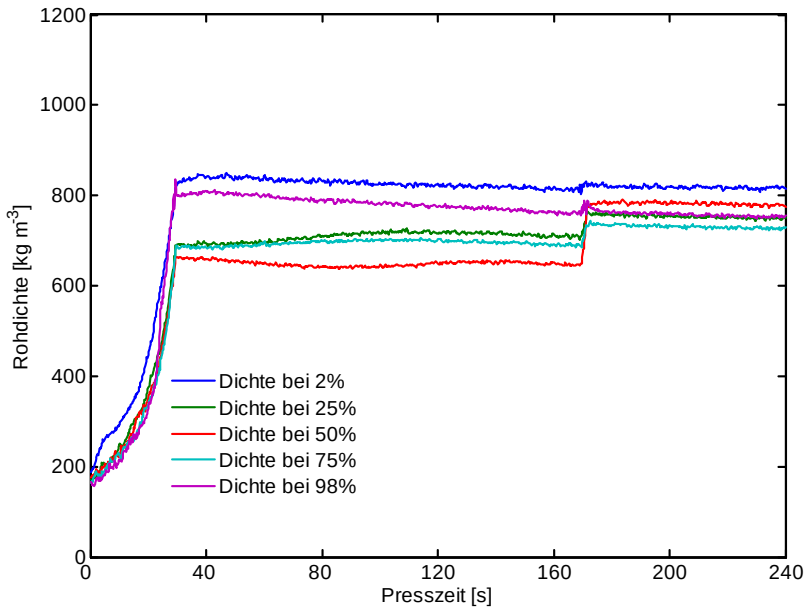


Abb. P- 165: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240.

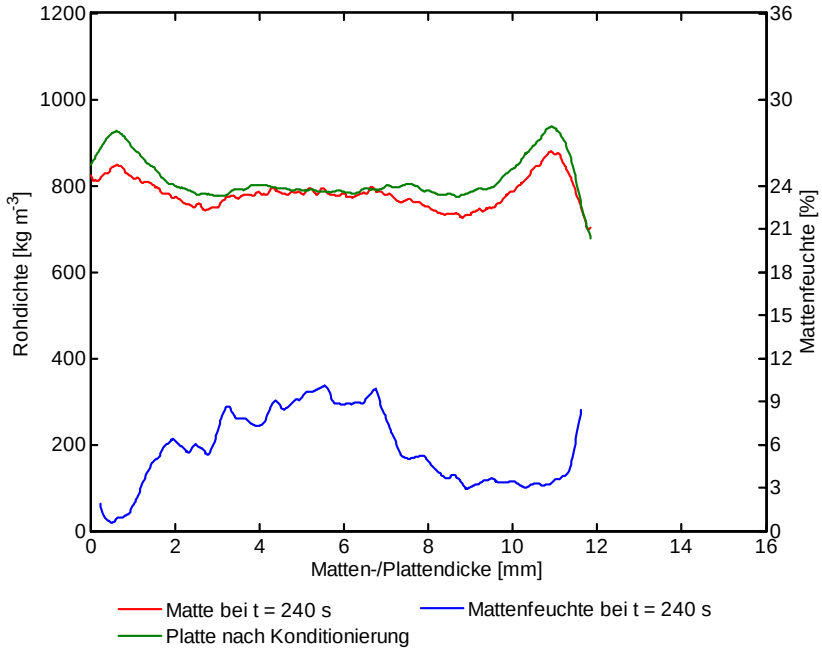


Abb. P- 166: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.34 Platte 12 mm_02_30_110_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,55	gravim.	829,73	gravim.	0,73	radiom.	18,93				
Endwert	18,82		798,92								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	697,31	99,95	radiom.	17,96	radiom.	0,97				
	Endwert	715,11	102,50		18,42		0,51				
zweite Haltephase	Startwert	773,21	99,83		17,95		0,97				
	Endwert	774,53	100,00		17,98		0,94				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,37	radiom.	-1,24	gravim.	3,99			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,62	4,76	846,85	121,44	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	63,2	0,62	4,76	888,43	127,41	0,93	165,00	95,84	55,17	92,32
	Ende	169,0	0,62	4,29	861,29	123,52	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,37	2,86	864,56	123,98	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	36,8	0,69	5,24	899,02	128,93	2,29	170,96	61,11	39,81	64,48
	Ende	169,0	0,81	6,19	871,63	125,00	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderes Maximum	Beginn	171,6	0,62	5,28	878,12	113,57	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,62	5,28	878,80	113,66	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
hinteres Maximum	Beginn	171,6	0,75	6,34	889,20	115,00	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,79	6,69	877,79	113,52	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	650,81	93,33			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Minimum	78,6	643,57	89,17			0,68	165,94	102,62	71,07	100,16
	Maximum	131,0	658,11	91,10			0,25	170,52	118,06	112,89	117,31
	Ende	169,0	651,91	91,16			0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
zweite Haltephase	Beginn	171,6	765,58	99,01			2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
	Ende	240,0	780,65	100,79			0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,25	40,00	752,84	107,96	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	88,0	4,52	34,48	757,48	108,63	0,57	166,68	105,66	80,86	103,86
	Ende	169,0	4,85	36,98	757,82	108,68	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
hinterer GF	Beginn	29,4	5,23	39,84	750,89	107,68	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	78,4	4,42	33,68	759,55	108,93	0,69	166,09	102,55	70,85	100,09
	Ende	169,0	4,52	34,44	756,18	108,44	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderer GF	Beginn	171,6	4,73	39,96	795,54	102,89	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,66	39,44	796,67	103,03	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
hinterer GF	Beginn	171,6	4,31	36,44	799,22	103,36	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,31	36,44	792,64	102,51	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	3,46	26,35	658,92	94,49	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	108,8	1,97	15,03	659,54	94,58	0,48	168,19	112,06	99,81	110,57
	Ende	169,0	2,08	15,87	659,75	94,61	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	3,58	27,30	658,72	94,47	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	88,2	1,49	11,39	652,31	93,55	0,55	166,53	106,21	82,65	104,49
	Ende	169,0	2,33	17,78	660,37	94,70	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
vorderer Profilgrund	Beginn	171,6	2,25	19,01	773,28	100,01	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,96	16,55	788,09	101,92	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
hinterer Profilgrund	Beginn	171,6	1,68	14,23	773,10	99,99	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,37	11,62	785,69	101,61	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	170,8	[mm]	12,39	[%]	104,75	2,50	174,67	124,91	113,76	123,81
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	171,6	2,73	23,06	725,55	93,84	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,73	23,06	720,61	93,20	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75
vorderes Maximum	Beginn	171,6	3,06	25,88	718,47	92,92	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,98	25,18	720,61	93,20	0,24	180,97	134,54	115,36	132,75

Tab. P- 67:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 68

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	1,89	14,44	697,31	100,00	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	96,0	2,68	20,42	722,51	103,61	0,48	167,04	108,10	88,67	106,60
	Ende	169,0	2,48	18,89	715,11	102,55	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,00	15,24	697,31	100,00	5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
erste Haltephase	Maximum	89,8	2,86	21,57	722,51	103,61	0,55	166,53	106,21	82,65	104,49
	Ende	169,0	2,39	18,25	715,11	102,55	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
vordere Peakbase	Beginn	171,6	1,42	11,97	773,21	100,00	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	169,0	1,42	11,97	774,53	100,17	0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
hintere Peakbase	Beginn	171,6	1,67	14,08	773,21	100,00	2,78	174,60	125,06	113,84	123,94
zweite Haltephase	Ende	169,0	1,52	12,85	774,53	100,17	0,15	180,97	134,54	115,36	132,75
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	655,09	93,95			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Minimum	29,4	655,09	93,95			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Maximum	104,2	702,59	97,21			0,39	168,61	110,68	96,06	109,21
	Ende	169,0	683,54	95,59			0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	659,06	94,51			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Minimum	87,8	642,21	88,96			0,58	166,36	105,59	80,65	103,77
	Maximum	126,2	664,25	91,95			0,27	170,79	116,95	111,23	115,97
	Ende	169,0	651,77	91,14			0,15	174,45	124,53	113,57	123,39
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	659,48	94,57			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Minimum	29,4	659,48	94,57			5,45	172,58	47,38	38,97	51,51
	Maximum	96,2	702,21	97,14			0,48	167,11	108,20	88,85	106,66
	Ende	169,0	689,55	96,43			0,15	174,45	124,53	113,57	123,39

Tab. P- 68:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

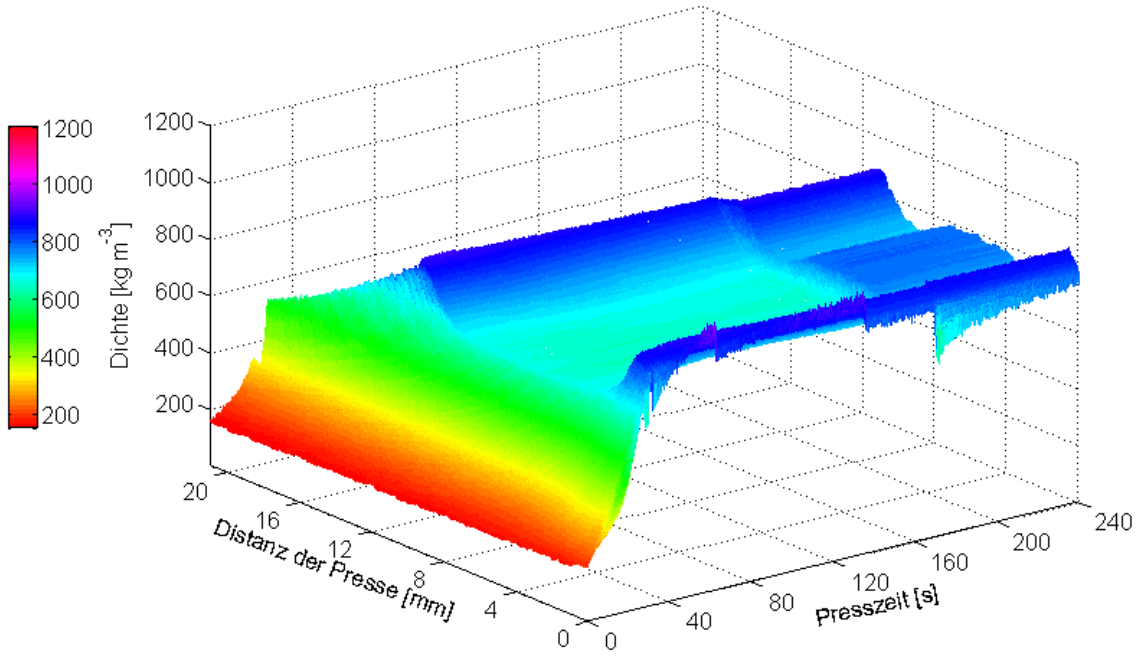


Abb. P- 167: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240.

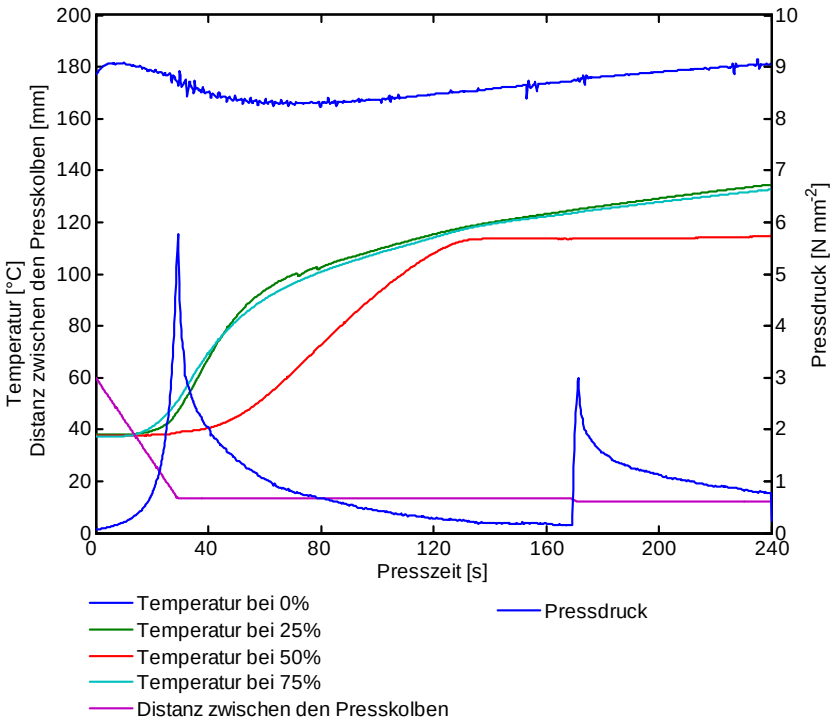


Abb. P- 168: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

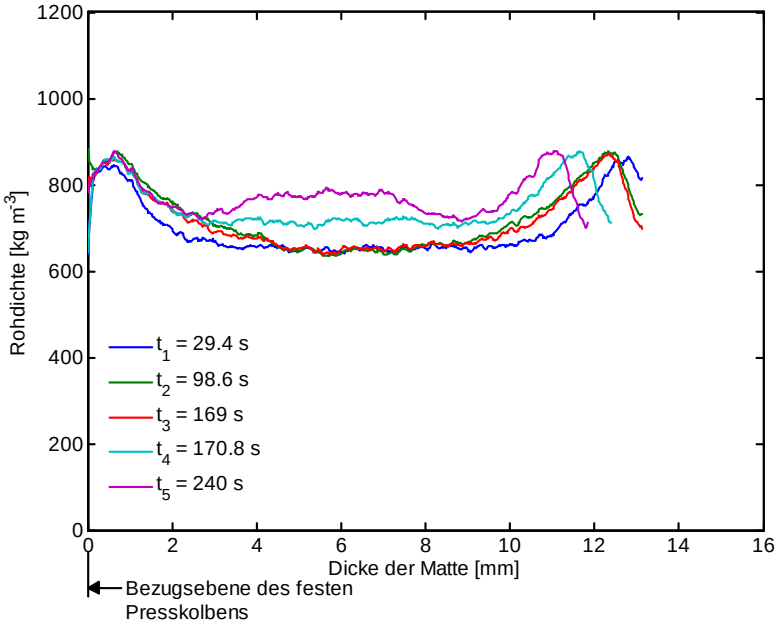


Abb. P- 169: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

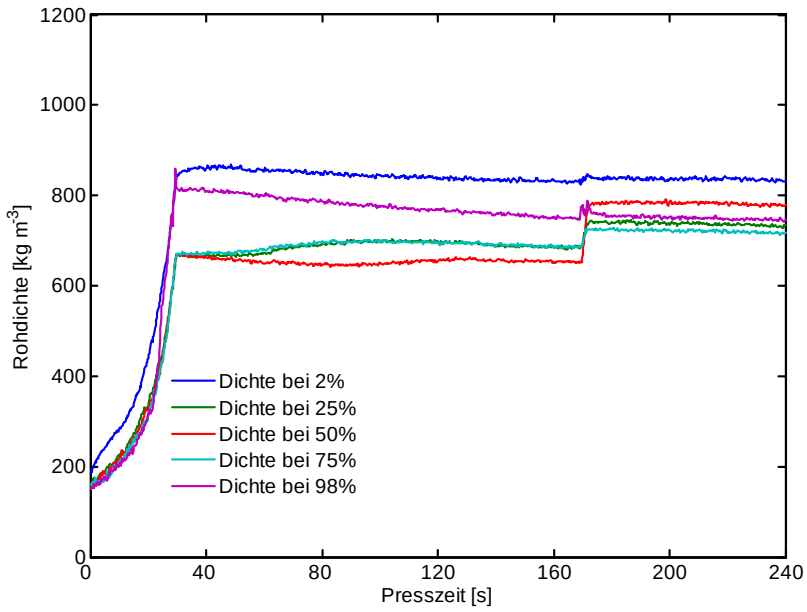


Abb. P- 170: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240.

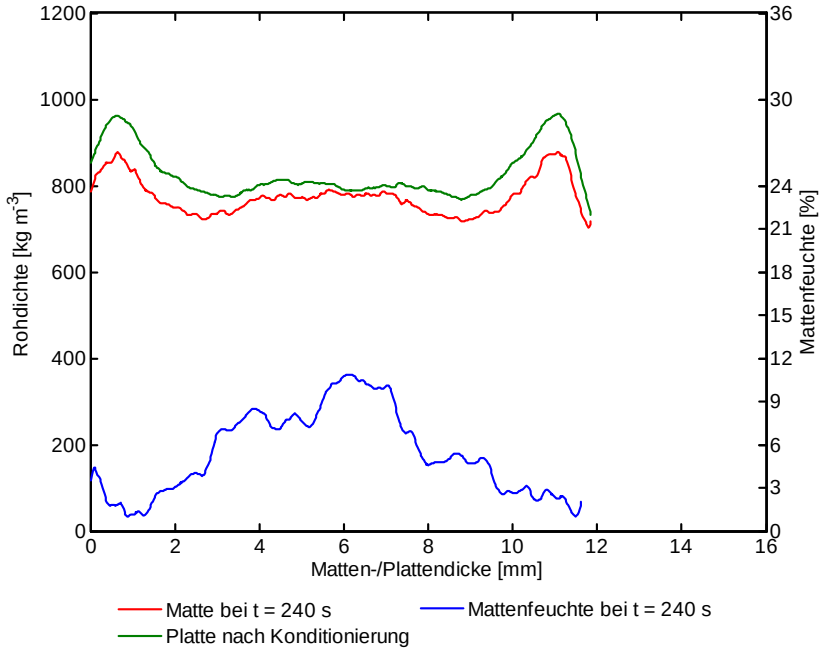


Abb. P- 171: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.35 Platte 12 mm_01_30_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,46	gravim.	825,91	gravim.	0,66	radiom.	18,72				
Endwert	18,81		798,11								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	696,18	101,02	radiom.	17,93	radiom.	0,79				
	Endwert	694,46	100,77		17,89		0,83				
zweite Haltephase	Startwert	756,66	99,39		17,63		1,09				
	Endwert	761,28	100,00		17,74		0,98				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,75	radiom.	-2,13	gravim.	3,61			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,54	4,13	842,55	121,02	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	56,6	0,54	4,13	872,39	125,31	1,03	116,73	96,91	57,19	84,94
	Ende	189,2	0,54	4,60	835,41	120,00	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,75	5,71	879,48	126,33	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	41,2	0,83	6,35	897,56	128,93	1,74	106,39	74,28	48,47	64,98
	Ende	189,2	1,00	7,62	860,31	123,58	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderes Maximum	Beginn	191,6	0,33	2,81	840,36	111,06	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,54	4,56	838,19	110,77	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
hinteres Maximum	Beginn	191,6	0,77	6,49	881,29	116,47	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,83	7,02	872,41	115,30	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	645,00	92,65			5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	189,2	620,93	89,41			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
	Maximum	189,2	620,93	89,41			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
	Ende	189,2	620,93	89,41			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
zweite Haltephase	Beginn	191,6	751,60	99,33			3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
	Ende	240,0	766,61	100,70			0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,25	40,00	752,93	108,15	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	92,4	4,46	33,97	743,05	106,73	0,47	124,95	115,92	89,94	102,74
	Ende	189,2	4,87	37,14	733,81	105,41	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
hinterer GF	Beginn	29,4	4,93	37,62	752,59	108,10	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	78,0	4,21	32,13	747,42	107,36	0,66	121,22	110,23	77,07	97,75
	Ende	189,2	4,50	34,29	734,13	105,45	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderer GF	Beginn	191,6	4,60	38,77	779,30	102,99	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,58	38,60	779,21	102,98	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
hinterer GF	Beginn	191,6	4,37	36,84	779,12	102,97	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,21	35,44	777,05	102,69	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	3,41	26,03	653,60	93,88	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	98,2	1,77	13,49	639,77	91,90	0,45	126,88	117,81	94,63	104,53
	Ende	189,2	1,79	13,65	632,15	90,80	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	3,12	23,81	651,83	93,63	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	187,4	1,70	12,96	634,09	91,08	0,53	124,29	113,66	84,77	100,80
	Ende	189,2	1,44	10,95	629,96	90,49	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderer Profilgrund	Beginn	191,6	1,92	16,14	757,22	100,07	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,85	15,61	775,52	102,49	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
hinterer Profilgrund	Beginn	191,6	1,63	13,72	760,76	100,54	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,31	11,05	776,96	102,68	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	190,8	[mm]	12,35	[%]	104,04	2,79	145,41	135,86	113,50	121,44
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	191,6	2,83	23,86	706,49	93,37	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,52	21,23	710,03	93,84	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59
vorderes Maximum	Beginn	191,6	2,81	23,68	703,50	92,98	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,23	27,19	710,03	93,84	0,32	152,22	141,74	115,23	126,59

Tab. P- 69:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 70

Probenname	Platte 12mm_01_30_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	1,94	14,76	696,18	100,00	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	94,6	2,67	20,39	712,06	102,28	0,45	126,07	116,59	91,78	103,41
	Ende	189,2	2,25	17,14	694,46	99,75	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,58	19,68	696,18	100,00	5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	86,4	2,85	21,32	712,06	102,28	0,53	124,29	113,66	84,77	100,80
	Ende	189,2	2,62	20,00	694,46	99,75	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
vordere Peakbase	Beginn	191,6	1,52	12,81	756,66	100,00	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	189,2	1,54	12,98	761,28	100,61	0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
hintere Peakbase	Beginn	191,6	1,73	14,56	756,66	100,00	3,01	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	189,2	1,67	14,04	761,28	100,61	0,14	152,22	141,74	115,23	126,59
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	660,72	94,91			5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	35,4	653,46	93,34			2,26	108,45	62,26	47,21	56,58
	Maximum	102,2	698,05	98,01			0,37	128,54	119,06	97,67	105,75
	Ende	189,2	671,41	96,68			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	639,97	91,93			5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	174,6	621,44	88,99			0,14	144,04	133,61	113,25	119,49
	Maximum	180,6	631,12	90,51			0,13	145,08	134,35	113,28	120,17
	Ende	189,2	622,20	89,59			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	663,69	95,33			5,17	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	41,4	660,23	94,04			1,73	107,45	74,63	48,50	65,24
	Maximum	95,8	693,63	97,42			0,44	126,41	117,02	92,72	103,78
	Ende	189,2	668,24	96,22			0,14	145,77	135,48	113,31	121,15

Tab. P- 70:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

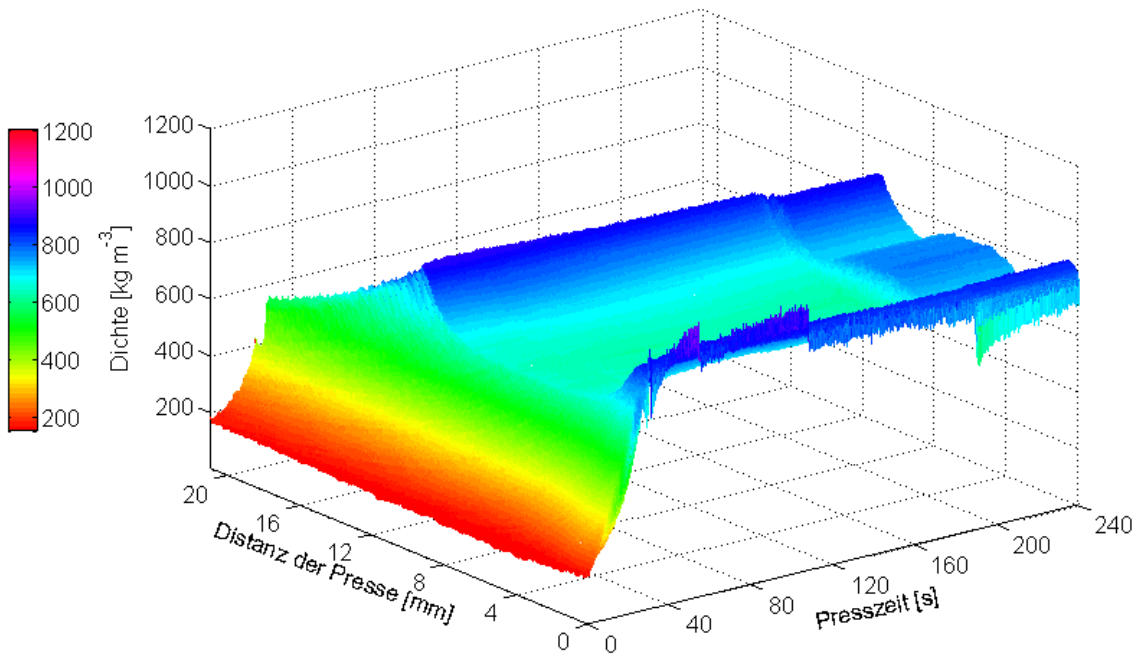


Abb. P- 172: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240.

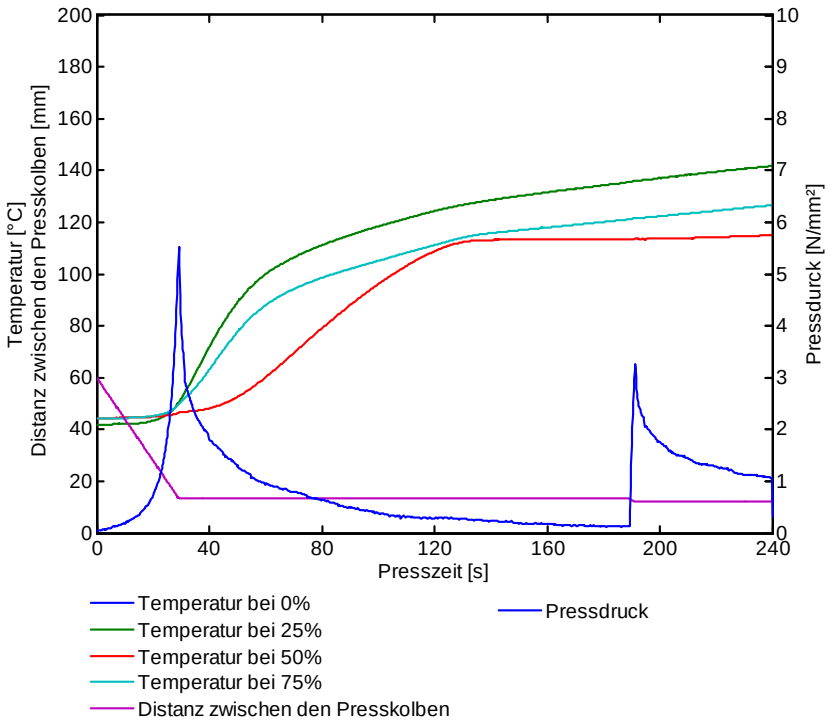


Abb. P- 173: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

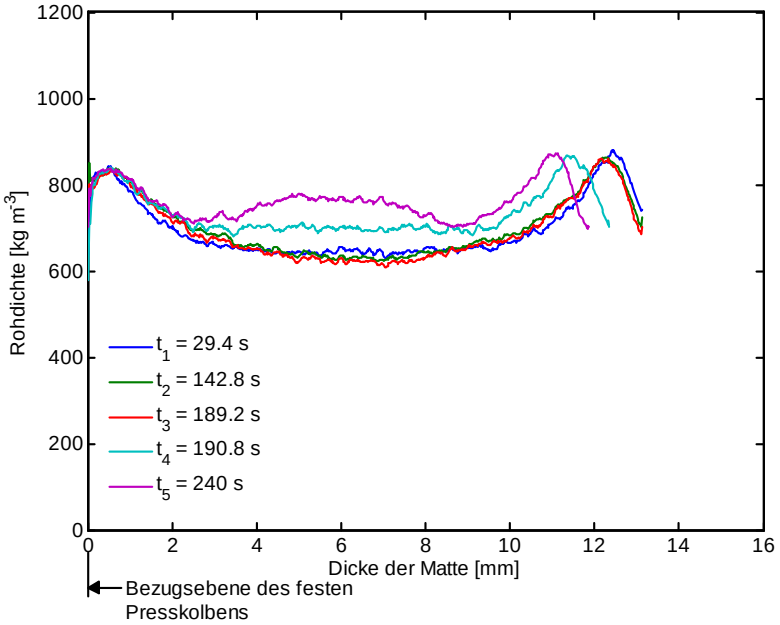


Abb. P- 174: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

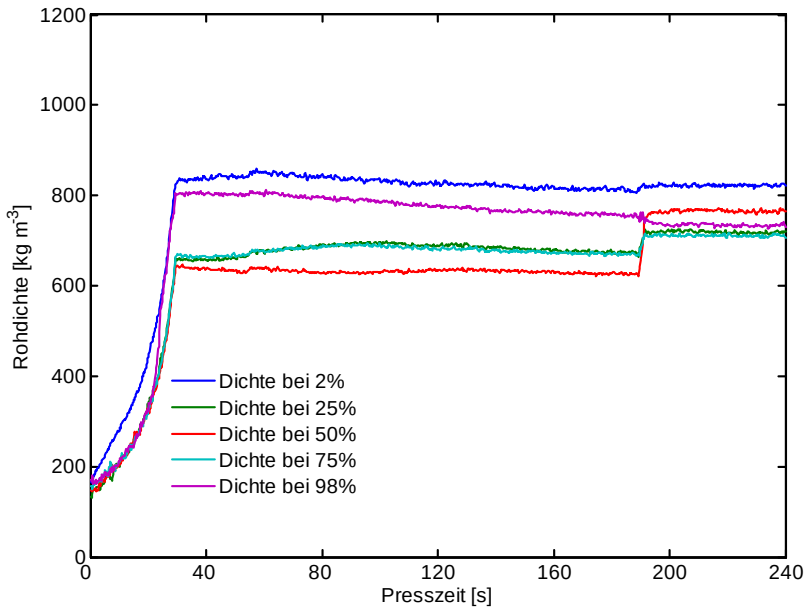


Abb. P- 175: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240.

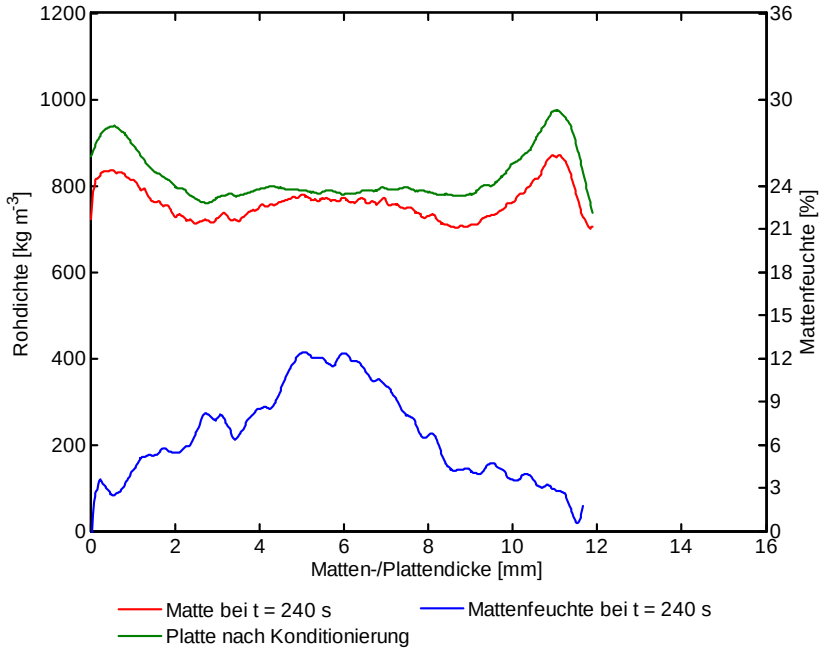


Abb. P- 176: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.36 Platte 12 mm_02_30_110_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,44	gravim.	825,06	gravim.	0,65	radiom.	18,44				
Endwert	18,79		797,47								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	704,08	101,32	radiom.	18,08	radiom.	0,37				
	Endwert	703,00	101,16		18,05		0,40				
zweite Haltephase	Startwert	763,22	99,65		17,78		0,66				
	Endwert	765,92	100,00		17,85		0,60				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,77	radiom.	-1,44	gravim.	3,59			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	29,4	0,37	2,87	832,34	118,22	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	49,2	0,59	4,52	860,38	122,20	1,36	118,34	87,85	52,00	76,59
	Ende	189,2	0,37	5,57	829,49	117,81	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
hinteres Maximum	Beginn	29,4	0,58	4,46	883,46	125,48	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	49,2	1,07	8,22	902,29	128,15	1,36	118,34	87,85	52,00	76,59
	Ende	189,2	0,87	6,69	872,18	123,87	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderes Maximum	Beginn	191,6	0,50	4,21	842,65	110,41	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,50	4,21	839,53	110,00	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
hinteres Maximum	Beginn	191,6	0,87	7,37	891,17	116,76	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,17	9,82	882,77	115,66	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	650,16	92,34			5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	81,8	630,16	88,14			0,63	121,45	111,91	80,60	99,20
	Maximum	132,8	644,97	90,23			0,22	134,48	127,23	112,76	114,69
	Ende	189,2	632,98	90,04			0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
zweite Haltephase	Beginn	191,6	758,33	99,36			3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
	Ende	240,0	771,09	100,67			0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	29,4	5,02	38,38	753,44	107,01	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	81,4	4,54	34,71	748,77	106,35	0,63	122,37	111,79	80,23	99,03
	Ende	189,2	4,75	36,31	740,31	105,15	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
hinterer GF	Beginn	29,4	4,89	37,42	750,55	106,60	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	76,2	4,18	32,01	746,99	106,09	0,72	120,29	109,42	75,35	97,04
	Ende	189,2	4,60	35,19	738,41	104,87	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderer GF	Beginn	191,6	4,50	37,89	786,43	103,04	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,33	36,49	776,87	101,79	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
hinterer GF	Beginn	191,6	4,23	35,61	784,22	102,75	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,16	35,09	781,48	102,39	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	29,4	3,81	29,14	660,03	93,74	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	102,6	1,90	14,54	648,00	92,03	0,49	128,61	119,21	97,99	105,91
	Ende	189,2	1,98	15,13	645,39	91,66	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
hinterer Profilgrund	Beginn	29,4	2,14	16,40	662,03	94,03	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	82,2	1,06	8,14	641,02	91,04	0,61	123,23	112,24	81,31	99,47
	Ende	189,2	1,37	10,51	646,06	91,76	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
vorderer Profilgrund	Beginn	191,6	1,89	15,96	769,18	100,78	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,21	10,18	776,87	101,79	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
hinterer Profilgrund	Beginn	191,6	1,59	13,40	766,01	100,37	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,31	11,05	781,48	102,39	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	190,8	[mm]	12,37	[%]	104,21	2,75	145,41	135,86	113,50	121,44
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	191,6	2,75	23,16	701,91	91,97	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,85	24,04	704,19	92,27	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59
vorderes Maximum	Beginn	191,6	3,12	26,32	715,56	93,76	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	240,0	3,39	28,60	704,19	92,27	0,33	152,22	141,74	115,23	126,59

Tab. P- 71:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 72

Probenname	Platte 12mm_02_30_110_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	29,4	1,85	14,17	704,08	100,00	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	92,8	2,37	18,10	716,69	101,79	0,49	125,69	116,01	90,29	102,86
	Ende	189,2	2,14	16,40	703,00	99,85	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
hintere Peakbase	Beginn	29,4	2,46	18,79	704,08	100,00	5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
erste Haltephase	Maximum	82,6	2,94	22,45	716,69	101,79	0,61	123,23	112,24	81,31	99,47
	Ende	189,2	2,64	20,22	703,00	99,85	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
vordere Peakbase	Beginn	191,6	1,56	13,16	763,22	100,00	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	189,2	1,58	13,33	765,92	100,35	0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
hintere Peakbase	Beginn	191,6	1,60	13,51	763,22	100,00	3,00	146,50	135,97	113,61	121,57
zweite Haltephase	Ende	189,2	1,52	12,81	765,92	100,35	0,13	152,22	141,74	115,23	126,59
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	650,42	92,38			5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	45,8	644,59	90,72			1,54	112,70	82,59	50,22	71,90
	Maximum	105,0	679,84	94,84			0,39	128,77	119,92	99,68	106,63
	Ende	189,2	655,64	93,26			0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	655,30	93,07			5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	81,8	628,48	87,90			0,63	121,45	111,91	80,60	99,20
	Maximum	138,4	649,27	90,92			0,21	134,64	128,25	113,10	115,52
	Ende	189,2	632,73	90,00			0,13	145,77	135,48	113,31	121,15
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	29,4	672,19	95,47			5,24	99,34	50,88	46,51	49,99
	Minimum	38,8	666,90	93,89			1,96	111,78	69,32	47,81	61,30
	Maximum	89,8	701,30	97,94			0,54	126,23	114,97	87,78	101,90
	Ende	189,2	676,61	96,25			0,13	145,77	135,48	113,31	121,15

Tab. P- 72:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

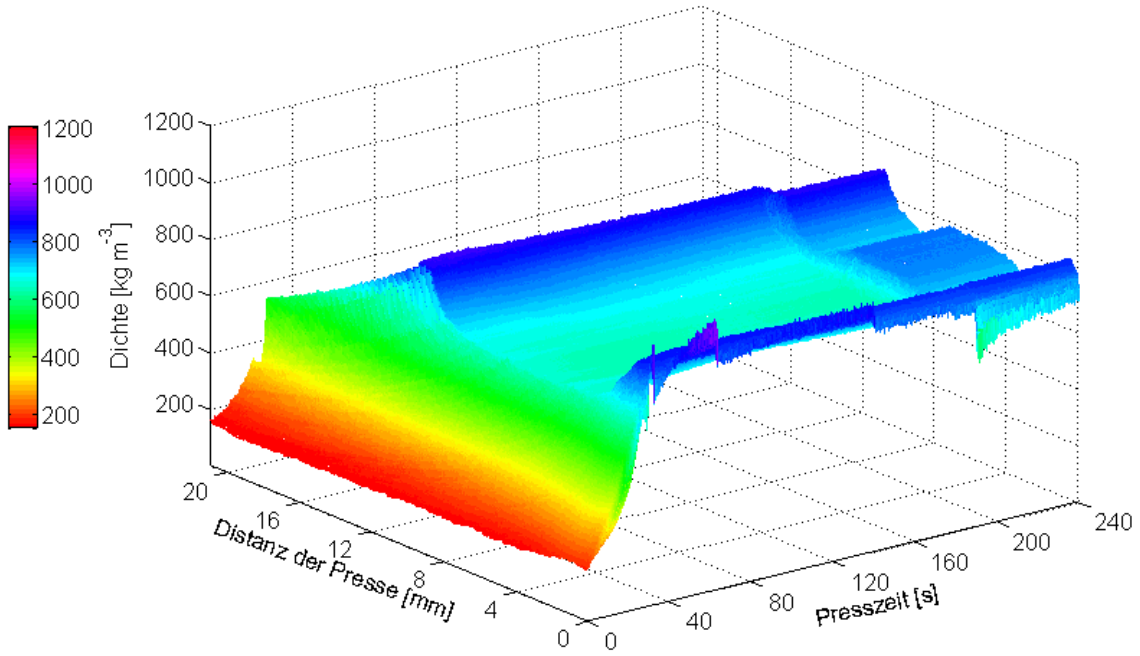


Abb. P- 177: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240.

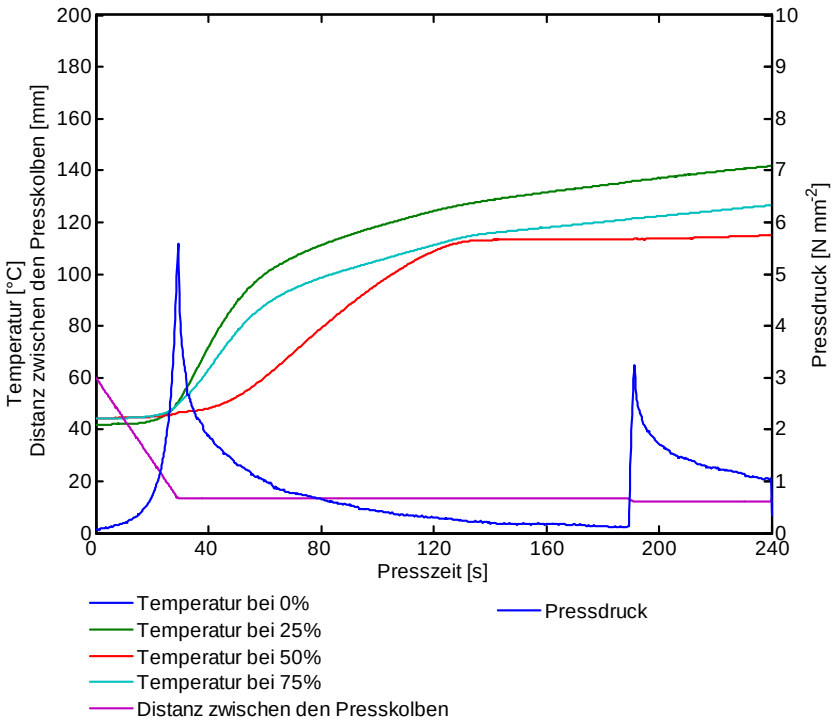


Abb. P- 178: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

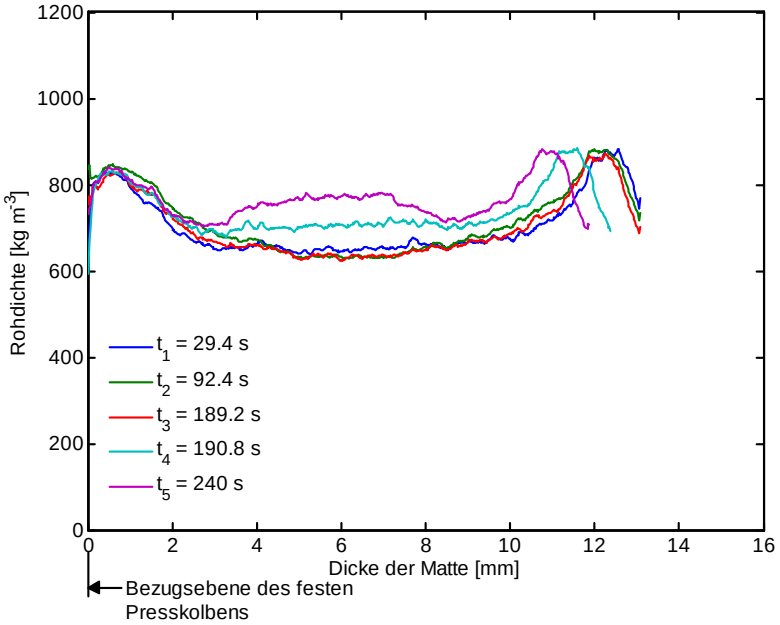


Abb. P- 179: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

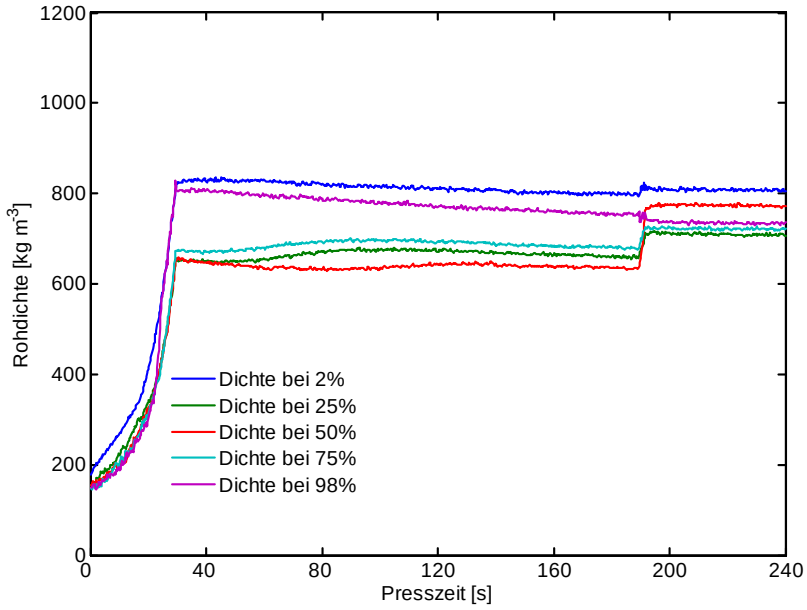


Abb. P- 180: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240.

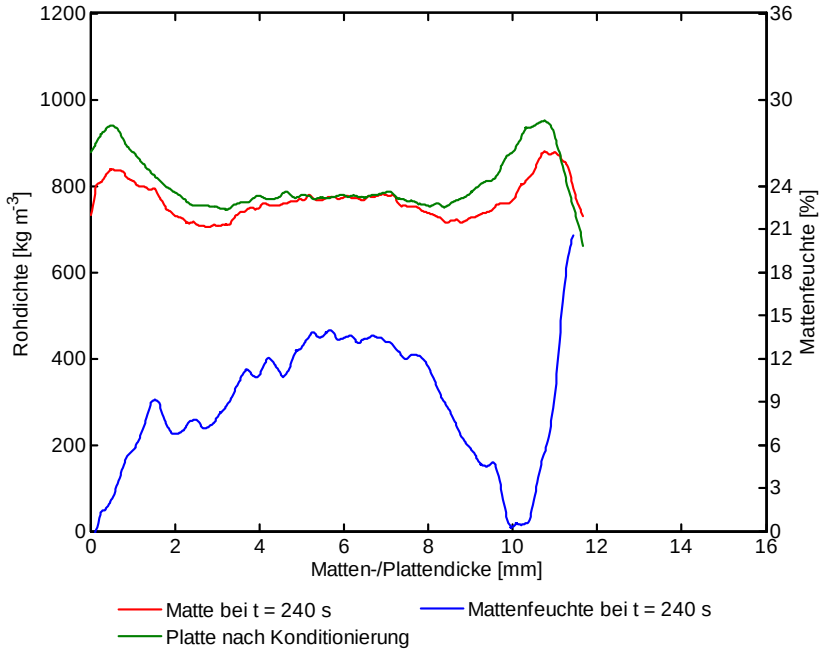


Abb. P- 181: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_110_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.37 Platte 12 mm_01_30_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,42	gravim.	824,21	gravim.	0,58	radiom.	18,12				
Endwert	18,85		799,81								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	652,66	102,04	radiom.	18,30	radiom.	-0,18				
	Endwert	654,52	102,33		18,36		-0,24				
zweite Haltephase	Startwert	777,91	101,04		18,13		-0,01				
	Endwert	769,90	100,00		17,94		0,18				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,18	radiom.	-0,82	gravim.	3,18			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,46	3,21	790,96	121,19	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	44,4	0,53	3,73	804,00	123,19	1,24	162,03	64,52	38,83	61,87
	Ende	148,4	0,46	3,79	777,95	119,20	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,69	4,81	817,00	125,18	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	34,0	0,69	4,81	832,20	127,51	1,97	163,59	49,65	37,27	47,84
	Ende	148,4	0,83	5,83	799,98	122,57	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderes Maximum	Beginn	153,0	0,37	3,16	794,32	102,11	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,37	3,16	781,85	100,51	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinteres Maximum	Beginn	153,0	0,87	7,37	825,66	106,14	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,04	8,77	816,51	104,96	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	611,74	93,73			3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	84,6	585,37	89,43			0,46	162,04	96,18	63,89	89,54
	Maximum	138,2	600,27	91,48			0,21	167,50	112,40	103,99	107,82
	Ende	148,4	598,92	91,50			0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
zweite Haltephase	Beginn	153,0	813,27	104,55			2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
	Ende	240,0	811,53	105,41			0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,73	40,09	707,10	108,34	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	76,6	5,10	35,69	694,67	106,44	0,56	161,62	92,46	57,11	86,16
	Ende	148,4	5,25	36,73	692,37	106,08	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
hinterer GF	Beginn	28,8	5,37	37,61	703,96	107,86	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	90,8	4,78	33,44	691,85	106,00	0,44	162,50	98,63	69,33	91,86
	Ende	148,4	5,06	35,42	690,51	105,80	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderer GF	Beginn	153,0	4,83	40,70	763,64	98,17	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,75	40,00	750,12	96,43	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinterer GF	Beginn	153,0	4,33	36,49	762,51	98,02	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,25	35,79	748,43	96,21	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	3,85	26,97	616,37	94,44	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	101,8	2,87	20,10	596,93	91,46	0,40	163,56	102,25	78,81	95,67
	Ende	148,4	3,00	20,99	607,51	93,08	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	3,62	25,36	617,31	94,58	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	84,8	2,37	16,60	595,15	91,19	0,43	162,67	99,67	71,97	92,93
	Ende	148,4	2,71	18,95	606,78	92,97	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderer Profilgrund	Beginn	153,0	1,92	16,14	806,00	103,61	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,87	15,79	803,12	103,24	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinterer Profilgrund	Beginn	153,0	2,24	18,84	822,35	105,71	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,14	18,07	813,56	104,58	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	150,6	[mm]	13,18	[%]	111,05	1,89	169,46	115,82	109,12	112,16
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m-3]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	153,0	2,04	17,19	713,53	91,72	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,06	17,37	700,24	90,01	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
vorderes Maximum	Beginn	153,0	2,44	20,53	722,75	92,91	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,35	19,82	700,24	90,01	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69

Tab. P- 73:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 74

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	1,94	13,56	652,66	100,00	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	97,6	2,97	20,78	656,05	100,52	0,40	163,14	100,93	75,27	94,23
	Ende	148,4	2,56	17,93	654,52	100,29	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,66	18,66	652,66	100,00	3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	93,8	3,01	20,89	656,05	100,52	0,43	162,67	99,67	71,97	92,93
	Ende	148,4	2,77	19,39	654,52	100,29	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
vordere Peakbase	Beginn	153,0	0,48	4,04	777,91	100,00	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	148,4	0,48	4,04	769,90	98,97	0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
hintere Peakbase	Beginn	153,0	0,87	7,37	777,91	100,00	2,78	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	148,4	0,85	7,19	769,90	98,97	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	609,59	93,40			3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	35,0	605,75	92,33			1,86	163,40	51,07	37,37	49,22
	Maximum	116,0	639,05	97,34			0,29	165,23	106,26	90,05	100,33
	Ende	148,4	630,41	96,32			0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	605,39	92,76			3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	88,0	583,43	89,04			0,44	162,25	97,55	66,86	90,88
	Maximum	145,0	603,69	92,23			0,19	168,26	114,26	107,02	110,10
	Ende	148,4	594,03	90,76			0,17	168,64	115,13	108,36	111,25
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	610,44	93,53			3,84	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	45,2	605,39	92,58			1,21	161,99	65,58	39,04	62,80
	Maximum	108,4	638,72	97,36			0,33	164,28	104,16	84,22	97,84
	Ende	148,4	633,77	96,83			0,17	168,64	115,13	108,36	111,25

Tab. P- 74:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

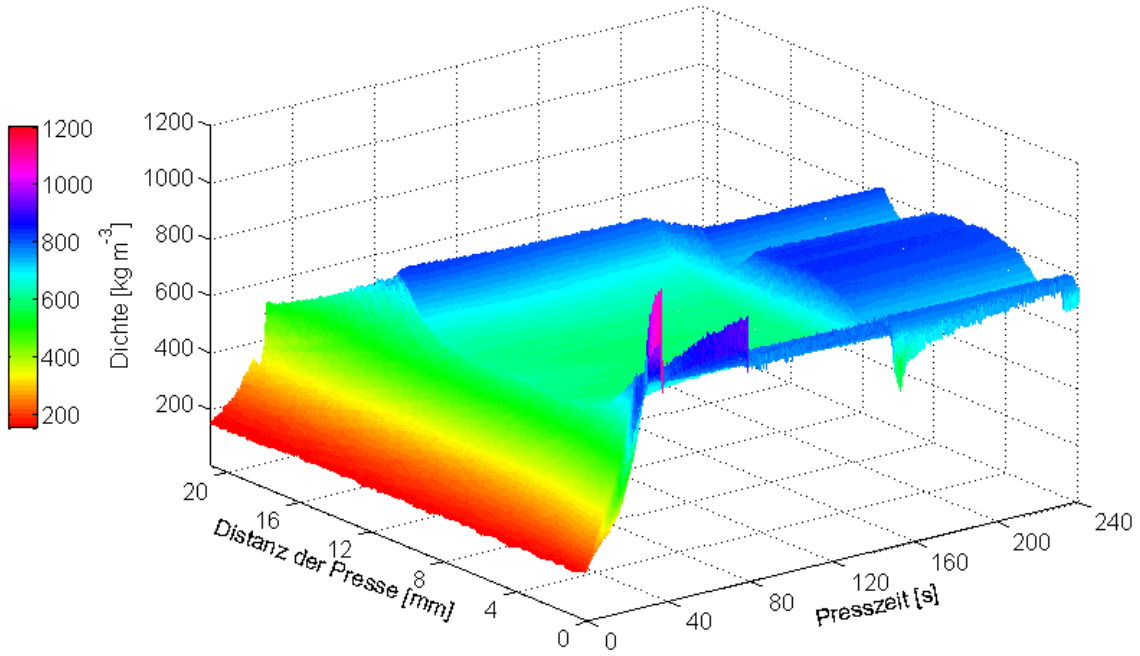


Abb. P- 182: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240.

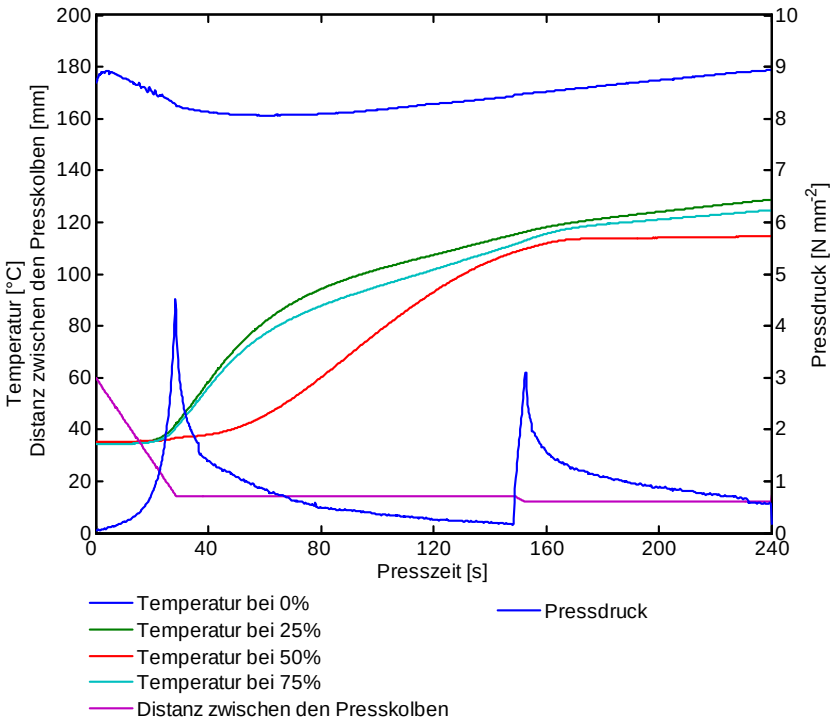


Abb. P- 183: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

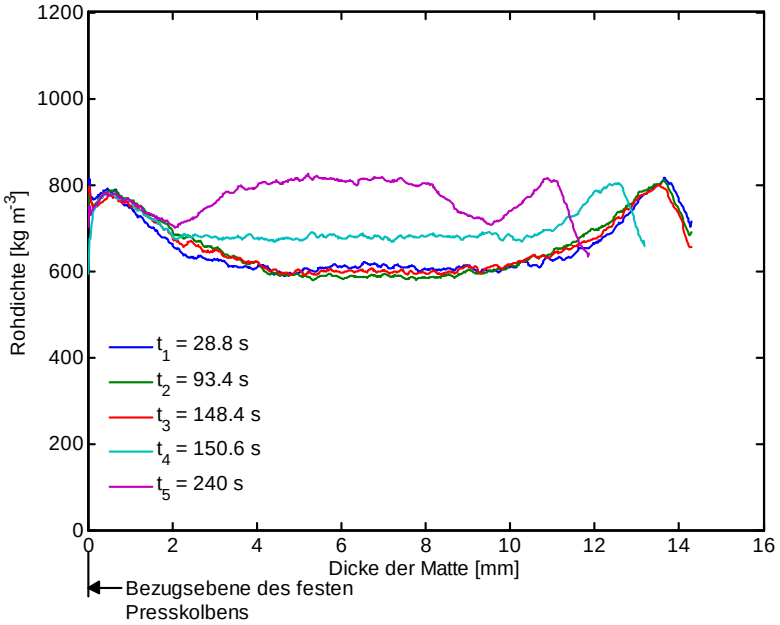


Abb. P- 184: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

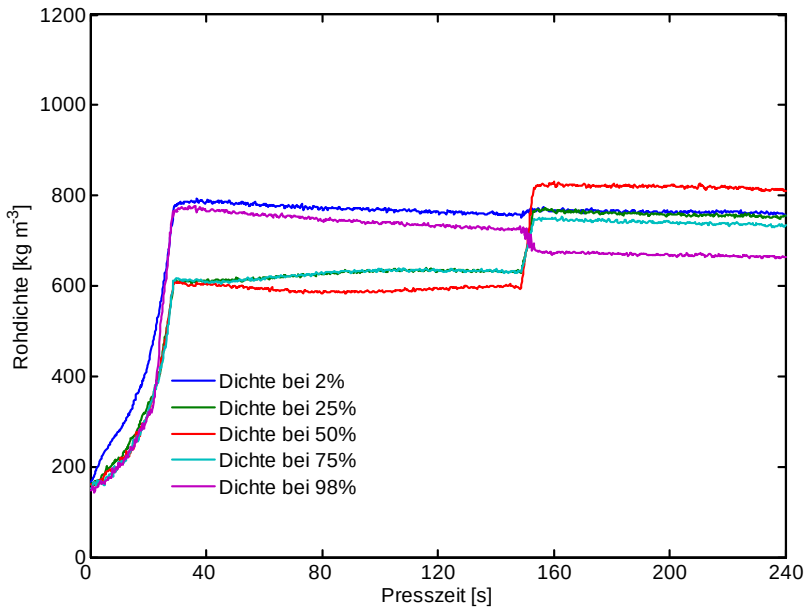


Abb. P- 185: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240.

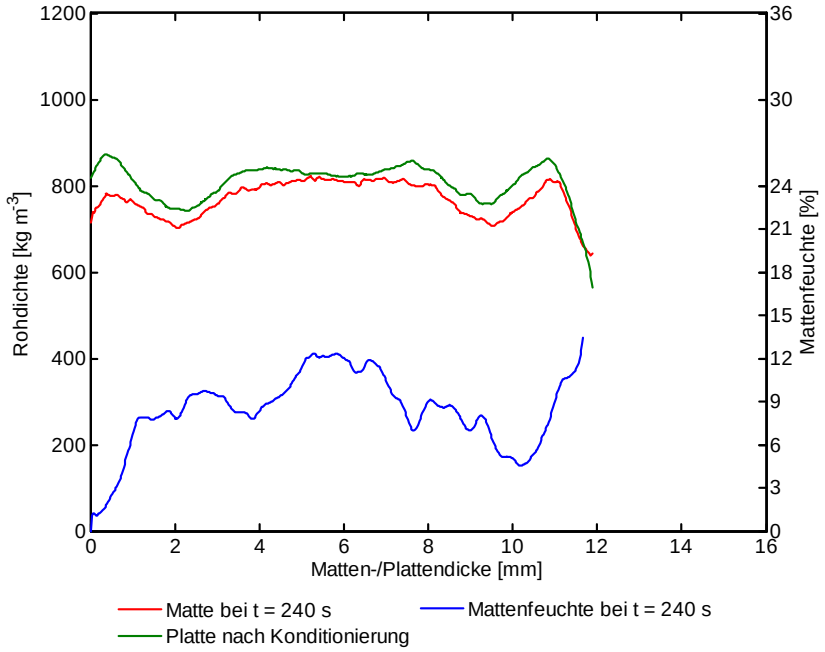


Abb. P- 186: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.38 Platte 12 mm_02_30_120_120_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_120_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,53	gravim.	828,88	gravim.	0,55	radiom.	13,99				
Endwert	18,98		805,62								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	625,77	101,02	radiom.	17,60	radiom.	-3,61				
	Endwert	630,35	101,76		17,73		-3,74				
zweite Haltephase	Startwert	759,02	101,44		17,66		-3,66				
	Endwert	748,25	100,00		17,40		-3,41				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,35	radiom.	-4,32	gravim.	3,01			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,44	3,05	770,69	123,16	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	62,0	0,64	4,48	820,35	131,09	0,91	161,32	83,10	46,55	78,12
	Ende	148,4	0,44	5,23	767,15	122,59	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,71	4,94	816,01	130,40	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	37,0	0,81	5,64	831,54	132,88	1,89	163,04	53,99	37,51	52,01
	Ende	148,4	0,77	5,38	805,04	128,65	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderes Maximum	Beginn	153,0	0,67	5,62	790,77	104,18	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,73	6,15	773,28	101,88	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinteres Maximum	Beginn	153,0	0,94	7,91	823,05	108,44	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,02	8,61	817,89	107,76	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	in kg	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	572,99	91,57			4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	91,4	542,39	86,17			0,51	162,53	98,84	69,84	92,09
	Maximum	147,4	558,63	88,54			0,18	168,55	114,89	107,94	110,92
	Ende	148,4	557,55	88,45			0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
zweite Haltephase	Beginn	153,0	784,39	103,34			2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
	Ende	240,0	777,52	103,91			0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,85	40,84	681,29	108,87	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	69,0	5,01	35,00	688,15	109,97	0,76	161,38	88,09	51,22	82,35
	Ende	148,4	5,37	37,50	669,79	107,03	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
hinterer GF	Beginn	28,8	5,31	37,06	679,99	108,66	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	90,0	4,74	33,08	671,13	107,25	0,53	162,38	98,31	68,61	91,57
	Ende	148,4	5,10	35,61	671,06	107,24	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderer GF	Beginn	153,0	4,90	41,39	753,70	99,30	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,82	40,69	733,97	96,70	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinterer GF	Beginn	153,0	4,45	37,52	752,42	99,13	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,38	36,99	738,49	97,30	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	4,21	29,36	582,86	93,14	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	115,2	1,97	13,76	561,05	89,66	0,76	165,18	106,07	89,48	100,08
	Ende	148,4	2,60	18,17	570,64	91,19	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	3,10	21,66	581,94	93,00	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	95,8	1,28	8,91	554,94	88,68	0,36	164,20	103,96	83,57	97,57
	Ende	148,4	2,06	14,39	568,42	90,84	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
vorderer Profilgrund	Beginn	153,0	2,47	20,83	790,77	104,18	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,24	18,89	773,28	101,88	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
hinterer Profilgrund	Beginn	153,0	2,35	19,81	795,26	104,77	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,09	17,66	788,55	103,89	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	151,0	[mm]	12,93	[%]	109,14	1,95	169,40	115,86	109,20	112,26
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	153,0	2,06	17,40	697,15	91,85	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,06	17,40	679,77	89,56	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69
vorderes Maximum	Beginn	153,0	2,25	18,98	707,95	93,27	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,44	20,56	679,77	89,56	0,17	178,46	128,73	115,09	124,69

Tab. P- 75:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 76

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_120_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	1,89	13,23	625,77	100,00	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	68,6	2,71	18,91	641,23	102,47	0,76	161,34	87,83	50,91	82,11
	Ende	148,4	2,62	18,31	630,35	100,73	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,50	17,44	625,77	100,00	4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
erste Haltephase	Maximum	107,6	3,12	20,59	641,23	102,47	0,36	164,20	103,96	83,57	97,57
	Ende	148,4	3,10	21,66	630,35	100,73	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
vordere Peakbase	Beginn	153,0	0,79	6,68	759,02	100,00	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	148,4	0,92	7,73	748,25	98,58	0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
hintere Peakbase	Beginn	153,0	1,00	8,44	759,02	100,00	2,61	169,69	116,43	109,79	113,10
zweite Haltephase	Ende	148,4	0,98	8,26	748,25	98,58	0,18	178,46	128,73	115,09	124,69
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	570,81	91,22			4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	30,8	566,81	89,98			3,00	164,16	45,16	37,00	43,54
	Maximum	125,8	596,99	94,59			0,26	166,17	108,94	96,93	103,60
	Ende	148,4	588,17	93,31			0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	576,59	92,14			4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	91,8	546,13	86,75			0,51	162,63	99,01	70,26	92,27
	Maximum	146,8	566,20	89,74			0,19	168,48	114,73	107,76	110,74
	Ende	148,4	560,83	88,97			0,18	168,64	115,13	108,36	111,25
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	596,22	95,28			4,39	165,02	42,47	36,84	41,00
	Minimum	36,8	584,47	92,48			1,92	163,04	53,70	37,51	51,75
	Maximum	110,8	619,18	98,25			0,35	164,57	104,85	86,12	98,66
	Ende	148,4	614,57	97,50			0,18	168,64	115,13	108,36	111,25

Tab. P- 76:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

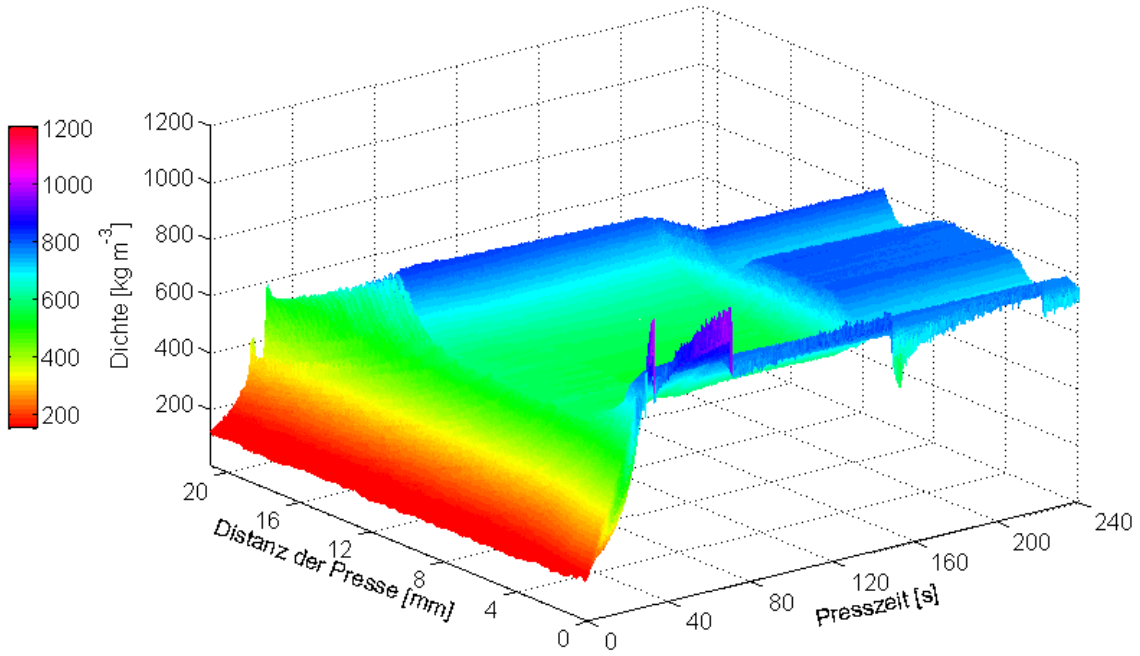


Abb. P- 187: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240.

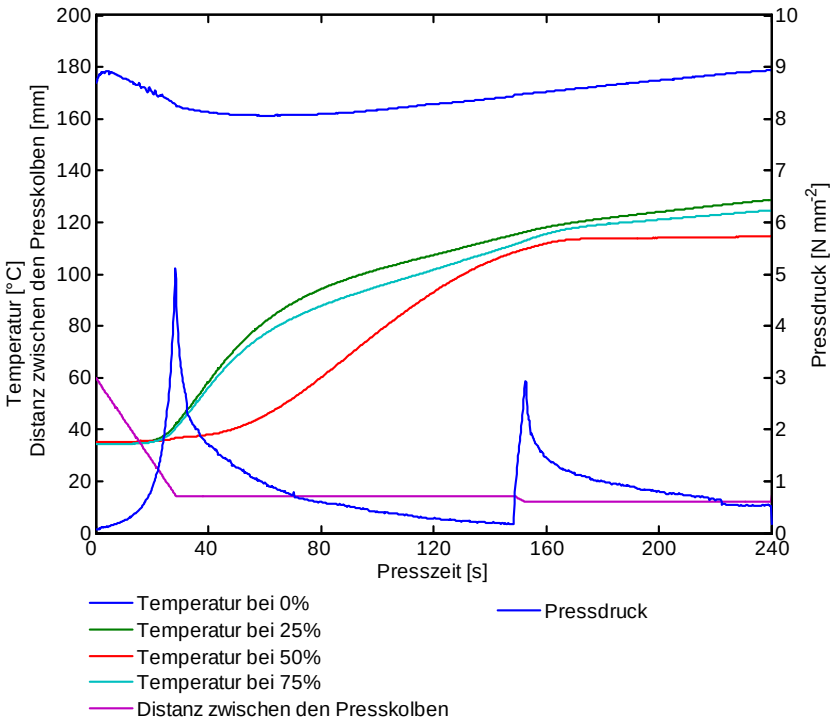


Abb. P- 188: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

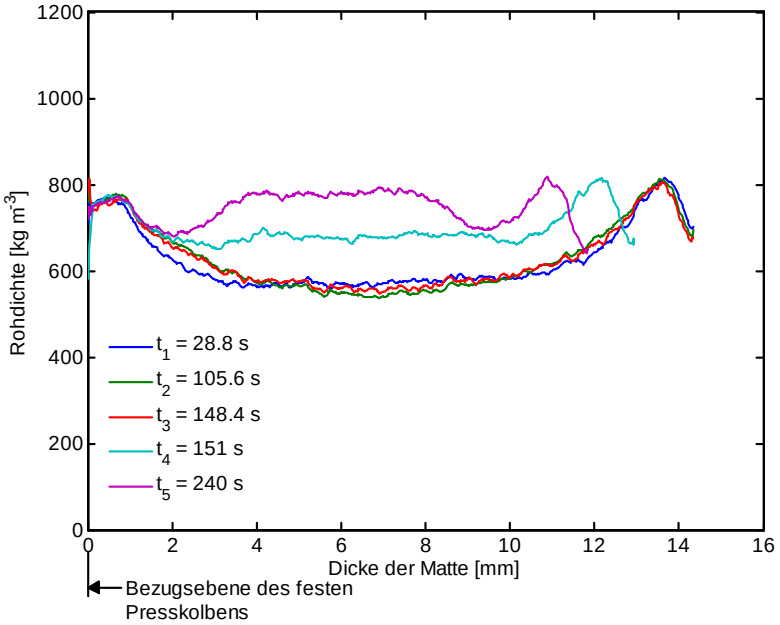


Abb. P- 189: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

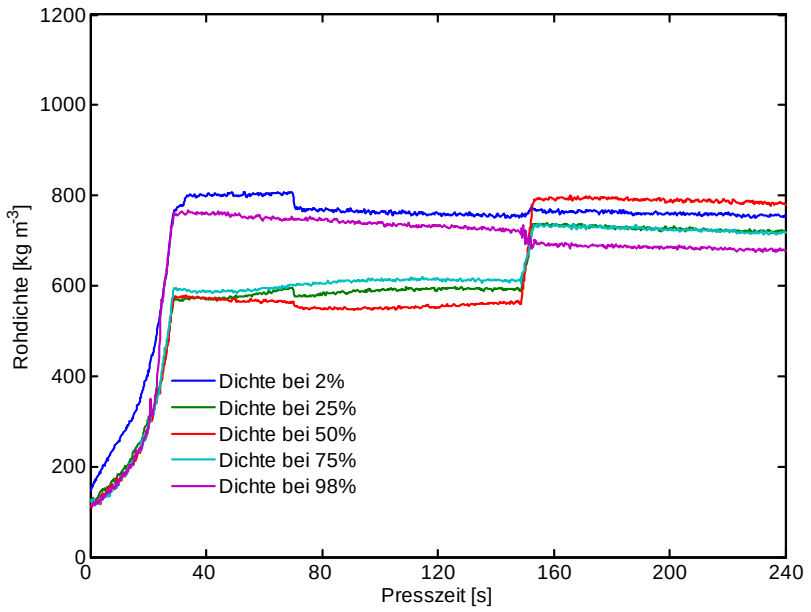


Abb. P- 190: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240.

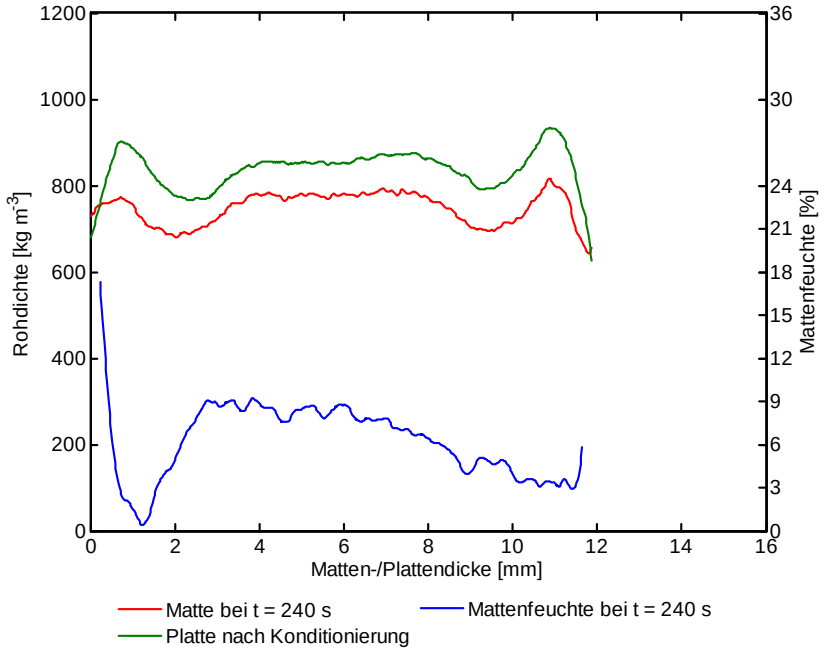


Abb. P- 191: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_120_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.39 Platte 12 mm_01_30_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,47	gravim.	826,33	gravim.	0,59	radiom.	20,87				
Endwert	18,88		801,21								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	678,24	102,40	radiom.	19,05	radiom.	1,82				
	Endwert	677,93	102,35		19,04		1,83				
zweite Haltephase	Startwert	799,33	100,06		18,59		2,27				
	Endwert	798,82	100,00		18,58		2,29				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,10	radiom.	2,46	gravim.	3,26			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,44	3,06	835,20	123,14	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	48,4	0,60	4,22	842,92	124,28	1,07	169,23	88,11	53,94	64,64
	Ende	168,2	0,44	3,06	815,23	120,20	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,79	5,53	844,64	124,53	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	48,0	0,78	5,47	854,88	126,04	1,10	171,97	87,81	53,79	64,20
	Ende	168,2	0,77	5,39	819,57	120,84	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderes Maximum	Beginn	172,8	0,52	4,39	837,47	104,77	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,50	4,22	829,79	103,81	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
hinteres Maximum	Beginn	172,8	0,83	7,03	843,38	105,51	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,77	6,50	840,88	105,20	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	632,53	93,26			3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	97,6	606,78	89,05			0,35	170,58	110,56	89,02	94,91
	Maximum	136,0	620,79	91,05			0,22	173,76	122,52	108,72	108,84
	Ende	168,2	619,72	91,41			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
zweite Haltephase	Beginn	172,8	839,95	105,08			3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
	Ende	240,0	850,41	106,46			0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,69	39,81	730,63	107,72	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	88,0	4,75	33,23	715,01	105,42	0,45	170,04	107,14	81,94	90,85
	Ende	168,2	5,17	36,17	716,35	105,62	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinterer GF	Beginn	28,8	5,57	38,94	732,34	107,98	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	93,4	4,94	34,51	717,21	105,75	0,38	170,29	109,09	86,01	93,17
	Ende	168,2	5,17	36,17	718,16	105,89	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderer GF	Beginn	172,8	4,69	39,63	784,04	98,09	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,59	38,75	780,12	97,60	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
hinterer GF	Beginn	172,8	4,55	38,40	785,14	98,22	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,51	38,05	781,30	97,74	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	4,01	28,02	643,07	94,81	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	105,8	2,32	16,23	620,75	91,52	0,29	171,14	113,40	94,53	98,11
	Ende	168,2	3,03	21,18	629,70	92,84	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	4,15	29,04	641,15	94,53	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	89,4	2,52	17,59	620,06	91,42	0,33	170,72	111,44	90,82	95,93
	Ende	168,2	3,15	22,05	630,02	92,89	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderer Profilgrund	Beginn	172,8	2,13	18,01	837,47	104,77	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,93	16,26	842,65	105,42	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
hinterer Profilgrund	Beginn	172,8	1,61	13,62	832,95	104,21	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,45	12,21	843,28	105,50	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	170,0	[mm]	13,55	[%]	114,41	1,75	176,78	130,05	114,47	114,66
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	172,8	2,31	19,51	748,68	93,66	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,02	17,05	738,41	92,38	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73
vorderes Maximum	Beginn	172,8	2,46	20,74	728,12	91,09	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,54	21,44	738,41	92,38	0,26	182,24	138,75	116,74	119,73

Tab. P- 77:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 78

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	2,19	15,28	678,24	100,00	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	118,6	3,00	20,96	682,05	100,56	0,29	172,16	117,48	101,74	102,86
	Ende	168,2	2,77	19,36	677,93	99,95	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,44	17,03	678,24	100,00	3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	100,2	2,91	19,46	682,05	100,56	0,33	170,72	111,44	90,82	95,93
	Ende	168,2	2,58	18,05	677,93	99,95	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vordere Peakbase	Beginn	172,8	0,98	8,26	799,33	100,00	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	168,2	0,94	7,91	798,82	99,94	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hintere Peakbase	Beginn	172,8	0,92	7,73	799,33	100,00	3,39	176,72	130,33	114,45	115,06
zweite Haltephase	Ende	168,2	0,81	6,85	798,82	99,94	0,15	182,24	138,75	116,74	119,73
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	636,63	93,86			3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	46,4	623,52	91,93			1,19	170,88	86,45	53,06	62,52
	Maximum	126,8	655,98	96,18			0,26	172,89	119,88	105,15	105,82
	Ende	168,2	642,87	94,83			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	627,33	92,49			3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	97,6	598,00	87,76			0,35	170,58	110,56	89,02	94,91
	Maximum	144,4	618,93	90,97			0,20	174,60	124,79	111,18	111,30
	Ende	168,2	615,01	90,72			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	632,54	93,26			3,77	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	33,0	625,87	92,32			2,10	175,80	70,52	49,12	49,50
	Maximum	95,6	657,48	96,19			0,37	170,42	109,86	87,59	94,09
	Ende	168,2	646,19	95,32			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52

Tab. P- 78:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

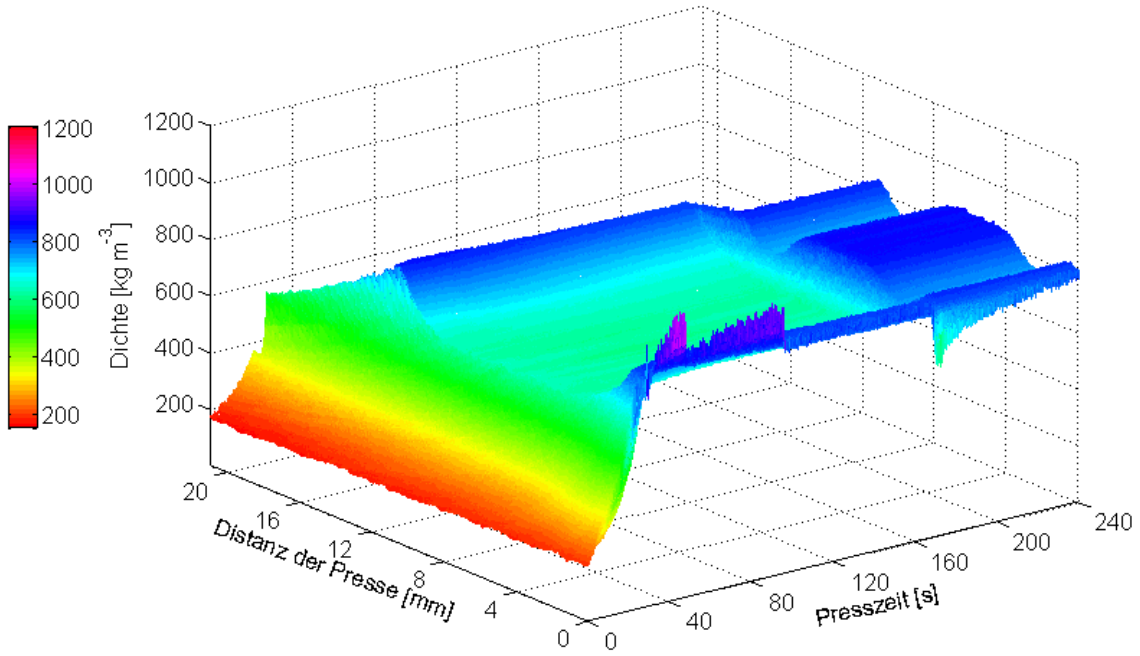


Abb. P- 192: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240.

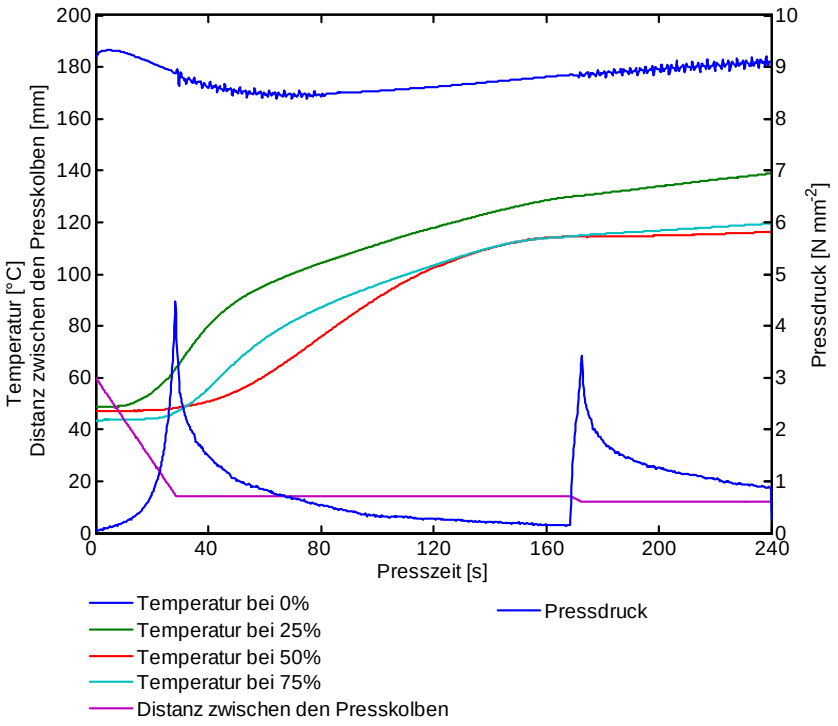


Abb. P- 193: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

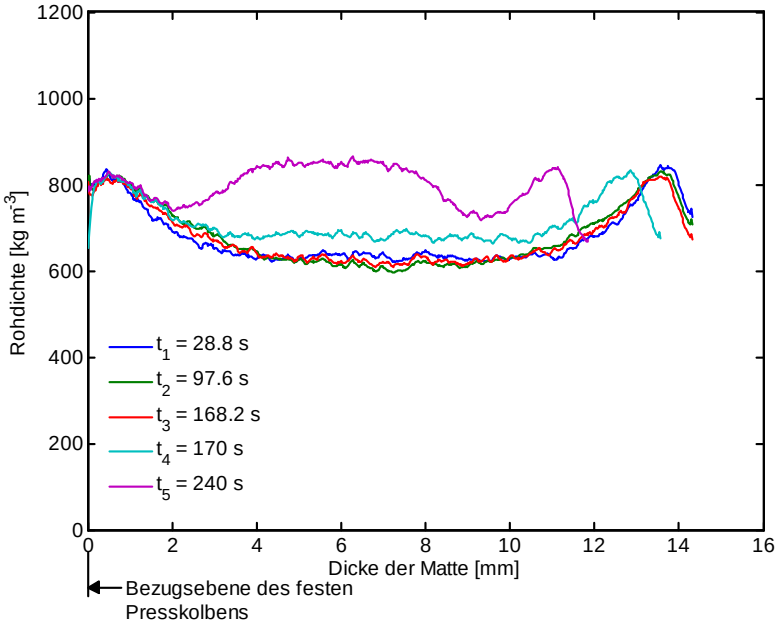


Abb. P- 194: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

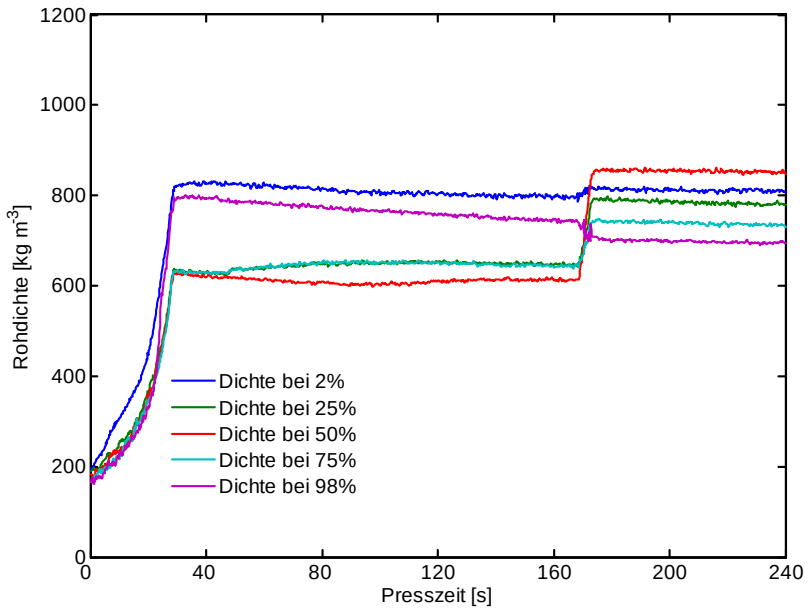


Abb. P- 195: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240.

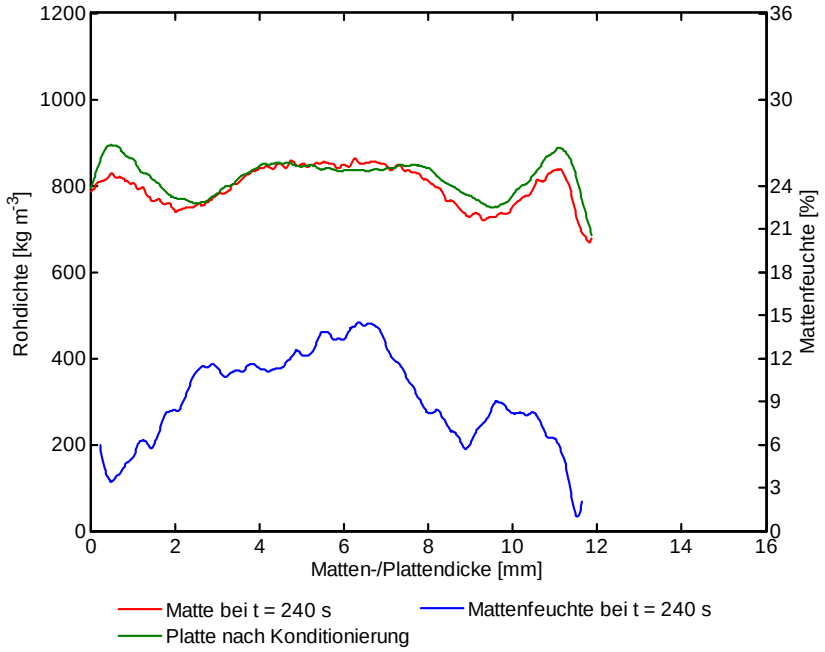


Abb. P- 196: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.40 Platte 12 mm_02_30_120_140_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_140_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,55	gravim.	829,73	gravim.	0,63	radiom.	19,08				
Endwert	18,93		803,20								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	682,38	102,50	radiom.	19,16	radiom.	-0,08				
	Endwert	680,57	102,22		19,11		-0,03				
zweite Haltephase	Startwert	806,97	99,95		18,70		0,38				
	Endwert	807,35	100,00		18,71		0,37				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	3,93	radiom.	2,77	gravim.	3,43			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,46	3,20	804,27	117,86	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	43,6	0,79	5,53	825,33	120,95	1,27	171,74	83,88	51,96	59,57
	Ende	168,2	0,46	4,95	802,93	117,67	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,79	5,53	842,65	123,49	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	42,0	0,85	5,91	865,57	126,85	1,31	172,50	82,25	51,38	57,85
	Ende	168,2	0,98	6,84	839,43	123,01	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderes Maximum	Beginn	173,0	0,67	5,64	820,86	101,72	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,79	6,70	822,95	101,98	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
hinteres Maximum	Beginn	173,0	0,98	8,29	859,77	106,54	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,92	7,76	853,85	105,81	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	627,66	91,98			3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	83,8	602,71	87,78			0,51	169,87	105,63	78,69	88,96
	Maximum	134,2	618,05	90,05			0,21	173,61	121,98	108,06	108,29
	Ende	168,2	613,28	90,11			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
zweite Haltephase	Beginn	173,0	844,42	104,64			3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
	Ende	240,0	852,73	105,62			0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,40	37,77	724,35	106,15	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	79,0	4,79	33,49	717,84	105,20	0,54	169,37	103,84	74,90	86,62
	Ende	168,2	5,13	35,88	715,48	104,85	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinterer GF	Beginn	28,8	5,15	36,03	725,07	106,26	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	86,4	4,62	32,30	715,56	104,86	0,49	169,97	106,56	80,71	90,15
	Ende	168,2	4,90	34,28	714,93	104,77	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderer GF	Beginn	173,0	4,67	39,59	789,29	97,81	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,61	39,07	786,61	97,48	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
hinterer GF	Beginn	173,0	4,24	35,89	791,24	98,05	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,24	35,89	786,80	97,50	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	3,11	21,76	637,41	93,41	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	102,8	2,10	14,68	617,68	90,52	0,34	170,92	112,39	92,57	96,97
	Ende	168,2	2,30	16,08	622,45	91,22	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	3,24	22,63	636,30	93,25	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	82,2	1,60	11,15	614,39	90,04	0,40	170,47	110,08	87,98	94,33
	Ende	168,2	1,53	10,70	622,70	91,25	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vorderer Profilgrund	Beginn	173,0	1,95	16,49	836,43	103,65	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,88	15,96	842,44	104,40	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
hinterer Profilgrund	Beginn	173,0	1,89	16,00	851,40	105,50	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,88	15,96	851,82	105,56	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	170,8	[mm]	13,14	[%]	111,29	2,38	176,80	130,13	114,46	114,74
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	173,0	2,21	18,69	743,72	92,16	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,39	20,28	742,89	92,06	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73
vorderes Maximum	Beginn	173,0	2,37	20,11	740,81	91,80	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,37	20,11	742,89	92,06	0,30	182,24	138,75	116,74	119,73

Tab. P- 79:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 80

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_140_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	2,14	14,99	682,38	100,00	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	103,2	2,93	20,48	687,25	100,71	0,34	170,95	112,51	92,85	97,11
	Ende	168,2	2,64	18,49	680,57	99,73	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,52	17,61	682,38	100,00	3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
erste Haltephase	Maximum	96,2	3,29	22,50	687,25	100,71	0,40	170,47	110,08	87,98	94,33
	Ende	168,2	2,98	20,82	680,57	99,73	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
vordere Peakbase	Beginn	173,0	0,69	5,82	806,97	100,00	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	168,2	0,56	4,76	807,35	100,05	0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
hintere Peakbase	Beginn	173,0	1,10	9,35	806,97	100,00	3,39	176,43	130,34	114,43	115,08
zweite Haltephase	Ende	168,2	0,92	7,76	807,35	100,05	0,15	182,24	138,75	116,74	119,73
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	650,62	95,35			3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	44,2	643,00	93,94			1,24	171,80	84,47	52,18	60,21
	Maximum	117,2	669,93	97,51			0,27	172,06	117,03	101,04	102,35
	Ende	168,2	654,48	96,17			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	632,79	92,73			3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	82,8	606,48	88,37			0,52	169,88	105,27	77,92	88,49
	Maximum	134,2	625,74	91,17			0,21	173,61	121,98	108,06	108,29
	Ende	168,2	621,75	91,36			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	657,35	96,33			3,68	178,36	64,13	48,41	46,89
	Minimum	45,2	652,24	95,40			1,19	170,95	85,40	52,56	61,26
	Maximum	104,2	672,69	97,90			0,35	171,04	112,89	93,52	97,48
	Ende	168,2	658,38	96,74			0,15	176,95	129,86	114,50	114,52

Tab. P- 80:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

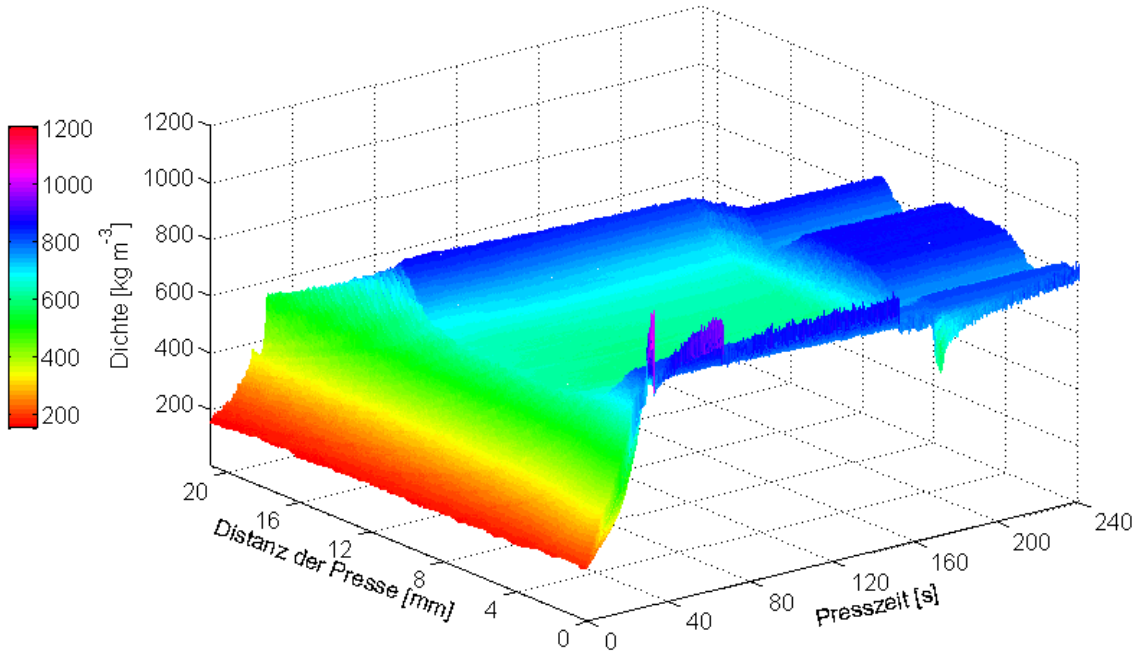


Abb. P- 197: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240.

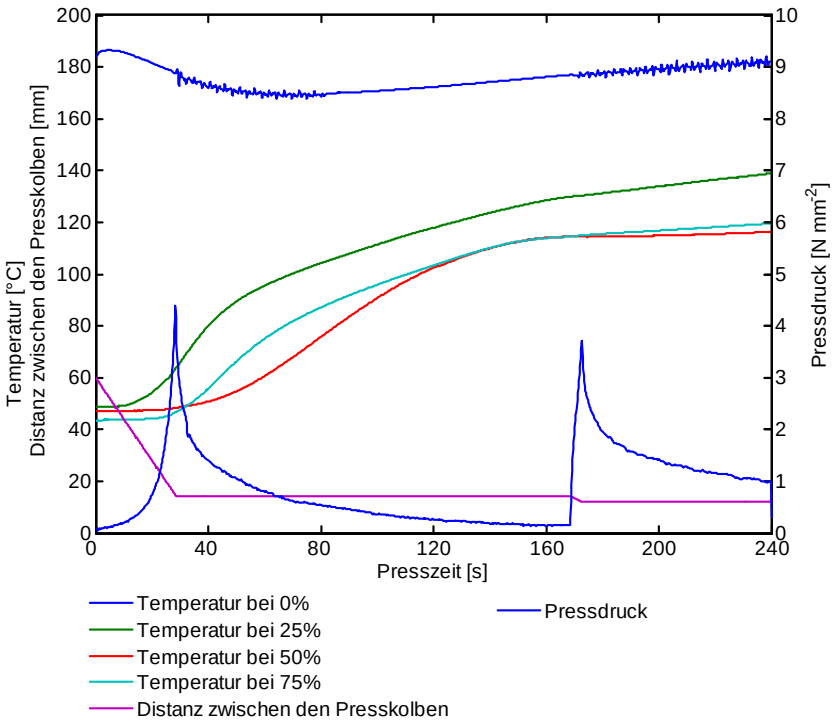


Abb. P- 198: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

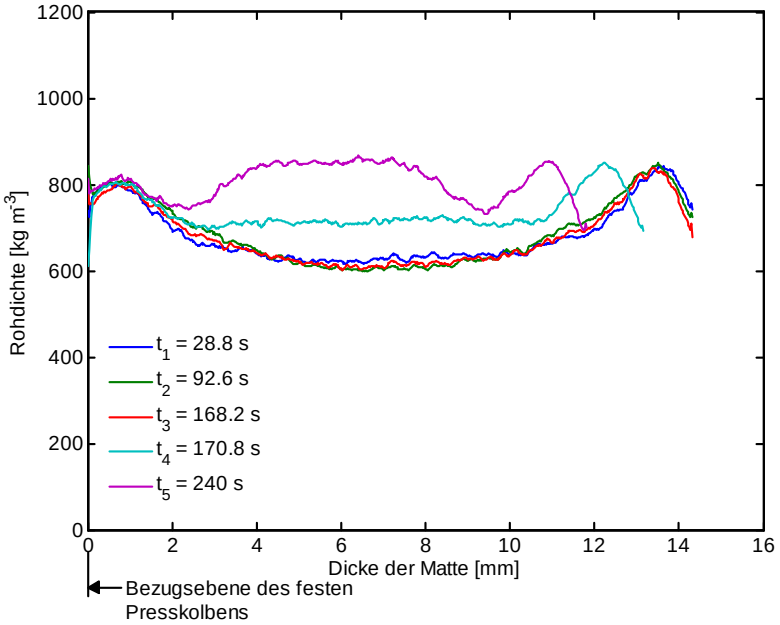


Abb. P- 199: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

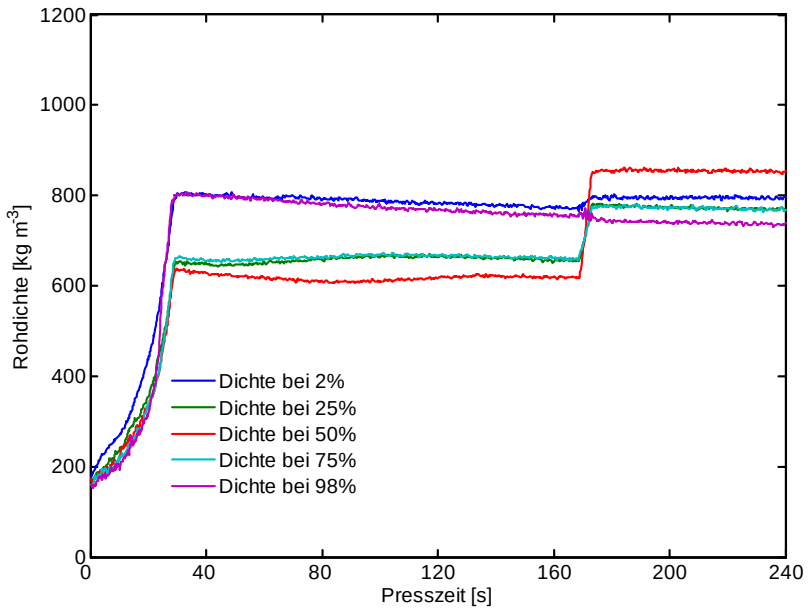


Abb. P- 200: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240.

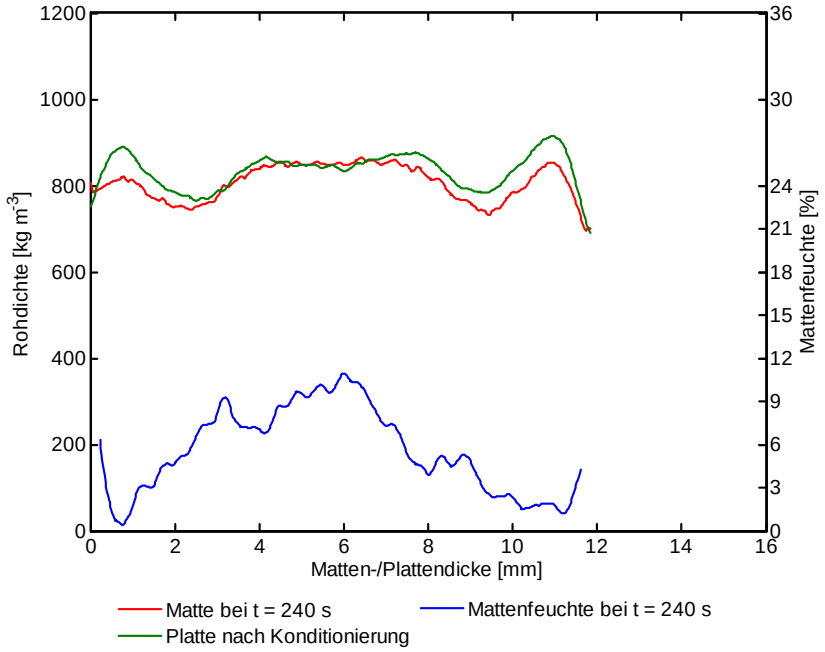


Abb. P- 201: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_140_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.41 Platte 12 mm_01_30_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,39	gravim.	822,94	gravim.	0,51	radiom.	16,19				
Endwert	18,88		801,29								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	636,55	100,70	radiom.	17,88	radiom.	-1,68				
	Endwert	637,07	100,78		17,89		-1,70				
zweite Haltephase	Startwert	760,55	100,22		17,78		-1,59				
	Endwert	758,85	100,00		17,74		-1,55				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,54	radiom.	-1,75	gravim.	2,82			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,37	2,62	786,89	123,62	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	56,2	0,60	4,22	808,91	127,08	1,09	164,29	90,06	70,08	82,33
	Ende	188,4	0,37	4,22	777,14	122,09	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,69	4,80	835,00	131,18	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	38,4	0,72	5,04	852,53	133,93	1,74	167,00	71,68	58,74	64,70
	Ende	188,4	0,73	5,09	821,16	129,00	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderes Maximum	Beginn	193,0	0,50	4,20	796,57	104,74	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,60	5,07	786,70	103,44	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
hinteres Maximum	Beginn	193,0	0,87	7,34	845,90	111,22	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,87	7,34	835,92	109,91	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	585,24	91,94			4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	103,8	557,33	87,03			0,40	167,51	108,22	102,73	102,59
	Maximum	169,0	571,76	89,46			0,15	174,54	124,36	119,91	119,35
	Ende	188,4	570,69	89,58			0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
zweite Haltephase	Beginn	193,0	797,32	104,83			2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
	Ende	240,0	803,74	105,92			0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,88	41,12	693,93	109,01	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	94,0	5,27	36,81	684,93	107,60	0,49	166,49	105,27	97,36	99,59
	Ende	188,4	5,47	38,21	678,55	106,60	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
hinterer GF	Beginn	28,8	5,49	38,36	695,65	109,28	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	99,4	4,92	34,40	679,27	106,71	0,44	167,04	106,91	100,46	101,27
	Ende	188,4	5,17	36,17	684,41	107,52	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderer GF	Beginn	193,0	4,93	41,43	751,82	98,85	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,91	41,26	745,73	98,05	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
hinterer GF	Beginn	193,0	4,27	35,84	747,67	98,31	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,29	36,01	744,14	97,84	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	4,65	32,53	592,09	93,02	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	118,0	2,43	16,97	568,69	89,34	0,47	169,05	112,42	108,66	106,88
	Ende	188,4	2,84	19,87	579,71	91,07	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	2,40	16,81	593,32	93,21	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	93,8	1,73	12,09	568,42	89,30	0,33	168,59	111,19	107,13	105,58
	Ende	188,4	1,76	12,30	577,95	90,79	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderer Profilgrund	Beginn	193,0	2,08	17,48	796,57	104,74	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,96	16,43	797,80	104,90	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
hinterer Profilgrund	Beginn	193,0	1,98	16,64	807,44	106,17	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,85	15,56	813,07	106,91	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	190,2	[mm]	13,43	[%]	112,76	1,78	176,66	127,48	120,65	121,67
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	193,0	2,23	18,71	677,40	89,07	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,23	18,71	670,28	88,13	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65
vorderes Maximum	Beginn	193,0	2,39	20,10	696,47	91,58	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,56	21,50	670,28	88,13	0,29	180,66	133,06	124,38	126,65

Tab. P- 81:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung siehe Tab. P- 82

Probenname	Platte 12mm_01_30_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	1,81	12,66	636,55	100,00	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	95,4	2,31	16,16	641,22	100,73	0,47	166,64	105,68	98,21	100,03
	Ende	188,4	2,04	14,26	637,07	100,08	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,81	19,65	636,55	100,00	4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	113,8	3,46	22,82	641,22	100,73	0,33	168,59	111,19	107,13	105,58
	Ende	188,4	3,23	22,56	637,07	100,08	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
vordere Peakbase	Beginn	193	0,79	6,64	760,55	100,00	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	188,4	0,81	6,82	758,85	99,78	0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
hintere Peakbase	Beginn	193	1,02	8,57	760,55	100,00	2,95	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	188,4	0,98	8,22	758,85	99,78	0,12	180,66	133,06	124,38	126,65
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	585,80	92,03			4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	46,8	575,12	89,86			1,41	165,00	82,24	63,61	74,32
	Maximum	125	602,07	93,98			0,26	169,81	114,42	111,03	109,00
	Ende	188,4	590,86	92,75			0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	580,51	91,20			4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	102,2	552,64	86,33			0,41	167,35	107,84	101,92	102,13
	Maximum	183,6	575,69	90,35			0,13	175,91	126,45	120,60	120,91
	Ende	188,4	575,69	90,37			0,12	176,32	127,13	120,86	121,43
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	615,01	96,62			4,48	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	41,4	608,98	95,25			1,59	166,03	75,83	60,32	68,40
	Maximum	119,8	639,70	99,86			0,29	169,26	112,96	109,28	107,46
	Ende	188,4	627,53	98,50			0,12	176,32	127,13	120,86	121,43

Tab. P- 82:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

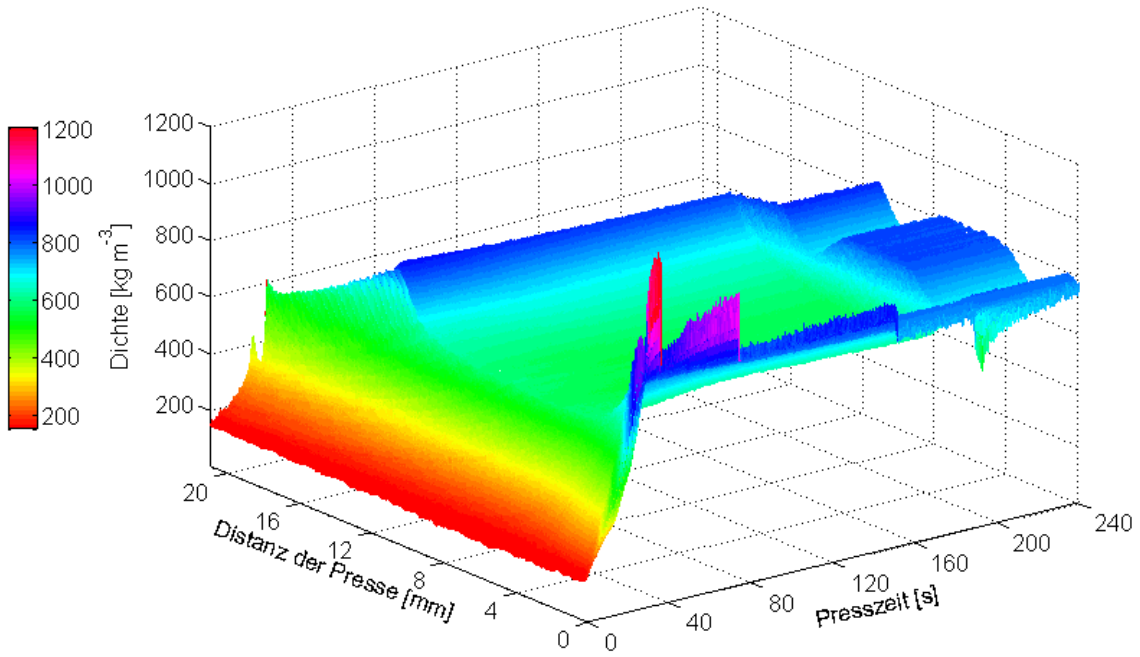


Abb. P- 202: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240.

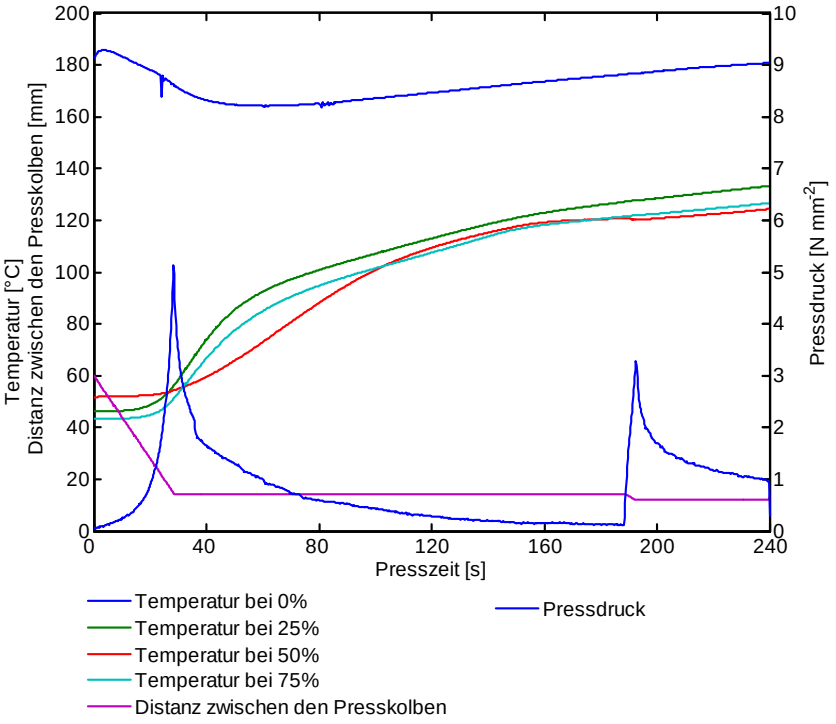


Abb. P- 203: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

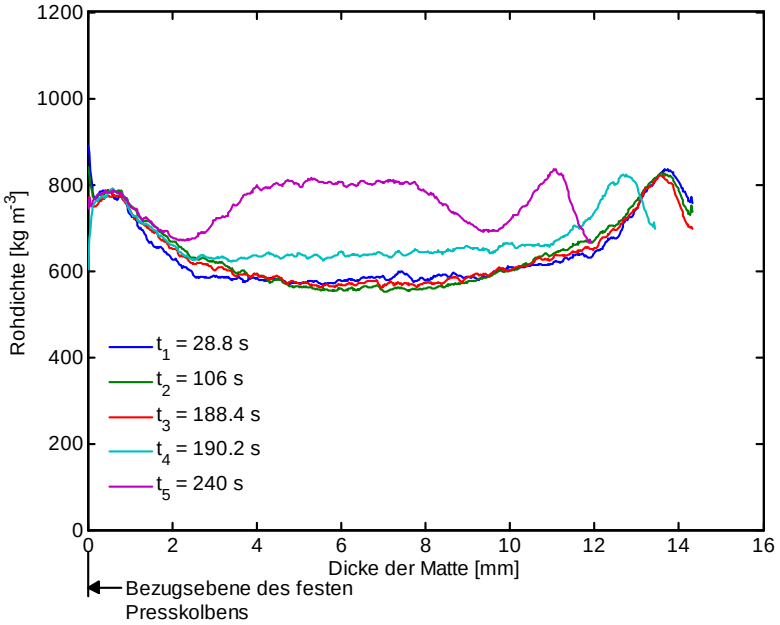


Abb. P- 204: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

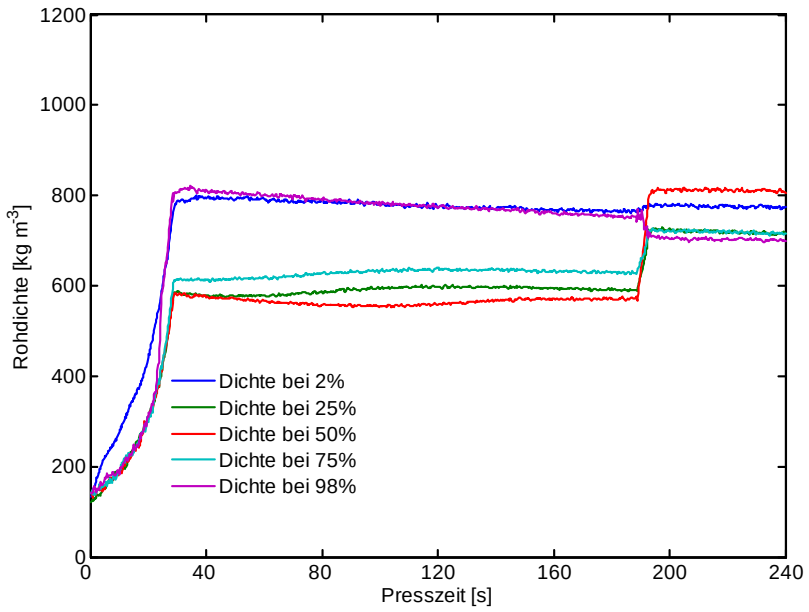


Abb. P- 205: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240.

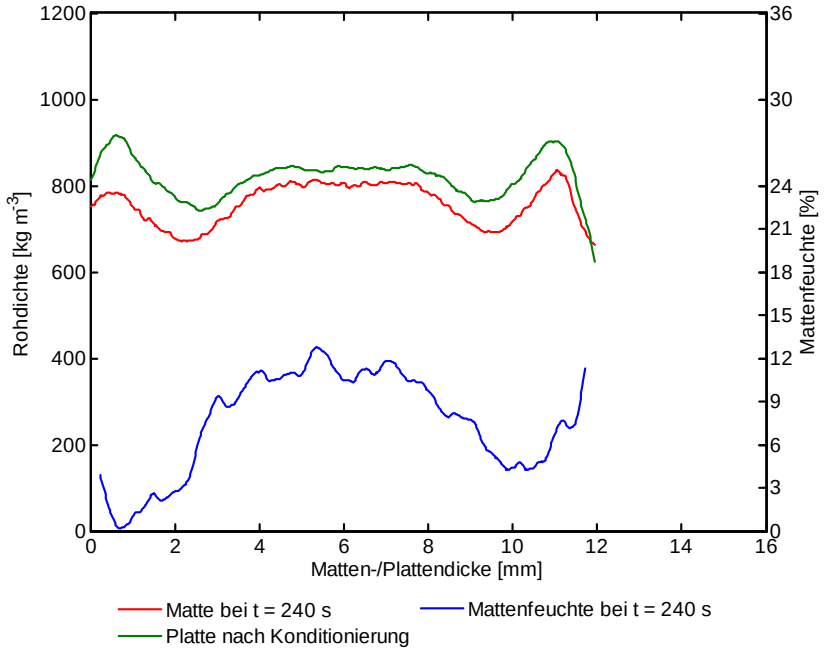


Abb. P- 206: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_01_30_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.

1.42 Platte 12 mm_02_30_120_160_240

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_160_240										
Plattenmasse	[g]	Dichte	[kg m^{-3}]	Verlust	[g]	Masse	[g]				
Startwert	19,45	gravim.	825,48	gravim.	0,57	radiom.	19,67				
Endwert	18,88		801,29								
mittlere Dichte		[kg m^{-3}]	[%]	Masse	[g]	Verlust	[g]				
erste Haltephase	Startwert	689,44	102,52	radiom.	19,33	radiom.	0,33				
	Endwert	683,99	101,71		19,18		0,49				
zweite Haltephase	Startwert	811,62	99,84		18,85		0,82				
	Endwert	812,96	100,00		18,88		0,79				
Plattenfeuchte		[%]		[%]	Verlust	[%]	Verlust	[%]			
	Startwert	7,36	Endwert	4,21	radiom.	4,20	gravim.	3,15			
Deckschichtmaxima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	28,8	0,62	4,37	820,26	118,97	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	48,2	0,62	4,37	839,10	121,71	1,13	164,86	83,64	64,49	75,68
	Ende	188,4	0,62	6,12	812,97	117,92	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
hinteres Maximum	Beginn	28,8	0,71	4,96	853,10	123,74	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	40,2	0,71	4,96	865,57	125,55	1,40	166,36	74,23	59,64	66,96
	Ende	188,4	0,87	6,12	831,22	120,56	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderes Maximum	Beginn	193,0	0,60	5,11	834,28	102,79	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,65	5,46	835,00	102,88	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
hinteres Maximum	Beginn	193,0	0,87	7,39	858,58	105,79	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	0,87	7,39	855,03	105,35	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
Mittelschichtdichte		Position	Dichte				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	644,33	93,46			3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	91,0	617,83	89,26			0,44	166,20	104,41	95,55	98,65
	Maximum	138,0	631,58	91,23			0,22	171,29	117,99	114,72	113,16
	Ende	188,4	625,23	91,41			0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
zweite Haltephase	Beginn	193,0	866,83	106,80			3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
	Ende	240,0	875,83	107,73			0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
Gradientfaktor		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer GF	Beginn	28,8	5,62	39,36	738,41	107,10	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	80,0	4,88	34,17	726,75	105,41	0,50	165,16	100,82	88,11	94,74
	Ende	188,4	5,29	37,03	719,02	104,29	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
hinterer GF	Beginn	28,8	5,43	38,05	739,15	107,21	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	82,0	4,87	34,11	727,88	105,58	0,49	164,46	101,51	89,52	95,53
	Ende	188,4	5,14	36,01	720,69	104,53	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderer GF	Beginn	193,0	4,68	39,61	793,38	97,75	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,56	38,56	790,40	97,39	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
hinterer GF	Beginn	193,0	4,48	37,85	793,20	97,73	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	4,41	37,32	791,33	97,50	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
Profilgrund		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderer Profilgrund	Beginn	28,8	4,00	27,99	652,51	94,64	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	95,8	1,88	13,14	631,95	91,66	0,37	166,70	105,81	98,43	100,18
	Ende	188,4	3,33	23,32	635,78	92,22	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
hinterer Profilgrund	Beginn	28,8	3,62	25,36	652,78	94,68	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	74,2	2,58	18,09	630,92	91,51	0,42	166,59	105,54	97,97	99,92
	Ende	188,4	2,62	18,37	636,17	92,27	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
vorderer Profilgrund	Beginn	193,0	1,75	14,79	858,69	105,80	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,81	15,32	867,75	106,92	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
hinterer Profilgrund	Beginn	193,0	1,44	12,15	857,72	105,68	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	1,17	9,86	867,75	106,92	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
Mittelschichtschritt	Position		Plattendicke		Plattendicke		Druck	Temperatur			
	[s]	190,2	[mm]	13,43	[%]	113,56	2,15	176,66	127,48	120,65	121,67
Zwischenminima		Position			Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vorderes Maximum	Beginn	193,0	2,31	19,54	751,31	92,57	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,44	20,60	745,06	91,80	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65
vorderes Maximum	Beginn	193,0	2,48	20,95	738,98	91,05	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	240,0	2,48	20,95	745,06	91,80	0,38	180,66	133,06	124,38	126,65

Tab. P- 83:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 1). → Fortsetzung Tab. P- 84

Probenname	Platte 12mm_02_30_120_160_240										
Peakbase		Position	Breite		Dichte		Druck	Temperatur			
		[s]	[mm]	[%]	[kg m^{-3}]	[%]	[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
vordere Peakbase	Beginn	28,8	2,10	14,72	689,44	100,00	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	102,0	2,87	20,08	692,95	100,51	0,37	167,34	107,70	101,80	102,05
	Ende	188,4	2,73	19,10	683,99	99,21	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
hintere Peakbase	Beginn	28,8	2,54	17,78	689,44	100,00	3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
erste Haltephase	Maximum	95,0	3,08	21,30	692,95	100,51	0,42	166,59	105,54	97,97	99,92
	Ende	188,4	3,00	20,99	683,99	99,21	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
vordere Peakbase	Beginn	193,0	0,81	6,87	811,62	100,00	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	188,4	0,46	3,87	812,96	100,17	0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
hintere Peakbase	Beginn	193,0	0,83	7,04	811,62	100,00	3,63	176,85	127,73	120,36	122,00
zweite Haltephase	Ende	188,4	0,77	6,51	812,96	100,17	0,13	180,66	133,06	124,38	126,65
Dichte		Position	in der 25%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	637,87	92,52			3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	40,6	630,34	91,49			1,39	166,26	74,79	59,85	67,45
	Maximum	122,6	665,02	95,93			0,28	169,54	113,77	110,25	108,31
	Ende	188,4	648,60	94,83			0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
Dichte		Position	in der 50%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	644,66	93,50			3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	77,0	616,93	89,11			0,53	164,89	99,77	85,84	93,54
	Maximum	142,6	634,80	91,73			0,22	171,75	119,15	115,86	114,56
	Ende	188,4	626,95	91,66			0,13	176,32	127,13	120,86	121,43
Dichte		Position	in der 75%-Schicht				Druck	Temperatur			
		[s]	[kg m^{-3}]	[%]			[N mm^{-2}]	bei 0% [°C]	bei 25% [°C]	bei 50% [°C]	bei 75% [°C]
erste Haltephase	Beginn	28,8	651,36	94,48			3,69	171,93	56,77	54,48	51,85
	Minimum	38,0	645,26	93,62			1,51	167,06	71,04	58,51	64,14
	Maximum	128,4	668,10	96,41			0,25	170,22	115,41	112,07	110,08
	Ende	188,4	654,48	95,69			0,13	176,32	127,13	120,86	121,43

Tab. P- 84:Charakteristische Werte für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240 zu markanten Zeitpunkten während des Heißpressvorgangs (Teil 2).

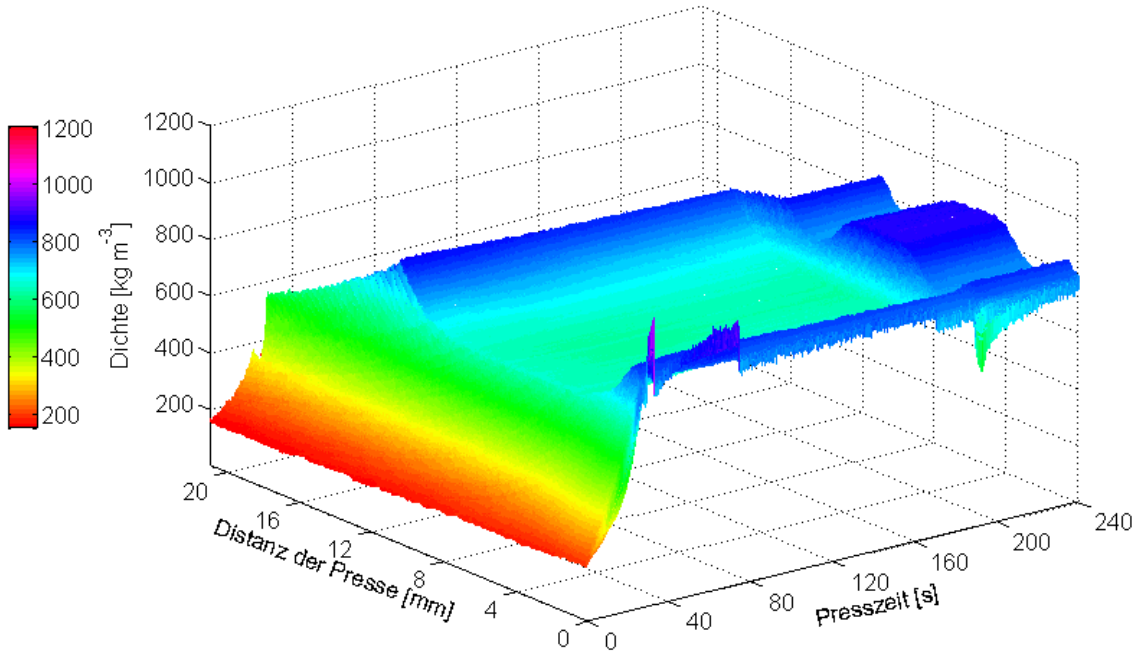


Abb. P- 207: Rohdichteprofilentstehung an der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240.

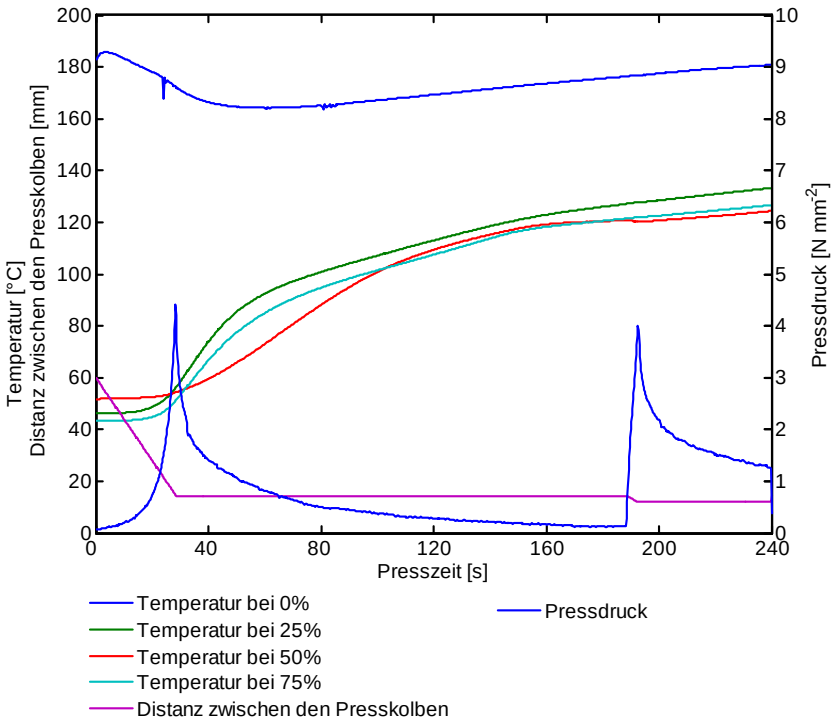


Abb. P- 208: Pressdiagramm der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240. Das Diagramm zeigt den Pressdruck, die Distanz zwischen den Presskolben und die Temperaturen an den Positionen bei 0 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %- Mattendicke.

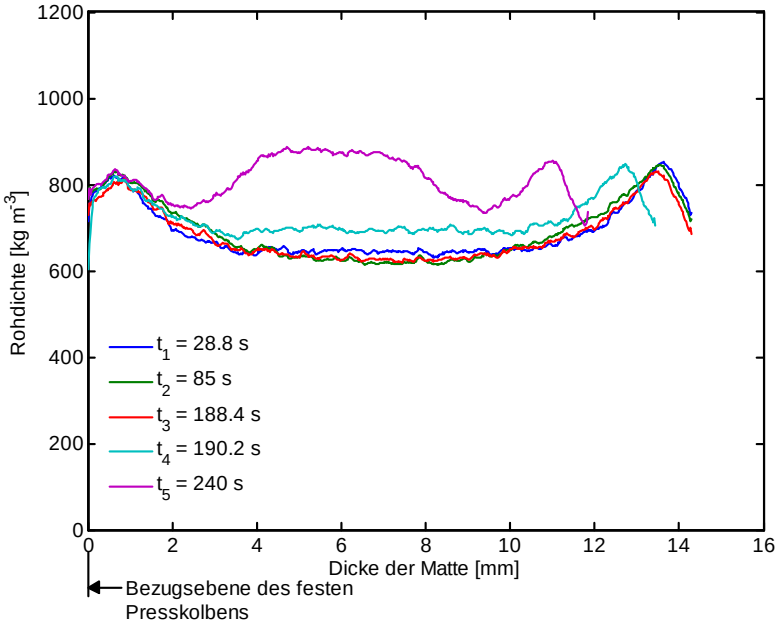


Abb. P- 209: Rohdichteprofile der Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240. Dargestellt werden die Rohdichteprofile am Beginn (t_1) und zum Ende (t_3) der ersten Haltephase, das Rohdichteprofil am Ende des Heißpressvorgangs (t_5), sowie das markanteste Rohdichteprofil in der ersten Haltephase (t_2) und das Profil zum Zeitpunkt des Mittelschichtschritts (t_4).

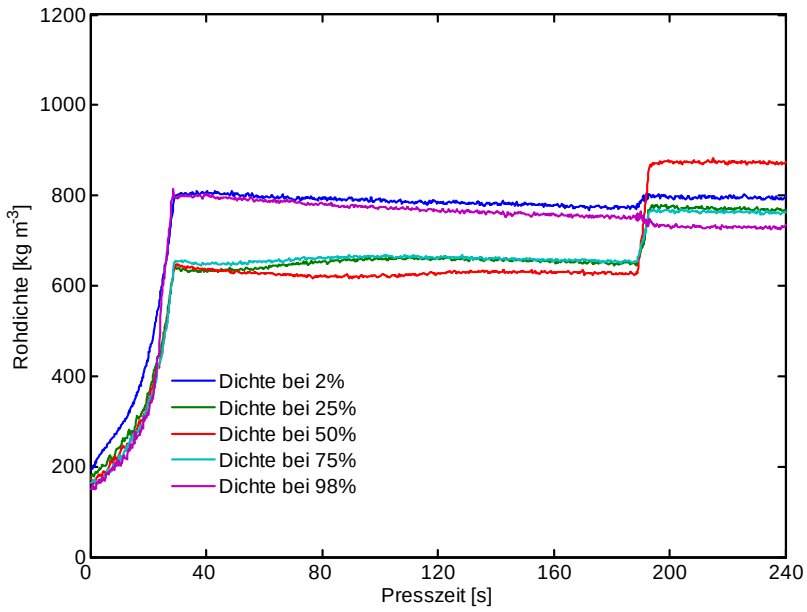


Abb. P- 210: Dichteentwicklung in der 2 %- , 25 %-, 50 %-, 75 %- und 98 %-Schicht für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240.

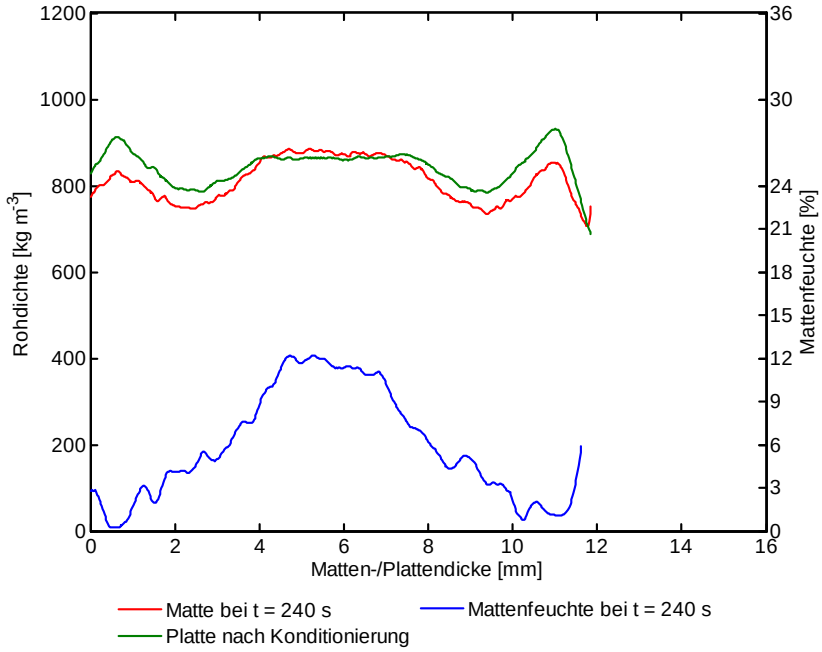


Abb. P- 211: Rohdichteprofile am Ende des Heißpressvorgangs und nach der Konditionierung im Normaklima (ϑ = 20°C, φ = 65 %) für die Probe: Platte 12 mm_02_30_120_160_240, sowie das daraus abgeleitete Feuchteprofil in der Matte am Ende des Heißpressvorgangs.