

**Einfluss von Druckänderungen während des
Heißpressprozesses auf die mechanischen
Eigenschaften von Holzwerkstoffen**

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
des Departments Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Niels Tobias Meyer
aus Bremen

Hamburg 2007

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Professor Dr. A. FRÜHWALD
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. M. BARBU
Tag der Disputation: 24. November 2006

Hamburg, den 10. November 2006



Professor Dr. Reinhard Lieberei
Leiter des Departments Biologie

Vorwort

Nach der Fertigstellung dieser Dissertation möchte ich mich bei denen bedanken, die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Arno Frühwald und meinem Projektleiter Dr. Heiko Thömen für die Anleitung, die Unterstützung und die Freiheit, das gestellte Thema kreativ bearbeiten zu können. Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Dr. Marius Barbu für die Übernahme des Koreferates. Allen drei danke ich für die investierte Zeit, das Vertrauen und die stete Bereitschaft zur Diskussion.

Das Bundesministerium für Wirtschaft, vertreten durch die AiF, finanzierte mein zur Dissertation beitragendes Projekt. Die Universität tat dies durch die Übernahme eines Abschlussstipendiums im Rahmen der Nachwuchsförderung. Hierfür meinen herzlichen Dank.

Seitens der Wissenschaft danke ich Prof. Dr. Jörg Ressel, Dr. Ralf Lehnen, Dr. Eckhard Schwab, Dr. Uwe Schmitt und Tino Schulz.

Ich bedanke mich für den steten fachlichen Beistand seitens der Industrie bei Peter Beck, Ulrich Kaiser, Dr. Helmut Roll sowie Dr. Jochem Berns.

Die Qualität der Arbeit wäre ohne die durchgeführten Messungen in der Industrie nicht möglich gewesen. Vielen Dank daher für die Mithilfe und das Ermöglichen der Versuche: Dr. Joachim Hasch und Dr. Dirk Grunwald (Kronopol), Prof. Dr. Dr. Marius Barbu (ehemals MDF-Hallein), Herrn Matthes und Gunnar Thiellecke (Kronotex). Besonders danke ich hierbei Steve Kirincic und Bruce Mallas vom Alberta Research Council, die mir die Rundreise durch Europa während der Industriemessungen zu einem unvergesslichen Erlebnis werden ließen.

Für die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchen danke ich Christian Lanvermann, Steffi Warsaw, Dörte Bielenberg, Ines Sauerteig, Klaus Brumm und Jens Schröder.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, meiner Freundin, allen Freunden und natürlich Thomas Walther, der mich als Kollege und Freund über viele Jahre begleitet hat.

Allen vielen Dank!

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Hintergründe	1
1.2	Problemstellung	4
1.3	Forschungsziele.....	5
2	Stand des Wissens	6
2.1	Physikalisch-chemische Vorgänge während des Heißpressens.....	6
2.1.1	Gekoppelter Wärme- und Stofftransport.....	6
2.1.2	Rheologisches Verhalten.....	10
2.1.2.1	Kompression.....	10
2.1.2.2	Relaxation und Retardation	12
2.1.3	Härtungsprozess Holzpartikel-Klebstoff-Matrix.....	13
2.2	Einfluss von Druckänderungen.....	16
2.2.1	Direkte Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften	16
2.2.1.1	Während des Heißpressvorgangs.....	16
2.2.1.2	Unmittelbar nach dem Heißpressvorgang	19
2.2.1.3	An der fertigen Platte	20
2.2.2	Auswirkungen auf das Rohdichteprofil	23
3	Entwicklung der Arbeitshypothesen.....	27
3.1	Wirkung von Druckschwankungen	27
3.1.1	Einführung.....	27
3.1.2	Aufstellung der Arbeitshypothesen	28
3.2	Überprüfung der Arbeitshypothesen.....	30
3.2.1	Mechanisch.....	30
3.2.2	Mikroskopisch	31
3.2.3	Extraktiv	31
4	Material.....	32
4.1	Klebstoffe	32
4.2	Fasern.....	32
4.3	Späne.....	34
4.4	Pufferkapazität- und pH-Wertbestimmung	35
5	Methodik	38
5.1	Versuchsapparatur.....	38
5.1.1	Ipates.....	38
5.1.1.1	Beleimung	39
5.1.1.2	Bestimmung der Platteneigenschaften	40

5.1.1.3	Temperaturmessung	42
5.1.2	Laborpresse.....	42
5.1.2.1	Beleimung.....	42
5.1.2.2	Bestimmung der Platteneigenschaften	43
5.1.2.3	Temperaturmessung	43
5.1.3	ABES.....	44
5.2	Druckmesssystem.....	45
5.2.1	Einleitung.....	45
5.2.2	Anforderungen	45
5.2.3	Überblick der Sensortechnologie	45
5.2.4	Messprinzip.....	46
5.2.5	Sensormaterial.....	48
5.2.5.1	Polymerwerkstoffe	48
5.2.5.2	Materialauswahl	50
5.2.6	Sensorkalibrierung	52
5.2.7	Layout des Messsystems	53
5.3	Versuchsablauf.....	54
5.3.1	Druckschwankungen aufgrund des Pressprogramms.....	54
5.3.1.1	Grundversuche Ipates	54
5.3.1.2	Hauptversuche Ipates.....	55
5.3.1.3	Laborpresse	57
5.3.2	Druckschwankungen aufgrund der Rahmenkonstruktion	58
5.3.2.1	Messungen im industriellen Heißpressprozess	59
5.3.2.2	Grundversuche Ipates	61
5.3.2.3	Hauptversuche Ipates.....	62
5.3.3	Analyse der Ursachen.....	63
5.3.3.1	Einfluss der Partikelgröße.....	65
5.3.3.2	ABES	66
5.3.3.3	Extraktion.....	67
5.3.3.4	Mikroskopie	69
5.3.4	Simulation.....	70
5.3.4.1	Grundversuche	71
5.3.4.2	Modellierung	73
5.3.5	Maßnahmenkatalog	74
5.4	Statistik.....	77
6	Druckschwankungen aufgrund des Pressprogramms.....	79
6.1	Grundversuche Ipates.....	79
6.1.1	Ergebnisse und Diskussion.....	79
6.1.1.1	Rohdichtepprofile.....	79
6.1.1.2	Bruchfläche	80
6.1.1.3	Querzugfestigkeiten.....	81
6.2	Hauptversuche Ipates	85
6.2.1	Ergebnisse und Diskussion.....	85
6.2.1.1	Rohdichtepprofile.....	85

6.2.1.2	Querzugfestigkeiten	86
6.2.1.3	Temperaturmessungen	90
6.2.1.4	Mattengegendruck	92
6.3	Laborpresse	96
6.3.1	Ergebnisse und Diskussion	96
6.3.1.1	Rohdichteprofil	97
6.3.1.2	Festigkeitseigenschaften	97
6.3.1.3	Temperaturverlauf	99
6.3.1.4	Mattengegendruck	100
6.4	Kritische Betrachtung Ipates	101
6.5	Vergleich Ipates und Laborpresse am IHD	103
6.6	Schlussfolgerung	104
7	Druckschwankungen aufgrund der Rahmenkonstruktion	106
7.1	Theoretischer Ansatz	106
7.2	Druckmessungen während der industriellen MDF-Herstellung	109
7.2.1	Ergebnisse und Diskussion	109
7.2.1.1	Druck- und Distanzschwankungen	110
7.2.1.2	Vergleich kontinuierlicher Pressen	111
7.2.1.3	Ausblick Drucksensor	114
7.3	Gasdruckmessungen während der industriellen MDF-Herstellung	115
7.3.1	Ergebnisse und Diskussion	115
7.3.1.1	Gasdruck	115
7.3.1.2	Vergleich Gasdruck und spezifischer Druck	116
7.3.1.3	Berechnung der Distanzänderung	117
7.4	Grundversuche Labor	118
7.5	Hauptversuche Labor	120
7.5.1	Ergebnisse und Diskussion	120
7.5.1.1	Querzugfestigkeiten	121
7.5.1.2	Temperaturverlauf	127
7.5.1.3	Mattengegendruck	129
7.6	Schlussfolgerung	132
8	Analyse der Ursachen	135
8.1	Einfluss der Partikelgröße	135
8.1.1	Ergebnisse und Diskussion	135
8.1.1.1	Nachverdichtung	135
8.1.1.2	Schwingung	140
8.2	ABES	142
8.2.1	Ergebnisse und Diskussion	142
8.2.1.1	Temperatur	142

8.2.1.2	Scherfestigkeit	143
8.3	Weitere Analysemethoden	148
8.3.1	Extraktion von Faserplatten	148
8.3.1.1	Ergebnisse und Diskussion	148
8.3.2	Rasterelektronenmikroskopie	150
8.3.2.1	Ergebnisse und Diskussion	150
8.4	Schlussfolgerung	155
9	Simulation	158
9.1	Ergebnisse und Diskussion	159
9.1.1	Grundversuche	159
9.1.1.1	Querzugfestigkeiten	159
9.1.1.2	Temperaturmessungen	161
9.1.1.3	Aussagen für die Simulation	163
9.1.2	Simulation	165
9.1.2.1	Rohdichteprofil	165
9.1.2.2	Querzugfestigkeit	166
9.2	Schlussfolgerung	169
10	Maßnahmenkatalog	171
10.1	Ergebnisse und Diskussion	171
10.1.1	Schließgeschwindigkeit	171
10.1.2	Niveau Erstverdichtung	174
10.1.3	Entspannungszeitpunkt	176
10.1.4	Niveau Entspannung	178
10.1.5	Kalibrierungszeitpunkt	180
10.2	Schlussfolgerung	182
11	Folgerungen für die Praxis	184
12	Zusammenfassung	186
13	Literatur	189
	Abbildungsverzeichnis	196
	Tabellenverzeichnis	204
	Anhang Statistik	205

1 Einleitung

1.1 Hintergründe

Für die Herstellung von Holzwerkstoffen im Heißpressprozess werden sowohl Takt- als auch kontinuierliche Pressensysteme eingesetzt. Die kontinuierliche Pressentechnologie gewinnt jedoch seit den 1980er Jahren für die Holzwerkstoffherstellung stetig an Bedeutung. Mittlerweile werden in Europa über 80 % der Holzwerkstoffe auf kontinuierlich arbeitenden Doppelbandpressen hergestellt, wogegen im US-amerikanischen Markt die Verwendung von Taktpressen überwiegt. Die bekanntesten Maschinenbauer des kontinuierlichen Pressentyps finden sich in Europa (Siempelkamp, Dieffenbacher, Metso/Küsters).

Die grundlegenden Unterschiede beider Pressensysteme finden sich im konstruktiven Bereich, in ihrer Anwendung im Materialfluss während der Plattenherstellung und den resultierenden Platteneigenschaften.

Beim Materialfluss wird gegenüber der chargenweisen Verpressung bei Taktpressen, die Matte bei kontinuierlichen Pressen beständig durch die Presse geführt und kommt in Kontakt mit dem umlaufenden Stahlband. Das Stahlband gibt die von den Heizplatten und zwischengeschaltete Rollkörper übertragene Wärme auf die zu verpressende Matte. Zusätzlich finden sich Presszylinder, die an den Pressrahmen liegen und die zu verpressende Matte mit Druck beaufschlagen. Die Konstruktion einer kontinuierlichen Heißpresse zeichnet sich weiter dadurch aus, dass die Presszylinder (Drucktöpfe) außer ihrer Anordnung über die Pressenlänge auch eine Anordnung quer zur Vorschubrichtung aufweisen. Mit dieser Bauart (Querkorrektur, Multipots) können die Plattendicke und die Entlüftung der Matte quer zur Pressenlänge während des Heißpressprozesses einstellen. Die schematische Darstellung einer kontinuierlichen Heißpresse ist aus Abbildung 1 ersichtlich.

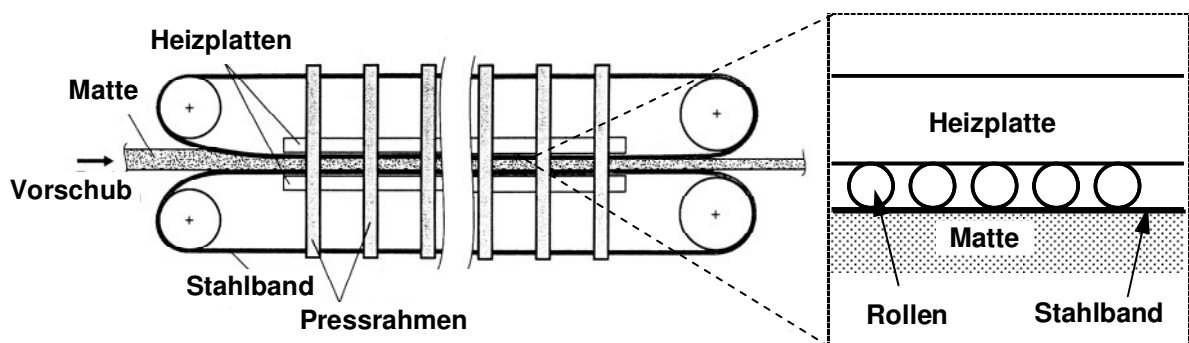


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Heißpresse (links, Thoemen 2000) und der Rollkörper (rechts).

Die Anwendung von Ein- und Mehretagenpressen führt bei der Produktion von Holzwerkstoffen zu Totzeiten zwischen Mattenzuführung und Pressung. Diese Totzeit fehlt beim

kontinuierlichen Prozess, wodurch höhere Produktionsvolumen erreicht werden. Die bei der Beschickung von Taktpressen entstehende einseitige Vorwärmung der Matte führt zu asymmetrischen Dichte- und Festigkeitsverteilungen senkrecht zur Plattenebene. In kontinuierlichen Pressen kommt es dagegen zur gleichzeitigen Erwärmung der Mattenober- und Unterseite. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen, wie z.B. Mitteldichte Faserplatten (MDF), Spanplatten und Oriented Strand Board (OSB), nimmt der Heißpressvorgang allgemein eine zentrale Stellung ein. Aufgrund der hohen Investitionskosten für eine kontinuierliche Heißpresse (ca. 250.000 Euro pro Meter Presse) stellt dieser Produktionsabschnitt besonders in diesem Fall den finanziell aufwendigsten Abschnitt des gesamten Produktionsprozesses dar. Aus dem hohen Investitionsvolumen für eine kontinuierliche Heißpresse leitet sich eine optimale Ausnutzung der Pressenkapazität für eine wirtschaftliche Produktion von Holzwerkstoffen ab.

Die Eigenschaften des fertigen Produktes werden maßgeblich durch die Wahl der Pressbedingungen bestimmt. Die weitere Optimierung des Pressprozesses ist daher ein wichtiges Ziel der Holzwerkstoffhersteller. Die komplexen Zusammenhänge und Interaktionen der einzelnen, beim Heißpressen auftretenden physikalischen Abläufe sind in Abbildung 2 verdeutlicht.

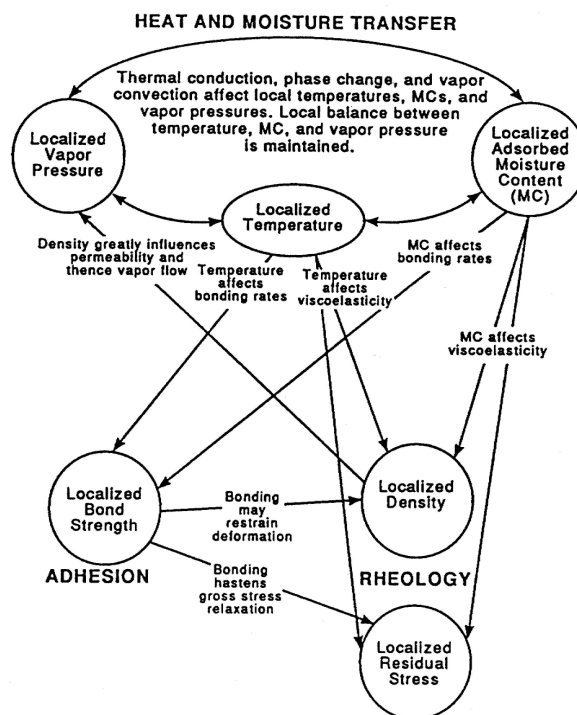


Abbildung 2: Grundlegende Mechanismen während des Heißpressvorgangs von Holzwerkstoffmatten (Humphrey 1994).

Die für die Herstellung verwendeten feuchten, beleimten Rohstoffe (Fasern, Späne, Strands) unterliegen während des Heißpressprozesses einer Druck- und Temperatureinwirkung.

kung. Die hierdurch in der Matte verursachten Wärme- und Stofftransporte führen zu einer Erwärmung der Matte und zur Aushärtung des beleimten Rohstoffes. Hierbei muss die Aushärtung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix am Ende des Pressvorgangs weit genug fortgeschritten sein, um den sich während des Heißpressens aufbauenden inneren Spannungen zu widerstehen.

Durch lokal unterschiedliche Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen beim Pressen über den Mattenquerschnitt bildet sich ein Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenoberfläche aus. Die gezielte Beeinflussung des Rohdichteprofiles während des Heißpressprozesses hat bei der Holzwerkstoffherstellung größte Bedeutung, da wesentliche mechanische Platteneigenschaften wie Querzug- und Biegefestigkeit vom Verdichtungsgrad der Matte in den einzelnen Schichten abhängen. Die Ausprägung des Rohdichteprofiles lässt sich bei kontinuierlichen als auch bei Taktpressen über die Wahl des Pressprogramms, das bedeutet über die Wahl des Druck- als auch Distanzverlaufs über die Pressenlänge während des Heißpressprozesses steuern. Hierbei kann die Regelung des Prozesses nach Weg oder Druck, nach Weg mit Druckbegrenzung oder Druck- mit Wegbegrenzung geschehen, wobei zwischen diesen Regelungsarten innerhalb des Prozesses gewechselt werden kann. Die Pressprogramme können sich stark unterscheiden, je nach herzustellender Produktart und verwendetem Pressentyp.

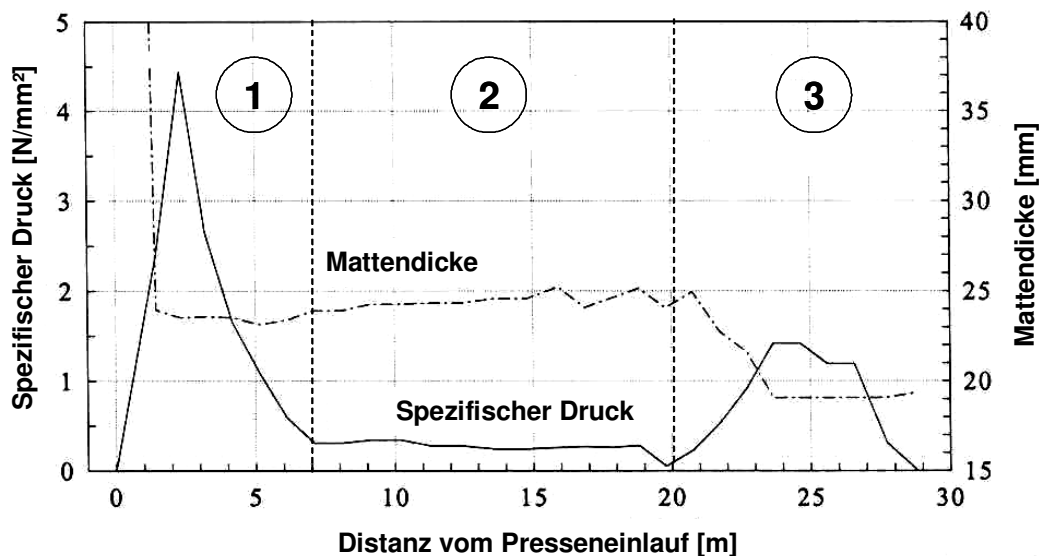


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines MDF-Pressprogrammes (Weg-Druck-Diagramm) mit einer Verdichtungszone 1 (Hochdruckbereich), einer Entlastungszone 2 (Niederdruckbereich) und einer Kalibrierzone 3 (Mitteldruckbereich) (verändert nach Thoemen 2000).

Ein in der Industrie übliches Pressprogramm für die kontinuierliche MDF-Produktion ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Hierbei kommt es nach der erstmaligen Verdichtung zum Pressenanfang zu einer Entlastung mit einer Dickenzunahme der Matte. Erst am Pressenende wird die Matte dann auf Solldicke kalibriert. Mit der Wegänderung einhergehend ist der

Druckverlauf der zu verpressenden Holzwerkstoffmatte. Die Verdichtungsphase führt hierbei zu einer Hochdruckbereich, die Entlastungsphase zu einem Niederdruck- und die Kalibrierungsphase zu einem Mitteldruckbereich. Durch die zeitlich geplante Abfolge unterschiedlicher Druckbereiche lässt sich bei der MDF-Herstellung das Rohdichteprofil manipulieren.

1.2 Problemstellung

Neben einem indirekten Zusammenhang zwischen Pressprogramm und Platteneigenschaften, der sich über das Rohdichteprofil ergibt, wird davon ausgegangen, dass sich das Pressprogramm auch direkt auf die Ausbildung der Eigenschaften auswirkt. Be- und Entlastungen der noch nicht vollständig gehärteten Matte führen hierbei je nach Zustand der jeweiligen Schichten zu Beeinträchtigungen bereits ausgebildeter Klebverbindungen oder verhindern die Festigkeitsentwicklung der sich ausbildenden Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Bisher waren systematische Untersuchungen über den direkten Einfluss von Be- und Entlastungen während der Heißpressung von Holzwerkstoffen auf die Platteneigenschaften nicht vorhanden. Kenntnisse über diese Zusammenhänge sind aber erforderlich für die gezielte Weiterentwicklung von Pressprogrammen, wie auch für die Auslegung von Pressensystemen.

Be- und Entlastungen während des kontinuierlichen Heißpressprozesses ergeben sich jedoch nicht nur aufgrund des Pressprogramms. Es lässt sich annehmen, dass beim Verpressen durch die Rahmenkonstruktion einer kontinuierlichen Heißpresse Dickenänderungen bzw. mit ihnen einhergehende Druckänderungen der Holzwerkstoffmatte verursacht werden. Diese anlagenbedingte Be- und Entlastungsphasen ergeben sich beispielsweise durch Druckvermindierungen zwischen den einzelnen Pressrahmen. So ist davon auszugehen, dass die Durchbiegung der Heizplatten zwischen den einzelnen Pressrahmen von kontinuierlich arbeitenden Pressen zu stetigen kurzzeitigen Be- und Entlastungen der durchlaufenden Matte führt. Die hierdurch mögliche Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in den äußeren Matenschichten mag eine Ursache dafür sein, dass die Biegefestigkeit von Platten aus kontinuierlichen Pressen im Allgemeinen niedriger als von Platten aus Taktpressen ist.

Neben den Druckänderungen zwischen den einzelnen Pressrahmen liegen noch kurzweiligere Be- und Entlastungen vor. Die Ursache liegt im Rollen- oder Stabkettenteppich, der zwischen Heizplatten und Stahlband mit nur halber Geschwindigkeit der Holzwerkstoffmatte durch die Presse gezogen wird. Jede Rolle verursacht somit eine Linienlast, die sich entgegen der Vorschubrichtung über die Matte bewegt. Derartige Druckunterschiede sind aber wahrscheinlich sehr gering und sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht messtechnisch untersucht werden.

Die kontinuierliche Aufzeichnung des von der Heißpresse auf die Holzwerkstoffmatte übertragenden Pressdruckes ist bisher nicht möglich. Bisher lässt sich der auf die Holzwerkstoffmatte wirkende Pressdruck nur indirekt über den hydraulischen Druck in den Presskolben berechnen und ist dementsprechend mit Ungenauigkeiten behaftet.

1.3 Forschungsziele

Die Ziele dieser Arbeit sollen folgend aufgelistet werden.

- Im Rahmen dieser Arbeit sollen anlagen-, wie auch steuerungsbedingte Be- und Entlastungsphasen in kontinuierlich arbeitenden Heißpressen erfasst werden. Hierfür soll ein neues Messsystem entwickelt werden, das den unmittelbar auf die Matte wirkenden Pressdruck kontinuierlich messen kann. Das Messsystem wird aus einem Drucksensor sowie einen daran anschließbaren Datenlogger bestehen.
- Der direkte Einfluss von Be- und Entlastungsphasen während der Heißpressung von Holzwerkstoffmatten auf die mechanischen Eigenschaften der fertigen Platte soll bestimmt und erklärt werden. Des Weiteren sollen die Auswirkungen der Be- und Entlastungsphasen auf die fortschreitende Ausbildung lokaler Festigkeiten der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix während des Pressvorgangs ermittelt werden.
- Die Ergebnisse sollen zu einer Erweiterung eines Simulationsmodells des Heißpressvorgangs führen, um somit zu einer Verbesserung der Vorhersage von Platteneigenschaften und hier insbesondere der Querkzugfestigkeit zu kommen.
- Die zusammengefassten Erkenntnisse dieser Arbeiten zu Grunde gelegt sollen weiterhin Maßnahmen erarbeitet werden, die unter Vermeidung kritischer Be- und Entlastungsphasen zu der Weiterentwicklung von Pressprogrammen beitragen können.
- Die angestrebten Ergebnisse der Arbeit sollen zur Optimierung sowohl der Verfahrenstechnik hinsichtlich des Heißpressvorgangs bei Holzwerkstoffen, als auch der konstruktiven Lösung von kontinuierlichen Heißpressen beitragen. Die Optimierung des Heißpressprozesses stellt sich bei betriebswirtschaftlichen Betrachtungen des Herstellungsprozesses von Holzwerkstoffen aufgrund seiner Kostenintensivität als sehr wichtig dar.

2 Stand des Wissens

Mit der Zusammenfassung der wesentlichen Literatur werden die wissenschaftlichen Grundlagen im Hinblick auf das Thema der Dissertation herausgearbeitet und zusammengeführt. Hierbei wird bevorzugt auf die physikalisch-chemischen Vorgänge innerhalb der zu verpressenden Matte während des Heißpressprozesses eingegangen. Im zweiten Schritt werden die für diese Arbeit entscheidenden Kenntnisse detaillierter aufgeführt, um eine Grundlage für eine theoretische und darauf folgende praktische Erarbeitung von Lösungswegen für die Bestimmung der Auswirkung von Druckschwankungen während des Heißpressprozesses auf die mechanischen Festigkeiten von Holzwerkstoffen zu schaffen.

2.1 Physikalisch-chemische Vorgänge während des Heißpressens

Grob betrachtet lassen sich diese Vorgänge nach der gängigen Literatur in folgende Teilbereiche einordnen: Wärme- und Stofftransport, Kompression der Matte und Relaxation der inneren Spannungen sowie Härtungsprozess des Klebstoffes. Die physikalischen Prozesse des Wärme- und Stofftransports sind eng miteinander gekoppelt und nicht voneinander zu trennen; auch in der gängigen Literatur werden die beiden Prozesse in der Regel zusammen dargestellt.

Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten untersuchen die Heißpressung von verschiedenen Holzwerkstoffmaterialien. Die hieraus abgeleiteten Erkenntnisse lassen sich jedoch allgemein auf Holzwerkstoffplatten übertragen und sind nicht notwendigerweise als produktspezifisch zu betrachten.

2.1.1 Gekoppelter Wärme- und Stofftransport

Der Wärmetransport beginnt mit dem ersten Kontakt der Spanmatte mit den Pressplatten (Taktpresse) bzw. dem Stahlband (kontinuierlich arbeitende Presse). Im Folgenden soll der Begriff Pressplatte das Stahlband der kontinuierlich arbeitenden Presse mit einschließen. Die Ursache für den Wärmetransport findet sich in dem sich ausbildenden Temperaturgradienten zwischen der heißen Pressplatte und der kühleren Spanmatte. Die übertragende Wärme reguliert sich über den sich stetig über den Querschnitt der Matte ändernden Temperaturgradienten (Rackwitz 1954, Gefahrt 1977, Thoemen und Humphrey 2003). Diese Änderungen treten bezüglich des Richtungsvektors sowie der absoluten Größe auf (Schweitzer 1992).

Prinzipiell lassen sich drei Wärmeübertragungsarten in der Thermodynamik beschreiben: Strahlung, Konduktion und Konvektion. Für den hier gegebenen Prozess kommen nur Konduktion und Konvektion zum Tragen. Die Strahlung ist laut Strickler (1959) nur von untergeordneter Bedeutung. Gesamtdruckunterschiede führen hierbei zu konvektiven Transportvorgängen, während Partialdruckdifferenzen zu Diffusionsvorgängen führen (Baehr 1992). Diffusionsvorgänge sind reine Teilchenausgleichsprozesse, während Konvektionsvorgänge

Stoff- und Wärmeausgleichprozesse durch Gas- oder Flüssigkeitsbewegungen darstellen und eine schnellere Wärmeübertragung ermöglichen (Dobrinski 1988).

Nach Humphrey *et al.* (1989a) ist die Konduktion der Hauptparameter für die Wärmeübertragung von der Heizplatte zur berührten Mattenoberfläche. Den wichtigsten Übertragungsmechanismus innerhalb der feuchten Matte stellt nach Rackwitz (1954), Kamke und Casey (1988b) sowie Bolton *et al.* (1988) jedoch der konvektive Wärmetransport dar, der wiederum von einer zunehmenden Konduktion bei abnehmender Feuchte überlagert wird. Konduktion innerhalb der Matte tritt hauptsächlich nach Verdampfung des freien Wassers in Erscheinung, da ab diesem Zeitpunkt die aufzubringende Desorptionsenthalpie für eine weitere Konvektion steigt und die Konduktion energetisch an Einfluss gewinnt. Dieser Wechsel der Transportmechanismen findet somit zuerst an der Mattenoberfläche statt und verlagert sich mit fortschreitender Austrocknung der einzelnen Schichten kontinuierlich in die Mattenmitte. Da sich während des Heißpressvorgangs eine erhöhte Feuchtigkeit der Mattenmitte gegenüber den Randschichten einstellt, muss nach Gefahrt (1977) und Thoemen (2000) erst dieser erhöhte Widerstand mit einer verlängerten Verdampfungszeit des Wassers überwunden werden, bevor die Mattenmitte weiter konduktiv erwärmt werden kann.

Hierbei ist es wichtig zu verstehen, dass zwischen den beiden genannten Wärmeübertragungsmechanismen zwar ein quantitativer Wechsel beim Trocknen der Matte stattfindet, dass aber selbst im feuchten Zustand des Vlieses der konduktive Wärmetransport Voraussetzung für die Konvektion ist und beides gleichzeitig ablaufende Prozesse sind. Mathematisch lässt sich die Konduktion durch das Fourier'sche Gesetz (Gleichung 1) beschreiben:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dl} \quad (1)$$

Fourier drückt damit aus, dass die durch eine Fläche A in einer bestimmten Zeit dt hindurchtretende Wärmemenge dQ der Fläche und der pro Länge dl wirksamen Temperaturdifferenz dT (Temperaturgradient) proportional ist. Dabei strömt die Wärme immer in Richtung des Temperaturgefälles, was in Fourier's Gesetz durch das Minuszeichen Beachtung findet. Die Darstellung des konvektiven Wärmetransports ist über ein Gleichungssystem möglich, welches den Gastransport und die Phasenübergänge des Wassers berücksichtigt (Thoemen und Humphrey 2003). Die vollständige Wiedergabe und Diskussion des Gleichungssystems würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit überschreiten und wird deshalb nicht weiter behandelt.

Durch die von den Heizplatten übertragende Energie und die sich in der Spanmatte befindende Feuchtigkeit bildet sich in der Matte ein Wasserdampfdruckgradient aus (im Folgenden kurz Dampfdruck genannt). Die Feuchtigkeit wird durch im Zellwandmaterial gespeichertes, durch eventuell zusätzlich auf die Oberfläche aufgebracht, durch im Klebstoff enthaltenes und durch die Kondensationsreaktion des Klebstoffes entstehendes Wasser bereitgestellt.

Der entstehende Gesamtgasdruckgradient ist, wie auch schon der Temperaturgradient, veränderlich in Größe und Richtung (vertikal und horizontal zur Mattenoberfläche) und verändert sich laufend während der Presszeit. Der Gesamtgasdruck (p_{ges}) setzt sich nach dem Gesetz von Dalton (Gleichung 2) aus dem partialen Wasserdampf- (p_d) und Luftdruck (p_l) zusammen:

$$p_{ges} = p_d + p_l \quad (2)$$

Darüber hinaus tragen noch flüchtige Holzinhaltstoffe und Bestandteile des Bindemittels mit einem geringfügigen Anteil zum Gesamtgasdruckgradient innerhalb der Holzwerkstoffmatten bei. Größe und Richtung des Gesamtgasdruckes bzw. -stromes sind von der Permeabilität der Holzwerkstoffmatte und damit u.a. von der Partikelgeometrie, dem Schichtaufbau, der sich über die Presszeit laufend ändernden Rohdichte und nicht zuletzt von der Schließzeit der Presse abhängig (Denisov *et al.* 1975, Rauch 1984, Kamke *et al.* 1988a, von Haas 1998).

Wie einleitend erwähnt, erkennt man bei der Betrachtung der Wärmeübertragung und des Verdampfungsprozesses (Druckaufbau) während der Holzwerkstoffherstellung einen engen Zusammenhang des Massen- oder auch Stofftransports (Avramidis und Hatzikiriakos 1995). Bei dieser Massenbewegung erfolgt ein Luft- und Wasserdampftransport vertikal zur Mattenoberfläche in Richtung der Plattenmitte und horizontal in Mattenebene hauptsächlich in Richtung der seitlichen Plattenkanten, immer dem Gasdruckgradienten folgend (Strickler 1959). Die Dampfbewegung in Richtung Mattenmitte, wird nach Gefahrt (1977) als Siedewelle benannt und zeichnet sich als elementarer Schritt bei der Plastifizierung der Holzpartikel aus, da durch die Wärme sowie die mittransportierte Feuchte eine Erweichung des Holzwerkstoffmattenmaterials schneller erreicht wird (Suchsland 1967).

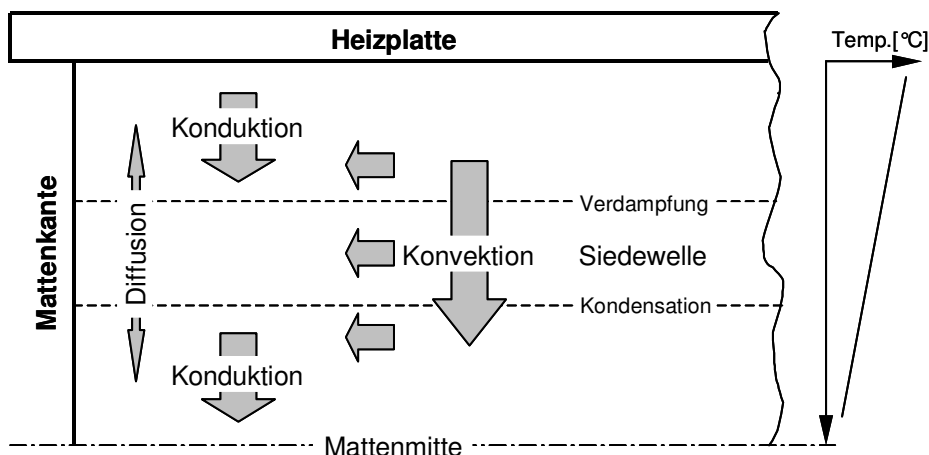


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Stoff- und Wärmetransporte (Verändert nach Gefahrt 1977 sowie Thoemen und Humphrey 2001).

Die durch die von den Heizplatten emittierte Wärmemenge und in der Matte enthaltene Feuchtigkeit entstehende Siedewelle bewegt sich in Richtung des Temperaturgefälles von der Mattenoberfläche zur Mattenmitte. Diese Bewegung entsteht als Ausgleich eines Gesamtdruckgefälles, welches sich durch die Zunahme des Dampf- sowie des Luftdruckes durch die unterschiedliche Verdichtung der Matte ausbildet (Rackwitz 1954, Thoemen und Humphrey 2003). Die Front des verdampften Wassers kondensiert in kühleren Schichten und gibt damit die latent gespeicherte Verdampfungswärme wieder ab. Folglich steigt die Temperatur in dieser Schicht relativ schnell an. Durch den sich ausbildenden Temperaturgradienten zu tieferliegenden Schichten werden diese zunächst konduktiv erwärmt (Rackwitz 1954). Sobald das kondensierte Wasser erneut verdampft wird, kommt es darüber hinaus zu einer konvektiven Erwärmung der tieferliegenden Schichten (Thoemen und Humphrey 2003). Abbildung 4 verdeutlicht diese Zusammenhänge schematisch.

Mathematisch lassen sich diese Stoffbewegungen über relativ einfache Gleichungen beschreiben. Nach dem ersten Fick'schen Gesetz (Gleichung 3) gilt für Diffusionsvorgänge:

$$\overset{\circ}{V}_D = -D \frac{dp}{dl} \quad (3)$$

Das Fick'sche Gesetz sagt somit aus, dass der diffusive Massenfluss $\overset{\circ}{V}_D$ direkt proportional zum wirkenden Partialdruckgradienten dp/dl (Luft oder Dampf) ist. Der Proportionalitätsfaktor D kennzeichnet den Diffusionskoeffizienten.

Die Konvektion stellt sich nach Darcy (Gleichung 4) in folgender Form dar und ist auf laminare Strömungen anwendbar:

$$\overset{\circ}{V}_K = -\frac{K}{\eta} \frac{m}{RT} p \frac{dp}{dl} \quad (4)$$

$\overset{\circ}{V}_K$	konvektiver Massenfluss [kg/(m ² s)]
K	Permeabilitätskoeffizient [m ²]
η	dynamische Viskosität des Gases [Pa s]
m	molekulare Masse [kg/mol]
R	Gaskonstante [J/(mol K)]
T	absolute Temperatur [K]
p	Gasdruck [Pa]
dp/dl	Gasdruckgradient [Pa/m]

Das Gesetz von Darcy zeigt damit, dass der konvektive Massenfluss $\overset{\circ}{V}_K$ direkt proportional zum wirkenden Gesamtdruckgradienten dp/dl und umgekehrt proportional zur dynamischen Viskosität des Gases ist.

Da Diffusionsvorgänge in der Regel langsamer als konvektive Prozesse ablaufen, ist die Relevanz der Diffusion nach Thoemen und Humphrey (2003) hauptsächlich bei der Konditionierungsphase nach dem Heißpressen gegeben, da sich dann nur noch Partialdruckdifferenzen ausbilden und die Konvektion in den Hintergrund gerät.

2.1.2 Rheologisches Verhalten

2.1.2.1 Kompression

Durch den beschriebenen Wärme- und Feuchtigkeitseinfluss wird das Mattengut plastifiziert und kann somit leichter durch den Pressdruck verdichtet werden. Der Grad der Plastifizierung des Mattengutes ist dabei hauptsächlich von der Holzpartikelfeuchte und der -temperatur abhängig (Rackwitz 1954, Fahrni 1956, Kollmann 1957, Buschbeck und Kehr 1960, Suchsland 1967, Kavvouras 1977). Das Verhältnis von Temperatur zu Feuchtigkeit, bei dem die größte Zunahme der Plastifizierung zu verzeichnen ist, ist beim Erreichen des Glasübergangspunktes (Holzerweichungspunkt) des Holzes gegeben (Kamke und Casey 1988b, Römpf 1995, von Haas 1998, von Haas und Frühwald 2000).

Das Verdichtungsverhalten von Holzwerkstoffmatten kann nach von Haas (1998) mit folgender Gleichung 5 hinreichend beschrieben werden. Die bei der Verdichtung auftretende Spannung σ hängt hierbei von der Temperatur ϑ , der Rohdichte ρ und der Holzfeuchte u ab. Dem Einfluss verschiedener Partikel (Fasern, Späne, Strands) wird mit den Regressionskoeffizienten α , β und χ Rechnung getragen.

$$\sigma = e^{\alpha u + \beta \vartheta + \chi} \rho^{e^{\alpha m u + \beta m \vartheta + \chi m}} \quad (5)$$

Allgemein lässt sich mit dieser Gleichung bestimmen, dass die Spannung mit steigender Feuchte und Presstemperatur sinkt und mit steigender Rohdichte zunimmt.

Der Einfluss der Partikelart ist in Abbildung 5 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass der Verdichtungswiderstand (Spannung) mit gröber werdenden Partikeln von Faser zu Strand zunimmt. Dieser Unterschied zeigt sich mit ansteigender Rohdichte zunehmend ausgeprägter.

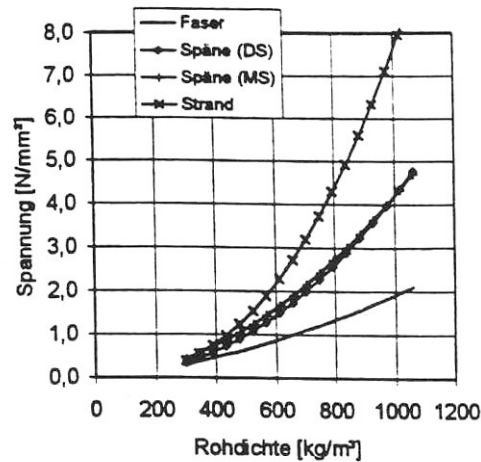


Abbildung 5: Spannungsverlauf bei Verdichtung von unterschiedlichem Mattenmaterial und einer Presstemperatur von 190°C (von Haas 1998).

Im Zuge der Verdichtung bildet sich das Rohdichteprofil (vgl. Abschnitt 2.2.2) aus, welches erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der fertigen Holzwerkstoffplatte hat (May und Keserü 1982, May 1983). Durch die zeitlich verschobene Plastifizierung des Deck- und Mittelschichtmaterials, kommt es durch die stärker verformbaren Deckschichten, kombiniert mit den höheren Rückstellkräften der kühleren Mittelschicht, zu einer stärkeren Verdichtung der äußeren Schichten (von Bismarck 1974, Hänsel *et al.* 1988). Der Verdichtungsprozess wird deshalb durch die Plattenhersteller gezielt variiert, um die speziellen gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Die Verdichtung kann sich aus verschiedenen Verdichtungsstufen, Entlastungsphasen und Stufen konstanten Druckes zusammensetzen. Der Verlauf ist hier theoretisch, insbesondere in kontinuierlichen Pressen, keine Grenzen gesetzt; nur die praktische Anwendbarkeit setzt hier Restriktionen.

Während des Verdichtungsprozesses kommt es zu verschiedenen Kreuzungsstellen, Verdichtungen und Krafteinflüssen an den Holzpartikeln. Nach Rackwitz (1954) werden Späne zu Verdichtungsbeginn auf Biegung beansprucht, um dann durch den sich aufbauenden Druck an ihren Überlappungsstellen verdichtet zu werden. An diesen Kreuzungsstellen baut sich ein Druck auf, der wesentlich höher als der von außen anliegende Pressdruck ist, da die für die einwirkende Presskraft vorhandene Fläche an den Überlappungspunkten wesentlich kleiner ist, als die vergleichbare Fläche der druckübertragenden Heizplatten. Da die Holzspäne annähernd parallel zur Mattenoberfläche liegen, wirkt dieser Druck senkrecht zur Faserichtung. Der Pressdruck deformiert nun die Zellwände des Spans und führt so zu einer plastischen, visko-elastischen und elastischen Deformation. Im Zuge der Deformation verringert sich das Porenvolumen sowohl zwischen den Spänen als auch im Span selbst bzw. innerhalb der einzelnen Zelle. Mit andauernder Verdichtung erhöht sich die Anzahl der Überlappungen,

die Presskraft übertragende Spanfläche wird größer, und der lokal wirkende Druck nähert sich dem äußeren Pressdruck an.

Von Haas (1998) verweist darauf, dass das Holzzellen versteifende Lignin hauptsächlich die entstehenden Druckspannungen bei einer einwirkenden Druckbelastung aufnimmt. Die Deformation der Holzpartikel geschieht hierbei hauptsächlich in den Frühholzzonen (Bodig 1965, Kunesh 1968). Tabarsa und Chui (1997) sehen die Ursache hierfür in den gegenüber den Spätholzzonen dünneren Zellwänden der Frühholzzonen.

2.1.2.2 Relaxation und Retardation

Das rheologische Verhalten der Matte lässt sich nach Thoemen *et al.* (2005) in guter Annäherung mit Hilfe des 5-Elemente Burgers-Humphrey Modells darstellen (Abbildung 6).

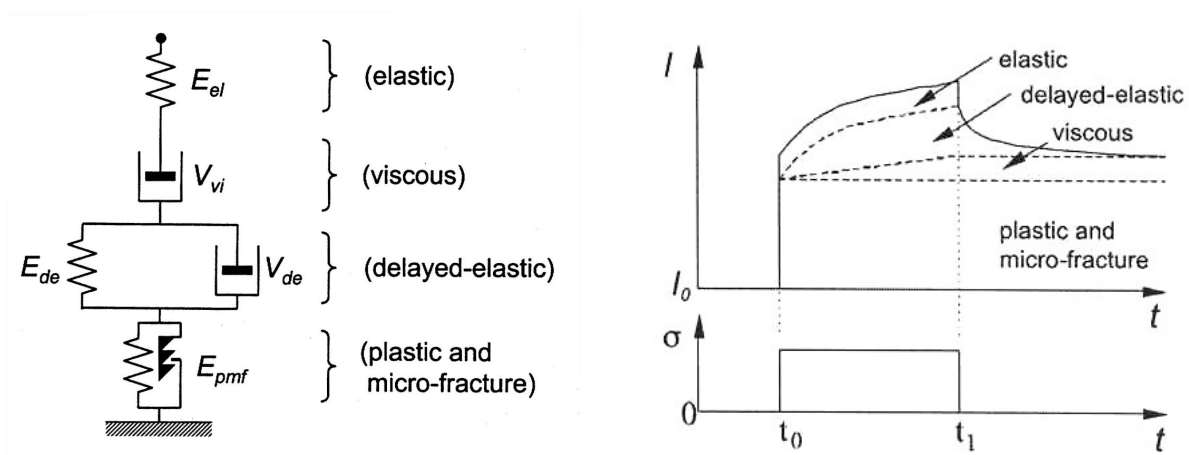


Abbildung 6: 5-Elemente Burgers-Humphrey Modell, links (Thoemen *et al.* 2005, nach Ren 1991) und Verformungskomponenten als Funktion Funktion der Zeit t und Spannung σ (Thoemen *et al.* 2005).

Das Modell setzt sich aus Federn (elastische Eigenschaften) und Kolben (dämpfende oder verzögernde Eigenschaften) zusammen, die in Reihe bzw. parallel geschaltet sind. Es kann benutzt werden, um Verdichtungs-, Relaxations- und Retardationsvorgänge im Allgemeinen oder innerhalb des Heißpressvorgangs von Holzwerkstoffmatten im Speziellen in Form eines Modells anschaulich darzustellen. Das 5-Elemente Burgers-Humphrey Modell besteht aus dem 4-Elemente Burgers-Modell zur Beschreibung des ideal-visko-elastischen Verhaltens, das von Ren (1991) durch ein weiteres Element zur Beschreibung von irreversibler Verformung (plastic and micro-fracture) erweitert wurde. Diese mikroskopischen Brüche treten nach Ren (1991) durch die relativ großen Deformationen während des Heißpressvorgangs von Holzwerkstoffmatten auf.

Eine Beschreibung des Verformungsverhaltens durch Druckeinflüsse kann vereinfacht mit Gleichung 6 geschehen.

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{el} + \Delta \varepsilon_{vi} + \Delta \varepsilon_{de} + \Delta \varepsilon_{pmf} \quad (6)$$

Wie aus Abbildung 6 und Gleichung 6 ersichtlich, setzt sich die resultierende Dehnung $\Delta\varepsilon_{el}$ aus einem elastischen $\Delta\varepsilon_{el}$, einem viskosen $\Delta\varepsilon_{vi}$, einem verzögert elastischen $\Delta\varepsilon_{de}$ und einem Mikro-Bruchanteil $\Delta\varepsilon_{pmf}$ zusammen.

Nach von Haas (1998), Sekino *et al.* (1999), sowie Thoemen *et al.* (2005) findet während und am Ende des Pressvorgangs eine Reduzierung der durch die Pressplatten induzierten Spannungen innerhalb der Matte statt. Dieser Spannungsabbau geschieht durch die fortschreitende Plastifizierung der Holzpartikel sowie durch das visko-elastische Verhalten des Holzes. Das visko-elastische Verhalten führt über Entspannungsvorgänge einerseits bei einem konstant gehaltenen Pressspalt zu einer Abnahme des spezifischen Pressdrucks, andererseits zu einer Rückfederung der Matte am Pressenauslass, dem sogenannten "springback". Diese Rückfederung setzt sich anteilmäßig sowohl aus dem Einfluss der Restspannung, verursacht durch das visko-elastische Verhalten innerhalb der Matte, als auch kurzfristig aus dem Gasdruck zusammen.

2.1.3 Härtungsprozess Holzpartikel-Klebstoff-Matrix

Der Härtevorgang des Klebstoffes führt zur Fixierung der einzelnen Partikel bzw. Plattenschichten (Schweitzer 1992) und ist abhängig von der Dauer und Höhe der auf das Bindemittel einwirkenden Temperatur. Suchsland (1967) gibt eine notwendige Temperatur von 100°C für die Kondensationsreaktion des Bindemittels an. Durch das Abbinden des Klebstoffes wird das Rohdichteprofil des Holzwerkstoffes nach Pressenauslass so weit wie möglich fixiert und die technologischen Eigenschaften gesichert. Auftretende Spannungen können vom kondensierenden Harz aufgenommen werden und verringern dadurch die inneren Spannungen der Holzwerkstoffplatte (Sekino *et al.* 1999).

Für die Verklebung von Reaktionsklebstoffen (Polykondensationsklebstoffe) werden eine ideale Leimfugendicke sowie ein idealer Pressdruck zur Verklebung angeführt (Habenicht 1990). Eine Unter- oder Überschreitung dieses Wertes führt zu verringerten Festigkeiten. Ein zu hoher Pressdruck führt hierbei zu einer hoch verdichteten Klebfuge, in die zusätzliche Spannungen induziert werden, die nachträglich zu einer Schwächung der Klebfestigkeit führen (Zeppenfeld und Grunwald 2005). Als Einflussfaktoren auf die Festigkeiten der Holzpartikel-Klebstoffmatrix werden die Klebfugendicke, die u.a. durch den Pressdruck und die Presstemperatur einer Beeinflussung unterliegen, die Klebstoffverteilung sowie der Abbindevorgang genannt. Allgemein ist der Pressdruck nach Zeppenfeld und Grunwald (2005) für die Benetzung der Oberfläche mit Klebstoff, für das Fließen und die gleichmäßige Verteilung des Klebstoffes verantwortlich.

Marra (1992) stellt ebenfalls grundlegende Gedanken über den Einfluss des Pressdruckes während der Verleimung von Holz an. So ist der Pressdruck zum einen für die Schaffung einer Leimfläche nötig, indem die Oberflächen zueinander gebracht werden, zum anderen für das Eindringen des Klebstoffs in die Oberfläche sowie für deren Benetzung mit Klebstoff. Für den Druck gibt es einen idealen Zustand bei dem optimale Festigkeiten ausgebildet werden.

Die erforderliche Druckhöhe gibt Marra mit 0,07 bis 0,14 N/mm² an. Diese erscheint jedoch recht gering und ist wohl nur auf die Vollholzverleimung anwendbar, da die aufgebracht Drücke bei der Holzwerkstoffherstellung aufgrund der Verdichtung der Holzpartikel wesentlich (bis zu 5 N/mm²) darüber liegen.

Hierbei ist zu ersehen, dass dem Faktor Pressdruckänderung keine besondere Aufmerksamkeit zukommt, wobei dieser entscheidend an der Ausbildung der Festigkeiten eines Holzwerkstoffes beteiligt ist. Aus der Tatsache, dass aus einer zu langsamen Schließgeschwindigkeit ein verringerter Pressdruck nach dem Schließen der Heißpresse folgert, wobei dies eine Aushärtung des Klebstoffes unter geringerem Druck und den daraus resultierenden Festigkeitseinbußen nach sich zieht, lässt sich ein Einfluss der Druckänderung ableiten. Allein aus diesen Gegebenheiten kann geschlossen werden, dass Druckniveau und Druckänderungen zu einer Beeinträchtigung des idealen Zustandes führen. Der Pressdruck ist somit indirekt für die Benetzung der Holzpartikel mit Klebstoff nötig, um zu einer Erhöhung der Kontaktflächen zu kommen, das Fließen des Klebstoffs zu unterstützen, sowie eine homogene Verteilung des Klebstoffs innerhalb der Klebfuge und damit eine homogene Schichtdicke für ideale Festigkeiten zu gewährleisten. Eine inhomogene Fugendicke des Klebstoffes führt zu Spannungen innerhalb der Klebfuge aufgrund von ungleichmäßiger Aushärtung der einzelnen Klebschichten.

Eine Zerstörung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix in der Art, dass es während des Heißpressprozesses zu mechanischen Brüchen innerhalb der Klebstofffuge kommt, erscheint bei dem geringen Aushärtungsgrad der Matte zum Ende des Pressvorgangs eher als unwahrscheinlich. Laut Heinemann (2004) liegt diese bei nur 10-20 % der erreichbaren Endfestigkeit im klimatisierten Zustand.

Ein zu hoher Pressdruck, der hier nicht weiter in seiner Magnitude bestimmt werden soll, kann zusätzlich zu Zerstörungen innerhalb der Zellwände der einzelnen sich überlappenden Holzpartikel führen. Aufgrund der Partikelgeometrie kommt es an den Überlappungsstellen zu Druckspitzen, die die Druckfestigkeit der betreffenden Zellwand übersteigen kann (nach Rackwitz 1954). Diese Beeinträchtigungen zeigen sich im anschließenden Querkzugfestigkeitstest an ausgehärteten Faserproben, da diese nicht in der Klebfuge bzw. im Übergangsbereich des Klebstoffes zum Zellwandmaterial geschehen sondern hauptsächlich in der S1 und S2 (Walther 2006).

Die möglichen Ursachen des Festigkeitsverlustes aufgrund von Druckschwankungen verursacht durch das Pressprogramm oder der Rahmenkonstruktion finden sich in den Grundlagen der Adhäsion zwischen Klebstoff und Holzpartikel. In der Literatur werden verschiedene Theorien für die Verbindung eines Klebstoffs mit dem zu verklebenden Medium erwähnt, des Weiteren werden verschieden Parameter genannt, die das Ausbilden speziell der Holzpartikel (oder Holz)-Klebstoff-Matrix beschreiben.

Marra (1992) teilt den Aufbau einer Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in 5 Zonen auf. 4 weitere Zonen sind nach ihm eher vernachlässigbar bei der Ausbildung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix (Abbildung 7).

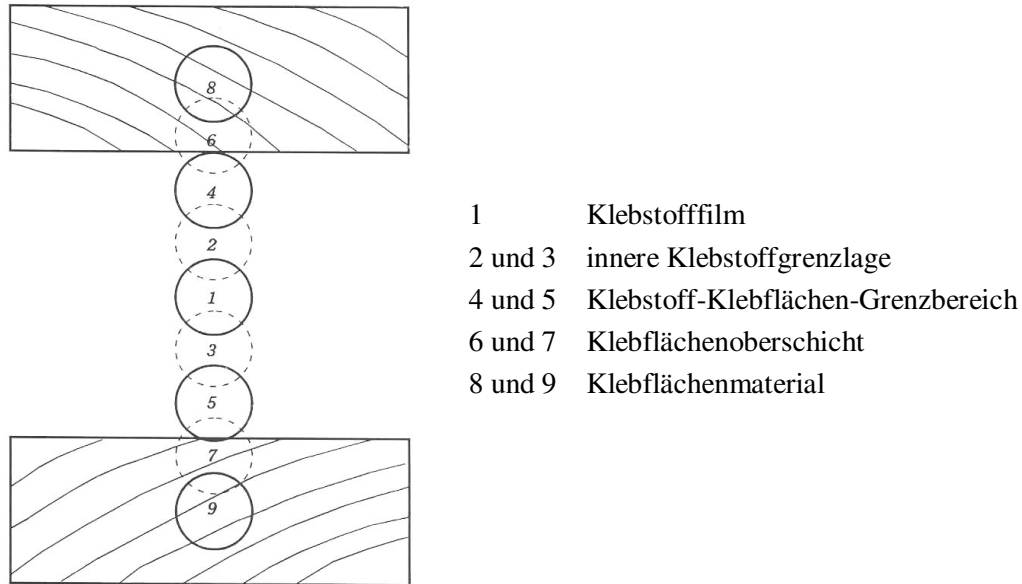


Abbildung 7: Vernetzung einer Klebstoffbindung. Vernachlässigbare Zonen sind schraffiert dargestellt (Marra 1992).

Kollmann *et al.* (1955) teilt die Adhäsion in die mechanische und spezifische auf. Er verweist weiterhin darauf, dass die mechanische Adhäsion nur bei porösen Oberflächen, wie z.B. Holz, bei denen der Klebstoff innerhalb der oberflächlichen Poren Verankerungspunkte findet, zu einem mechanischen Halt zwischen Klebstoff und Oberfläche führt.

1. Mechanische Verankerung

-
- 2. Adsorption
 - 3. Wechselwirkung zwischen Grenzflächen- und -schichten
 - 4. Diffusion des Klebstoffs in der Grenzschicht zum Holzpartikel
 - 5. Polare Anziehung
 - 6. Elektrostatische Anziehung
 - 7. Chemische Bindungen

**mechanische
Adhäsion**

**spezifische
Adhäsion**

Eine hinreichende Erklärung der Verklebung bei UF-, MUF- und PF-Klebstoffen stellen nach Grunwald und Zeppenfeld (2006) die ersten drei genannten Adhäsionstheorien dar, wobei der Einfluss der Diffusion als Bestandteil der mechanischen Verankerung fließend erscheint und als zusätzlicher Grund angeführt werden kann. Nach Dunky und Niemz (2002) sowie Kollmann *et al.* (1955) ist die Wechselwirkung zwischen Grenzflächen- und -schichten

(vgl. Abbildung 7, Zonen 4 und 5) hauptsächlich für die Adhäsion zwischen Klebstoff und Holzpartikel verantwortlich.

2.2 Einfluss von Druckänderungen

Nachdem die Grundlagen der physikalisch-chemischen Vorgänge während des Heißpressens in einer Holzwerkstoffmatte erläutert wurden, wird im Folgenden auf den Einfluss von Druckänderungen auf dieselbe eingegangen.

2.2.1 Direkte Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften

2.2.1.1 Während des Heißpressvorgangs

Auf die durch Be- und Entlastungen der noch nicht vollständig ausgehärteten Matte induzierten Schwächungen der Klebfugen bzw. der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix wurde in der wissenschaftlichen Literatur wie auch von industrieller Seite immer wieder hingewiesen.

Beispielsweise mutmaßt Jahic (2000) in seiner Arbeit über das Verpressen von Spänen bei höheren Feuchten (7 % vor der Beleimung) zu Spanplatten, dass die Leimfugen sehr wahrscheinlich in einem oder mehreren Querschnitten des Übergangs- bzw. des Mittelschichtbereichs beschädigt werden, wenn es zu einer zu frühen bzw. zu starken Entlastung der Matte am Ende des Pressvorgangs kommt. Hierbei wirken sowohl Zug- als auch Scherbeanspruchungen, durch die die Bruchdehnung der noch nicht vollständig ausreagierten Leimfugen erreicht werden kann. Bei einer zusätzlich betrachteten Überverdichtung der Spanmatte (>5 %) mit einer anschließenden Entlastung auf Zieldicke wurde ein starker Abfall der Querszugfestigkeit beobachtet, der wiederum mit der Überschreitung der Leimbruchgrenze erklärt wird. Hierbei lässt Jahic außer Acht, dass die Verdichtung eventuell selbst zu einer Beeinträchtigung der inneren Festigkeit führte, was dann wiederum in einer verstärkten Rückfederung nach dem Heißpressen messbar wäre.

Dunky und Niemz (2002) diskutieren unter anderem die Einflussgrößen während des Herstellungsprozesses von Holzwerkstoffen. Hierbei beschreiben sie den Verlauf der Mittelschichttemperatur während des Heißpressprozesses und kommen zu dem Schluss, dass es eine ideale Temperatur für den Zeitpunkt einer Nachverdichtung gibt. Die Durchwärmung der Matte sollte bis zu einer Plastifizierung der verwendeten Holzpartikel fortgeschritten sein, jedoch nicht so weit, dass schon ausgebildete Leimbrücken der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix aufgrund der Nachverdichtung wieder zerstört werden könnten.

Des Weiteren berichten Thole *et al.* (2000) über den Einfluss des Pressprogramms auf die Rohdichteprofilentwicklung bei kontinuierlicher MDF-Produktion. Sie zeigen anhand von Laborergebnissen, dass der Pressvorgang auf Solldicke in 2 Verdichtungsstufen einzuteilen sei. Hierbei sollte die zweite Verdichtungsstufe auf die Entdicke der Platte einsetzen, wenn die Abbindung des Klebstoffes in der Mittelschicht beginnt, um somit keine Festigkeitsverringernungen zu erreichen. Bei einer zu weit fortgeschrittenen Abbindung des Leimes

innerhalb der Mittelschichten könnten die bereits entstandenen Leimbrücken wieder zerstört werden.

Den Einfluss von Bewegung auf die Ausbildung der Leimfestigkeit erwähnt ebenfalls Tuohino (1984) in seiner allgemeinen Betrachtung über die Entwicklungen von Taktpresensteuerungen. Er stellt dort dar, dass eine Verringerung der Festigkeit durch jegliche Bewegung während des Härtungsvorgangs folgern muss.

Denisov (1973) stellte dar, dass bei der Überwachung des Pressvorgangs bei der Spanplattenproduktion auf den gegenseitigen Einfluss der inneren (Dampfdruck, Drucksteifigkeit des Plattenquerschnitts) und äußeren Kräfte (Pressdruck) zu achten ist, um Dampfplatzer beim Öffnen der Taktpresse zu vermeiden. Die gegenseitige Einflussnahme dieser Kräfte kann zu periodisch auftretenden positiven, wie auch negativen Dickenänderungen der Platte während des Heißpressens führen, die die Ausbildung der Klebverbindungen zwischen den Partikeln stört und damit die Querkzugfestigkeit bzw. die Adhäsionskraft zwischen den Partikeln vermindert.

Wang und Winistorfer (2000) untersuchten dynamische Einflüsse auf die Ausbildung des Rohdichteprofiles bei OSB-Laborplatten. Sie zeigten, dass es während der Kalibrierungsphase zu einer Verdichtung der Mittelschichten kommt, die zwar die Kontaktfläche der Partikel erhöht und damit die Ausbildung neuer Leimbrücken unterstützt, jedoch schon bereits ausgebildete wieder zerstören kann.

Weiterhin bestimmten Wang *et al.* (2001b) die Eigenschaften von MDF-Laborplatten, die unter Anwendung mehrerer Nachverdichtungsstufen gepresst wurden. Sie weisen darauf hin, dass sich die Nachverdichtung von MDF-Matten unter derartigen Bedingungen negativ auf das Verhalten der Klebfugen des Endprodukts auswirken könnte, da bereits gebildete Klebverbindungen während des Pressens wieder zerstört werden. Eine durch die Nachverdichtung erhöhte Mittelschichtrohdichte resultierte somit nicht notwendigerweise in einer höheren Querkzugfestigkeit.

Eine der weiteren Arbeiten, in denen der direkte Einfluss von Be- und Entlastungen auf den Zustand von teilausgehärteten Klebfugen experimentell nachgewiesen werden konnte (wenn auch nur im Rahmen von Vorversuchen), wurde von Pecina und Bernaczyk (1991) durchgeführt. Sie beobachteten, dass sich eine kurze Phase vollständiger Druckentlastung beim Verpressen von harten Holzfaserplatten zwar positiv auf die Querkzugfestigkeit aufgrund der Entfernung des Dampfes, aber negativ auf die Biegefestigkeit auswirkt. Sie führen das Absinken der Biegefestigkeit auf eine Zerstörung besonders der in den äußeren Decklagen bereits eingetretenen Bindungen zurück und nehmen an, dass der extreme Druckwechsel das bereits ausgehärtete Bindemittel rissig werden lässt.

Eine umfangreiche Versuchsreihe von Schulte und Frühwald (1996) zur Position der Bruchebene beim Querkzugtest von industriell hergestellten MDF ergab, dass die Mehrheit der Brüche nicht in der Mittelschicht sondern in einem Bereich von 15-35 % bzw. 65-85 % der Plattendicke zu finden war, und zwar auch dann, wenn die minimale Dichte deutlich in der

Plattenmitte lag. Schulte und Frühwald erklären dieses Phänomen damit, dass es bei der Nachverdichtung der Mittelschichten zu einer nachträglichen Veränderung der Mattenstruktur in den Übergangszonen kommt, und dass dieses vor allem durch anschließende Entlastungsschritte zu einer Zerstörung bereits ausgebildeter Klebverbindungen führen könne.

Die Beobachtungen von Schulte und Frühwald stimmen mit denen von Xu und Winistorfer (1995) überein, die an MDF- und OSB-Proben die Querkzugfestigkeit getrennt für die einzelnen Mattenschichten bestimmt haben. Die Untersuchungen ergaben, dass die Schicht mit der minimalen Querkzugfestigkeit nicht zwangsläufig mit der Position des Dichteminimums übereinstimmen muss. Zusätzlich zeigten sie besonders an den untersuchten OSB Proben, dass die Schicht mit den höchsten Rohdichten nicht selbstverständlich zu den höchsten Querkzugfestigkeiten führen muss. Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse belegen damit ebenfalls einen Einfluss auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix.

Pichelin *et al.* (2002) stellt bei Labor-OSB-Platten mit einer Mattenfeuchtigkeit von 24 % fest, dass die in der Industrie üblicherweise zur Anwendung kommende Entgasungsphase unvorteilhafter ist, als die Verwendung hoher Feuchtigkeiten für die Erzielung gleicher Plattenqualitäten. Er begründet diese Aussage mit dem möglichen Brechen von Leimbrücken während einer an eine Überverdichtung anschließende Dekompressionsphase bei Matten mit geringem Feuchtigkeitsgehalt. Des Weiteren erwähnt Pichelin hierbei die mögliche Zerstörung von Zellwänden bei einer Überverdichtung mit den einhergehenden negativen Auswirkungen auf die Platteneigenschaften.

Die Zerstörung von Plattenmaterial erwähnt ebenfalls Marra (1992) indem er darlegt, dass es in Deckschichten bei einer verspätet aufgebrachtten Hochdruckzone in einer Taktpresse aufgrund der Voraushärtung zu inneren Brüchen kommen kann. Bei der Überschreitung eines gewissen Druckniveaus kann es zusätzlich zu Zerstörungen und Deformationen des Holzes (Zone 8 und 9) und der Übergangszone von Holz zum Klebstoff (Zone 6 und 7) kommen (Abbildung 7). Die Zonen 2, 3, 6 und 7 sind demnach für eine Zerstörung oder Beeinträchtigung vernachlässigbar.

Die aufgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass es bei der Be- oder Entlastung einer bereits teilweise ausgehärteten Holzwerkstoffmatte zu lokalen Spannungen innerhalb der Matte kommen kann, welche die bis dahin ausgebildeten Festigkeiten der Klebfugen übersteigen. Es ist weiter davon auszugehen, dass die induzierten Verformungen um so stärker von den Klebfugen aufgenommen werden müssen, je unnachgiebiger die Holzpartikel sind. Dieses würde bedeuten, dass Be- und Entlastungen der Matte um so weniger zu einer nachträglichen Zerstörung von Klebverbindungen führen und sich damit negativ auf die Eigenschaften der fertigen Platten auswirken werden, je stärker das Holzmaterial plastifiziert ist und je kleiner die verwendeten Holzpartikel (z.B. Fasermaterial) wären.

Eine Zusammenfassung der aufgeführten Literaturstellen findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Literaturstellen für den Einfluss von Druckänderungen. k.A.: keine Angaben, E: Entlastung, V: Verdichtung, ZS: Zwischenschicht, ZW: Zellwand

Autor (Jahr)	Werkstoff	Klebstoff	Ursache	Wirkung
Denisov (1973)	Span	k.A.	E, V	Klebverbindung
Tuohino (1984)			E, V	Festigkeit
Pecina, Bernaczyk (1991)	Faser	Lignin-P	E	Biegefestigkeit
Marra (1992)			V	ZW-Bruch
Xu und Winistorfer (1995)	Faser, Strand	MUF, PF		Bruchfläche ZS
Schulte, Frühwald (1996)	Faser, Span	UF	V	Bruchfläche ZS
Jahic (2000)	Span		E, V	Leimfuge
Thole <i>et al.</i> (2000)	Faser	k.A.	V	Leimbrücken
Wang, Winistorfer (2000)	Strand	PF	V	Klebverbindung
Wang <i>et al.</i> (2001)	Faser	UF	V	Klebverbindung
Pichelin (2002)	Strand	Tannin	V, E	ZW-Bruch
Dunky und Niemz (2002)			V	Leimbrücken

2.2.1.2 Unmittelbar nach dem Heißpressvorgang

Die Arbeit von Pichelin *et al.* (2001) führt zu einer gesonderten Betrachtung der Zerstörung von Leimbrücken durch den Einfluss der Restspannungen am Pressenauslass. Das Öffnen der Presse, bzw. das Auslaufen der Matte aus der Presse stellt eine Druckverminderung dar, wie sie auch während des Pressvorgangs durch Entgasungsphasen stattfinden kann. Die absolute Druckverminderung ist zwar als größer anzusehen, dennoch bleibt das Prinzip der Zerstörung durch Druckwechsel und den damit einhergehenden Dickenänderungen erhalten. Diese nachträgliche Zerstörung von Leimbrücken wird von Pichelin *et al.* (2001) dargestellt, indem er erläutert, dass die in der Matte gespeicherten Restspannungen nach dem Pressenende zu Dickendehnungen der Matte führen. Dieses "Rückfedern" zerstört demnach teilweise die noch nicht völlig ausgehärteten Leimbrücken.

Nach Pichelin *et al.* (2002) führen die während des Heißpressens vom Klebstoff aufgenommenen Spannungen zu einer Zunahme der daraus resultierenden Querkzugfestigkeit, die sich durch folgende Gleichung 7 beschreiben lässt:

$$QF = LF - ES - DD, \quad (7)$$

wobei QF die Querkzugfestigkeit, LF die Festigkeit des ausgehärteten Leimes, ES die Eigenspannung der Matte und DD der Dampfdruck ist. Können ES und DD vermindert werden, so erlaubt dies den Schluss einer höheren QF . Eine Dampfdruckerniedrigung erfolgt z.B. durch die Kühlung der Matte im hinteren Pressenbereich (Roll 2001), eine Erniedrigung der Restspannung oder Eigenspannung kann durch höhere Temperaturen und Feuchten innerhalb

der Matte erreicht werden. Ein völliger Abbau der Spannungen ist hierdurch jedoch nicht möglich (v. Haas und Frühwald 2001).

Nach von Bismarck (1974) ist die günstigste Presszeit erreicht, wenn die Restspannung zwischen 25 und 40 % der Querkzugfestigkeit liegt. Denisov und Juskov (1974) sehen diesen Punkt erreicht, wenn die Querkzugfestigkeit größer ist als die restlichen, inneren Kräfte innerhalb der Matte beim Öffnen der Presse.

May (1970) beschreibt in seiner Arbeit über Einflüsse bei der Spanplattenherstellung, dass der Gegendruck der Matte während des Verpressens aus drei Bestandteilen besteht. Er erwähnt hier den Dampfdruck, den Verdichtungswiderstand der Späne und eine elastische Rückfederung nach dem Pressenende. Diese Rückfederung entsteht, wenn sich die Verdichtung mit der Aushärtung der Spanmatte überlagert und die Spannungen in ausgehärteten Matenschichten nur noch elastisch aufgenommen werden können.

Von Haas (1998) äußert sich in seiner Dissertation über den Einfluss einer sich ändernden Vorlastzeit bei gleicher Presszeit auf die Querkzugfestigkeit von Spanplatten. Er zeigt auf, dass sich mit zunehmender Vorlastzeit die Restspannungen in der Matte verstärken und zu einem erhöhten Rückfedern nach dem Heißpressprozess führen. Hierbei können ausgebildete Leimbrücken brechen.

Den negativen Einfluss der Rückfederung, bzw. der Restspannungen auf die Ausbildung der Querkzugfestigkeit bestätigen u. a. die Arbeiten von Kollmann (1957), Stegmann und Bismarck (1967), Bolton *et al.* (1989), Irle and Bolton (1991) Wang und Winistorfer (2000).

2.2.1.3 An der fertigen Platte

Das Querdruckverhalten von Holzwerkstoffen, gleichbedeutend mit der Druckfestigkeit senkrecht zur Oberfläche, wurde in der Literatur bisher wenig untersucht. Doch gerade im heutigen Markt der ansteigenden Laminatproduktion gewinnt diese Fragestellung an Bedeutung. Die Relevanz im Rahmen dieser Arbeit ergibt sich aus den während des Heißpressprozesses aufgelisteten Beeinträchtigungen der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix mit den daraus abgeleiteten Festigkeitseinbußen, die sich selbstverständlich auf die Qualität des fertigen Produktes auswirken. Es können somit bei der Weiterverarbeitung zu Laminatprodukten und in der Endbenutzung aufgebrauchte Querkräfte weniger zerstörungsfrei in der Platte aufgenommen werden als in einer Platte mit intaktem Holz-Klebstoff-Verbund.

Schwab (2003) untersuchte den Einfluss von Querdruckbeanspruchungen auf Spanplatten. Er bestimmte hierbei die für eine gewisse Stauchung aufzubringende Druckspannung. Aus den gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen leitete er die zulässige Druckspannung ab, bei der die Stauchung den elastischen Bereich nicht übersteigt und zu keinen plastischen Deformationen führt. Ob die Überschreitung mittels größerer Stauchungen zu einer Schädigung der ausgehärteten Klebstoffbrücken führt, konnte aus anschließenden Scherprüfungen an den vorher belasteten Proben aufgrund der großen Streuung der Messwerte nicht sicher gefolgert werden. Schwab deutete jedoch an, dass die Scherfestigkeit und damit die Festigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix erst ab einer Stauchung von über 20 % signifi-

kant verringert wird, wobei eine höhere Stauchung bei im Vergleich dickeren Proben und Holzwerkstoffen aus gröberen Partikeln (OSB) mit vergleichbarer Probenrohddichte aufgebracht werden muss.

Den Einfluss der Partikelgröße des belasteten Werkstoffes auf die Druckfestigkeit stellte Neusser (1966) dar. Hierbei zeigte sich, dass Vollholz- und Sperrholzproben im Gegensatz zu Faser- und Spanplatten einen Grenzbereich unter Druck aufweisen, bis zu dem keine bzw. nur eine geringe Dickenänderung aufgrund von Quetschung erfolgt (Abbildung 8).

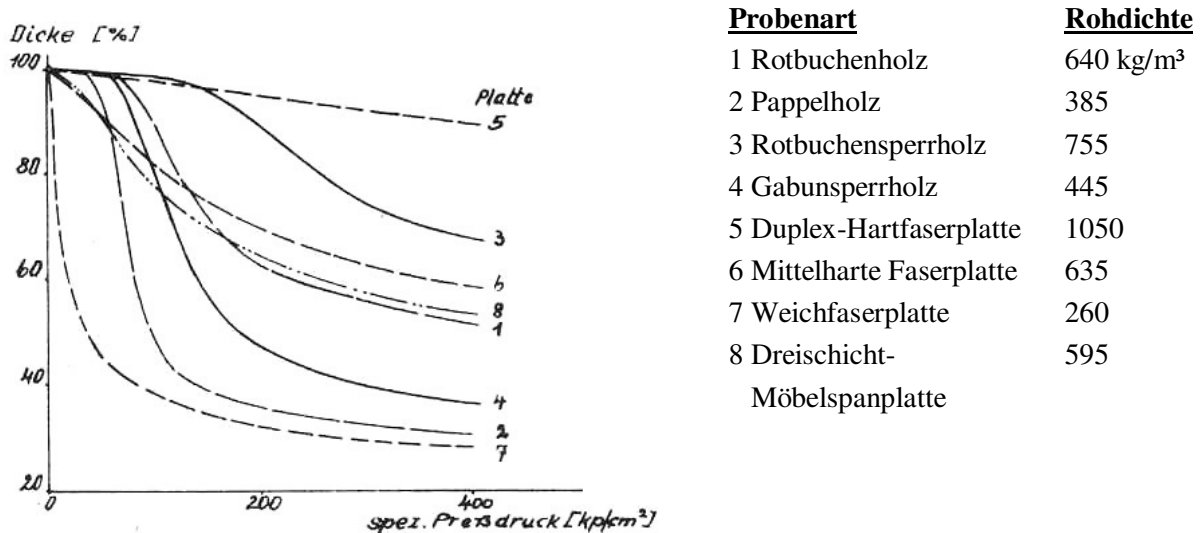


Abbildung 8: Dickenabnahme von Proben unter Flächendruck (Neusser 1966).

Vergleichbar aufgrund der Rohddichte sind das Rotbuchenvollholz, die mittelharte Faserplatte und die Dreischicht-Möbelspanplatte. Die Dickenabnahme von Span- und Faserplatte ist bei Drücken unterhalb 50 kp/cm² (5 N/mm²) vergleichbar höher als bei Vollholz. Selbst das Gabunsperrholz mit einer geringeren Rohddichte hat in diesem Bereich fast keine Dickenabnahme zu verzeichnen. Die Daten von Neusser bestätigen hiernach eine steigende Querdrukfestigkeit mit zunehmender Partikelgröße bzw. geringerem Zerteilungsgrad des Ausgangswerkstoffes Holz.

Kollmann (1957) stellte Untersuchungen über den Einfluss von sechs aufeinander folgenden Druckschwingungen auf verschiedene Rohstoffe an. Je gröber die Holzpartikel und je mehr die Druckbelastung senkrecht zur Faser (liegende Jahrringe) war, desto mehr kam der Einfluss der Frühholz-Spätholz-Schichtung zum Tragen. Hierbei nimmt das Holz eine andauernde schwingende Druckbelastung mit einem ansteigenden elastischen Anteil auf, wobei die plastische Verformungszunahme je Amplitude abnimmt. Bei Werkstoffen aus kleinen Holzpartikeln kommt es demnach verstärkt zu plastischen Deformationen mit entsprechenden negativen Auswirkungen auf die Festigkeitsentwicklung.

Die Untersuchungen von Kollmann erklären ebenfalls den durch Neusser (1966) dargestellten Verlauf der Dickenabnahme unter Querdruckeinfluss senkrecht zur Faser. Der Einfluss der Frühholz-Spätholz-Schichtung führt gerade bei Vollholzprodukten zu einer im Vergleich zu Werkstoffen aus kleinen Holzpartikeln bzw. Fasern geringen Dickenänderung bei niedrigen Drücken und einer hohen Dickenänderung bei hohen Drücken, die Kollmann mit Bruchvorgängen erklärt.

Gaber (1940) zeigt jedoch, dass hierbei die Unterscheidung in Nadel- und Laubholz beachtet werden muss. Nadelholz verhält sich bei einer Druckbeanspruchung mit geändertem Lastwinkel von 0° bis 90° umgekehrt zum Laubholz, welches eine maximale Quetschspannung bei einer Belastung senkrecht zur Faser aufweist, hingegen Nadelholz bei einer Belastung parallel zur Faser (Abbildung 9).

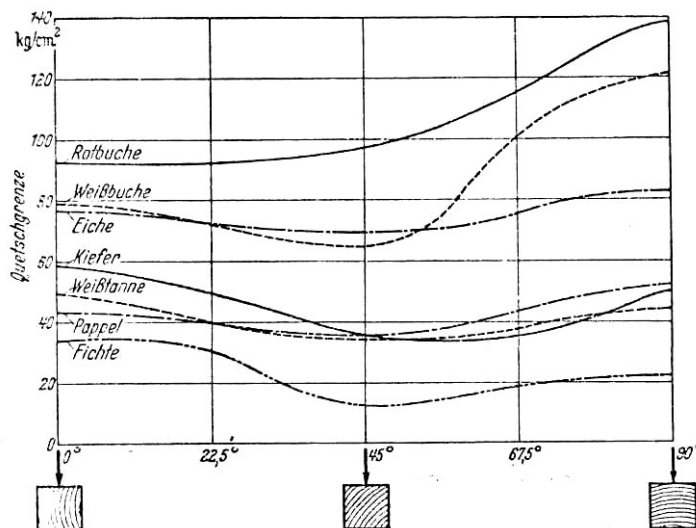


Abbildung 9: Quetschgrenze von Vollholzproben bei unterschiedlichem Lastwinkel (Gaber 1940).

Genauer untersucht als die soeben dargestellte statische Querdruckbelastung ist der Einfluss einer dynamischen Druckänderung zur Bestimmung der Schwingfestigkeit bzw. der Dauerfestigkeit. Die hieraus abgeleiteten typischen Wöhler-Kurven geben Auskunft über die Spannung, die der belastete Werkstoff dauerhaft ohne Bruch aushält. Hierbei sind jedoch keine Arbeiten bekannt, die eine dauerhafte Druckbelastung senkrecht zur Probenoberfläche zum Thema haben.

Die aus den Wöhlerkurven ablesbare Zeit- und Dauerfestigkeit wurde bereits von Kollmann und Krech (1961) an Spanplatten bestimmt, indem Proben einer dauerhaften Zug-Schwell und Wechselbiegebelastung ausgesetzt wurden. Aus den erhaltenen Werten für verschiedene Belastungsarten konnte dann zusammenfassend ein Dauerfestigkeits-Schaubild abgeleitet werden. Die Versuche an Spanplatten ergaben eine dauerhaft ertragbare Belastungen, die bei etwa 40 % der statischen Zug- und 25 % statischen Biegefestigkeit lag und damit dem Ergebnis an vergleichbar getesteten Hartfaserplatten entsprachen, die ebenfalls von Kollmann

getestet wurden. Die im Vergleich zu Vollholz geringeren Festigkeiten erklären Kollmann und Krech mit der Sprödigkeit der verwendeten Klebstoffe.

Die Abnahme der dauerhaft ertragenden Belastungen bis zum Bruch mit zunehmender Belastungshöhe bestätigt McNatt (1978). Er beschreibt die Ermüdungseigenschaften durch Zug- und Scherfestigkeits mittels logarithmischer Ausgleichsgeradenfunktionen, die er durch die normale S-Kurvenform legt.

In weiteren Untersuchungen an Spanplatten bestimmt McNatt (1975), dass nicht nur die Höhe der Belastung einen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaft hat, sondern ebenso die Geschwindigkeit, mit der diese auf die Probe aufgebracht wird. Bei durchgeführten Biege-, Zug- und Scherfestigkeitsversuchen zeigte sich, dass mit zunehmender Testgeschwindigkeit eine steigende Probenfestigkeit bei Versagen auftrat.

Bei Thomson *et al.* (2002 und 2005) wurde für die Erstellung der Wöhlerkurven von OSB, MDF und Grob-Spanplatten, die Anzahl der Schwingungen bis zum Ermüdungsbruch mittels Biege-, axialem Zug- und Drucktest sowie der Überprüfung der Scherfestigkeit herangezogen.

Die dargestellten Arbeiten bestimmen den Einfluss einer Belastung auf eine Probe indem sie von der Eigenschaft des Körpers, die jeweils aufgebrachte Belastung ohne Bruch (Dauerfestigkeit) oder mit Bruch (Zeitfestigkeit) aufzunehmen, auf die Festigkeit schließen. Keine der Arbeiten untersucht jedoch, ob auch dauerhaft oder nur kurzzeitig ertragende Belastungen zu Veränderungen der Holz-Partikel-Klebstoffmatrix führen bevor diese brechen. Diese Einflüsse wären über einen zusätzlich nachgeschalteten Festigkeitstest (Querzugfestigkeit-, Scherfestigkeitstest) überprüfbar. Des Weiteren zeigen die Arbeiten, dass es im Verhalten von unterschiedlichen Holzwerkstoffen unter Belastung zu Differenzen kommt, die auf einen Einfluss der Partikelgeometrie und damit der jeweiligen Holz-Partikel-Klebstoff-Matrix schließen lassen.

2.2.2 Auswirkungen auf das Rohdichteprofil

Die Auswirkungen von Druckänderungen aufgrund des Pressprogramms auf das Rohdichteprofil sind bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen. In den letzten Jahren wurde dabei verstärkt der Effekt von Nachverdichtungsschritten auf das Rohdichteprofil betrachtet (z.B. Wang *et al.* 2000, Thoemen und Humphrey 2003, Thole 2001).

Bei Holzwerkstoffen zeigt sich im Normalfall ein charakteristischer Dichtegradient über die Plattendicke, der sich in höheren Deckschicht- und niedrigeren Mittelschichtrohlichten zeigt. Das vertikale Rohdichteprofil bestimmt maßgeblich die technologischen Eigenschaften des fertigen Holzwerkstoffes, wie z.B. Oberflächenqualität, Kantenbearbeitbarkeit, Biegefestigkeit und Querzugfestigkeit (Winistorfer *et al.* 1996) und wird durch viele Faktoren während der Plattenherstellung beeinflusst. Einflussgrößen auf das Dichteprofil können Holzart, Spangeometrie, Feuchtigkeit, Belemung, Schüttgewicht und Pressenbedingungen sein (Ranta und May 1978). Suchsland (1967) fasst diese Faktoren für das Erreichen eines

von ihm sogenannten "Sandwich-Effektes", mit hoher Deckschicht- und niedrigerer Mittelschichtrohddichte, folgendermaßen zusammen: die Deckschicht sollte relativ feucht sein, einen hohen Bindemittelanteil haben und aus einem Rohstoff mit niedriger Druckfestigkeit und kleiner Partikelgröße bestehen. Die Mittelschicht sollte weniger feucht sein, einen geringeren Bindemittelanteil haben und aus einem Rohstoff mit höherer Druckfestigkeit und größeren Partikeln bestehen.

Nach Suchsland (1967), von Bismarck (1974) und Winistorfer (1996) führt eine feuchtere Matte, verbunden mit einer schnellen Pressschließzeit, zu einem größeren Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittelschicht, als bei einer trockeneren Matte, die mit einer langsamen Pressschließzeit hergestellt wird (Abbildung 132). Hänsel *et al.* (1988) führen den geringeren Rohddichteunterschied bei einer langsamen Verdichtungszeit hauptsächlich darauf zurück, dass zahlreiche Klebstoffbrücken innerhalb der Deckschichten bereits ausgehärtet sind, bevor durch die höheren Rückstellkräfte der Mattenmittelschichten eine Verdichtung der Deckschichten eintreten kann. Die Zunahme der Rohddichtedifferenzierung innerhalb des Mattenquerschnitts durch eine höhere Verdichtungsgeschwindigkeit zeigt sich nach von Bismarck (1974) nur bis zu einem Maximalwert, nach dem keine weitere Änderung des Verhältnisses von Deck- zu Mittelschicht mehr erkennbar ist (Abbildung 10).

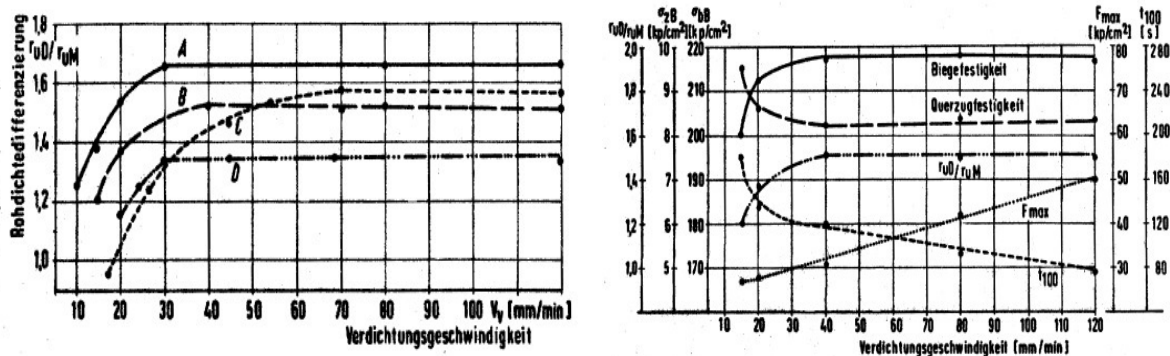


Abbildung 10: Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf Rohddichtedifferenzierung (links) und technologische Eigenschaften (rechts) (Bismarck v. 1974).

Wang *et al.* (2001a) zeigten anhand von im Labor hergestellten MDF- und OSB-Platten, dass es mit einer speziellen Presstechnik möglich ist, die Deckschichten noch während des Presszyklus weiter als nach der Erstverdichtung zu komprimieren. Hiermit weisen sie nach, dass die Deckschichten in der ersten Verdichtungsphase nicht vollständig aushärten, da sie sonst im Folgenden nicht mehr weiter zu komprimieren wären. Dieser Effekt wird in Abbildung 11 (links) verdeutlicht, bei dem die Oberflächenschichten aufgrund eines Nachverdichtungsschrittes während des Heißpressprozesses eine weitere Rohddichteerhöhung erfahren.

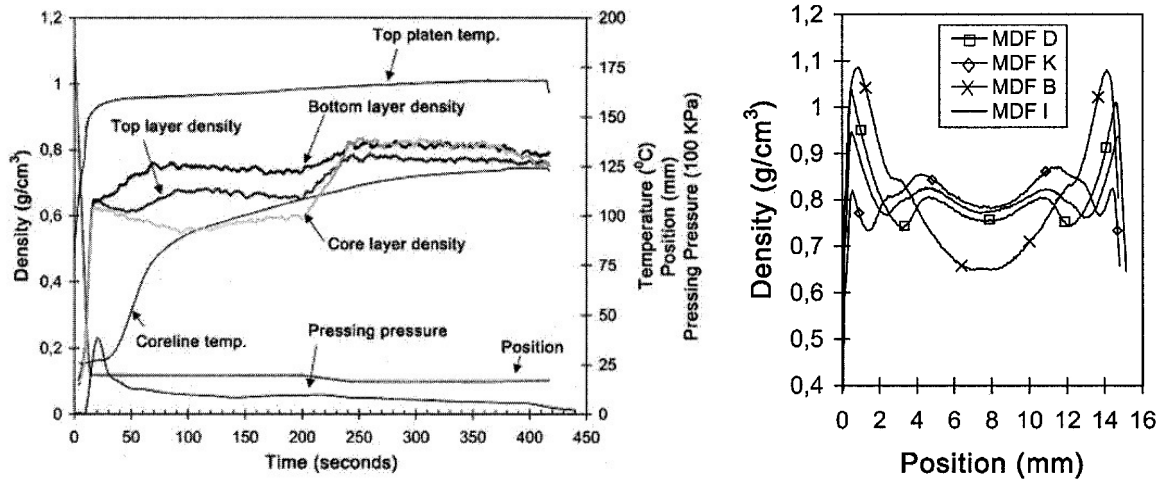


Abbildung 11: Auswirkungen eines schrittweisen Pressens auf Matteschichten während des Heißpressprozesses sowie daraus resultierender Erhöhung der Oberflächenschichten bei 200 s (links) und daraus resultierende Rohdichteprofile, rechts (Wang *et al.* 2001a).

Es zeigt sich, dass durch schrittweises Pressen nicht nur die Mittelschicht-, sondern auch die Deckschichtrohddichte manipulierbar ist.

Bei der Darstellung der Rohdichteentwicklung während des Pressvorgangs, arbeiteten Wang und Winistorfer (2000) zwei grundlegende Perioden heraus, die sie in insgesamt 5 verschiedene Entwicklungsstufen einteilten (Abbildung 12).

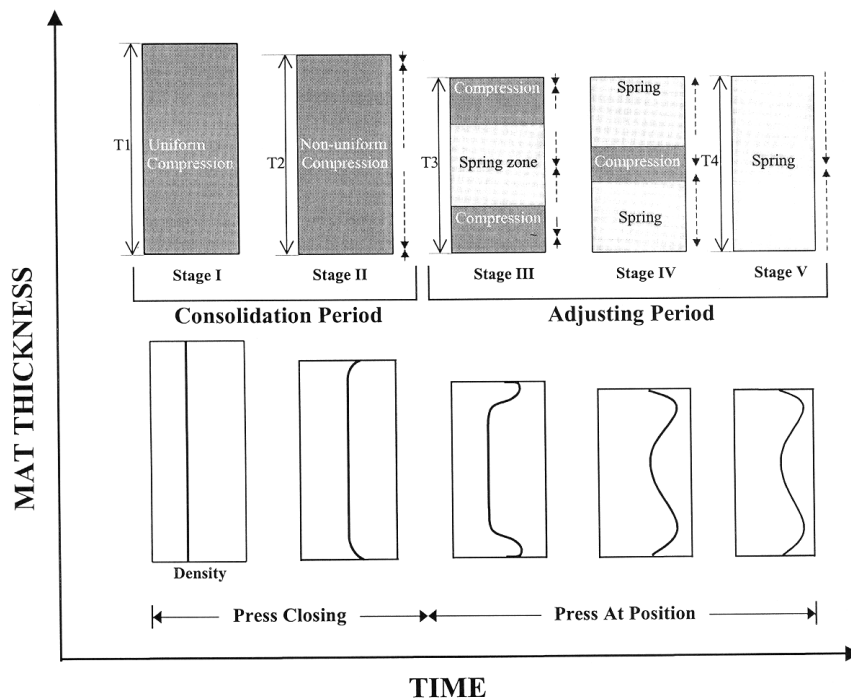


Abbildung 12: Schematische Darstellung der vertikalen Rohdichteprofilausbildung während des Pressens (Wang und Winistorfer 2000).

Die Hauptperioden teilten sie in eine Verdichtungsphase ein, an die eine Kalibrierungsphase anschließt, die nach Erreichen der Pressendposition einsetzt.

Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen muss immer ein Kompromiss zwischen der angestrebten Biege- und Querkzugfestigkeit getroffen werden, da bei einer gleichbleibenden mittleren Rohdichte sowie einer konstanten Plattendicke entweder eine hohe Deckschicht- mit einer niedrigen Mittelschichtrohndichte oder eine im Verhältnis dazu niedrigeren Deckschicht- mit einer höheren Mittelschichtrohndichte verbunden ist. Bei konstanter Durchschnittsdichte folgt also, dass bei einer unter diesen Bedingungen erhöhten Deckschichtrohndichte eine Reduzierung der Rohdichte in Mattenmitte erfolgen muss (Hänsel *et al.* 1988). Diesen aus der Festigkeitslehre begründbaren Sachverhalt beschreibt bereits Kollmann (1957), indem er festhält, dass eine höhere Festigkeit bzw. Dichte der Deckschicht mit einer einhergehenden Widerstandsmomentenerhöhung zu einer Biegefestigkeitszunahme führt.

Keylwerth (1958) entwickelte eine Theorie zur Mechanik von mehrschichtigen Platten und wies nach, dass sich die resultierenden Eigenschaften einer Platte aus den Eigenschaften der einzelnen Schichten ableiten lassen, die wiederum eng mit den jeweiligen Dichten korreliert sind.

Nach Gressel (1981) korreliert das Rohdichtemaximum straff mit der Brinellhärte und weniger eindeutig mit dem Biege-E-Modul. Die für Qualitätskriterien wichtigen Korrelationen zwischen Rohdichte und Querkzug- sowie Biegefestigkeit bei Industriespanplatten sind im Falle der Querkzugfestigkeit nicht eindeutig (Schulte und Frühwald 1996a, Kruse *et al.* 1996). Plath und Schnitzler (1974) sowie May (1983) weisen in ihren Versuchen eine straffe Korrelation zwischen dem Rohdichte- und Querkzugprofil aus, die jedoch bei einem Vergleich mit der mittleren Rohdichte weniger zuverlässig erscheint. Maku und Hamada (1955) fügen dem eine Abhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit sowie des E-Moduls von der Rohdichte in Form einer Exponentialfunktion an.

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Arbeiten betrachten jedoch nur den Rohdichteprofileinfluss auf die Entwicklung der Platteneigenschaften. Hierbei erfolgte die Betrachtung zu einseitig auf Einflüsse durch die Verteilung der Rohdichte über den Plattenquerschnitt. Neuere Untersuchungen lassen jedoch vermuten, dass der Einfluss der Klebstoffaushärtung während des Heißpressprozesses (Heinemann 2004) sowie die konstruktive Gestaltung der kontinuierlichen Heißpresse mit ihren Pressrahmen von nicht zu vernachlässigbarem Einfluss auf die Ausbildung der Plattencharakteristika sind.

3 Entwicklung der Arbeitshypothesen

Die im Stand des Wissens (Abschnitt 2) aufgeführten Arbeiten sowie eigene Überlegungen sollten zur Aufstellung von eigenen Hypothesen über den Einfluss von Druckschwankungen während des kontinuierlichen Heißpressprozesses von Holzwerkstoffen führen und anschließend geeignete Untersuchungsmethoden aufzeigen. Das bisher vorhandene Wissen lässt auf sowohl mechanische als auch chemische Einflüsse schließen, die mittels mechanischer, chemischer und optischer Untersuchungsmethoden zu bestimmen sind. Die hier aufgelisteten Hypothesen haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, geben jedoch die Quintessenz der Möglichkeiten aus den Verklebungstheorien und den Einflüssen durch Druckänderungen wieder. Da nicht alle aufgestellten Theorien im Laufe dieser Arbeit untersucht werden können, werden die subjektiv am wahrscheinlichsten zutreffenden und vor allen Dingen auch mit geeigneten Maßnahmen überprüfbar aufgelistet und im Weiteren der vorliegenden Arbeit ausgeführt.

3.1 Wirkung von Druckschwankungen

3.1.1 Einführung

Eine Beeinträchtigung der Bindefestigkeiten von Klebstoffen durch Druckänderungen kann aufgrund der vorher aufgeführten Einflussfaktoren nach Zeppenfeld und Grunwald (2006) wie folgt erklärt bzw. initiiert werden:

1. Pressdruck und -änderungen können zum Abbau kovalenter Bindungen führen, wie sie auch bei Holzwerkstoffen auftreten die in Kalandern hergestellt werden, in denen es aufgrund der Verbiegung der Matten während des Heißpressprozesses zu Scherkräften kommt.
2. Beim Abbinden des Klebstoffes kommt es durch Druckänderungen zum Auftreten von Spannungen, die die innere Plattenfestigkeit herabsetzen.
3. Ideale Bindungskräfte bzw. maximal hierfür erforderliche werden aufgrund von Druckänderungen nicht erreicht.
4. Es liegen keine idealen Benetzungs- und Abbindebedingungen (Temperatur, Anteil Reaktionspartner, Oberflächenspannung bzw. Randwinkel) vor.
5. Die Ausbildung der Grenzflächen zwischen Klebstoff und Holzpartikel erfolgt nicht ideal.

Eine Pressdruckänderung, die exzentrisch senkrecht auf die Überlappungsfläche der beleimten Holzpartikel wirkt, führt zu Schälkräften auf die Klebstoffe. Nach Habenicht (1990) führen Schälkräfte zu einem früheren Versagen der Klebfuge als reine Zug-, Druck- oder Scherkräfte. Die bei einer Schälbelastung auftretenden Spannungsspitzen wirken als Li-

nienlast maximal an den Überlappungsenden, und sind daher für Klebverbindungen weitaus belastender als Zug-, Druck- und Scherkräfte, die flächig wirken.

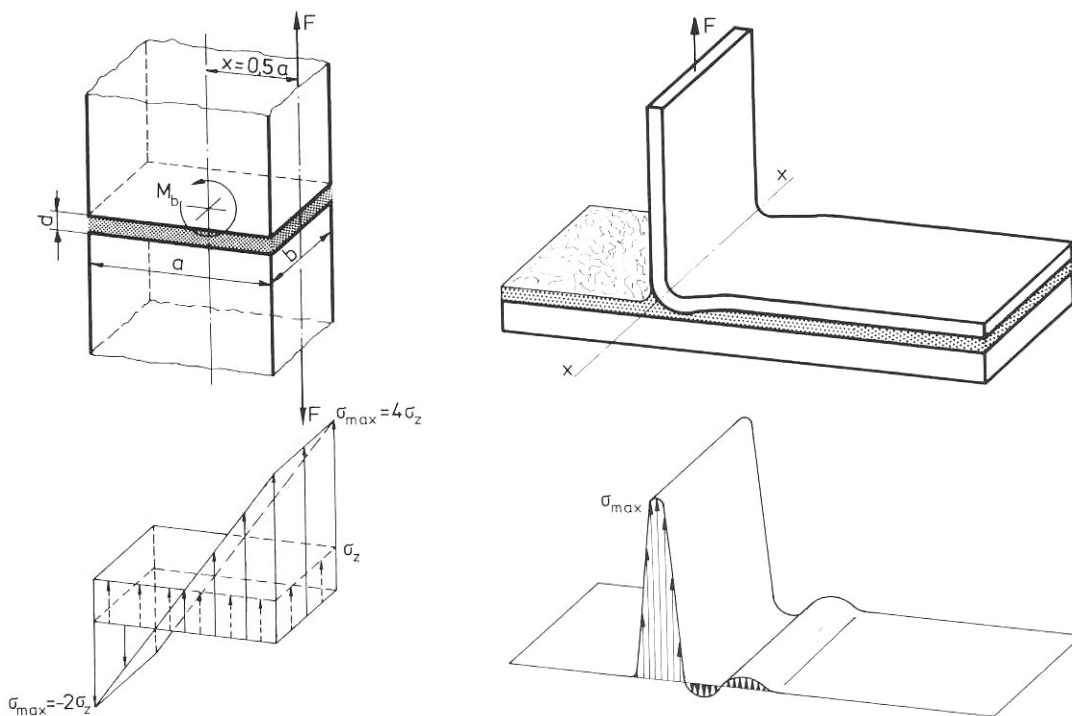


Abbildung 13: Darstellung von Spannungsspitzen aufgrund einer exzentrischen Zugbelastung (links) als auch Schälbelastung (rechts) auf eine Klebverbindung (Habenicht 1990).

3.1.2 Aufstellung der Arbeitshypothesen

Auf die vorliegende und in dieser Arbeit zu behandelnde Problematik angewandt, ergeben sich aus den oben und im Literaturteil aufgeführten Informationen die folgenden eigenen Hypothesen.

Hypothese 1:

Druckänderungen führen zu einer Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix und damit der mechanischen Festigkeiten.

Erklärung Hypothese 1:

a) Die Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix durch die Druckschwankungen sollte in der Mittelschicht der zu verpressenden Holzwerkstoffmatte den größten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit haben, da hier in der Regel die geringsten lokalen Festigkeiten erreicht werden. Druckänderungen würden daher in dieser am spätesten aushärtenden Schicht am längsten mit einer Wegänderung aufgenommen. Eine Beeinträchtigung der Holzpartikel-

Klebstoff-Matrix in den äußeren Mattenschichten würde eine Verringerung der Biegefestigkeiten zur Folge haben.

b) Des Weiteren ist durch Druckänderungen eine Erhöhung der Restspannungen innerhalb der Holzwerkstoffmatte zu vermuten, so dass es nach dem Pressenauslauf zu einer verstärkten Rückfederung "springback" mit einer einhergehenden Festigkeitsverringering der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix kommen sollte.

Hypothese 2:

Je größer die zu verdichtenden Partikel, desto größer sind die aus Druckänderungen resultierenden Schälspannungen und damit die Festigkeitsverluste.

Erklärung Hypothesen 2:

Bei der Verpressung von Holzwerkstoffen kommt es zu keiner reinen Druckbelastung der Holzpartikel, was sich aus der Partikelgeometrie ergibt. Je feiner die Partikel, desto geringer sind Biegespannungen. Größere Partikel erleiden aufgrund der geringeren Anzahl und der größeren Steifigkeit höhere Auslenkungen und damit höhere Schälspannungen während eines Verdichtungsprozesses. Mögliche Abscherungen könnten zu einer Beeinträchtigung der Klebstoffverbindungen führen. Hieraus resultiert, dass der Einfluss von Druckänderungen aufgrund des Pressprogramms bzw. der Rahmenkonstruktion bei Holzwerkstoffen aus flächigeren Holzpartikeln wie z.B. Spänen oder Strands zu vergleichbar höheren Auswirkungen führen müsste als bei Fasern.

Hypothese 3:

Die Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix findet bei groben zu verdichtenden Partikeln eher im Klebstoff, bei feinen Partikeln eher im Holzpartikel statt.

Erklärung Hypothese 3:

Die größere Festigkeit bei gröberen Partikeln aufgrund des einhergehenden höheren Biegegegenstandsmomentes gegenüber feineren Partikeln, führt bei Druckbelastungen eher zu einer Beeinträchtigung der Klebfuge, auch wenn diese relativ dünn ist. Feinere Partikel nehmen Druckbelastungen ab einem Grenzwert eher im Partikel selbst und damit in der Zellwand auf.

Hypothese 4:

Eine im Pressprozess späte Nachverdichtung bei dann erhöhter Viskosität des Klebstoffes hat eine Festigkeitsverringering der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zur Folge.

Erklärung Hypothese 4:

Bei einem zu späten Druckaufbau auf die zu verpressende Holzwerkstoffmatte wird die Benetzung der Oberfläche sowie das Eindringen des Klebstoffs in die Poren der Holzpartikel aufgrund der mit der Presszeit ansteigenden Viskosität des Klebstoffes verringert. Hierdurch verschlechtert sich die mechanische Verknüpfung zwischen dem Klebstoff und dem Holzpartikel.

Hypothese 5:

Druckänderungen führen zu einer verstärkten Dampf- und damit Formaldehydausgasung und somit zu einer Beeinträchtigung der Klebstoffaushärtung.

Erklärung Hypothese 5:

Aufgrund des Pressprogramms und der Rahmenkonstruktion kommt es zu einer verstärkten Ausgasung von Formaldehyd, wobei hiermit die Abbindung des Harnstoffs verringert würde. Diese Vorgänge hätten ein geringeres Aushärtungsniveau des Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffs zur Folge. Hierbei würde aufgrund einer späteren Nachverdichtung bzw. einer höheren Schwankung und der damit länger niedrig gehaltenen Plattenrohichte, eine verstärkte Ausgasung von Dampf und damit von Formaldehyd erreicht werden.

3.2 Überprüfung der Arbeitshypothesen

3.2.1 Mechanisch

Zur Überprüfung der Hypothesen 1 und 2 sollen Querzugtests an Prüfkörpern vorgenommen werden, die während des Heißpressprozesses einer Druckänderung ausgesetzt werden. Diese Druckänderung kann zum einen einmalig während des Prozesses aufgrund des Pressprogramms aufgebracht werden, zum anderen mehrfach aufgrund der Pressenkonstruktion. Die erhaltenen Werte wären dann mit gleichzeitig produzierten Referenzproben, die ohne einer zusätzlichen Druckänderung bis auf das Pressenschließen- und Öffnen herzustellen sind, vergleichbar. Des Weiteren wäre die Möglichkeit gegeben an den im Querzugtest zerstörten Proben die Bruchebene zu bestimmen, um die Frage zu klären, ob die Beeinträchtigung immer in der Mittelschicht vorkommen muss.

Um den unterschiedlichen Einfluss von Druckänderung auf verschieden große Holzpartikel zu simulieren, sollen mit dem Querzugtest an Faser- und Spanproben vergleichbar erhaltene Scherfestigkeitswerte von Furnierproben aufgenommen werden.

Zusätzlich ließen sich Hypothese 1 und 3 über eine Änderung der Presszeit nach dem Einfluss von Druckänderungen an Faser-, Span- und Furnierproben kontrollieren. Hierbei sollte sich die Querkzugfestigkeit nach einer Beschädigung seitens des Holzpartikels nicht weiter erhöhen. Anders bei einer vermuteten Beeinträchtigung des Klebstoffs, hier wäre von einer Zunahme der Festigkeit nach einer zusätzlichen Presszeit auszugehen, wenn es zu keinem mechanischen Bruch der Klebfuge kommt. Des Weiteren sollte eine zusätzliche Presszeit zu einem Abbau der Restspannungen innerhalb der Holzwerkstoffmatte führen und damit zu verbesserten Querkzugfestigkeiten. Um diese Hypothesen zu untersuchen sollte ein Teil der MDF-Versuche an Spanplatten aus Mittelschichtspan wiederholt werden. Zusätzlich können größere Holzpartikel durch das Verleimen von Furnierstreifen nachempfunden werden.

3.2.2 Mikroskopisch

Eine weitere Einschätzung der mechanisch hervorgerufenen Defekte in der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix ist durch optische Verfahren zu erwarten. Hypothese 1a) sowie Hypothese 4 sind mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) zu untersuchen. Zum einen sollten Bruchflächen, die durch einen Querkzugtest bei den hergestellten Proben hervorgerufen werden, im REM abzubilden sein. Hierbei sollte sich zeigen, ob z.B. bei Faserproben die Brüche bei Referenzproben vornehmlich in der Faserwand auffindbar sind, wobei sich das Bruchbild bei unter Druckschwankungen hergestellten Prüfkörpern eher in der Klebfuge, so dass weniger Bruchstellen in den Faserwänden festzustellen sein sollten. Zum anderen ist zu erwarten, dass sich das Bruchbild bei einem Druck bedingten Wegschlagen, bzw. veränderten Eindringverhalten des Klebstoffes unterschiedlich zeigt.

3.2.3 Extraktiv

Mittels einer Heißwasserextraktion ließe sich der lösliche Harnstoffgehalt, der sich während des Heißpressprozesses aufgrund von Druckänderungen nicht mit dem Formaldehyd verbinden kann, bestimmen. Hierbei wäre die Menge an bestimmtem Harnstoff als Zeiger für die geringere Ausbildung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zu verstehen, was zur Untersuchung der Hypothese 5 beitragen würde.

Eine durch Druckänderungen hervorgerufene Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix, wie in Hypothese 1a) vermutet, ließe sich auch durch eine Extraktion mit DMF (Dimethylformamid) nachweisen, wenn Druckänderungen zu einem geringeren Vernetzungsgrad und mechanischen Brüchen innerhalb der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix führten. Bei dieser Methode wird die Menge an löslichem Gesamtextrakt aus einer Probe bestimmt und mit einer geringeren Festigkeit der Probe gleichgesetzt.

4 Material

4.1 Klebstoffe

Als Klebstoff wurden insgesamt drei unterschiedliche Systeme der Firma BASF, Ludwigshafen eingesetzt. Hierbei handelte es sich um ein Kaurit[®] 350, ein Kauritec[®] 405 und ein Kauratec[®] 605. Kaurit[®] 350 wird üblicherweise für die Herstellung von Spanplatten verwendet. Um sich jedoch nicht nur auf Klebstoffe für die MDF-Produktion zu beschränken wurde dieser Klebstofftyp für einen Teil der Versuchsreihen verwendet. Bei den letzten beiden zwei Typen handelt es sich um handelsübliche Klebstoffe für die industrielle Faserbeimung bzw. -herstellung. Die folgenden Angaben über die verwendeten Klebstoffe entstammen den verfügbaren Datenblättern der BASF AG.

Kaurit[®] 350 ist ein Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsklebstoff mit einem Trockengehalt von $66,5 \pm 1 \%$ sowie einem pH-Wert bei 20°C von 7,5-9,5.

Kauritec[®] 405 ist ein Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsklebstoff, der mit ca 1 % Melamin verstärkt ist. Kauritec 405 hat einen Trockengehalt von $69 \pm 1 \%$ sowie einen pH-Wert bei 20°C von 8-9.

Kauratec[®] 605 ist ein Harnstoff-Melamin-Formaldehyd-Kondensationsklebstoff. Und hat einen Trockengehalt von $65 \pm 1 \%$ sowie einen pH-Wert bei 20°C von 9,4-10.

Die Leimflotten wurden mit einem Härteranteil von 1 % bezogen auf atro Leim erstellt, wobei eine Ammoniumnitratlösung mit einem Trockengehalt von 40% als Härter benutzt wurde.

4.2 Fasern

Das eingesetzte Fasermaterial kam von der Firma Kronopol in Zary, Polen. Das Material setzte sich aus 95-98 % Kiefer mit einem Rest aus Laubmischholz zusammen und war mit ca. 0,7-1,2 % Festharz und 1-1,2 % Wachs versetzt. Für die folgenden Versuchen wird dieses Material als reiner, unbeleimter Rohstoff gegenüber beleimten Proben bezeichnet. Die Faserstoffqualität wurde mittels des Faserstoffanalysesystems Qual-Scan (Abbildung 14) der Firma McCarthy Products, Seattle/USA bestimmt, das eine Charakterisierungen der Faserlänge und -breite ermöglicht. Das Analysesystem wurde ursprünglich zur Bestimmung von Grob- und Fremdpartikeln innerhalb einer Fasersuspension konzipiert, kann aber auch zum ungefähren Vergleich von Faserproben dienen.

Das Messprinzip beruht auf der Analyse einer Partikel-Wasser-Suspension, wobei die Partikel beim Abfließen der Suspension aus dem Mischtank in eine spezielle Zelle (Flow Cell) mittels einer über dem Sichtfenster der Zelle angeordneten Kamera mit 10 Bildern pro Sekunde fotografiert und anhand der gewonnenen Bildpunkte vermessen werden. Auf diese

Weise werden die Partikellänge und die Partikelfläche bestimmt und die Partikelbreite berechnet.

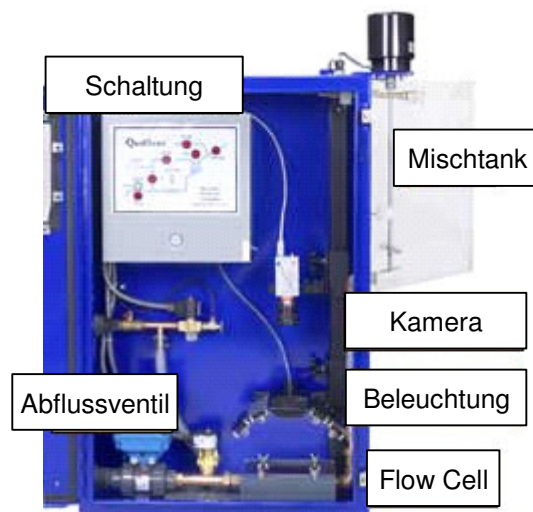


Abbildung 14: Qual-Scan (McCarthy Products).

Das System ermöglicht es, eine Unterteilung der geometrischen Eigenschaften (Länge, Breite) in Teilbereiche vorzunehmen, ähnlich der Abstufung der Siebmaschenweiten bei der Siebanalyse. Mit einer entsprechenden Software wird aus den Häufigkeitsverteilungen von 5 Messungen, die für eine Analyse notwendig sind, eine Siebkennlinie erstellt.

Aufgrund der langfristigen Versuchsdurchführung wurden drei Faserchargen eingesetzt.

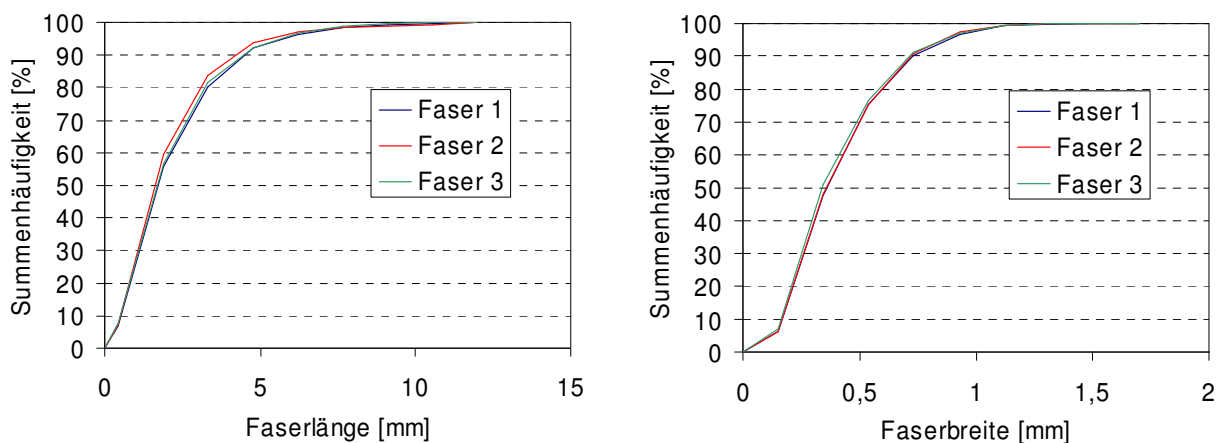


Abbildung 15: Analyse der Industriefasern. Faserlänge (links) und Faserbreite (rechts)

In Abbildung 15 sind die Faserlängen- und -breitenverteilung der drei verwendeten Chargen im Vergleich dargestellt. Die Analyse der Fasergeometrie zeigte zwischen den einzelnen Chargen keine nennenswerten Abweichungen.

Das hier angewendete Qual-Scan-System wird innerhalb der Wissenschaft und der Praxis kontrovers diskutiert. Das System macht bei der Auswertung aufgrund der geringen Auflösung von 200 μm keine Unterschiede zwischen Faserbündeln und Einzelfasern. Des Weiteren soll es aufgrund des Ablaufs aus dem Mischtank zu einer Separierung von Grob- und Feinfaseranteil kommen, bei der die Grobfasern nicht mit vermessen werden. Es wurde dennoch auf das Qual-Scan-System zurückgegriffen, da wider alle Vorwürfe bezüglich der Genauigkeit bzw. der Auswertungsmethodik ein relativer Vergleich von Faserstoffen, ohne hierbei auf die absoluten Werte für die Faserlänge und -breite einzugehen, sinnvoll erscheint.

4.3 Späne

Das eingesetzte Spanmaterial kam von der Firma Rauch Spanplattenwerk in Markt Bibart. Das Material setzte sich aus 90 % Kiefer sowie Fichte und aus 10 % Laubmischholz zusammen. Für die Versuche wurde ein Mittelschichtspan als Plattenmaterial verwendet. Die Spangrößenverteilung (Abbildung 16) wurde mittels eines Taumelsiebes in Anlehnung an die DIN 66165 ermittelt.

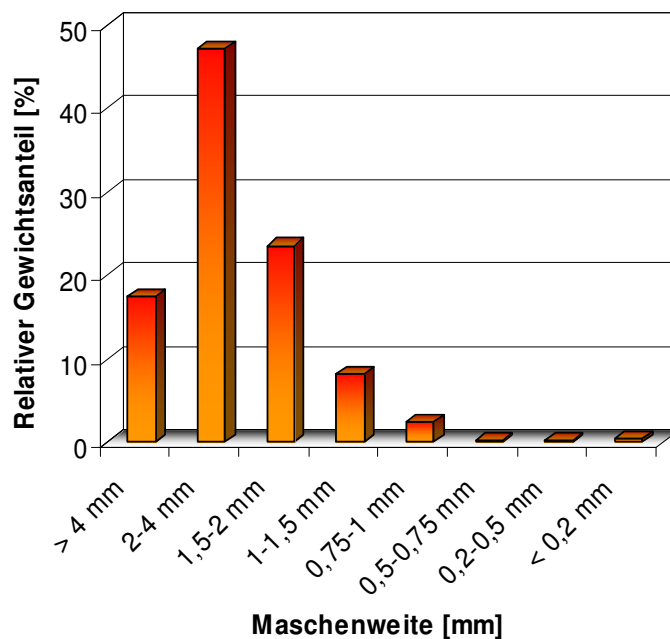


Abbildung 16: Siebfraction des verwendeten Spanmaterials.
Dargestellt sind Mittelwerte aus jeweils drei Messungen.

Der grobe Mittelschichtspan lässt sich an einer gebrochenen Querkzugprobe darstellen (Abbildung 17).



Abbildung 17: Spanprobe aus Mittelschichtspan (links) und nach Querzugtest (mittig und rechts).

4.4 Pufferkapazität- und pH-Wertbestimmung

Im Weiteren wurden an dem Faserstoff und dem Mittelschichtspanmaterial der pH-Wert sowie die Pufferkapazität bestimmt.

Die Bestimmung der Pufferkapazität als auch des pH-Wertes lässt eine Aussage über die Reaktivität des verwendeten Materials in Kombination mit der eingesetzten Leimflotte zu. Die in dieser Arbeit angewandten Klebstoffsysteme härten sauer aus. Somit hat der pH-Wert oder aber das Pufferungsvermögen des Holzmaterials einen zum Härter zusätzlichen Einfluss auf das Härungsverhalten des Leimes. Speziell für den direkten Vergleich von aus Span- oder Fasermaterial hergestellten Prüfkörpern sind diese Kennwerte wichtig zur Einschätzung der Ergebnisse.

Für die Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität wurden jeweils 5 g/atro Faser- und in einer Mühle zerkleinerten Spanmaterial in 300 ml destilliertem Wasser eingewogen. Die Suspension wurde 24 h bei Raumtemperatur und 200 U/min geschüttelt. Die Auswertung erfolgte über eine Doppelbestimmung, wobei jeweils 40 ml aus der abfiltrierten Lösung zur Titration entnommen wurde. Für eine vollständige Abdeckung des pH-Bereichs wurde sowohl mit einer 0,01 m HCl-Lösung als auch einer 0,01 m NaOH-Lösung titriert. Somit konnten das saure und das alkalische Pufferungsvermögen des wässrigen Auszuges bei einem pH-Wert von 3 bzw. 7 bestimmt werden. Der entsprechende pH-Wert wurde mit einer Elektrode bestimmt.

Die Einzelwerte zeigen einen Unterschied zwischen den verschiedenen Materialien jedoch keinen innerhalb der beiden Faserproben. Aus diesem Grund wurde in der Abbildung 18 nur der pH-Wert-Verlauf einer Faserprobe im Vergleich mit der Spanprobe aufgetragen.

Tabelle 2: pH-Wert und Pufferkapazität des eingesetzten Materials

Material	pH-Wert		Puffervermögen [mmol/ 100 g atro Späne]			
			Saure Pufferkapazität 0,01 m NaOH		Alk. Pufferkapazität 0,01 m HCl	
	Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
Faser 1	4,71	4,79	0,42	0,44	1,32	1,32
	4,86		0,45		1,32	
Faser 2	4,77	4,83	0,37	0,37	1,25	1,26
	4,89		0,37		1,27	
Span	5,10	5,14	0,17	0,17	1,05	1,04
	5,18		0,17		1,02	

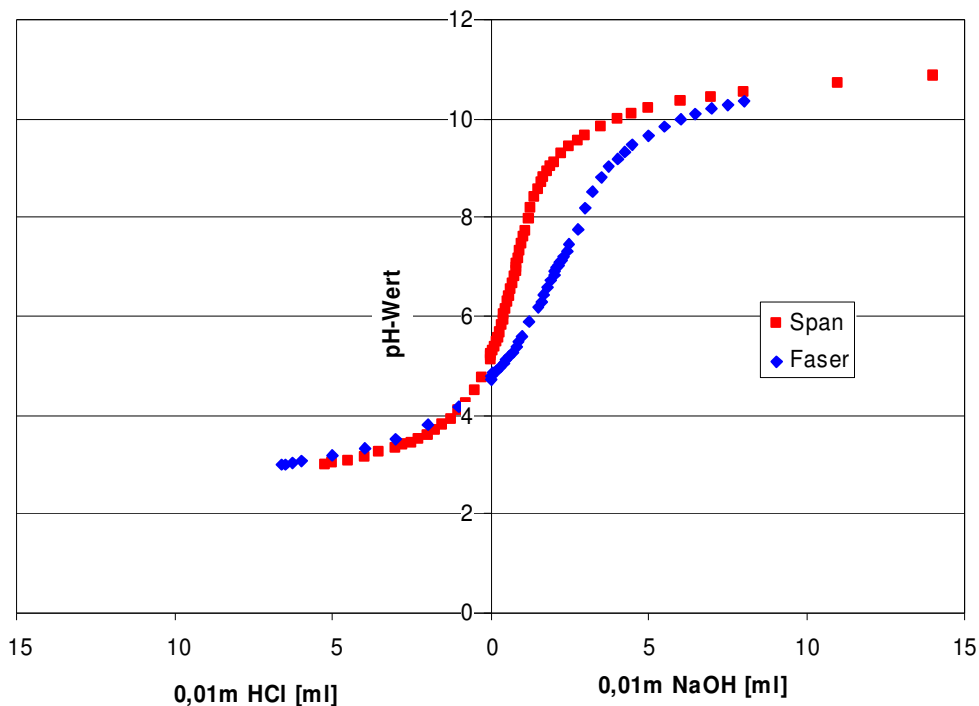


Abbildung 18: Darstellung des pH-Wert-Verlaufs von Faser- und Spanmaterial bei der Titration von 0,01 m NaOH und 0,01 m H₂SO₄.

Die Unterschiede innerhalb der Pufferkapazitäten zwischen dem Span- und dem Fasermaterial führen zu abweichenden Reaktionsgeschwindigkeiten in Kombination mit dem

eingesetzten Leim-Härter-System und müssen bei einer vergleichenden Betrachtung von Festigkeitswerten beachtet werden. Die pH-Werte zeigen, dass der eingesetzte Mittelschichtspan mit dem verwendeten Klebstoff schneller reagiert.

5 Methodik

5.1 Versuchsapparatur

5.1.1 Ipates

Die zur Anwendung kommende Ipates (Integrated Pressing And Testing System) wurde von Roos (2000) und Heinemann (2004) entwickelt.

Die Besonderheit des hier verwendeten Labor-Presssystems ist, dass nicht nur herkömmliche Proben hergestellt, sondern die Querkzugfestigkeiten direkt im Anschluss an den Heißpressvorgang getestet werden können (Abbildung 19, links). Hierfür wird der vorverdichtete Faserkuchen mit einem handelsüblichen PUR-Klebstoff (Ponal, Construct) mit den Pressblechen (Durchmesser 100 mm) verklebt. Der Pressvorgang wird dann zu einem definierten Zeitpunkt unterbrochen und die Matte bzw. Platte unmittelbar anschließend auf ihre Querkzugfestigkeit getestet (Abbildung 19). Die Vorverdichtung geschieht mittels eines Stopfrohrs, das auf den Presszylinder aufgesetzt wird. Nach der Überführung des Fasermaterials in den Zylinder, werden die Pressplatten aufgesetzt und zusammen in die Presszylinderaufnahme eingeführt (Abbildung 20).

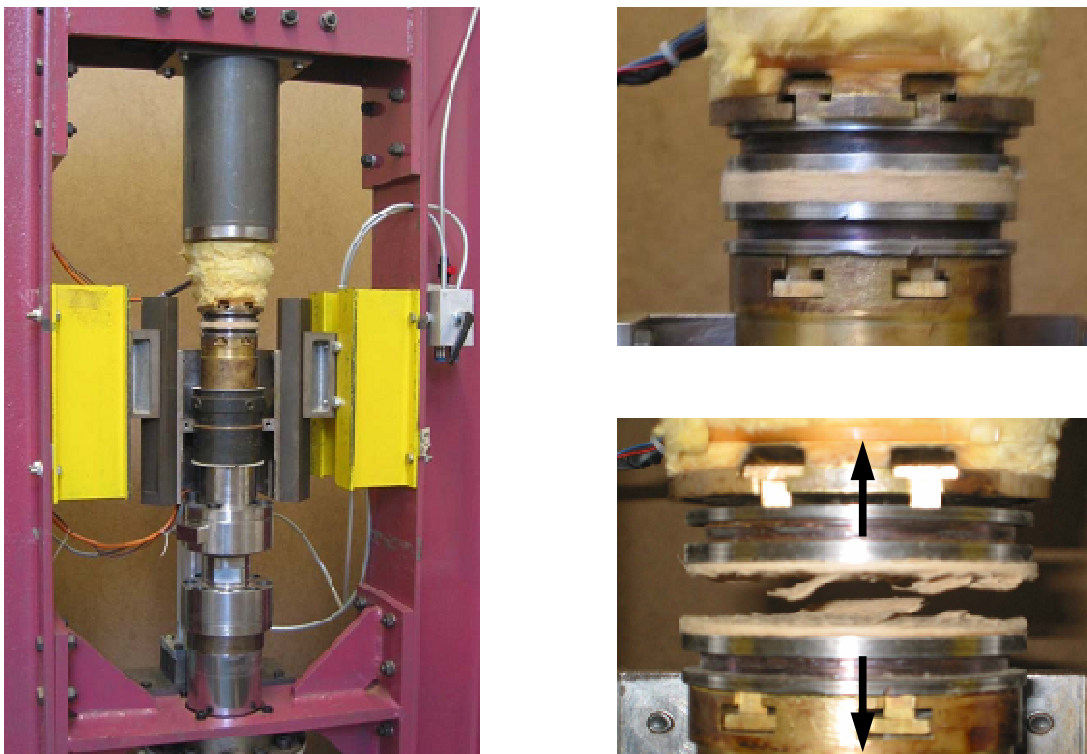


Abbildung 19: Miniaturpresse IPATES (links) und Querkzugtest "sofort" an einem Prüfkörper (rechts).



Abbildung 20: Verdichtungszyylinder (links), Presszylinder (mittig) und Presskolben mit Presszylinder Aufnahme (rechts)

Darüber hinaus lässt sich die Ipates auch im herkömmlichen Sinne als Heißpresse für die Herstellung von kleinen Holzwerkstoffproben einsetzen. Der wesentliche Vorteil dieser Anwendung gegenüber der Herstellung von Laborplatten besteht darin, dass in relativ kurzer Zeit eine große Zahl an unterschiedlichen Pressprogrammen oder auch Pressparameter eingestellt werden können

5.1.1.1 Beleimung

Die Fasern wurden in einer Beleimtrommel der Fa. Drais-Werke chargenweise beleimt. Hierbei wurden jeweils zwei Chargen eines Leimansatzes zu je 500 g beleimte Fasern zusammengeführt und zweimal durch Durchlaufen eines Ventilators "geflufft", um eine Verinselung der Fasern, die sich durch den Beleimungsprozess zu Faserkugeln agglomeriert hatten, zu erreichen. Durch diesen zusätzlichen Arbeitsschritt war eine möglichst homogene Schüttung der Fasern zur Matte möglich.

Das unbeleimte Material wies eine Feuchte von 7 % auf, wodurch eine minimale Faserfeuchte von 12 % nach der Beleimung eingestellt werden konnte. Nach dem "Fluffen" wiesen die Fasern eine Restfeuchte von ca. 11 % auf. Die beleimten Fasern wurden in einem luftdicht verschlossenen Behälter verwahrt und nur für die Entnahme des Probenmaterials für einen Prüfkörper geöffnet. Da davon auszugehen war, dass der Prüfzeitpunkt aufgrund der offenen Zeit des beleimten Fasermaterials einen Einfluss auf die Messergebnisse hatte, wurde die Reaktivität eines Klebstoffes (Kauritec 405) bestimmt. Hierzu wurde eine Charge beleimte Fasern im Anschluss an das "Fluffen" zur Probenherstellung in der Ipates bereitgestellt. Die Probenkörper wurden wie oben beschrieben, nach dem Pressvorgang direkt auf ihre Querkzugfestigkeit hin geprüft. Der Verlauf der Querkzugfestigkeit der beleimten Faser über die Zeit nach dem "Fluffen" ist in Abbildung 21 dargestellt.

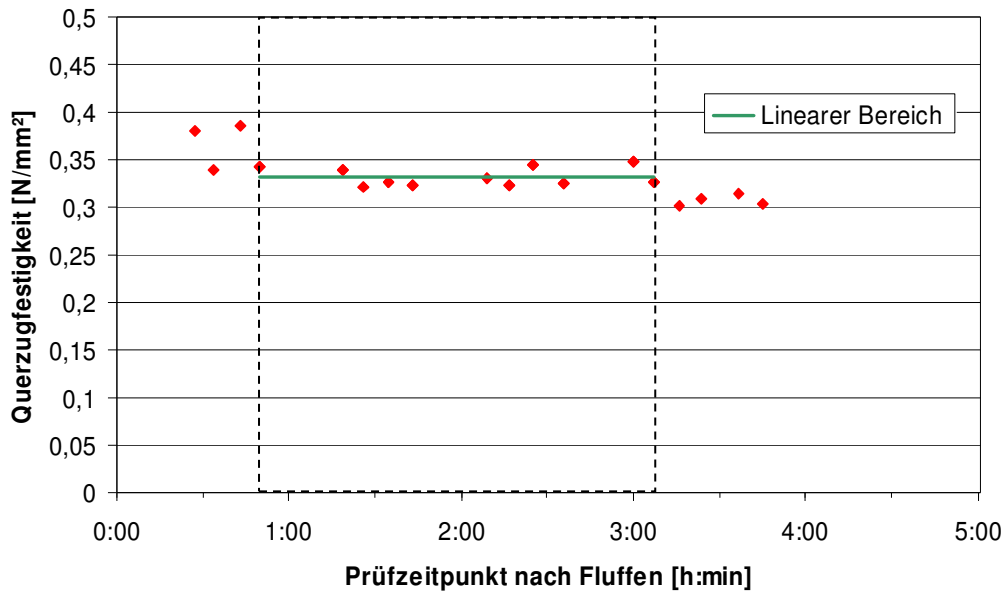


Abbildung 21: Reaktivität von Kauritec 405

Der Verlauf weist ein Zeitintervall mit annähernd gleichen Querzugfestigkeiten auf, das ungefähr zweieinhalb Stunden beträgt und eine Stunde nach dem "Fluffen" beginnt. Diese Auswertung zu Grunde gelegt, wurden die beleimten Fasern in den folgenden Versuchen erst eine Stunde nach dem "Fluffen" und dann für weitere maximal zweieinhalb Stunden für die Versuchsreihen verwendet.

5.1.1.2 Bestimmung der Platteneigenschaften

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl herkömmliche Prüfkörper auf der Ipates hergestellt, die nicht mit den Pressblechen verklebt waren und dementsprechend nicht direkt nach dem Heißpressen zerstört wurden, als auch das oben beschriebene Verfahren zur direkten Messung der Querzugfestigkeiten angewendet. Bei Verwendung herkömmlicher Prüfkörper konnten Querzugtests in Anlehnung an die EN 319 erfolgen. Hierbei wurden aus dem hergestellten runden Probenkörper mittig zwei Prüfkörper mit Kantenlängen von 40 mm geschnitten, die anschließend zwei Wochen in der Normklimakammer (20°C/65 % relative Luftfeuchte) bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert wurden (Abbildung 22).

Des Weiteren wurden zusätzliche Prüfkörper auf ihr Rohdichteprofil untersucht. Hierfür wurde ein Dichteprofilmessgerät der Firma Raytest Isotopenmesstechnik GmbH, Straubenhardt verwendet. Das Dichteprofilmessgerät arbeitet mit einem Gammastrahler (Americium 241). Bei dem Zerfall von Atomkernen des radioaktiven Elements werden unter anderem kurzweilige Gammastrahlen emittiert. Diese Strahlen werden mit einem geeigneten Detektor (Scintillationszähler) erfasst und anschließend ausgewertet.

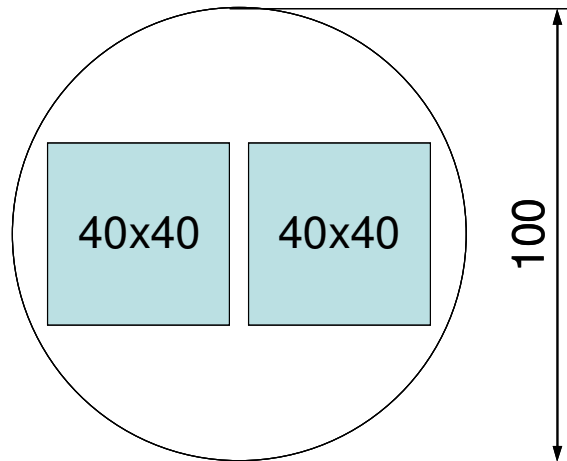


Abbildung 22: IPATES-Probenkörper mit Prüfkörper für die Dichteprofil- und Querkzugfestigkeitbestimmung.

Zusätzlich zu den Rohdichteprofilen wurde an den zerstörten Proben der Querkzugtests teilweise die Lage der Bruchfläche an einer Probenhälfte bestimmt. Hierbei wurde an den vier Ecken der gebrochenen Querkzugprobe der maximale Abstand zur Unterseite der Probe bestimmt. Der hierdurch bestimmte Mittelwert der Bruchlage konnte dann in den zugehörigen Rohdichteprofilen markiert werden. In Abbildung 23 sind exemplarisch drei Prüfkörper mit unterschiedlichem Bruchbild dargestellt.

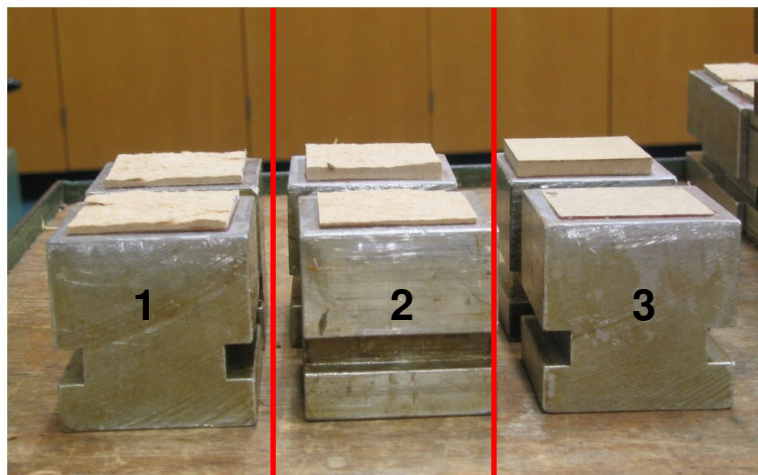


Abbildung 23: Prüfkörper nach Querkzugtest mit unterschiedlichen Bruch-
ebenen. 1: Mittelschicht-, 2: Zwischenschicht-, 3: Oberflächenbruch.

5.1.1.3 Temperaturmessung

Um den Temperaturverlauf während der Heißpressung zu verfolgen, wurden Temperaturmessungen in der Mittelschicht vorgenommen. Hierbei wurde jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt. Da die Herstellung der Probenkörper und die Temperaturmessung nicht gleichzeitig geschehen konnten, wurden die Versuche unter den gleichen Versuchsbedingungen wiederholt. Unterschiedlich war hier nur der Presszylinder, der für die Temperaturmessungen Schlitz aufwies, um das Thermoelement in die Matte einzuführen (Abbildung 24).

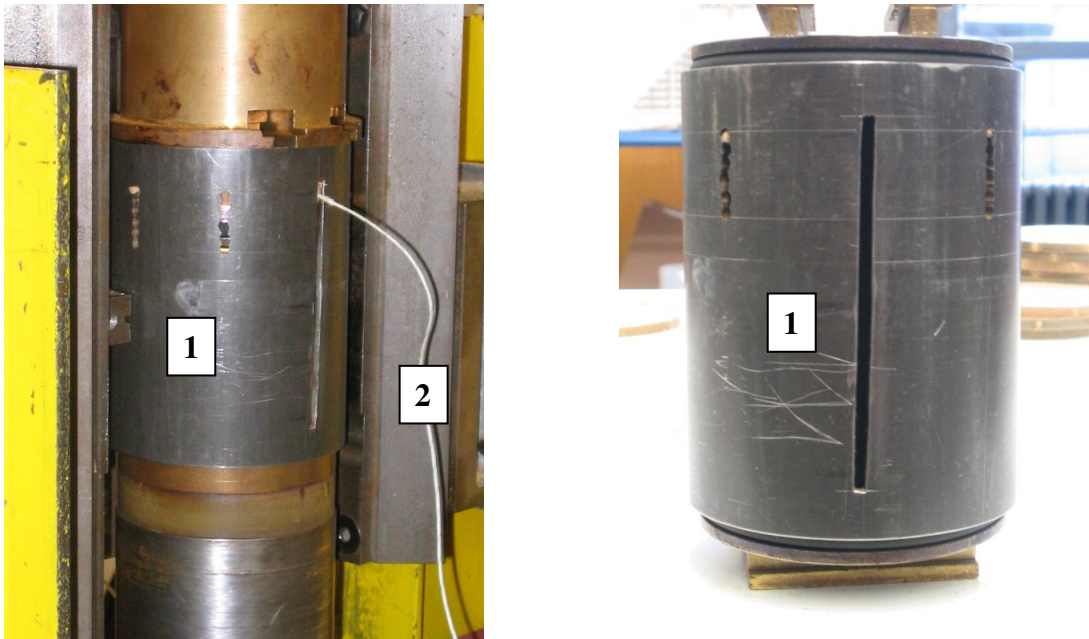


Abbildung 24: Presszylinder (1) für die Temperaturmessungen , links mit Thermoelement (2) .

Für die Auswertung wurde jeweils die Messung der Doppelbestimmung herangezogen, deren Temperaturanstieg am spätesten erfolgte. Somit wurde die Messung ausgewählt, die der Mittelschichttemperatur am ehesten entsprach. Dieses Verfahren wurde gewählt, da keine nachträgliche Überprüfung der Lage des Thermoelementes im Prüfkörper durchgeführt werden konnte.

5.1.2 Laborpresse

Mit der Laborpresse der Firma Siempelkamp GmbH & Co. KG, Krefeld, können Platten bis zu den maximalen Außenmaßen von 700 x 500 mm² gepresst werden. Es handelt sich bei diesem Pressentyp um eine Einkolben-Presse.

5.1.2.1 Beleimung

Die Fasern wurden in einer Mischtrommel eines Pflugschar-Mischers der Firma Gebr. Lödige Maschinenbau GmbH, Paderborn, beleimt und danach zur Vereinzelung "geflufft".

5.1.2.2 Bestimmung der Platteneigenschaften

Die Faserplatten wurden, nachdem sie auf Raumtemperatur abgekühlt waren, in einer Klimakammer mit Normklima (20°C/65% relativer Luftfeuchte) für zwei Wochen gelagert. Nach der Klimatisierung wurden nach folgendem Schnittplan (Abbildung 25) Prüfkörper hergestellt. Um die schwächeren Randbereiche nicht mit in die Auswertung einfließen zu lassen, wurden diese durch einen 70 mm breiten Besäumschnitt von der fertigen Platte abgetrennt.

Biegung-25		Biegung-26	S-13	Q-21
	Q-5		S-14	R-22
	S-6		Q-15	S-23
	Q-7		S-16	Q-24
	R-8		R-17	Biegung-27
Q-1	S-9	Q-18		
S-2	Q-10	S-19		
R-3	S-11	Q-20		
Q-4	S-12			

Abbildung 25: Probenschnittplan für Biegefestigkeit, Querzugfestigkeit (Q), Dickenquellung (S) und Rohdichteprofil (R).

Die Prüfkörper dienen der Bestimmung der Querzug- (EN 319) und Biegefestigkeit (EN 310), der Dickenquellung (EN 317) sowie des Rohdichteprofils. Das Rohdichteprofil wurde ebenfalls mit dem Dichteprofilmessgerät der Firma Raytest Isotopenmesstechnik GmbH, Straubenhardt, erstellt.

5.1.2.3 Temperaturmessung

Während der Schüttung wurde jeweils ein Thermoelement (Pt 100) auf die beiden Mattenoberflächen und in die Mittelschicht eingebracht.

5.1.3 ABES

Bei dem Automated Bonding Evaluation System (ABES) handelt es sich um eine Messapparatur zur Bestimmung der Scherfestigkeit von unter Temperatur und Pressdruck härtenden Klebfugen zwischen zwei Furnierstreifen. Es besteht hauptsächlich aus zwei Presszylindern (1) mit aufgelagerten Pressköpfen (2) zur Übertragung des Druckes und der Temperatur und zwei Klemmbacken (3) zur Einspannung der zu verklebenden Furnierstreifen (Abbildung 26).

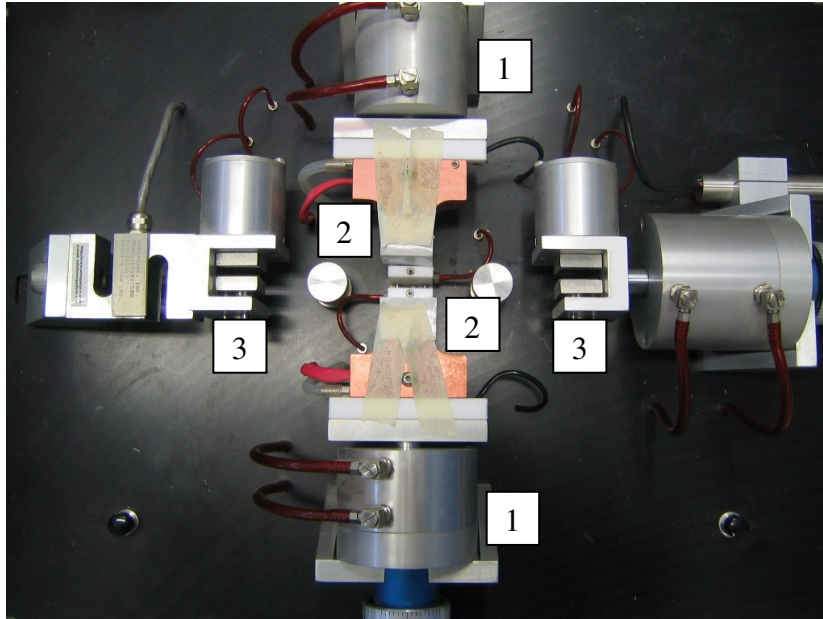


Abbildung 26: Prüfmaschine ABES. 1: Presszylinder, 2: Pressköpfe, 3: Proben­spannklemmen.

Die schematische Darstellung der Verklebung zweier Furnierstreifen ist in Abbildung 27 zu erkennen.

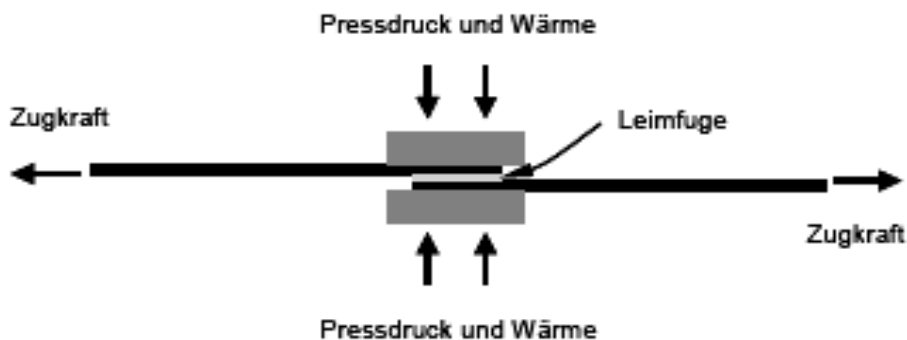


Abbildung 27: Verklebung zweier Furnierstreifen in der ABES (Heinemann 2004).

5.2 Druckmesssystem

5.2.1 Einleitung

Bislang war es nicht möglich den spezifischen Druck, den eine Heißpresse auf das zu verpressende Material auswirkt, direkt, das heißt im Material, zu messen. Hierfür musste bisher der Kolbendruck der Heißpresse mit seiner wirksamen Fläche auf den spezifischen Druck umgerechnet werden.

Der Grundgedanke zur Entwicklung des Messsystems war es daher, den Pressdruck mittels eines neuartigen Drucksensors direkt während des Heißpressprozesses messbar zu machen und die Daten mit einem transportablen Datenlogger kontinuierlich aufzuzeichnen. Hierbei sollte der Druckverlauf in Produktionsrichtung bestimmt werden. Die Aufnahme des spezifischen Druckes sollte eine Aussage darüber ermöglichen, inwieweit der Druckverlauf bzw. Druckänderungen während des Heißpressprozesses aufgrund der Rahmenkonstruktion und des Pressprogrammes einer kontinuierlichen Heißpresse von dem idealen bzw. vorgegebenen mit der Pressensensorik erfassten und dargestellten linearen Druckverlauf abweicht.

5.2.2 Anforderungen

Die Anforderungen, die sich an den zu entwickelnden Drucksensor stellten, unterlagen zum großen Teil den Vorgaben der Pressentechnologie. Aufgrund der konstruktiven und verfahrenstechnischen Gegebenheiten einer kontinuierlich arbeitenden Heißpresse muss eine Vielzahl von Bedingungen erfüllt sein. Der wesentliche Unterschied zum Einsatz innerhalb einer Taktpresse (industriell und im Labormaßstab) liegt im umlaufenden Stahlband. Fremdkörper, wie z. B. Leimklumpen oder Plattenmaterialanhäufungen können zu Deformationen oder gar zum Bruch des 2-3 mm starken Stahlbandes führen, zumal, wenn es sich um dünne (< 8 mm) Holzwerkstoffmatten handelt. Um diesen Einfluss des Sensors als Fremdkörper zu minimieren oder auszuschließen, musste der Drucksensor in seinen Proportionen und seiner Oberflächenbeschaffenheit entsprechend konzipiert sein. Die Bauhöhe hatte somit möglichst flach zu sein und die Oberfläche sollte eine geringere Härte als das Stahlband aufweisen. Des Weiteren musste der Sensor relativ hohe spezifische Pressdruckspitzen, die von der Presse auf das zu verpressende Material übertragen werden, mechanisch aushalten und Stahlbandtemperaturen von über 200°C sowie Heißdampf widerstehen.

Die verschiedenen Anforderungen stellten somit hohe Ansprüche an den zu erstellenden Drucksensor und das Messprinzip.

5.2.3 Überblick der Sensortechnologie

Allgemein wandelt ein Sensor physikalische, chemische oder auch biologische Messgrößen in elektrische Messsignale um, die sich im günstigsten Fall proportional (linear) zum Messwert darstellen. Die Messsignale werden über eine Messschaltung und einen Messverstärker in ein normiertes analoges elektrisches Messsignal umgewandelt. Bei einer weiteren

Sensorart werden die Signale von einem Analog-Digital-Umwandler über eine digitale Signalverarbeitung an den Buskoppler gesendet. Hier findet eine Anpassung des Signals an die Bus-Schnittstelle des Instruments statt. Ein Aufbaubeispiel für einen Sensor mit analogem, normiertem Ausgangssignal wie er in dieser Arbeit Anwendung fand sowie einem busfähigen, intelligenten Sensor ist in Abbildung 28 dargestellt.

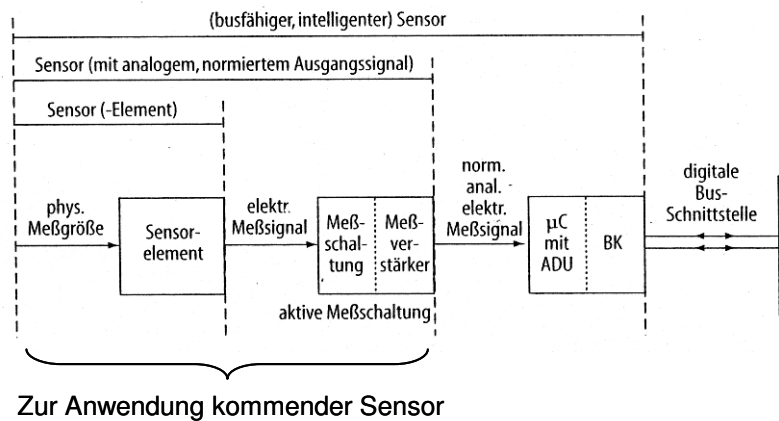


Abbildung 28: Aufbaubeispiel eines Sensors (Tränkler und Obermeier 1998)

Zur Messung von Druckkräften sind verschiedene Messwertaufnehmer bekannt, die sich unterschiedlicher Messprinzipien bedienen. So gibt es piezoelektrische, piezoresistive, resistive, kapazitive, induktive, magnetoelastische und weitere hier nicht aufgeführte Sensoren bzw. Messprinzipien.

Piezoelektrische Sensoren bestehen z.B. aus einer speziellen Keramik bzw. einem Kristall, in der sich unter Krafteinwirkung Ladungen verschieben, die zu elektrisch messbaren Oberflächenladungen führen. Diese Ladungsverschiebung stellt ein Maß für die auf den Kraftaufnehmer ausgeübte Kraft dar. Des Weiteren werden Dehnungsmessstreifen zur Messung von Dehnungen infolge von Krafteinwirkungen verwendet. Hierbei handelt es sich um Kunststoff-Folien, auf die sehr dünne Leiterbahnen aufgebracht sind, welche wiederum unter Dehnung ihren Widerstand ändern (resistiver Effekt). Ähnlich sind Foliensensoren, die senkrecht auf ihre mäanderförmigen Metallbahnen ausgeübte Drücke messen können. Piezoresistive Drucksensoren nutzen die Widerstandsänderung ΔR in einem Halbleiterwerkstoff (z.B. Silizium, Germanium) durch Dehnung und gleichzeitige Querkontraktion aus, die durch eine mechanische Kraft bewirkt wird. Hierbei kommt es zu einer Änderung der Beweglichkeit sowie zu einer energetischen Umverteilung der beweglichen Ladungsträger im Halbleiterwerkstoff.

5.2.4 Messprinzip

Um die in Abschnitt 5.2.2 aufgeführten Anforderungen zu erfüllen wurde ein patentiertes Sensorprinzip des deutschen Sensorherstellers Weiss-Robotics (Ludwigsburg) ausge-

wählt, das auf einem resistiven Messprinzip beruht und eine dünne Ausführung des Sensors ermöglicht. Hierbei werden Widerstandsänderungen eines elektrisch leitfähigen, bzw. mit leitfähigen Partikeln leitfähig gemachten Sensormaterials (hier ein mit Ruß oder Graphitpulver angereichertes Elastomer) ausgenutzt. Um eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit zu gewährleisten muss hierbei der elektrische Durchgangswiderstand des Polymerwerkstoffs kleiner als 10^4 Ohm sein. Höhere Werte führen zu einer bloßen statischen Ableitung bzw. zu einer Isolator-Wirkung.

Aufgrund des eingesetzten flexiblen Sensormaterials ist der Drucksensor in der Lage, hohe Kräfte aufzunehmen, ohne zerstört zu werden. Der Nachteil der in Abschnitt 5.2.3 aufgezählten Kraft- bzw. Drucksensoren liegt in ihrem empfindlichen Reagieren auf Messbereichsüberschreitungen. So können Piezokeramiken zertrümmert, Dehnungsmessstreifen zerrissen und Siliziummembranen durchbrochen werden. Um dies zu vermeiden, sind für diese Sensortypen kostenintensive Schutzmaßnahmen erforderlich.

Ein weiterer Vorteil des hier verwendeten Sensors besteht darin, dass dieser in der Lage ist selbst hochdynamische Vorgänge mittels hoher Messgeschwindigkeiten erfassen zu können. Eine Weiterentwicklung des hier eingesetzten Sensors zu einer Sensormatrix (taktile Sensor) ist denkbar, um Druckprofile zweidimensional erfassen und über eine entsprechende Software dreidimensional darstellen zu können (Abbildung 29). Damit ließen sich beispielsweise lokale Druckunterschiede oder auch ein Druckabfall im Randbereich der Matte darstellen.

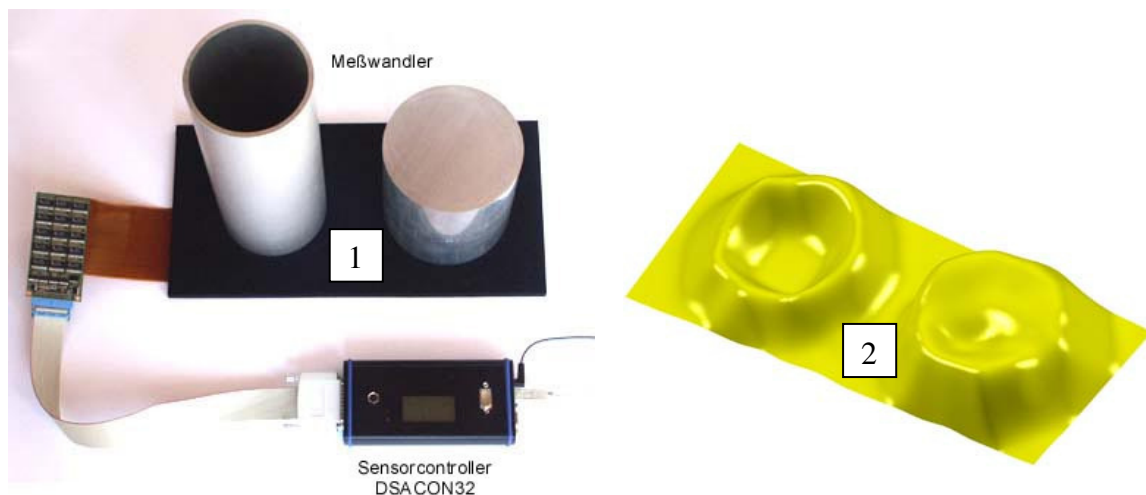


Abbildung 29: Taktile Drucksensor (1) links und 3D-Darstellung der Messwerte (2) rechts (Weiss Robotics 2004).

Das somit bereits bestehende Messverfahren arbeitet nach einem patentierten ortsauflösenden Messprinzip. Ursprünglich für taktile Sensoren entwickelt, ist es dabei im Unterschied zu anderen taktilen Sensorsystemen in der Lage ist, zwischen benachbarten Sensorzellen keine druckunempfindlichen Messbereiche auftreten zu lassen. Das für alle Sensorzellen

durchgängig aufliegende Sensormaterial hat zur Messung der elektrischen Eigenschaftsänderung nur auf einer Seite Sensorelektroden. Diese ovalen oder kreisrunden Sensorelektroden werden von einer einzigen Gegenelektrode umschlossen (Abbildung 30).

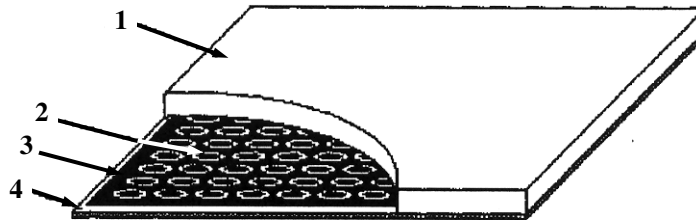


Abbildung 30: Ausführungsbeispiel einer zweidimensionalen Sensormatrix. Sensormaterial (1), Sensorelektrode (2), Gegenelektrode (3), Grundplatte (4) (nach Weiß 2002)

Für die Sensoranwendung im Rahmen dieser Arbeit wurde der taktile Sensor auf eine Sensorzelle reduziert, um durch die damit verringerte anfallende Datenmenge eine mobile Aufnahme der Messdaten zu ermöglichen. Das Prinzip der einseitig aufliegenden Sensorelektrode, die von einer Gegenelektrode umschlossen ist, blieb jedoch bestehen.

5.2.5 Sensormaterial

Aufgrund der in Abschnitt 5.2.2 aufgeführten Anforderungen an einen im industriellen, kontinuierlichen Heißpressprozess einsatzfähigen Drucksensor soll im Folgenden die Auswahl eines passenden Materials dargestellt werden. Dieses Material musste für die Umgebungsbedingungen bei einer Messung des spezifischen Flächendrucks während des kontinuierlichen Heißpressvorgangs geeignet sein. Für das unter Abschnitt 5.2.4 beschriebene Messprinzip waren keine Daten bekannt, die den Einsatz von Kunststoffen als Sensormaterial im Hochdruck und Hochtemperaturbereich darstellen. Der Nachteil des bestehenden Sensortyps lag in dem Verwendung findenden Elastomer, welches nur geringe Temperaturschwankungen aufnehmen kann ohne seine Eigenschaften zu verändern.

5.2.5.1 Polymerwerkstoffe

Zur Auswahl standen über 200 verschiedene Polymerwerkstoffe, deren Einteilung durch ihre Eigenschaftsänderungen während des Erwärmens stattfindet. Mit Grundlage dieser Klassifizierung kann man die Gruppe der Duroplaste, der Elastomere und der Thermoplaste bestimmen.

Duroplaste

Duroplaste besitzen eine starke Vernetzung, somit sind die Molekülketten engmaschig untereinander verbunden. Sie sind weder schmelzbar noch sind sie formbar. Die Herstellung erfolgt über die Reaktion von flüssigen Ausgangsprodukten, die dabei eine vernetzte Molekülstruktur aufbauen. Während des Vernetzungsvorgangs sind Duroplaste formbar und müssen daher innerhalb dieses Zeitraums in die gewünschte Form gebracht werden. Zu den Duroplasten zählen u. a. Polyurethane, Phenolharze, Harnstoff- und Melaminharze, Epoxidharze sowie Silikone.

Elastomere

Bei den Elastomeren besteht eine schwache Vernetzung der Molekülketten, wodurch sie nicht schmelzbar aber elastisch formbar sind. Die räumliche Vernetzung ist einerseits Grund für die Rückfederung des Stoffes nach einer Belastung, andererseits verhindert sie das Schmelzen, da die Moleküle nicht aneinander abgleiten können. Die besonders hohe Elastizität ist auch ein besonderes Merkmal gegenüber den beiden anderen Polymerwerkstoffgruppen. Bekannt Elastomere sind Kautschuk und Gummi.

Thermoplaste

Thermoplaste weisen keine Vernetzung bzw. Atombindungen der einzelnen Molekülketten untereinander auf. Beim Erwärmen beginnen sich die Makromoleküle zu bewegen und gleiten dabei aneinander ab. Sie erweichen somit bei Erwärmung bis zum Fließen und sind in diesem Zustand plastisch formbar. Beim Abkühlen werden Thermoplaste wieder fest und bleiben formstabil. Eine Einteilung der verschiedenen Typen kann in einer „Pyramide der Thermoplaste“ geschehen (Abbildung 31). Hierbei findet eine Unterscheidung in amorphe und teilkristalline sowie Hochtemperatur-, Konstruktions- und Standardthermoplaste statt.

Um den Ansprüchen aus Abschnitt 5.2.2 gerecht zu werden, fiel die Vorauswahl auf ein Polytetrafluorethylenpolymer (PTFE).

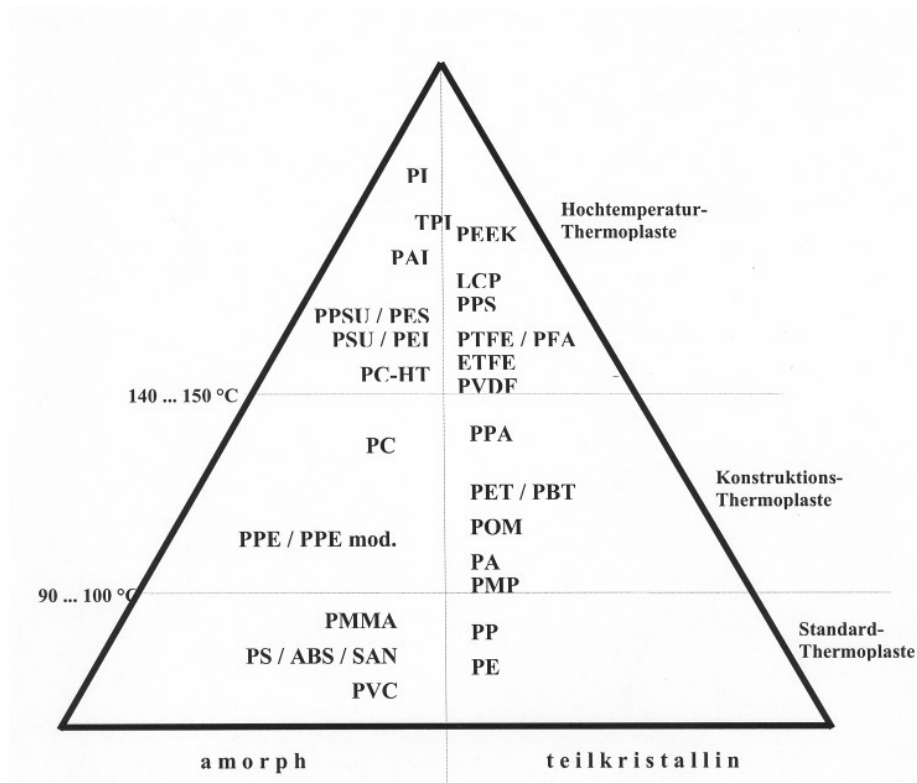


Abbildung 31: Pyramide der Thermoplaste (Kundert 2004).

5.2.5.2 Materialauswahl

Um das Verhalten der als geeignet erscheinenden Materialien unter hohen Temperaturen und Drücken zu untersuchen wurden verschiedene Materialproben einer Wechselbelastung unter Temperaturen zwischen 120°C und 220°C und einem mittleren Druck von 5 N/mm² ausgesetzt. Bei diesen Wechselbelastungen wurden dann die elektrischen Eigenschaften vermessen. Für eine spätere analoge Linearisierung muss die aufgezeichnete statische Druck-Spannungs-Kennlinie möglichst hyperbelförmig sein. Des Weiteren muss der Wechselbelastungstest (hier Rechteckfunktion) zu einem verwertbaren Signal der gemessenen elektrischen Spannung führen, damit hieraus die rechteckförmige Belastung rekonstruiert werden kann.

Zur Untersuchung standen fünf Materialproben auf PTFE-Basis (Polytetrafluorethylen) mit verschiedenen Zusatzstoffen sowie ein Karbonlack-Gemisch und ein Silikon-Compound zur Verfügung. Die PTFE Proben waren alternativ mit Leitruß, mit 25% E-Kohle, mit 25% Graphit oder mit 30% K-Kohle und 3% Graphit angereichert, um den elektrischen Durchgangswiderstand zu erniedrigen.

Die Messungen zeigten sowohl einen unterschiedlichen Einfluss der einwirkenden Temperaturen auf die statische Druck-Spannungs-Kennlinie, als auch auf den Wechselbelastungstest und die daraus resultierende Spannungskennlinie. Aufgrund der durchgeführten Messungen kann geschlossen werden, dass das PTFE-Verbundmaterial mit Leitruß am geeig-

neten für die Anwendung als Sensormaterial ist. Das Material weist neben einer hyperbelförmigen Kennlinie (Abbildung 32) ein verwertbares Ausgangssignal unter Wechselbelastung auf (Abbildung 33).

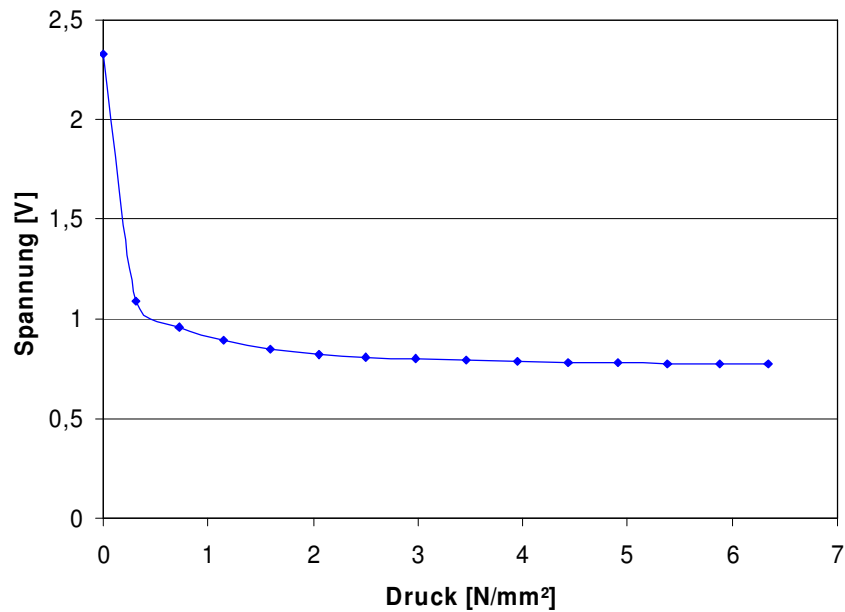


Abbildung 32: Statische Druck-Spannungs-Kennlinie bei 120°C von einer mit Leitruß angereicherten PTFE-Probe.

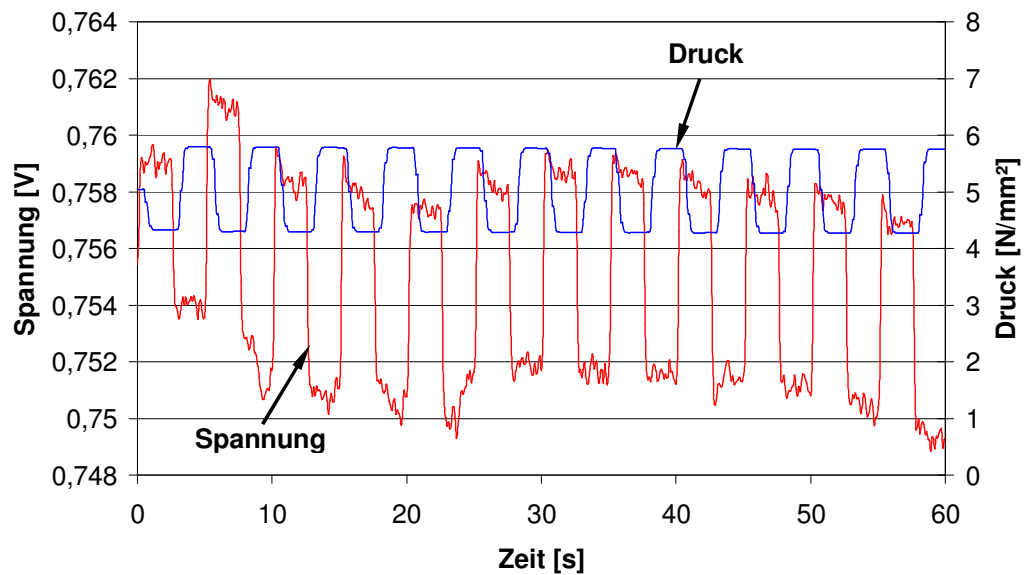


Abbildung 33: Wechselbelastungstest bei 120°C von einer mit Leitruß angereicherten PTFE-Probe.

5.2.6 Sensorkalibrierung

Wie bereits erwähnt, basiert das hier zur Anwendung kommende Messprinzip auf einer Erfassung des elektrischen Widerstandes des Sensormaterials, der sich in Abhängigkeit vom einwirkenden Druck verändert. Die elektrischen Widerstandsdaten mussten mit geeigneten Kalibrierkurven in spez. Druckwerte umgerechnet werden. Da der elektrische Widerstand außerdem temperaturabhängig ist, wurden drei Kalibrierkurven aufgezeichnet, die den Zusammenhang vom spezifischen Druck und elektrischen Widerstand bei Temperaturen von 20°C, 80°C und 150°C wiedergeben (Abbildung 34).

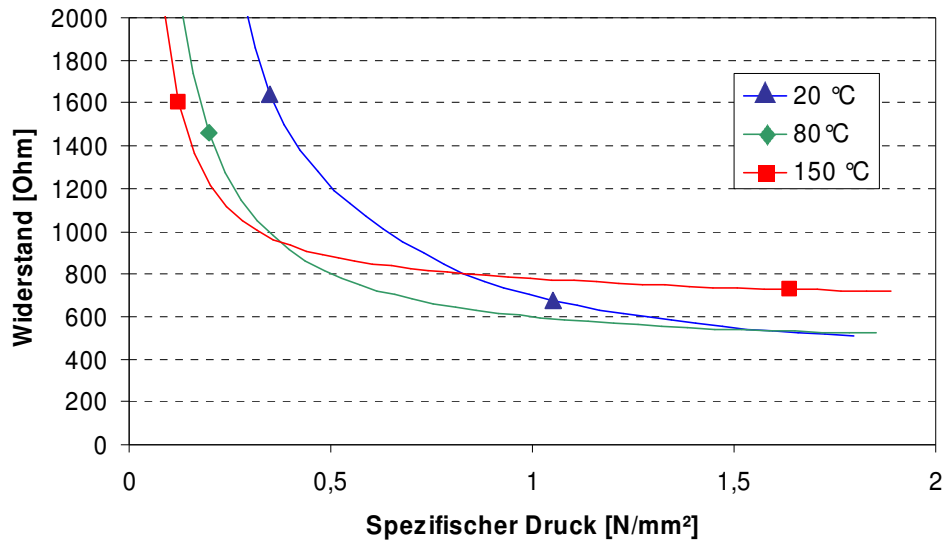


Abbildung 34: Kalibrierungskurven des spezifischen Drucksensors für drei unterschiedliche Temperaturen (20°C, 80°C, 150°C).

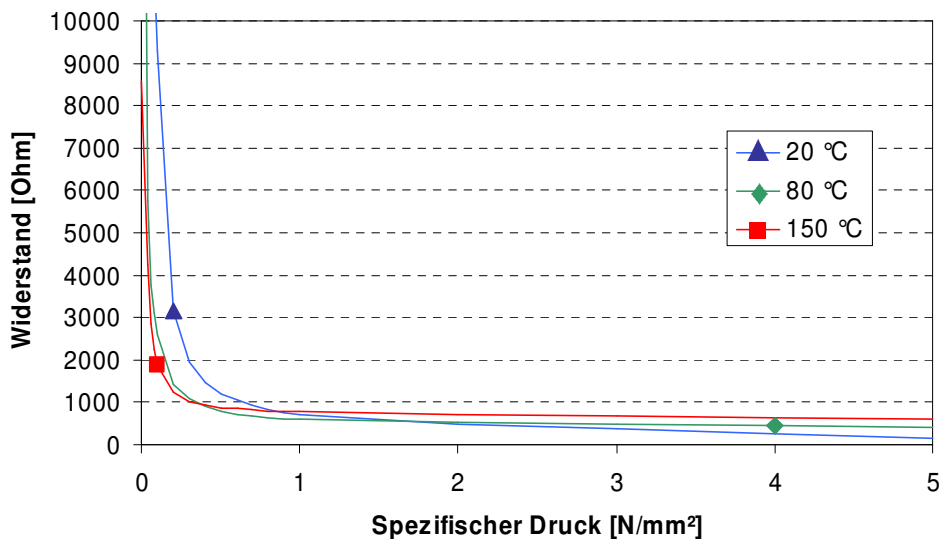


Abbildung 35: Extrapolierte Kalibrierungskurven des spezifischen Drucksensors für drei unterschiedliche Temperaturen (20°C, 80°C, 150°C).

Die Werte des Widerstandes für spezifische Druckwerte über $1,8 \text{ N/mm}^2$ wurden extrapoliert (Abbildung 35). Die Kurven zeigen, dass die Temperatur keinen linearen Einfluss auf den Widerstand hat und somit mit den vorhandenen drei Temperaturabhängigkeiten keine Interpolation bzw. Extrapolation fehlender Temperaturen mit akzeptablem Fehler durchgeführt werden kann.

5.2.7 Layout des Messsystems

In Zusammenarbeit mit dem deutschen Sensorhersteller Weiss-Robotics, Ludwigsburg und dem Alberta Research Center (ARC) in Edmonton/Kanada wurde sowohl die Entwicklung eines Sensors zur Erfassung des spezifischen Drucks, als auch dessen Anbindung an ein mobiles Datenloggersystem (PressMAN®) verwirklicht (Abbildung 36).

Der modifizierte Drucksensor kann somit bei der Herstellung von Holzwerkstoffen in einer Heißpresse eingesetzt werden, sowohl im Labormaßstab (Labor-Taktpresse) als auch im industriellen Rahmen in einer Mehretagenpresse oder einer kontinuierlichen Heißpresse. Mit diesem Messsystem (Drucksensor und Datenlogger) lassen sich unmittelbar auf die Matte wirkende Pressdrücke während des Heißpressprozesses und somit anlagenbedingte Be- und Entlastungsphasen erfassen. Die wirksame Sensorfläche zur Aufnahme des spezifischen Druckes beträgt bei dem hier angeführten Prototyp $1 \times 1 \text{ cm}^2$ bei einer Dicke des Sensors von 2 mm im unbelasteten Zustand.

Der Datenlogger besteht aus einer Datenspeichereinheit (PressMAN®) sowie einer austauschbaren Gasdruckmessspitze variabler Länge. Die Messspitze besteht aus einer Kanüle für die Gasdruckaufnahme, die nicht wie bei herkömmlichen Gasdruckmesssystemen mit Öl gefüllt ist, sowie einem integrierten Thermoelement für die Aufnahme der Temperatur. Der Messbereich für die Gasdruckaufnahme reicht bis ca. 690 kPa ($6,9 \text{ bar}$), entsprechend einer Temperatureaufnahme bis etwa 260°C . Die Messgenauigkeit liegt auch bei hohen Temperaturen noch unter $\pm 1^\circ\text{C}$ (Abbildung 36).

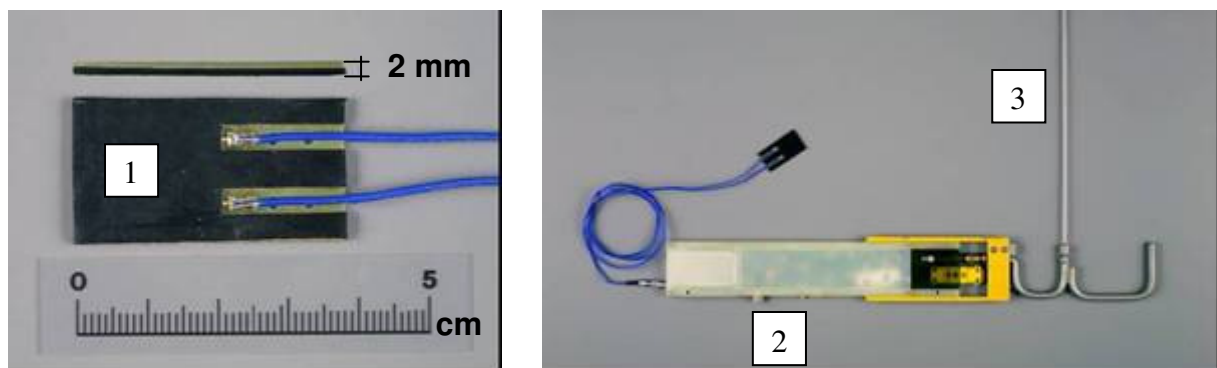


Abbildung 36: Darstellung des Pressdrucksensors, links (1) sowie die Verbindung an den mobilen Datenlogger, rechts (2) mit Messspitze (3).

5.3 Versuchsablauf

5.3.1 Druckschwankungen aufgrund des Pressprogramms

Mithilfe von Laborversuchen sollte der Einfluss des Pressprogramms auf die Ausbildung der Plattenfestigkeiten bzw. der Einfluss der hierdurch induzierten Druck- und Distanzänderungen auf die Holzpartikel-Klebstoffmatrix untersucht werden. Ob es bei Pressprogramm-induzierten Entlastungen bzw. Nachverdichtungen zu einer Beeinträchtigung der inneren Festigkeit kommt, wie in Hypothese 1 vermutet, sollte durch getrennte Laboruntersuchungen des Einflusses von Entlastung und Nachverdichtung auf die Querkzugfestigkeit, das Rohdichteprofil, die Bruchfläche der Querkzugproben, den Temperaturverlauf der Mattenmittelschicht sowie den Pressdruck- bzw. Mattengegendruckverlauf bestimmt werden.

Die Versuche wurden an der Ipates und der Laborpresse durchgeführt. Die Untersuchungen an der Ipates wurden für die Pressprogramm-induzierten Druckänderungen in Grund- und Hauptversuche unterteilt, wobei die Grundversuche zu einer Minimierung des zu untersuchenden Probenumfangs in den Hauptversuchen führen sollte. Die Ergebnisse sollten Rohdichte bereinigt werden, wobei sich der Einfluss des Rohdichteprofiles nicht ausschließen lässt. Mit einer weiteren Versuchsreihe an der Laborpresse wurde daher der Einfluss eines Nachverdichtungsschrittes auf die Plattenqualitäten ohne Einwirkung der Rohdichte und des Rohdichteprofiles bestimmt. Hierfür sollten Laborplatten hergestellt werden, die ein homogenes Rohdichteprofil aufweisen. Eigenschaftsunterschiede, die sich durch unterschiedliche Pressprogramme ergeben, können somit ohne Einflussnahme des Rohdichteprofiles erklärt werden.

5.3.1.1 Grundversuche Ipates

Während industrielle Pressprogramme für MDF-Platten in der Regel sowohl eine Entspannung der Matte als auch eine Nachverdichtung aufweisen (vgl. Abbildung 3), wurden für die hier dargestellten Grundversuche diese beiden Vorgänge voneinander getrennt. Die Trennung erfolgte für zwei unterschiedliche Pressprogramme, die sich in ihren Entspannungs- (10 % und 20 %) bzw. Verdichtungs-niveaus (15 % und 30 %) unterschieden. Abbildung 37 zeigt, dass diese Entspannungen bzw. Verdichtungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Pressintervalls stattfanden. Bei den Grundversuchen wurden jeweils zwei Entspannungs- bzw. Verdichtungs-niveaus (A und B) betrachtet. Bei den Entspannungsversuchen wurde zunächst auf eine Dicke von 5,38 mm (A, 650 kg/m³) bzw. 5,83 mm (B, 600 kg/m³) verdichtet und dann um 10 % (A) bzw. 20 % (B) entspannt. Entsprechend wurde bei den Nachverdichtungsversuchen zunächst auf eine Dicke von 5,83 mm (A, 600 kg/m³) bzw. 7 mm (B, 500 kg/m³) verdichtet und dann um 15 % (A) bzw. 30 % (B) auf die Zieldicke von 5 mm (700 kg/m³) verdichtet.

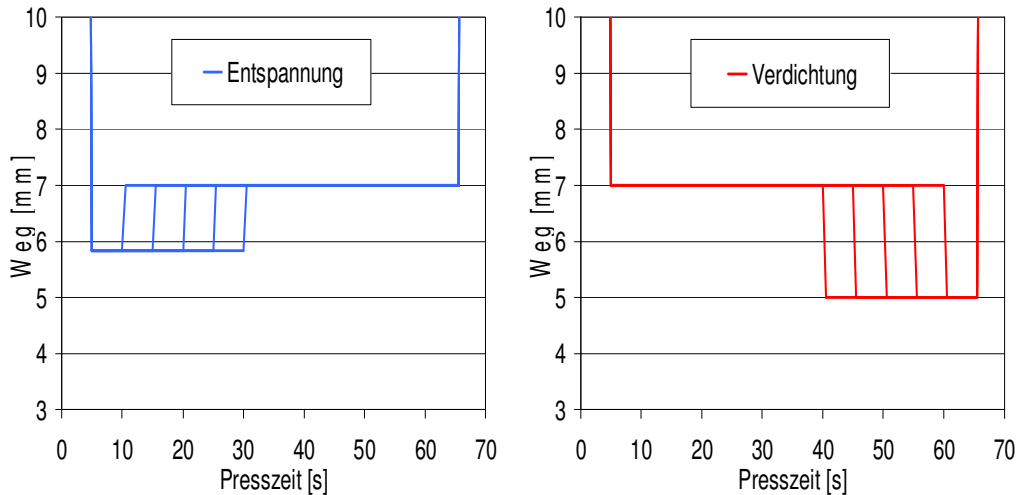


Abbildung 37: Darstellung der Ipates-Pressprogramme. Entspannungsversuch mit 20 % Entspannungsniveau (links) und Nachverdichtungsversuch mit 30 % Verdichtungsniveau (rechts) für Grundversuche.

Die untersuchten Pressparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Variation der Pressparameter während der Grundversuche Ipates.

Klebstoff	mUF (Kauritec 405), MUF (Kauratec 605)
Beleimungsgrad [%]	10
Temperatur [°C]	110; 180
Presszeit [s]	60
Zeitpunkt Entspannung [s]	10; 15; 20; 25; 30
Zeitpunkt Verdichtung [s]	35; 40; 45; 50; 55
Entspannungsniveau [%]	10; 20
Verdichtungsniveau [%]	15; 30
Probenzielstärke [mm]	5
Rohdichte (u=8%) [kg/m ³]	700
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper (gesamt)	6

Für diesen und die nachfolgenden Versuche beinhaltet der Begriff Presszeit nicht die Schließzeit von 5 Sekunden, sondern nur den Zeitraum danach bis zum letzten Öffnen der Presse.

5.3.1.2 Hauptversuche Ipates

Mittels der Grundversuche konnte gezeigt werden, dass in einem herkömmlichen laborangepassten Pressprogramm für die Herstellung von MDF-Platten die Entspannung bzw. Nachverdichtung bei 180°C Presstemperatur den größten Einfluss auf die Ausbildung der Plattenqualitäten hat. Diese Ergebnisse zu Grunde gelegt, wurde in den Hauptversuchen nur noch die Nachverdichtung mit 30 % und einer Presstemperatur von 180°C betrachtet, um sich

der Lösung der Fragestellung des in der Literatur beschriebenen Effektes der Zerstörung der Klebstoff-Holzpartikelmatrix bei einer Nachverdichtung zu nähern.

Die Pressprogramme für die Hauptversuche sind in Abbildung 38 dargestellt. Im Gegensatz zu den Grundversuchen wurden auch frühere Nachverdichtungszeitpunkte gewählt, um die Aussagekraft der Ergebnisse durch die Nachverdichtung von auch wenig ausgehärteten Matten zu erhöhen. Eine Zusammenfassung der Pressparameter findet sich in Tabelle 4.

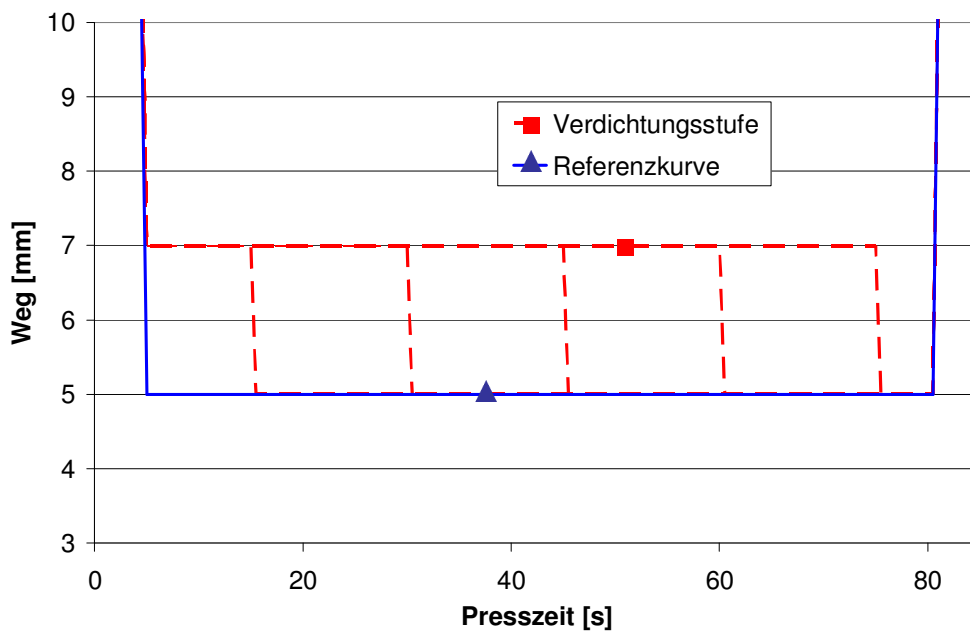


Abbildung 38: Darstellung des Pressprogramms "Nachverdichtung" für Hauptversuche.

Tabelle 4: Variation der Pressparameter

Klebstoff	mUF (Kauritec 405); MUF (Kauratec 605)
Beleimungsgrad [%]	7; 13
Temperatur [°C]	180
Presszeit [s]	75
Zeitpunkt [s]	0; 10; 25; 40; 55; 70
Probenzielstärke [mm]	5
Rohdichte ($u=8\%$) [kg/m^3]	550; 700; 850
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper	6

5.3.1.3 Laborpresse

Die für die Versuchsreihe angewandten Pressparameter sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Variation der Pressparameter für die Laborpresse

Klebstoff	UF (Kaurit 350)
Beleimungsgrad [%]	10
Temperatur [°C/min]	1,4
Presszeit [s]	4200
Probendicke [mm]	10
Rohdichte (u=8 %)[kg/m ³]	650
Zeitpunkt [s]	0; 1950; 2350; 2800; 3250; 3900
Presszeit [min]	70
Anzahl Wiederholungen	2

Die beleimten Fasern wurden bei den Versuchen mit einer durchschnittlichen Anfangstemperatur der Heizplatten von 26°C verpresst. Die Presse wurde zusätzlich zu einer Wegsteuerung mit einer Temperaturrampe von ca. 1,4°C/min gefahren. Die Presszeit wurde auf 70 min. eingestellt, so dass die Mattentemperatur ungefähr 120°C erreichte.

Die Nachverdichtungszeitpunkte wurden so gewählt, dass sie gezielte Temperaturbereiche innerhalb der Mattenmittelschicht abdeckten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Nachverdichtung

Nachverdichtungszeitpunkt [s]	Nachverdichtungs-temperatur [°C]
0	26
1950	70
2350	80
2800	90
3250	100
3900	110

Die über die Wegsteuerung eingestellte Plattenenddicke betrug 10 mm (100%), wobei für die Platten mit Nachverdichtungsstufen eine Vorverdichtung auf 12,5 mm (125%) gewählt und erst im Anschluss daran auf 100 % der Enddicke verdichtet wurde (Abbildung 39).

Die angestrebte Rohdichte der herzustellenden Platten betrug 650 kg/m³, bei einer Zieldicke von 10 mm und einer Plattengröße von ca. 430 x 630 mm².

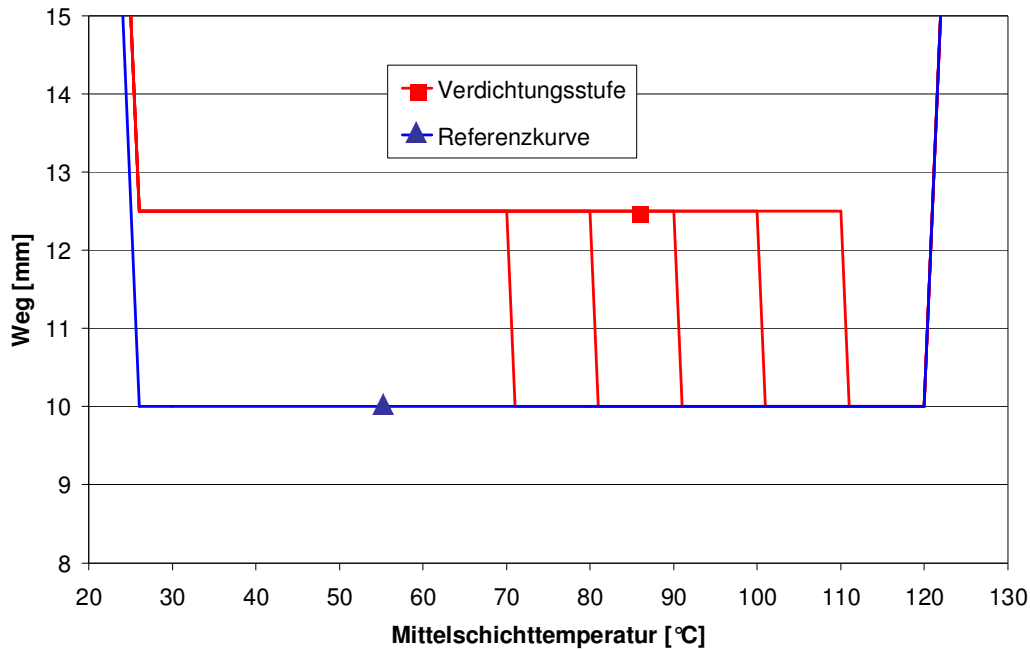


Abbildung 39: Darstellung des Pressprogramms "Nachverdichtung" für die Laborpresse.

5.3.2 Druckschwankungen aufgrund der Rahmenkonstruktion

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte bzw. weiterentwickelte Messsystem (Drucksensor und Datenlogger) sollte im industriellen, kontinuierlich arbeitenden Heißpressprozess erprobt werden. Zusätzlich sollte die mit den Druckänderungen einhergehenden Mat-tendickenänderungen während des Pressvorgangs mit Hilfe eines Distanzsensors erfasst werden. Die Messungen sollten zum einen zeigen, ob es aufgrund der Rahmenbauart der Heißpressen zu Druck- bzw. Distanzschwankungen während des Herstellungsprozesses auf die Holzwerkstoffmatte kommt, zum anderen, ob sich diese Schwankungen bei den untersuchten Pressentypen unterschiedlich stark darstellen. Der Begriff Rahmenbauart wird in diesen Auswertungen speziell für die kontinuierlichen Pressen hervorgehoben, da im Gegensatz zu den konventionellen Taktpressen, das Pressgut kontinuierlich relativ zu den Pressrahmen bewegt wird. Somit kommt es bei dem kontinuierlichen Pressentyp zu einer Streckenlast und keiner Punktlast auf die zu verpressende Holzwerkstoffmatte.

Die Relevanz dieser neuen Messmethode ergibt sich aus den im Literaturteil gemachten Aussagen eines Druckeinflusses auf die Holzpartikel-Klebstoffmatrix mit einem einhergehenden Einfluss auf die Entwicklung der Platteneigenschaften (Hypothese 1). Da der Heißpressprozess mit der dazugehörigen Heißpresse den finanziell aufwendigsten Abschnitt der Holzwerkstoffproduktion darstellt, erscheint eine wissenschaftliche Untersuchung von Faktoren, die eventuell die mechanischen Plattenwerkstoffeigenschaften beeinflussen, als begründet.

5.3.2.1 Messungen im industriellen Heißpressprozess

Für die Bestimmung der vermuteten spezifischen Druck- und Distanzschwingungen aufgrund der Rahmenbauweise wurden zwei neu entwickelte Sensor-Prototypen verwendet. Der für die Industrierversuche verwendete Drucksensor (Abbildung 36) wurde wie bereits beschrieben in Zusammenarbeit mit einem deutschen Sensorhersteller (Weiss Robotics, Ludwigsburg) aus einem bereits bestehenden Messprinzip weiterentwickelt. Der ebenfalls zur Anwendung kommende Distanzsensor (Abbildung 40), der die Distanz zwischen den Stahlbändern unmittelbar neben der Matte misst, wurde vom Alberta Research Council (ARC), Edmonton/Kanada zur Verfügung gestellt.

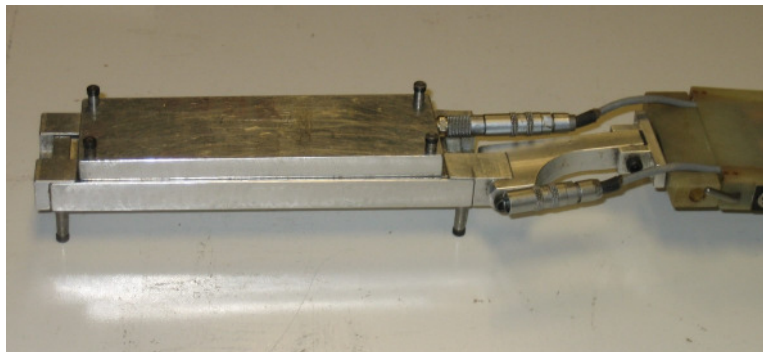


Abbildung 40: Distanzsensor mit Anschluss an den PressMAN® (Quelle: ARC).

Sowohl der Druck- als auch der Distanzsensor wurden mit einem mobilen Datenlogger PressMAN® verbunden, der die gewonnenen Messdaten während des Heißpressprozesses aufzeichnete (Abbildung 41 und Abbildung 42).

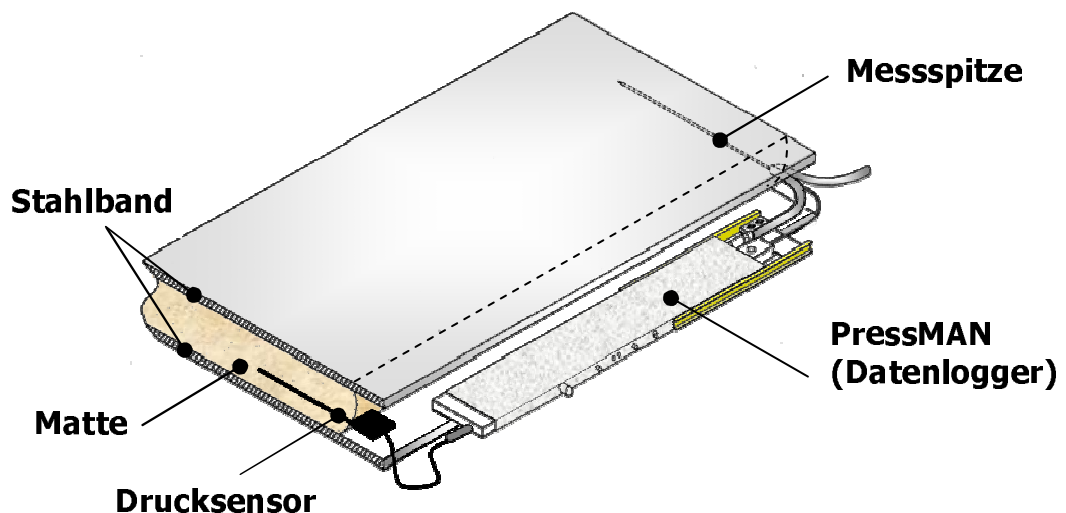
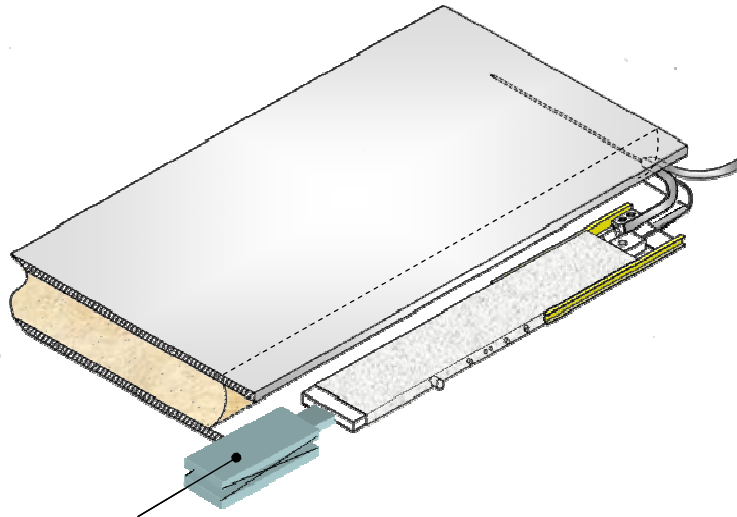


Abbildung 41: Anwendung des Drucksensors und des Datenloggers in einer Heißpresse (verändert nach ARC).

Das verwendete Messsystem (PressMAN[®]) des ARC, misst somit in seiner Standardausführung bereits die Temperatur und den Gasdruck, so dass zusammen mit dem neu entwickelten Drucksensor und dem Prototypen des ARC zur Distanzmessung vier Messgrößen während der Versuche aufgezeichnet wurden.



Distanzsensoren

Abbildung 42: Anwendung des Distanzsensors und des Datenloggers in einer Heißpresse (verändert nach ARC).

Die Messsysteme wurden vor dem Presseneinlauf in Mattenkontakt gebracht und direkt nach dem Pressenauslauf wieder entfernt. Die Einstichtiefe und damit die Messentfernung von der Mattenkante betragen bei dem Drucksensor ca. 10 cm und ca. 30 cm bei der Gasdruck- und Temperaturmessung. Bis auf die Distanzmessung wurde versucht diese Messgrößen in der Mattenmittelschicht zu bestimmen, um einen möglichst geringen Einfluss der Temperatur auf den Sensor zu gewährleisten. Da die gemessenen Matten bzw. Platten jedoch nicht nachträglich aufgetrennt wurden, um die genaue Position des Sensors bzw. der Messspitze zu bestimmen, war eine anschließende Überprüfung, ob die Datenaufnahme in der Mattenmittelschicht geschah, nicht möglich. Zusätzlich wurde die Temperatur auf der Mattenoberfläche gemessen.

Die Lage der Mattenebene zur Druckbestimmung hatte keinen Einfluss auf die Höhe des messbaren Druckes, da der Heißpressprozess keinen dynamischen Verdichtungs- und Entlastungsprozess darstellt, so dass aufgrund der statischen Gegebenheiten in allen Schichten der gleiche Pressdruck gegeben ist. Die unterschiedliche Rohdichteverteilung über die Mattendicke hat bei den gemessenen Fasermatten ebenso keinen Einfluss auf die Messergebnisse, da von einer annähernd gleichmäßigen Verteilung (Streugenauigkeit $\pm 4\%$) der Fasern parallel zur Oberfläche auszugehen ist. Anders stellt sich dies jedoch bei größeren Plattenmaterialien wie z.B. OSB-Strands oder Mittelschichtspan aus, da es dort aufgrund der Partikelgeometrie

und deren Verteilung auch über die horizontale Ebene zu Druckunterschieden kommt, die sich auch durch Überlappungen der verwendeten Holzpartikel erklären.

Die Messungen erfolgten bei drei Holzwerkstoffproduzenten, die MDF im kontinuierlichen Heißpressprozess herstellen, und zwar bei den Firmen Kronopol, Zary/Polen (Siempelskamp-Pressen), MDF-Hallein, Österreich (Küsters-Pressen) und Kronotex, Heiligengrabe (Diefenbacher-Pressen). Um die Messungen an den unterschiedlichen Pressentypen vergleichbar zu machen, wurde an MDF-Matten mit einer Zieldicke von 19-20 mm und einer Zielrohddichte von 700-750 kg/m³ gemessen.

5.3.2.2 Grundversuche Ipates

Um die Auswirkungen von Druckschwankungen im industriellen Prozess, die durch die Rahmenbauweise der kontinuierlichen Heißpressen auf die durchlaufende Matte induziert werden, auf die mechanischen Festigkeiten von Holzwerkstoffen zu untersuchen wurden an der Ipates zuerst orientierende Versuche durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss von Pressrahmenabstand und Vorschubgeschwindigkeit durch die Variation von Frequenz und Amplitude berücksichtigt. Das verwendete Pressprogramm ist in Abbildung 43 und die verwendeten Pressparameter in Tabelle 7 dargestellt.

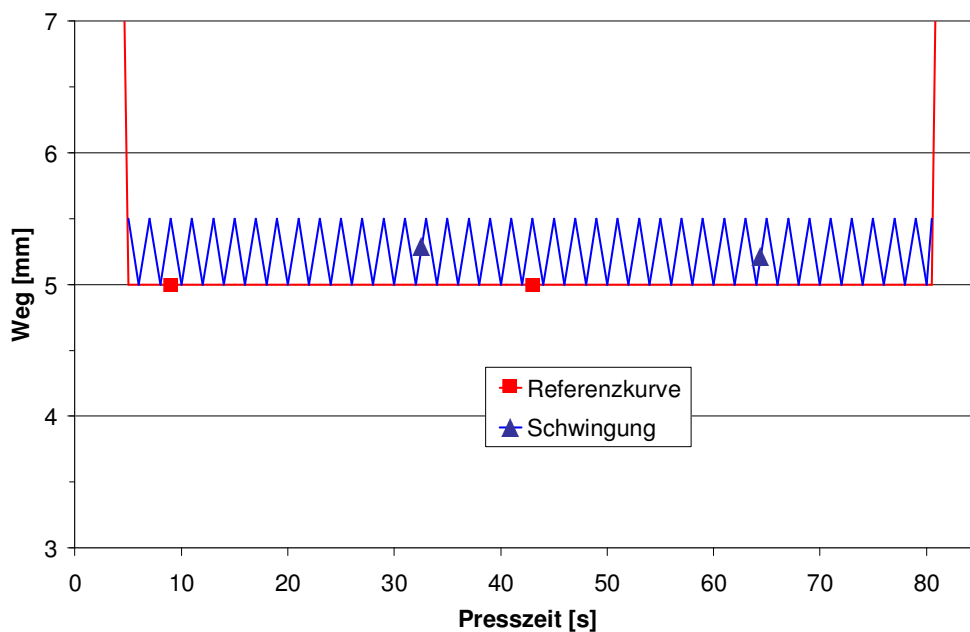


Abbildung 43: Darstellung des Pressprogramms "Schwingung" für Grundversuche.

Tabelle 7: Variation der Pressparameter

Klebstoff	mUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	13
Temperatur [°C]	110; 140; 180
Presszeit [s]	75
Presszeitfaktor [s/mm]	15
Amplitude [mm]	0; 0,05; 0,2; 1
Amplitude [%]	0; 1; 4; 20
Frequenz [Hz]	0,5; 1
Probenzieldicke [mm]	5
Rohdichte (u=8%) [kg/m ³]	700
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper	6

5.3.2.3 Hauptversuche Ipates

Die aus den Grundversuchen gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Planung der Hauptversuche ein, indem zum einen die während des industriellen Heißpressprozesses vorherrschenden Pressparameter (insbesondere Presszeitfaktor) nachgestellt wurden, zum anderen der Einfluss des Druckschwingungszeitraumes auf die Platteneigenschaften zur Untersuchung stand. Die zur Anwendung kommenden Pressparameter sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Variation der Pressparameter

Klebstoff	mUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	3, 10, 17
Presstemperatur [°C]	180
Presszeit [s]	45
Presszeitfaktor[s/mm]	9
Amplitude [mm]	0, 0,05, 0,5
Amplitude [% Probendicke]	0, 1, 10
Schwingungsdauer [% Presszeit]	0, 25, 50, 100
Frequenz [Hz]	0,1/4; 1
Rohdichte (u=8%) [kg/m ³]	550, 850
Probenzieldicke [mm]	5
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper	6

Um den Einfluss der in der Industrie gemessenen Distanzschwankungen nachzuempfinden, wurde Probenkörper nach folgenden Pressprogrammen (Abbildung 44) hergestellt.

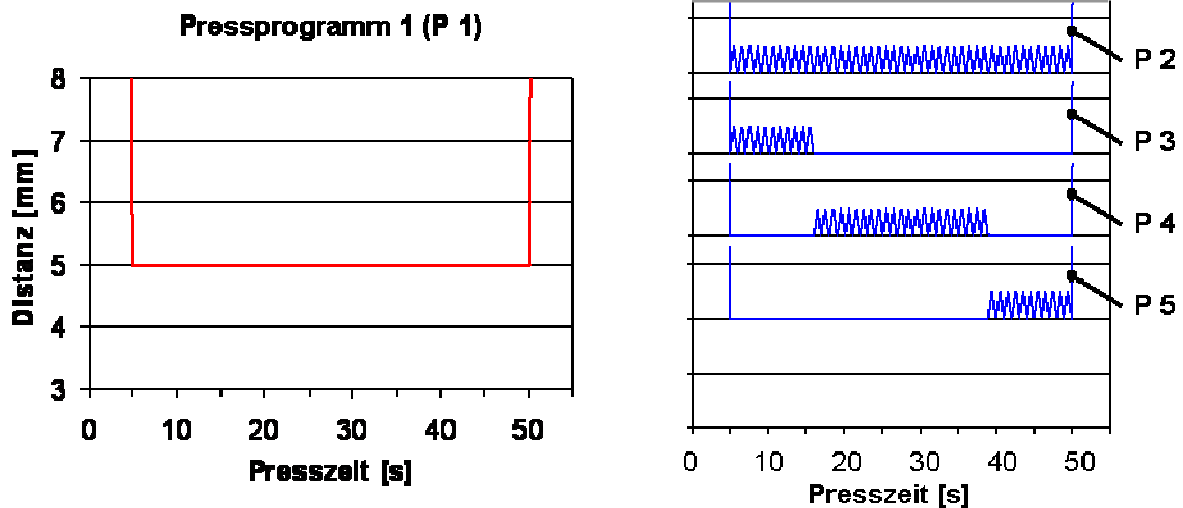


Abbildung 44: Darstellung der Pressprogramme. 1: Referenzprogramm, 2-5: Schwingungsvariation.

Druckschwingungen im Mitteldruckbereich, also im hinteren Pressbereich, zum Zeitpunkt der Mittelschichtaushärtung und damit der vollständigen Aushärtung der gesamten Matte, sollten eine Reduzierung der Querkzugfestigkeiten zur Folge haben (Hypothese 1). Diese Hypothese sollte durch die Variation der Schwingungsdauer einer Überprüfung unterzogen werden, so dass Schwingungen im vorderen und mittleren Bereich zu keinen Querkzugfestigkeitsverlusten gegenüber Referenzplatten führen sollten.

5.3.3 Analyse der Ursachen

Einfluss der Partikelgröße

Zusätzlich zu den Untersuchungen an der Miniaturpresse Ipates sowie der Siempelkamp-Laborpresse, in deren Verlauf der Einfluss von Druckschwankungen aufgrund des Pressprogramms und der Pressenkonstruktion auf die mechanische Festigkeiten, das Rohdichtprofil, den Pressdruckverlauf und die Mittelschichttemperatur dargestellt wird, sollte mittels weiterer mechanischer Untersuchungen ein Lösungsansatz geliefert werden, um Einflussgrößen für die Beeinträchtigung zu bestätigen oder auszuschließen. Die Mechanismen, die zu den vermuteten Festigkeitseinbußen führen, sollten durch einen Vergleich der Querkzugfestigkeiten von Span- (Grobpartikel) mit Faserproben (Feinpartikel) bestimmt werden. Aufgrund der jeweiligen Partikelgeometrie war davon auszugehen, dass es bei einwirkenden Druckänderungen zu unterschiedlichen Verformungsverhalten und damit auftretenden Kraft- bzw. Spannungseinflüssen auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix innerhalb der Matte kommt (Hypothese 2).

ABES

Mithilfe des Automated Bonding Evaluation System (ABES) sollte zusätzlich der Einfluss eines Nachverdichtungsschrittes bzw. einer Druckzunahme während des Heißpressvorgangs auf die Scherfestigkeit der Klebfuge getestet werden. Die Ergebnisse sollten darüber Aufschluss geben, inwieweit sich die mittels der IPATES Versuche gewonnen Aussagen bezüglich des Einflusses eines Nachverdichtungsschrittes auf die Querkzugfestigkeiten, über den Holzpartikel (Faserstoff) oder den verwendeten Klebstoff begründen lassen. Dafür sollte der Einfluss der Haltezeit nach dem Verdichtungsschritt bestimmt werden und mit den IPATES Ergebnissen verglichen werden. Hierdurch wären die Auswirkungen eines Nachverdichtungsschrittes bzw. sowie der restlichen Presszeit (Haltezeit) nach dem Verdichten bis zum Öffnen der Presse auf die Festigkeitseigenschaften darstellbar (Hypothese 3). Zusätzlich sollten mit der ABES Druckeinflüsse auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bei Werkstoffen aus größeren Partikeln gegenüber denen bei Faserplatten untersucht und nachgestellt werden (Hypothese 2).

Extraktion

Als mögliche Ursache für die angenommenen schwächeren mechanischen Eigenschaften von nachverdichteten Faserplatten sind sowohl mechanische als auch chemische Veränderungen der Plattenmaterialien während des Nachverdichtungsvorganges denkbar.

Die zu überprüfenden Hypothesen bestehen darin, dass der mit einer verspäteten Nachverdichtung bzw. Schwingung einhergehende Pressdruckverlauf über die Presszeit zu einer schlechteren Verteilung des Klebstoffes auf der Holzpartikeloberfläche und damit zu einer ungleichmäßig ausgebildeten Klebfuge führen könnte. Möglicherweise spielt hierbei auch die bei einer späteren Nachverdichtung höhere Viskosität des Klebstoffes eine Rolle (Hypothese 4). Eine spät einsetzende Nachverdichtungsphase könnte zudem bedeuten, dass die Vernetzung des Klebstoffes zum Duromer nicht optimal verläuft, so dass eine Klebfuge mit geringerem Vernetzungsgrad entsteht. In einer solchen Klebfuge könnte der Anteil an löslichen oligomeren Klebstoffbruchstücken und an löslichem Harnstoff erhöht sein. Des Weiteren ist zu mutmaßen, dass die ebenfalls länger niedrig gehaltene Rohdichte bis zum Nachverdichtungsschritt bzw. die schwingende Änderung der Rohdichte zu einem verstärkten Ausgasen von Formaldehyd führt, was wiederum ein geringeres Abbinden des Harnstoffes innerhalb der zu verpressenden Probe nach sich zöge (Hypothese 5). Daher sollte mit Hilfe geeigneter Extraktionsmethoden untersucht werden, ob unterschiedliche Pressbedingungen die Menge der nicht in das Polymernetzwerk eingebauten Klebstoffbestandteile beeinflusst. Hierzu wurde auf zwei in der Literatur bekannte Verfahren zurückgegriffen, die für die vorliegende Arbeit leicht modifiziert wurden:

1. Extraktion mit Warmwasser und anschließende Bestimmung des Harnstoffgehaltes mit Urease (Roffael *et al.* 2003).

2. Extraktion mit Dimethylformamid (DMF) und gravimetrische Bestimmung der Extraktstoffmenge (Technocell 2002).

Mikroskopie

Die Beeinflussung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix mittels Druckänderungen, die durch das Pressprogramm und die Rahmenkonstruktion einer kontinuierlichen Heißpresse auf die zu verpressende Holzwerkstoffmatte wirken (Hypothese 1), wurde im Laufe der dieser Arbeit ausführlich dargelegt. Aus den Verklebungstheorien abgeleitet, wären Brüche innerhalb der Klebfuge bzw. der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix und damit die Beeinträchtigung der mechanischen Festigkeiten möglich. Wie Butterfield *et al.* 1992 darlegt, findet der Bruch bei einem Querzugtest jedoch vornehmlich in der Zellwand bei Proben aus Fasern statt.

Mit Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen sollten aus diesem Grunde Bruchflächen untersucht werden, die an Schwingungs- und Nachverdichtungsproben verursacht wurden. Zeigt sich an diesen Aufnahmen auch bei Proben, die durch den Einfluss einer späten Nachverdichtung bzw. einer hohen Amplitude während des Heißpressens in ihrer Querzugfestigkeit verringert wurden, ein Bruch hauptsächlich in der Zellwand, so ist die Beeinträchtigung der Klebfuge auszuschließen bzw. geringer als die Beeinträchtigung der Faser. Zeigen sich hingegen verstärkt Brüche in der Klebfuge, so wäre damit die Einflussnahme von Druckänderungen auf die Klebfuge nachgewiesen (Hypothese 1). Der letzte Fall wäre gleichbedeutend mit einem verringerten Auftreten von sichtbaren Brüchen in der Faser, da die zerstörten Faserstellen nicht mehr herausgelöst würden. Des Weiteren sollte sich nach Hypothese 4 in den Bruchbildern zeigen, ob Druckschwankungen zu einer verringerten Vernetzung des Klebstoffes mit der Oberfläche des Holzpartikels führen.

5.3.3.1 Einfluss der Partikelgröße

Um die Ursache für die Querzugfestigkeitsabnahme durch einen Nachverdichtungsschritt (Tabelle 9) bzw. Schwingungen (Tabelle 10) während des Heißpressprozesses vergleichend zu Faserproben zu klären, wurden aus einem Mittelschichtspan (vgl. Abbildung 16) Prüfkörper mit folgender Pressparametervariation in der Ipates hergestellt.

Tabelle 9: Variation der Pressparameter für Nachverdichtung

Klebstoff	mUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	7; 13
Temperatur [°C]	180
Presszeit [s]	75
Zeitpunkt [s]	0; 10; 25; 40; 55; 70
Probenzieldicke [mm]	5
Rohdichte (u=8%) [kg/m ³]	550; 850
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper	6

Tabelle 10: Variation der Pressparameter für Schwingung

Klebharz	mUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	13
Temperatur [°C]	140, 180
Presszeit [s]	75
Presszeitfaktor [s/mm]	15
Amplitude [mm]	0; 0,05; 0,2; 1
Amplitude [%]	0; 1; 4; 20
Frequenz [Hz]	0,5; 1
Probenziöldicke [mm]	5
Rohdichte (u=8%) [kg/m ³]	700
Anzahl Wiederholungen	3
Anzahl Prüfkörper	6

5.3.3.2 ABES

Für die Versuchsreihe wurden Buchenfurnierstreifen mit einer mittleren Dicke von 0,88 mm ($\pm 0,05$ mm) sowie einer Länge von 170 mm und einer Breite von 20 mm mit einer Überlappung von 0,5 mm in der ABES mit einem Kauritec 405 ohne Härterzugabe verklebt. Die Furniere wurden einen Tag im Normklima 20°C/65 % relative Luftfeuchte gelagert. Der Auftrag des Klebstoffes erfolgte mittels eines Furnierstreifens, mit dem eine Auftragsmenge von 50-60 g/m² realisiert werden konnte. Hierbei wurde der Klebstoff auf einer Breite von ca. 10 mm verstrichen, um somit eine gleichmäßige Klebstoffverteilung auf der für die Scherfestigkeit relevanten Breite von 5 mm zu erzielen. Die Auftragsmenge wurde aus dem Mittelwert von 10 ausgewogenen und beleimten Furnierstreifen bestimmt.

Der Scherzugtest wurde in der ABES (Abbildung 26) vollzogen. Um den Einfluss einer Nachverdichtung zu untersuchen, wurde während des Pressprozesses der Pressdruck von 1 bar manuell auf 3 bar erhöht. Dieser Vorgang dauerte ca. 4 Sekunden, so dass von einer 4 Sekunden langen Nachverdichtungsschließzeit gesprochen werden kann. Die Variation der Pressparameter ist aus Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 11: Pressparameter

Klebstoff	Kauritec 405	
	Temperatur [°C]	120
Presszeit [s]	60	40
Referenzdruck [N/mm ²]	1; 3	
Nachverdichtungsbeginn [s]	0; 5; 10; 30; 50	0; 5; 10; 20; 30; 20+30; 30+30
Messwiederholung [n]	10	

Zusätzlich zu den Nachverdichtungszeitpunkten wurden die Referenzkurven bei jeweils 1 N/mm² bzw. 3 N/mm² ohne Nachverdichtung aufgenommen. Die Druckbelastung während des Versuches erfolgte auf die Tangentialfläche in radialer Richtung des Buchenfurniers. Die in der Literatur stehenden Druckfestigkeiten bzw. Druck-E-Module von

300....500....700 N/mm² lassen bei den wirkenden Pressdrücken auf die Überlappungsfläche der Furniere eine rechnerische Dehnung bzw. Stauchung von 0,003 mm schließen. Diese Wegänderung ist vernachlässigbar, so dass von einer reinen Druckbelastung während des Versuches auszugehen war.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die durch eine Scherprüfung oder einen Querzugtest erlangt werden, bestätigen Suzuki und Miyagawa (2003) sowie Heinemann (2004) auf der Grundlage, dass beide Tests zu einem Bruch in der Mittelschicht des Prüfkörpers führen. Der lineare Zusammenhang ist exemplarisch in Abbildung 45 dargestellt.

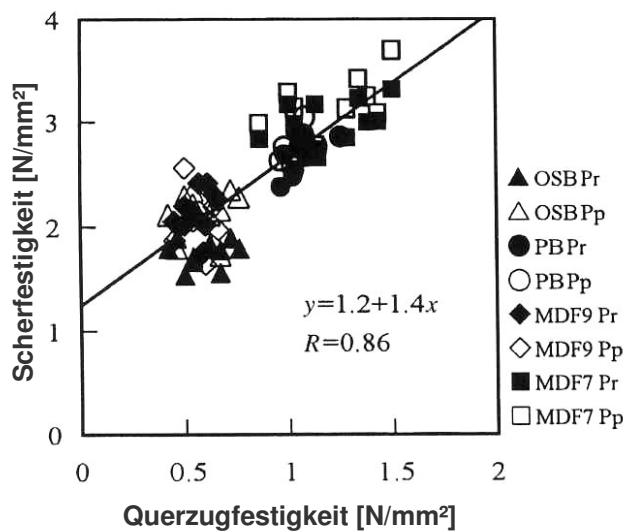


Abbildung 45: Verhältnis von Querzug- zu Scherfestigkeit bei OSB, MDF und Spanplatten (nach Suzuki und Miyagawa, 2003).

5.3.3.3 Extraktion

Für die Extraktion wurden Faserproben verwendet, die sich entsprechend den bereits beschriebenen Nachverdichtungsversuchen hergestellt wurden (Tabelle 12).

Tabelle 12: Pressparameter für chemische Untersuchung.

Pressparameter	Faserprobe			
	A	B	C	D
Presszeit [s]	—	75	75	60
Nachverdichtung [s]	—	—	70	—
Presstemperatur [°C]	—	180	180	110
Klebstoff	—	Kauritec 405		
Beleimungsgrad [%]	—	10		

Warmwasserextraktion

Die Extraktion mittels Heißwassers stützt sich auf Untersuchungen von Roffael et al. (2003), der in seinen Untersuchungen mit dieser Vorgehensweise Unterschiede in der Beleimung aufgrund des extrahierbaren Harnstoffs von Faserstoffen aufzeigte, die mit der Blow-Line oder dem Blender-Verfahren beleimt wurden. Mit der Bestimmung des Harnstoffgehalts an einem Heißwasserextrakt des beleimten Faserstoffes schloss er auf den Kondensationsgrad des Klebstoffes und damit auf den Vernetzungsgrad der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix. Hierbei extrahierte Roffael *et al.* 10 g Material mit Wasser bei einer Temperatur von 50°C für 24 Stunden. Die Konzentration des gelösten und damit für die Ausbildung des Netzwerkes nicht mehr zur Verfügung stehenden Harnstoffes wurde mit einer enzymatischen Hydrolyse des Harnstoffes mit Urease bestimmt. Die gebildeten Ammoniumverbindungen wurden anschließend mittels Indophenol mengenmäßig bestimmt.

Die Extraktion mit warmem Wasser erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise von Roffael *et al.* (2003). Die Faserplatte wurde vorzerkleinert, mit einer Retsch-Mühle gemahlen und anschließend gesiebt. 10 g (lutro) der Siebfraction (<1 mm) wurden 24 h in 350 ml destilliertem Wasser bei 50°C digeriert. Anschließend wurde die Suspension mit 10 ml Ureaselösung (0,6 mg/ml) (Fluka, *Canavalia ensiformis*, 9,3 U/mg) für 20 min bei 40°C in einem Schüttelwasserbad inkubiert. Die Suspension wurde daraufhin destilliert, bis 100 ml Destillat in der Vorlage waren. Das Destillat wurde dann mit 50 ml 0,1 m HCl und dem Indikator Methylorange versetzt und mit 0,1 m NaOH bis zum Umschlagspunkt titriert. Die Menge an gelöstem Harnstoff [%] bezogen auf die eingewogene Fasermenge lässt sich nach Gleichung 8 bestimmen:

$$\text{Harnstoff}[\%] = \frac{(50 - \text{Verbrauch}_{\text{NaOH}}) * 0,15 * 2[\text{ml}]}{\text{Einwaage}_{\text{Faser}}[\text{g}]} * 100 \quad (8)$$

DMF-Extraktion

Die DMF-Extraktion folgte einer Methode zur Qualitätsbestimmung von Overlay-Papieren (Technocell Dekor 2002). Hierbei wird ein Harzfilm (Overlay) mit DMF (Dimethylformamid) extrahiert und der Rückstand gravimetrisch bestimmt. Je mehr Extraktstoff erhalten wird, desto geringer ist der Aushärtungsgrad und damit die Qualität des Harzfilms. Die Bewertung des Vernetzungsgrades findet hierbei über die mittels DMF lösliche Menge an Harnstoff-Formaldehyd und/oder Melamin statt, die nicht mehr für die Kondensationsreaktion und damit die Ausbildung des Netzwerkes zur Verfügung steht. Mit dieser Methode ist somit die Bestimmung des Härtingsverlaufes über die Presszeit von Harzfilmen möglich (Abbildung 46). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode erstmals an Holzwerkstoffproben getestet.

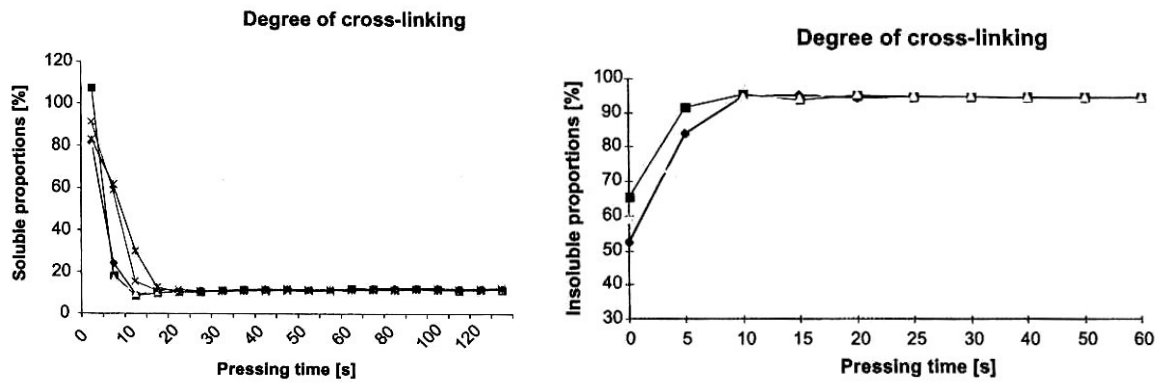


Abbildung 46: Vernetzungsgrad von Harzfilmen über die Pressezeit (Technocell Dekor 2002).

In Anlehnung an diese Methode, wurden 10 g (Iutro) Fasermaterial in 400 ml DMF suspendiert und 40 min bei 50°C gerührt. Die Suspension wurde anschließend filtriert und das im Filtrat enthaltene Lösungsmittel (DMF) im Rotationsverdampfer entfernt. Der Rückstand wurde dann im Exsikkator über Phosphorpentoxid getrocknet und zusätzlich für 24 h einer Darrung bei 105°C unterzogen. Der Rückstand wurde jeweils gravimetrisch bestimmt.

5.3.3.4 Mikroskopie

Aus den im Querschnitt erhaltenen Proben wurden Prüfkörper mit einer zu betrachtenden Fläche von 1x1 cm² herausgetrennt. Aus jeder Herstellungsart wurde ein Prüfkörper aus der Probenmitte ausgewählt und für 24 h im Exsikkator über Phosphorpentoxid getrocknet und anschließend in einem Biorad SC510 SEM Coating System mit Gold bedampft ("sputter-coating"). Die Goldbedampfung wurde zwei Mal je Prüfkörper durchgeführt, um aufgrund der Topografie eine ausreichende Beschichtung zu gewährleisten. Für die Bedampfung wurde ein Vakuum von $6 \cdot 10^{-2}$ mbar angelegt und eine Bedampfungszeit von jeweils 165 s eingestellt. Zur Untersuchung der Bruchflächen wurden die Prüfkörper in ein REM überführt und vergrößert dargestellt. Das REM S-520 der Firma Hitachi arbeitete bei den für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen stets mit einer Beschleunigerspannung von 15 kV.

Für die REM-Aufnahmen wurden Faserproben gewählt, die sich in ihrer Herstellung an die bereits erfolgten Versuche über den Einfluss einer Nachverdichtung und einer Schwingung anlehnten. Hierbei wurden jeweils Referenzproben und Proben mit maximaler Einflussnahme produziert, um den Vergleich an Extremwerten vorzunehmen. Die entsprechenden Herstellungsparameter sind in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Tabelle 13: Variation der Pressparameter für REM-Proben mit Nachverdichtung.

Klebstoff	MUF (Kauritec 605)
Beleimungsgrad [%]	10
Temperatur [°C]	180
Presszeit [s]	75
Zeitpunkt [s]	0, 70
Probenzielstärke [mm]	5
Rohdichte ($u=8\%$) [kg/m ³]	550, 850
Anzahl Wiederholungen	2
Anzahl Prüfkörper	4

Tabelle 14: Variation der Pressparameter für REM-Proben mit Schwingung.

Klebstoff	MUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	10
Temperatur [°C]	180
Presszeit [s]	45
Amplitude [mm]	0; 1
Amplitude [%]	0, 20
Frequenz [Hz]	1
Probenzielstärke [mm]	5
Rohdichte ($u=8\%$) [kg/m ³]	550, 850
Anzahl Wiederholungen	2
Anzahl Prüfkörper	4

Aus den erhaltenen Prüfkörpern einer jeden Pressparametervariation wurde jeweils einer ausgewählt und für die REM-Untersuchungen aufgearbeitet. Somit wurden acht heißgepresste und ein zusätzlicher Prüfkörper mit unbeleimten Fasern untersucht.

Die Proben zeigten den bereits in dieser Arbeit ausführlich dargestellten Querkraftfestigkeitsverlauf. Hierbei hatte ein stärkerer Einflussfaktor (spätere Nachverdichtung, höhere Amplitude, höhere Rohdichte) eine höhere Abnahme der Querkraftfestigkeit zur Folge.

5.3.4 Simulation

Rohdichteprofil und Aushärtungsgrad des Klebstoffes beeinflussen maßgeblich die mechanischen Festigkeiten. Sie reichen alleine aber noch nicht zu einer eindeutigen Bestimmung dieser aus. Eine Voraussetzung für die Modellierung und Simulation der Entstehung von Platteneigenschaften ist die Berücksichtigung von Effekten, die sich aus den Druckschwankungen beim Pressen und den hierdurch verursachten Verringerungen der Festigkeiten ergeben. Hierfür sind systematische Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Be- und Entlastungen einer Matte und den mechanischen Platteneigenschaften erforderlich.

Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeit sollte deshalb ein Modellansatz zur Beschreibung des Einflusses von Änderungen der Mattendicke erarbeitet und in das bestehendes

physikalisches Modell zur Simulation des Heißpressvorgangs, der Virtual Hot Press (VHP), integriert werden. Bisher wurde in diesem Modell von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass es nach einer anfänglichen Verdichtung der Matte zu keinen weiteren Dickenänderungen kommt, wodurch man zu tendenziell optimistischeren Vorhersagen der Festigkeitsentwicklung kommt. Wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit mehrfach vermutet, kommt es im industriellen Heißpressprozess von Holzwerkstoffen jedoch zu Dickenänderungen der Matte aufgrund des Pressprogramms oder der Pressenkonstruktion (Rahmen) mit den dargestellten Auswirkungen auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit. Aus diesem Grund sollte die Auswirkungen von Druck- und Distanzänderungen während des kontinuierlichen Heißpressprozesses von Holzwerkstoffen auf die Querkzugfestigkeit erstmals in einer Simulation erfasst werden.

5.3.4.1 Grundversuche

Der durchgeführte Versuchsaufbau zur Erlangung der nötigen Daten für das Simulationsmodell beschränkt sich auf den Einfluss einer Dickenänderung durch das Pressprogramm. Beobachtet werden sollte anhand dieser Versuchsreihe, wie stark die Querkzugfestigkeit durch die Nachverdichtung absinkt und wie sich die Querkzugfestigkeit nach dieser Strukturänderung weiter entwickelt.

Bei den hier IPATES in-situ bezeichneten Versuchen lässt sich die Entwicklung der Querkzugfestigkeit während des Heißpressvorgangs direkt verfolgen. Anders als bei allen bisher beschriebenen Versuchen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in dieser Versuchsreihe die Prüfkörper sofort nach der Verdichtung auf die Querkzugfestigkeit geprüft (siehe Abschnitt 5.3), bzw. nach einer weiteren Haltezeit danach. Ziel dieser Versuchsreihe war es, Veränderungen der Mattenstruktur, wie sie bei einer Nachverdichtung stattfinden, hervorzurufen und den Einfluss dieser Strukturänderungen auf die Querkzugfestigkeit zu bestimmen. Hierzu wurde ein Pressprogramm gewählt, das die Matte kurzzeitig nachverdichtet, diese dann aber wieder in ihre Ausgangshöhe zurückfedern lässt (Abbildung 47). Da die Proben während des Versuchsablaufs mit den Heizplatten verklebt waren, wurde anhand des Pressdruckverlaufs bestätigt, dass die Auslenkung der Matte nicht durch die Zugsbewegung der Presskolben verursacht, sondern aufgrund der rheologischen Eigenschaften der Holzpartikel selbst initiiert wurde.

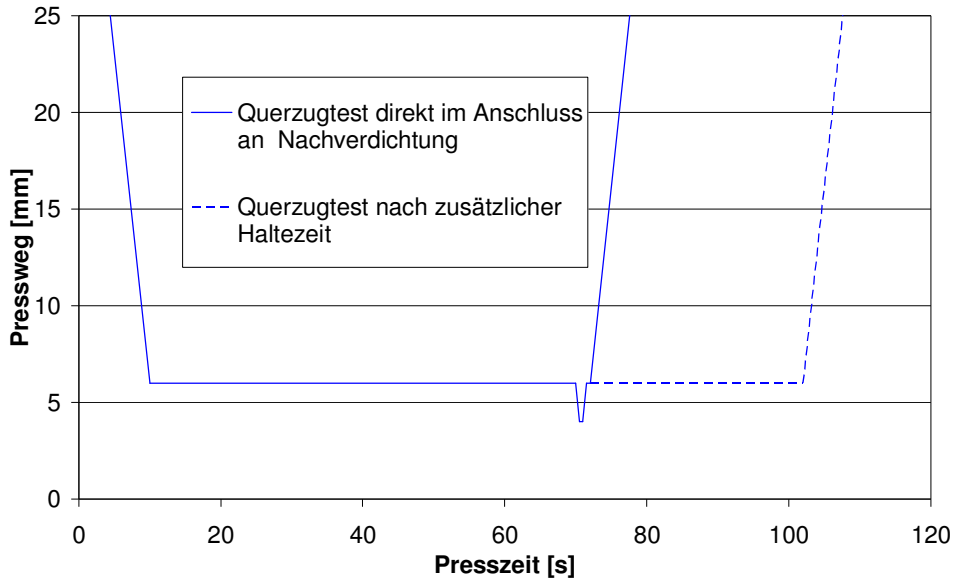


Abbildung 47: Darstellung eines exemplarischen Pressprogramms mit einem Nachverdichtungsschritt.

Aufgrund der Rückfederung auf die vorgegebene Ausgangsdicke lassen sich die Ergebnisse eindeutig einem gemeinsamen Dichtewert zuordnen und müssen nicht Rohdichte befreit werden. Zum Vergleich wurden diesen Versuchen Referenzmessungen ohne Nachverdichtung gegenübergestellt. Die Variation der Pressparameter ist aus Tabelle 15, der vollständige Versuchsplan aus Tabelle 16 ersichtlich.

Frühere Nachdruckzeitpunkte konnten im Rahmen dieser Versuche nicht durchgeführt werden, da die Aushärtung des verwendeten PU-Klebstoffes zur Fixierung der Faserplatte an die Pressbleche in Abhängigkeit von der jeweiligen Presstemperatur zu einer Grenzzeit führte, die für die nötige Abbindung des PU-Klebstoffes nötig war.

Tabelle 15: Variation der Pressparameter

Klebstoff	mUF (Kauritec 405)
Beleimungsgrad [%]	10
Temperatur [°C]	100; 140; 180
Faserfeuchte [%]	12
Probendicke [mm]	6
Nachverdichtungs- und Prüfzeitpunkt [s]	45; 60; 90; 120; 180; 240
Nachverdichtungsschritt [mm]	1; 2
Rohdichte [kg/m ³]	583; 750; 900

In den Versuchen wurde eine Probendicke von 6 mm und nicht von 5 mm, wie in den vorangegangenen Versuchen gewählt, da die maximale Nachverdichtung von 2 mm durch die Pressenkonstruktion der Ipates sonst nicht durchführbar gewesen wäre. Die Presse weist im geschlossenen Zustand einen Pressspalt von ca. 3 mm auf, der bei der hier Anwendung fin-

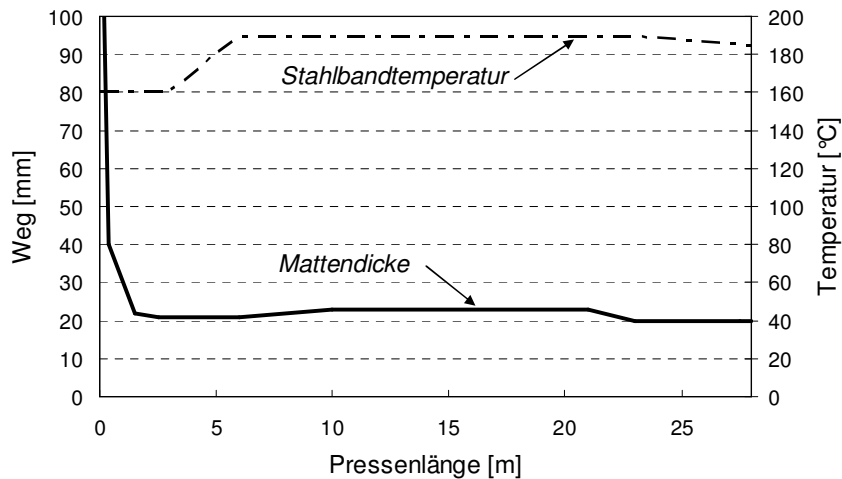


Abbildung 48: Verlauf von Stahlbandtemperatur und Mattendicke als Input-Parameter für das Simulationsbeispiel. Nachverdichtungsschritt hier nach 21 m Pressenlänge.

Dargestellt werden zwei Simulationsläufe, für die abgesehen vom Nachverdichtungszeitpunkt (nach 21 bzw. 24 m) identische Anfangs- und Randbedingungen gewählt wurden. Die Anfangs- und Randbedingungen (im Folgenden Input-Parameter genannt) sind in Abbildung 48 und Tabelle 17 zusammen gefasst.

Tabelle 17: Input-Parameter für das Simulationsbeispiel

Material	MDF-Fasern (Kiefer)
Mattenhöhe (vor Heißpresse) [mm]	160 mm
Zieldicke [mm]	20 mm
Zieldichte (atro) [kg/m ³]	700; 800
Flächengewicht [kg/m ²]	15,3; 17,5
Mattenfeuchte [%]	9,6
Mattentemperatur [°C]	26
Pressenlänge [m]	28
Mattenbreite [mm]	2700
Vorschub [mm/s]	140
Presszeitfaktor [mm/s]	10

5.3.5 Maßnahmenkatalog

Die Ergebnisse der bisher angestellten Versuche zur Klärung des Einflusses von Druckänderungen während des Heißpressprozesses auf die mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen sowie die Bestimmung der Ursachen für die Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zeigten, dass auch ein Zusammenspiel von Rohdichteprofil und Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zu den beobachteten Querkzugfestigkeitsverlusten führte. Unter Berücksichtigung der erhaltenen Ergebnisse aus den Industrie- und Labormessungen sowie der

Simulationsergebnisse, wurde aus diesen Gründen ein Maßnahmenkatalog erarbeitet, der zur Vermeidung kritischer Be- und Entlastungsphasen während des industriellen, kontinuierlichen Heißpressprozesses aufgrund des Pressprogramms dienen soll. Erst mit dem Wissen über Druckänderungen in einem die mechanischen Festigkeiten mindernden Ausmaß bzw. Dauer und Zeitpunkt kann es zu einer Vermeidung derselben durch geeignete Maßnahmen kommen.

Der zu erarbeitende Maßnahmenkatalog soll somit als eine Hilfestellung zur Abschätzung des Einflusses von Nachverdichtungen und Entlastungen in Abhängigkeit von Stärke und Zeitpunkt auf das entstehende Rohdichteprofil sowie die Mattentemperatur und damit auf die Ausbildung lokaler Festigkeiten (Querzugfestigkeiten) dienen.

Zur Erstellung des Maßnahmenkatalogs wurde, wie bereits bei den vorangegangenen Laborversuchen, von einem schematisierten Standard-Pressprogramm für die Herstellung von MDF (Abbildung 49) ausgegangen. Hierbei folgt auf die erste Verdichtung (Hochdruckphase) eine Entspannung der Matte (Niederdruckphase) mit einer abschließenden Kalibrierung auf die Zieldicke (Mitteldruckphase). Gemäß dieser Einteilung konnten die in Tabelle 18 aufgelisteten acht Einflussgrößen während des Heißpressprozesses benannt werden. Als hiervon beeinflusste Zielgrößen werden im Folgenden das Rohdichteprofil, die Mattentemperatur sowie die Querzugfestigkeit betrachtet und untersucht. Mittels der zuvor im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wurden die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Zielgrößen abgeleitet und grafisch dargestellt.

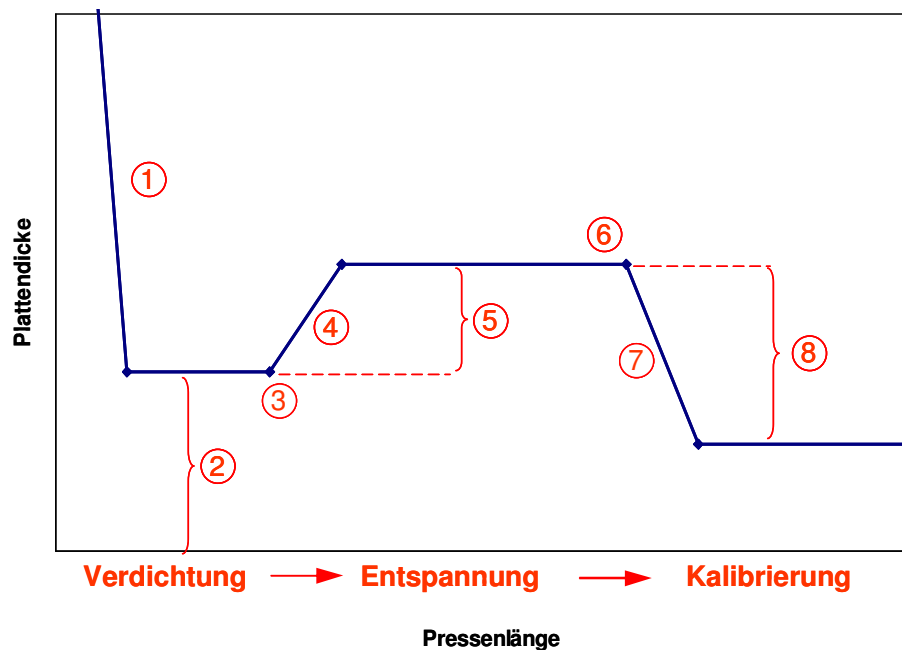


Abbildung 49: Einteilung eines Pressprogramms für den Maßnahmenkatalog.

Dabei wurden, zusätzlich zu den Aussagen der Laboruntersuchungen und der Simulationsrechnungen, auch frühere Arbeiten zur Entstehung des Rohdichteprofiles wie z.B. Ruf (2003), Literaturangaben sowie Expertenmeinungen in die Ausarbeitung des Maßnahmenka-

talogs mit einbezogen. Die Literaturangaben sind für den jeweiligen Fall angegeben, die anderen Quellen sind nicht kenntlich gemacht worden.

Tabelle 18: Einflussgrößen des Pressprogramms

Programmabschnitt	Kurz:
1. Schließgeschwindigkeit	SG
2. Niveau Erstverdichtung	NV
3. Entspannungszeitpunkt	EZ
4. Entspannungsgeschwindigkeit	EG
5. Niveau Entspannung	NE
6. Kalibrierungszeitpunkt	KZ
7. Kalibrierungsgeschwindigkeit	KG
8. Niveau Kalibrierung	NK

Die erste ausgearbeitete Form des Maßnahmenkatalogs wurde in Anlehnung an die Standard-Delphi-Methode den beteiligten Industriepartnern zum Kommentieren getrennt und ohne Diskussion vorgelegt. Die erhaltenen Anmerkungen zu den einzelnen aufgelisteten Einflussgrößen und Programmschritten wurde bei Rückerhalt eingearbeitet. Die Prozedur des Verbesserns und des wiederholten Zuschickens zum Überdenken der gemachten Aussagen seitens der Industriepartner wurde solange wiederholt bis der kleinste gemeinsame Nenner der Beteiligten gefunden wurde. Nach der Bildung eines Mittelwertes bzw. nach Erreichung eines Konsens der unterschiedlichen Meinungen wurde der Maßnahmenkatalog mit den Industriepartnern Kronotex (Heiligengrabe), Kronopol (Zary/Polen) und MDF-Hallein (Österreich) in Einzelgesprächen diskutiert. Die Kommentare der Industriepartner flossen in die endgültige Version des Maßnahmenkatalogs ein, so dass letztendlich die Einflussgrößen von acht auf fünf wesentliche reduziert wurden. Dabei handelt es sich um die Einflussgrößen 1 (Schließgeschwindigkeit), 2 (Niveau Erstverdichtung), 3 (Entspannungszeitpunkt), 5 (Niveau Entspannung) und 6 (Kalibrierungszeitpunkt).

Wichtiges Kriterium für die Darstellungsform des Katalogs war eine gute Übersichtlichkeit und Lesbarkeit der Aussagen. Andererseits war aber eine zu starke Vereinfachung von Sachverhalten zu vermeiden. Insofern stellt die hier dargestellte Ausführung des Maßnahmenkatalogs einen Kompromiss zwischen verständlicher Darstellung und noch zulässig erscheinender Komprimierung von Inhalten dar. Bei der Verwendung des Katalogs und der Übertragung von dessen Aussagen auf den industriellen Prozess ist dieser Hintergrund unbedingt zu beachten. Weiterhin ist der Katalog als Richtungsweiser zu verstehen, mit dem Tendenzen dargestellt werden sollen. Alle Aussagen des Maßnahmenkatalogs sind unter der Maßgabe zu verstehen, dass außer der jeweils betrachteten Einflussgröße kein weiterer Prozessparameter verändert wurde.

5.4 Statistik

Um die statistische Sicherheit der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse zu überprüfen, wurden verschiedene Methoden angewendet. Für eine Stichprobe vom Umfang n aus einer Grundgesamtheit gilt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

\bar{x} arithmetisches Mittel

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

s^2 Varianz

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

s Standardabweichung

Zur genaueren Darstellung der Einzelwerte eines Mittelwertes wurde die grafische Darstellung der Box-Plots gewählt (Abbildung 50).

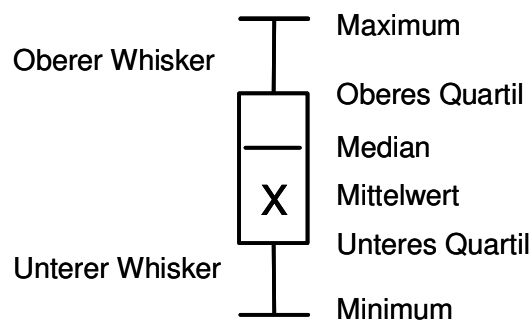


Abbildung 50: Darstellung eines Box-Plots auch Box and Whisker Plot genannt.

Ein Box-Plot kombiniert die Darstellung der zentralen Tendenz, Streuung und Schiefe von Datenreihen. Bei der gewählten Variante entspricht die Länge der Whisker der Differenz

zwischen dem maximalen Wert und dem oberen Quartil bzw. dem minimalen Wert und dem unteren Quartil. Des Weiteren ist der Mittelwert und der Median eingezeichnet. Die grafische Darstellung der Box-Plots sowie die Aufführung der Standardabweichungen und der Varianzen finden sich im Anhang.

Für die Überprüfung des Unterschiedes zweier Mittelwerte x_1 und x_2 zweier unabhängigen Stichproben des Umfangs n_1 und n_2 wurde je nach Fragestellung der einseitige oder zweiseitige t-Test verwendet. Hierbei wurde darauf verzichtet die Grundgesamtheiten auf ihre Normalverteilung hin zu testen, da viele Datensätze relativ klein waren und die daraus folgende statistische Aussagekraft mit Vorsicht betrachtet werden muss. Die berechnete Prüfgröße \hat{t} wurde hierbei zum Bestimmen der Signifikanz verwendet. Hierfür wurde für den t-Test der p-Wert betrachtet. Er gibt in diesem Fall die Irrtumswahrscheinlichkeit α an, mit welcher eine aufgestellte Hypothese falsch ist. Ist der p-Wert kleiner als 0,05, so ist statistisch gesehen eine Signifikanz gewährleistet und die Hypothese wird unter Vorbehalt der entsprechenden Irrtumswahrscheinlichkeit bestätigt. Das aus der Wahl von $\alpha = 0,05$ resultierende 95-Konfidenzintervall besagt, dass mit einer Sicherheit von 95 % der Erwartungswert μ innerhalb dieses Bereiches liegt. Folgende Fälle werden unterschieden:

p	>	0,05	(nicht signifikant)
p	<	0,05	(signifikant)
p	<	0,01	(hoch signifikant)
p	<	0,001	(höchst signifikant)

Für die Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Versuchswerte ist die Unterscheidung der verschiedenen Signifikanzniveaus aufgrund der geringen Grundgesamtheit unerheblich. Aus diesem Grund wird die Nullhypothese, wie oben bereits erwähnt, ab $p < 0,05$ als angenommen betrachtet und nur der Begriff „signifikant“ verwendet.

Um Tendenzen oder Trends von Wertescharen darzustellen bzw. die erhaltenen Festigkeitswerte von der Rohdichte zu bereinigen, wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Hierfür wurden Regressionsgeraden durch die Punkte der jeweiligen Parameter gelegt. Bei den im Folgenden als „Rohdichte bereinigt“ bezeichneten Werten wurde anhand der Regressionsgerade auf die jeweilige Zielrohndichte normiert. Für die lineare Regressionsanalyse wurde je nach Fragestellung der ein- bzw. zweiseitige t-Test angewandt.

6 Druckschwankungen aufgrund des Pressprogramms

6.1 Grundversuche Ipates

6.1.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsapparatur ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsablaufs aus Abschnitt 5.3.1.1 zu entnehmen.

6.1.1.1 Rohdichteprofile

Die Rohdichteprofile zeigen indirekt Verdichtungs- bzw. Entspannungszeitpunkteinflüsse auf die Probendicke, die für beide eingesetzten Klebstoffsysteme (Kauritec 405 und 605) gleich sind. Je später der Entspannungszeitpunkt stattfindet desto dünner werden die Proben, während ein späterer Verdichtungszeitpunkt zu dickeren Proben führt.

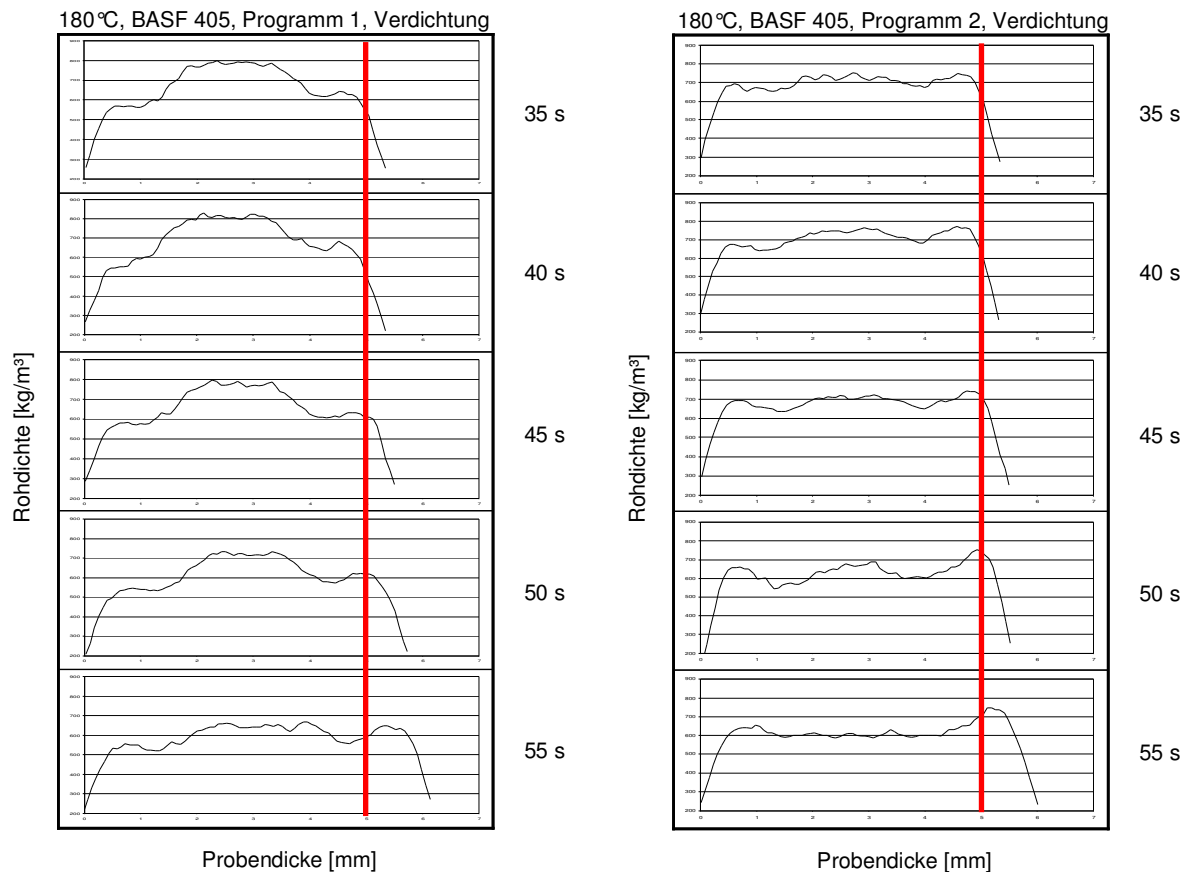


Abbildung 51: Rohdichteprofile und Probendickenänderungen bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten bei zwei unterschiedlichen Nachverdichtungs-niveaus mit 30 % (links) und 15 % (rechts), Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 % Kauritec 405.

Die Rohdichtepprofile der Entspannungsversuche (hier nicht dargestellt) zeigen einen für Industriepplatten üblichen Verlauf mit einer an den Deckschichten höhern Rohdichte als in der Mittelschicht, sowohl bei einer Presstemperatur von 110°C als auch bei 180°C. Dieser Verlauf ändert sich bei der Verdichtung bei 110°C in der Art, dass sich der Bereich der Deckschicht im Rohdichteprofil breiter darstellt und somit die Mittelschichtrohddichte angehoben wird (Massenerhaltung). Eine Verdichtung von 30 % bzw. 15 % bei 180°C zeigt innerhalb der Rohdichteprofile einen höheren Mittelschichtbereich als in den Zwischenschichten (Abbildung 51).

Dieser Effekt zeigt sich bei früher erfolgten Verdichtungszeiten deutlich und nimmt zu den später erfolgten Verdichtungszeiten hin ab. Zusätzlich zeigt sich bei den um 30 % nachverdichteten Proben ein stets höhere Mittel- als Deckschichtrohddichte. Bei den um 15 % nachverdichteten Proben lässt sich eine relative Übereinstimmung der Deck- und Mittelschichtrohddichten darstellen. Dieser Verlauf zeigt sich ebenfalls bei einer Verdichtung bei 110°C für beide Verdichtungs-niveaus.

6.1.1.2 Bruchfläche

Die Proben der Entspannungsversuche weisen eine Bruchfläche innerhalb der Probenmitte im Bereich der niedrigsten Rohddichte auf.

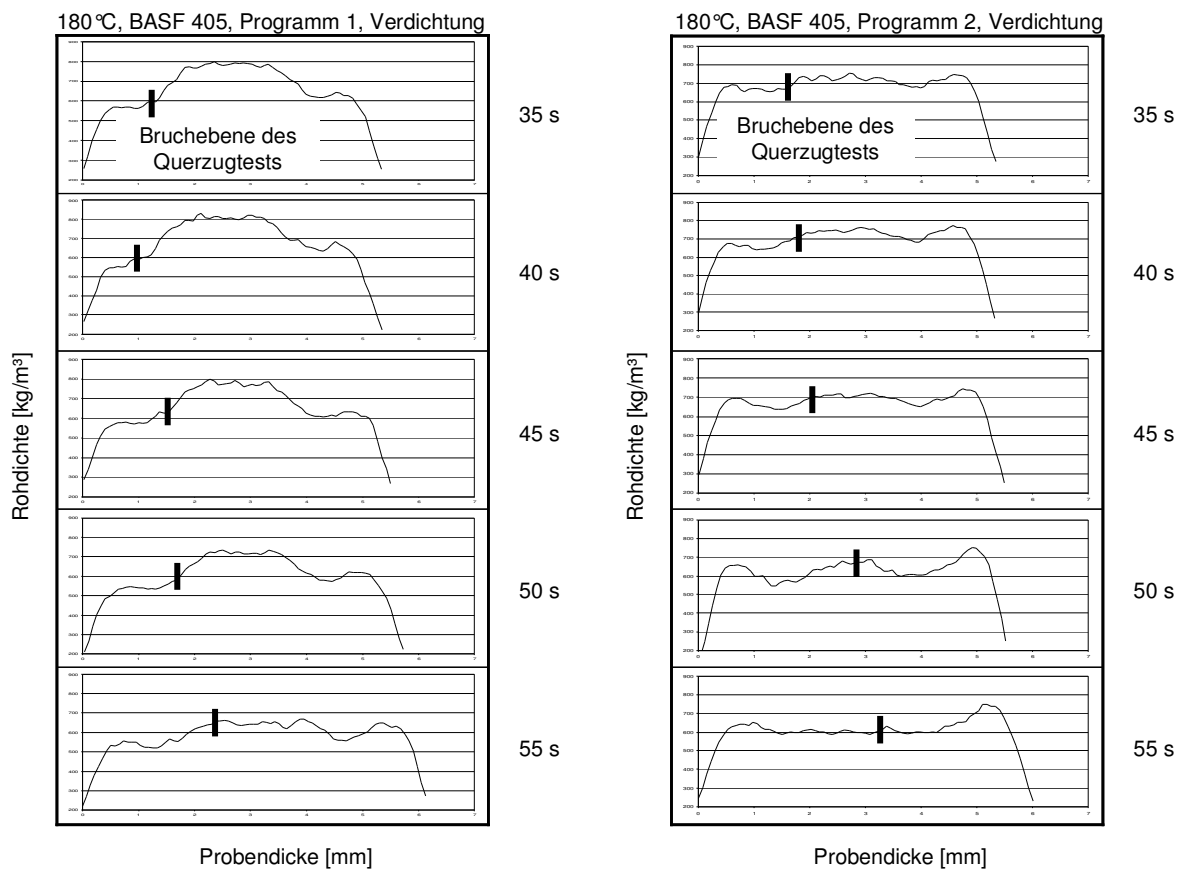


Abbildung 52: Rohdichteprofil und Bruchebene bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Hohes Nachverdichtungs-niveau (links) und niedriges Nachverdichtungs-niveau (rechts), Rohddichte

700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 % Kauritec 405.

Dieses Bild ergibt sich auch bei den Verdichtungsversuchen mit 110°C, nicht aber bei den Verdichtungsversuchen mit 180°C.

Der Bruch erfolgt hierbei mit späterem Verdichtungszeitpunkt immer mehr Richtung Probenmitte und damit auch in Zonen, die nicht die geringste Rohdichte aufweisen (Abbildung 52), was auf eine Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bzw. der Verklebungsgüte schließen lässt.

Dieses Verhalten lässt sich in einem Bruchdichtequotienten BDQ ausdrücken, der das Verhältnis der Rohdichte an der Bruchfläche ρ_{Bruch} zur minimalen Rohdichte des Prüfkörpers $\rho_{Minimum}$ wiedergibt (Gleichung 12).

$$BDQ = \frac{\rho_{Bruch}}{\rho_{Minimum}} \quad (12)$$

Der Quotient nimmt Werte von mindestens 1 an, je nachdem ob der Bruch an der minimalen Rohdichte ($BDQ=1$), oder an Stellen mit einer höheren als der minimalen Rohdichte geschieht ($BDQ>1$). Für die in Abbildung 52 dargestellten Rohdichteprofile ergibt sich für das hohe Nachverdichtungs niveau ein $BDQ=1$ für eine Nachverdichtung bei 35 s mit einer Zunahme des $BDQ>1$ bis zu einer Nachverdichtung bei 55 s. Für das niedrige Nachverdichtungs niveau zeigt sich eine Zunahme des BDQ von einer Nachverdichtung bei 35 s von $BDQ=1$ bis zu einem $BDQ>1$ bei 50 s mit einer Abnahme auf $BDQ=1$ bei einer Nachverdichtung bei 55 s.

Die Feststellung, dass die geringste Festigkeit nicht zwingend mit der geringsten Rohdichte einhergehen muss, zeigen die Ergebnisse von Humphrey(1990) und Wang *et al.* (2001). Während Humphrey diesen Sachverhalt bei der Simulation von Querkzugfestigkeiten über den Dickenquerschnitt feststellte, kamen Wang *et al.* bei ausführlich angestellten Versuchen über den Einfluss von schrittweisen Verdichtungen bei der Herstellung von MDF und OSB auf deren Platteneigenschaften zu dem Schluss, dass eine schrittweise Erhöhung der Mittelschichtroh dichte zu keinen höheren Querkzugfestigkeiten führt.

6.1.1.3 Querkzugfestigkeiten

Die Entspannung bei 180°C (Abbildung 54) zeigt im Gegensatz zu einer Entspannung bei 110°C (Abbildung 53) eine signifikante lineare Querkzugfestigkeitsabnahme mit späterem Entspannungszeitpunkt, wobei das höhere Entspannungs niveau von 20 % den stärksten Einfluss erkennen lässt.

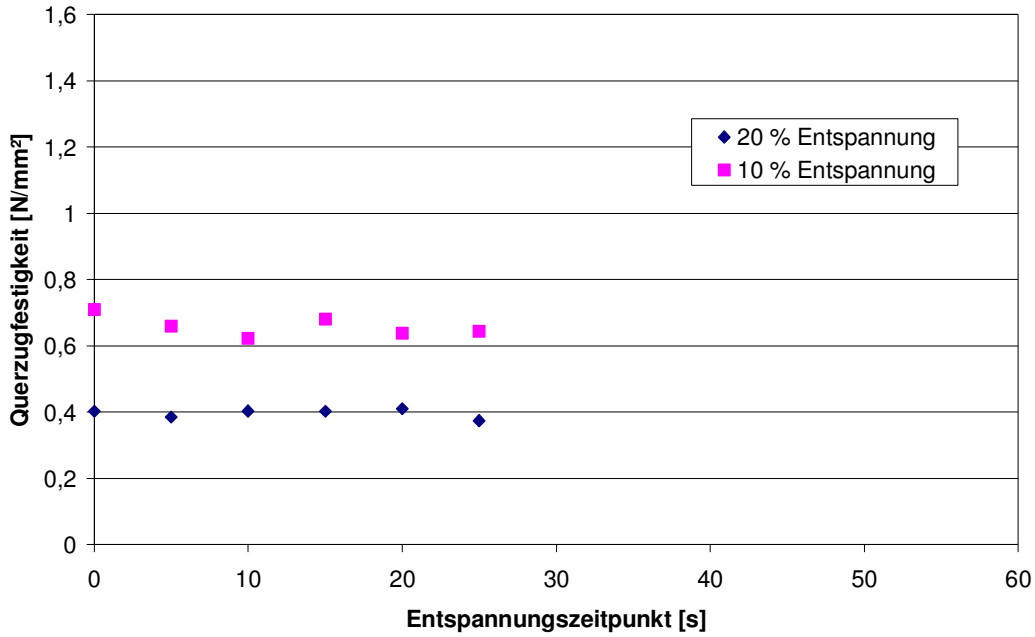


Abbildung 53: Einfluss des Entspannungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 110°C und zwei unterschiedlichen Entspannungsniveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %.

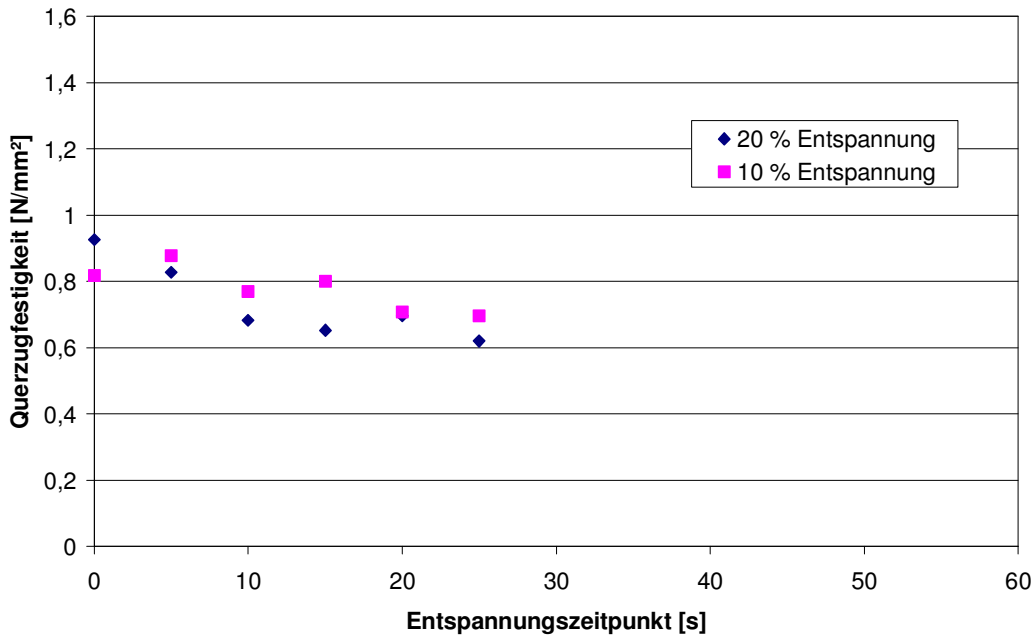


Abbildung 54: Einfluss des Entspannungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 180°C und zwei unterschiedlichen Entspannungsniveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %.

Auch bei der Verdichtung zeigt sich, dass die Einflüsse mit höherer Temperatur und höherem Verdichtungslevel steigen bzw. die Querzugfestigkeiten stärker abnehmen (Abbildung 55 und Abbildung 56). Hierbei ist die Querzugfestigkeitsabnahme vom minima-

len bis zum maximalen Verdichtungszeitpunkt bei einer Temperatur von 180°C und einer Verdichtung von 30 % signifikant.

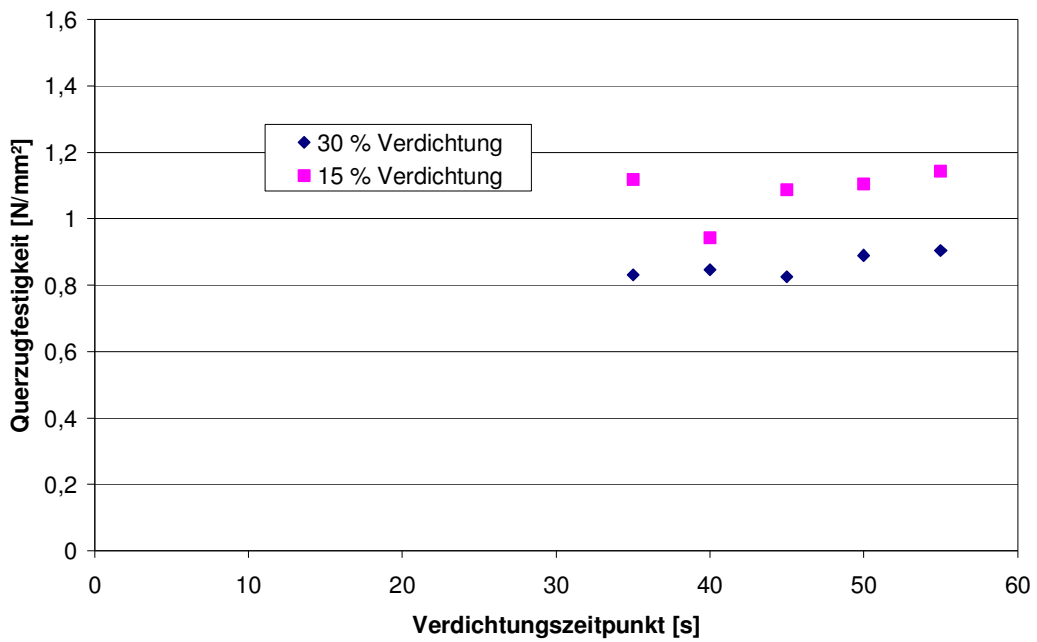


Abbildung 55: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 110°C und zwei unterschiedlichen Verdichtungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %.

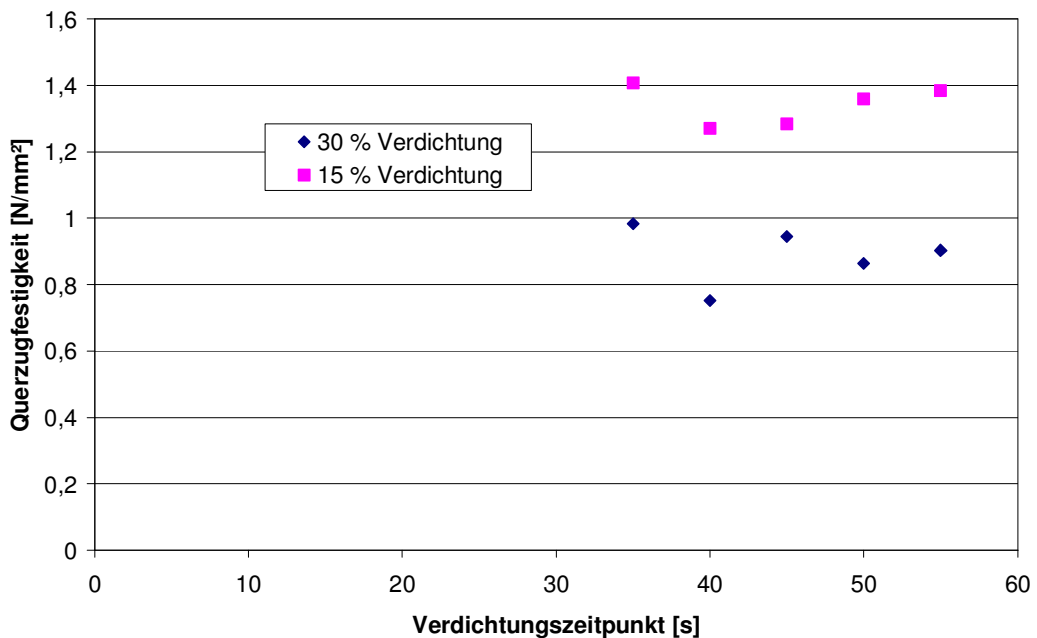


Abbildung 56: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 180°C und zwei unterschiedlichen Verdichtungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %.

Die Auswertungen zeigen, dass das höhere Entspannungs- bzw. Verdichtungsniveau verglichen mit den niedrigeren Niveaus bei betrachteten Temperaturen von 110°C und 180°C (Ausnahme: Entspannung bei 180°C) in einer signifikanten Querkzugfestigkeitsverminderung resultiert. Hierbei bedeutet +_x, die Annahme der Hypothese und -_x, die Ablehnung. Die Indizes x bestimmen die Steigung des Trends t, den Unterschied u_{minmax} und das Niveau n.

Tabelle 19: Statistische Auswertung der Grundversuche mit den Indizes t = Steigung Trend; u, mm = Querkzugfestigkeitsunterschied minimale und maximale Presszeit; n = Niveau der Entlastung (Verdichtung).

Presstemperatur [°C]	Prozess			
	Verdichtung [%]		Entspannung [%]	
	15	30	10	20
110	- _t - _{u, mm}	- _t - _{u, mm}	- _t + _{u, mm}	- _t + _{u, mm}
	+ _n		+ _n	
180	- _t - _{u, mm}	- _t + _{u, mm}	+ _t + _{u, mm}	+ _t + _{u, mm}
	+ _n		- _n	

Die Festigkeiten des Klebstoffs Kauratec 605 zeigen generell die gleichen Entwicklungen wie der Klebstoff Kauritec 405, wobei die 15 % Entspannung sowie 30 % Verdichtung bei 180°C niedrigere Querkzugfestigkeiten als die vergleichbaren Werte von Kauritec 405 aufweisen. Dieser Unterschied folgert aus den gleich angewendeten Pressparametern für beide Klebstoffe. Der mit Melamin verstärkte Kauratec 605 benötigt für die Härtung eine längere Presszeit und höhere Presstemperaturen. Erst unter diesen Bedingungen weist dieser Klebstoff höhere Festigkeiten als der Kauritec 405 auf. In der Industrie werden diese Anforderungen mit einer nachträglichen Stapellagerung und damit länger gehaltenen Plattentemperatur erfüllt.

Die Darstellungen der Querkzugfestigkeiten zeigen in einigen Fällen keinen eindeutigen linearen Verlauf, sondern weisen innerhalb der verschiedenen Verdichtungszeitpunkte Werteschwankungen auf. Diese Schwankungen können dadurch verursacht worden sein, dass bei der Durchführung der Versuchsreihe unterschiedliche Faserchargen verwendet wurden. Es musste somit bei folgenden Versuchen darauf geachtet werden, dass die Durchführung eines Versuchablaufs möglichst nur mit einer Fasercharge geschieht, wobei die Abfolge der Parameteränderungen im Rahmen der Versuchsplanung, z.B. (Verdichtungszeitpunkt), weiterhin statistisch verteilt erfolgen muss, um die Auswirkungen von systematischen Fehler auf die Platteneigenschaften zu verhindern.

Die Grundversuche konnten zeigen, dass sich die Höhe des Entspannungs- und Nachverdichtungsniveaus umgekehrt proportional zu den Querkzugfestigkeiten verhält. Die Auswirkung des Zeitpunktes der Druckänderung (Entspannung, Nachverdichtung) kann mit den Grundversuchen nicht hinreichend genug beurteilt werden.

6.2 Hauptversuche Ipates

6.2.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.1.2 zu entnehmen.

6.2.1.1 Rohdichteprofile

Die Rohdichteprofile (Abbildung 57) zeigen für Prüfkörper ohne Nachverdichtung (Referenzwerte) einen klassischen Verlauf mit einem Rohdichtemaximum an den Oberflächen und einem Abfall zur Plattenmitte hin.

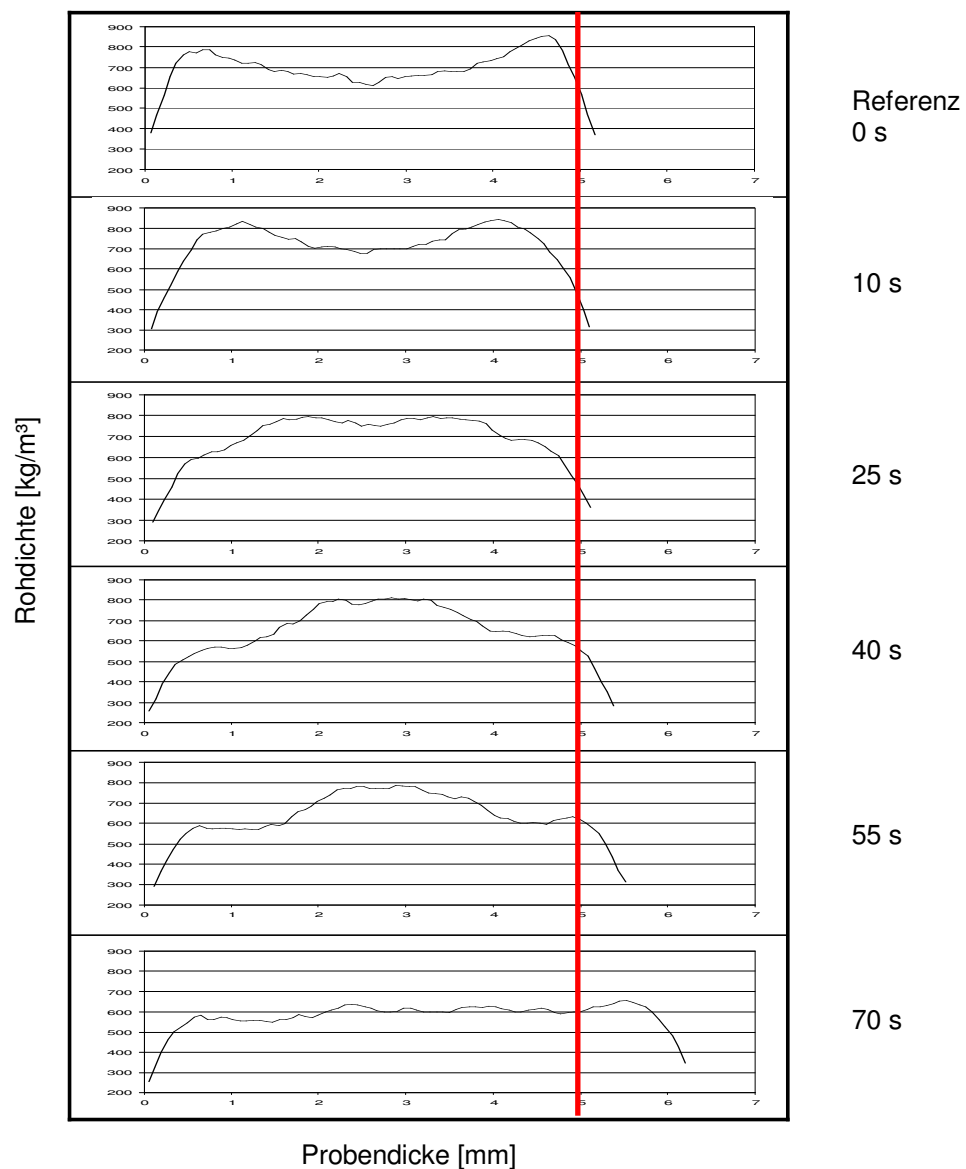


Abbildung 57: Rohdichteprofil bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten mit zunehmender Probendicke.

Mit später einsetzender Nachverdichtung werden die Proben dicker, wie bereits in Abschnitt 6.1.1.1 dargestellt wurde. Ab einem Nachverdichtungszeitpunkt von 25 Sekunden wird die Rohdichte der Mittelschicht im zunehmenden Maße über die der Oberfläche gedrückt. Ab diesem Moment reißen die Querszugproben nicht mehr in der Mattenmitte, sondern verstärkt an den schwächeren Oberflächen. Es stellt sich die Frage, inwieweit das Rohdichteprofil einen Einfluss auf den dargestellten Querszugfestigkeitsverlauf über die Nachverdichtungszeitpunkte hat und wie sich das Zusammenspiel bzw. die Gewichtung mit der Zerstörung von Leimbrücken darstellt. Diese Fragestellung wird in Abschnitt 6.3.1 näher betrachtet.

6.2.1.2 Querszugfestigkeiten

Die Werte der Querszugfestigkeit wurden, wie bereits im Statistikeil (vgl. Abschnitt 5.4) beschrieben, Rohdichte bereinigt. Für das aufzustellende Gleichungssystem wurde die Rohdichte und die Anzahl der sich für den zu untersuchenden Fall ändernden Pressparameter (in diesem speziellen Fall der Verdichtungszeitpunkt) als Einflussgröße und die Querszugfestigkeit als Zielgröße definiert. Die jeweiligen Zielfunktionen mit den Einflussgrößen Rohdichte und Pressparametervariable wurden dann mittels der Regression gelöst wodurch die ursprünglichen Querszugfestigkeiten auf eine Zielrohichte neu berechnet werden konnten.

Die Querszugfestigkeitsverläufe zeigen für eine Rohdichte von 700 kg/m^3 und einem Beleimungsgrad von 7 % für beide Klebstoffe (Kauritec 405 und Kauratec 605) und bei 13 % für Kauratec 605 ein signifikantes Querszugfestigkeitsmaximum das nicht bei der Referenzwerten liegt, sondern bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 10 Sekunden (Abbildung 58 und Abbildung 59). Eine spätere Nachverdichtung hat eine signifikante Abnahme der Querszugfestigkeit zur Folge.

Das Fehlen vereinzelter Werte innerhalb der folgenden Abbildungen resultiert aus Brüchen in den Oberflächen während des Querszugfestigkeitstests mit Werten, die als Ausreißer betrachtet wurden und somit nicht in die Auswertung einfließen.

Wie nicht anders zu erwarten führt ein höherer Beleimungsgrad zu höheren Querszugfestigkeitswerten (Abbildung 58). Der Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes ist ähnlich für die beiden untersuchten Beleimungsgrade (Ausnahme siehe Abbildung 58: 70 s, Rohdichte bereinigt). Jedoch zeigen sich absolute als auch relative Unterschiede bei veränderter Rohdichte (Abbildung 59).

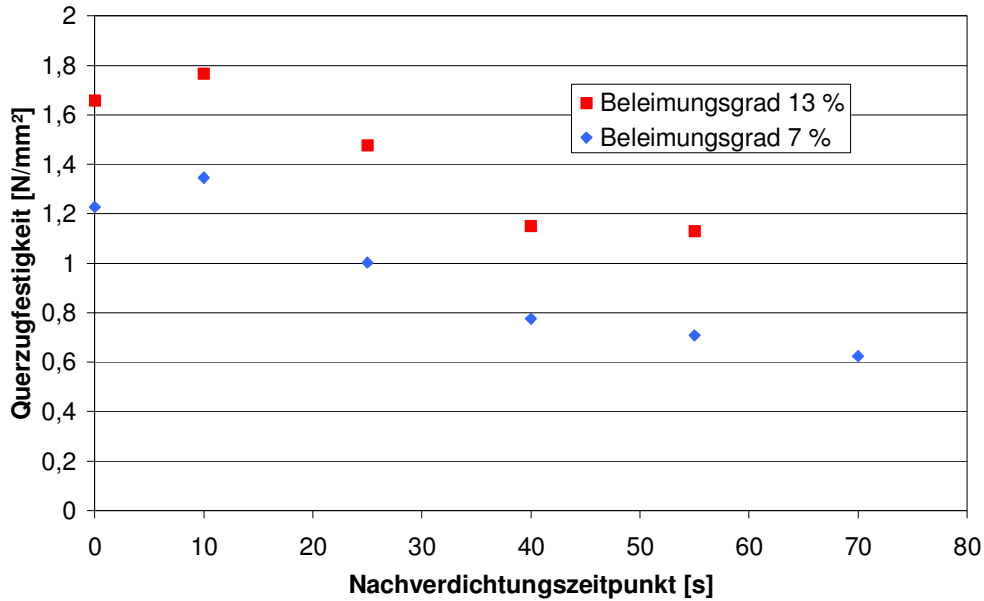


Abbildung 58: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Quersugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Beleimungsgrade, 7% und 13% (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m^3 , Kauratec 605.

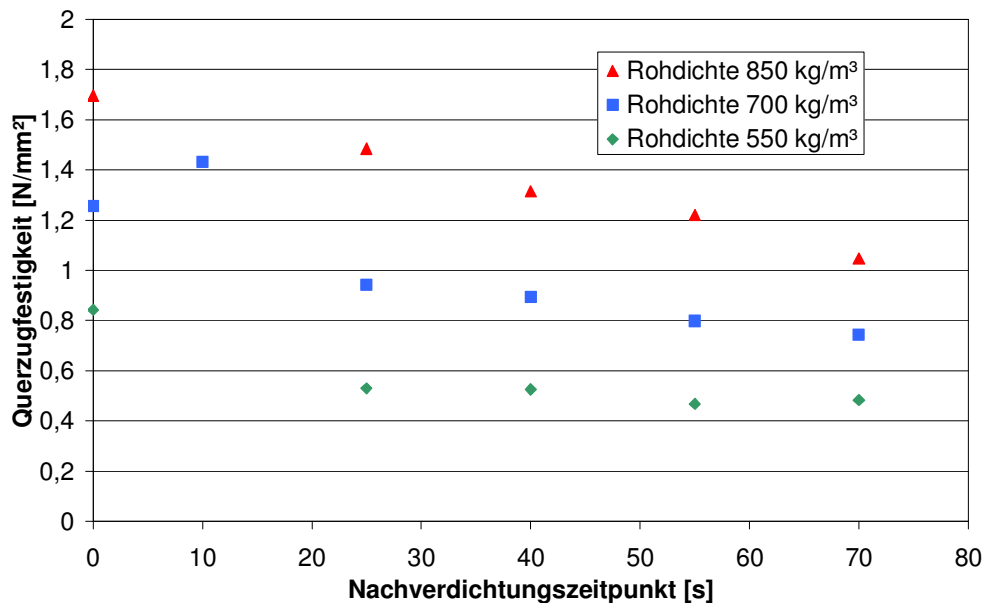


Abbildung 59: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Quersugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Rohdichten, 550 kg/m^3 , 700 kg/m^3 und 850 kg/m^3 (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.

Die signifikanten Unterschiede in der Quersugfestigkeitsabnahme stellen sich besonders nach dem Maximum (idealer Nachverdichtungszeitpunkt, 10 Sekunden) dar.

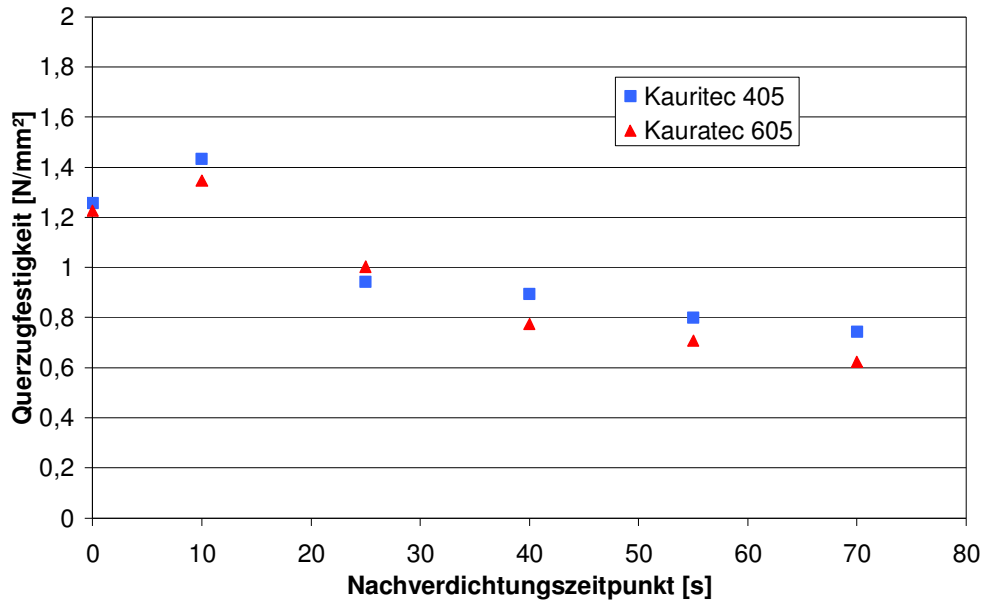


Abbildung 60: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Klebstoffsysteme, Kauratec 605 und Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 7 %, Rohdichte 700 kg/m³.

Es zeigt sich, dass bei einer Rohdichte von 700 kg/m³ eine Abnahme vom Nachverdichtungszeitpunkt bei 25 Sekunden bis zum Nachverdichtungszeitpunkt von 70 Sekunden von 19 % erfolgt. Die Werte für die Abnahme liegen bei einer Rohdichte von 850 kg/m³ bei 29 %. Bei der Rohdichte von 550 kg/m³ stellen sich die Unterschiede als nicht signifikant dar.

Der Vergleich der beiden untersuchten Klebstoffsysteme Kauritec 405 und Kauratec 605 in Abbildung 60 zeigt nur geringe Unterschiede im Verlauf der Querkzugfestigkeitsentwicklung über den Nachverdichtungszeitpunkt. So stellt sich bei beiden verwendeten Klebstoffen eine Querkzugfestigkeitszunahme von der Referenzkurve zur idealen Nachverdichtung mit einer nachfolgende Abnahme dar. Die geringere Sprödigkeit des Kauratec 605 mit seinem höheren Melaminanteil zeigt sich nicht in den Versuchsergebnissen, da zu erwarten gewesen wäre, dass sich die Querkzugfestigkeiten über den gesamten Verlauf höher als die vergleichbaren Werte des spröderen Harnstoffharzes mit einem geringen Melaminanteil (Kauritec 405) darstellen würden. Auf die Begründung für diesen Unterschied wurde bereits in Abschnitt 6.1.1.3 hingewiesen.

Unter Zuhilfenahme der entsprechenden Rohdichteprofile (vgl. Abbildung 57) zeigt sich, dass die Querkzugfestigkeitsunterschiede der Nachverdichtungszeitpunkte von 0 s und 70 s nicht über das Rohdichteprofil zu erklären sind, da die Dichten in der Bruchebene (Mittelschicht) annähernd identisch sind. Es muss also zu einer Beeinträchtigung der inneren Festigkeit bzw. der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix gekommen sein.

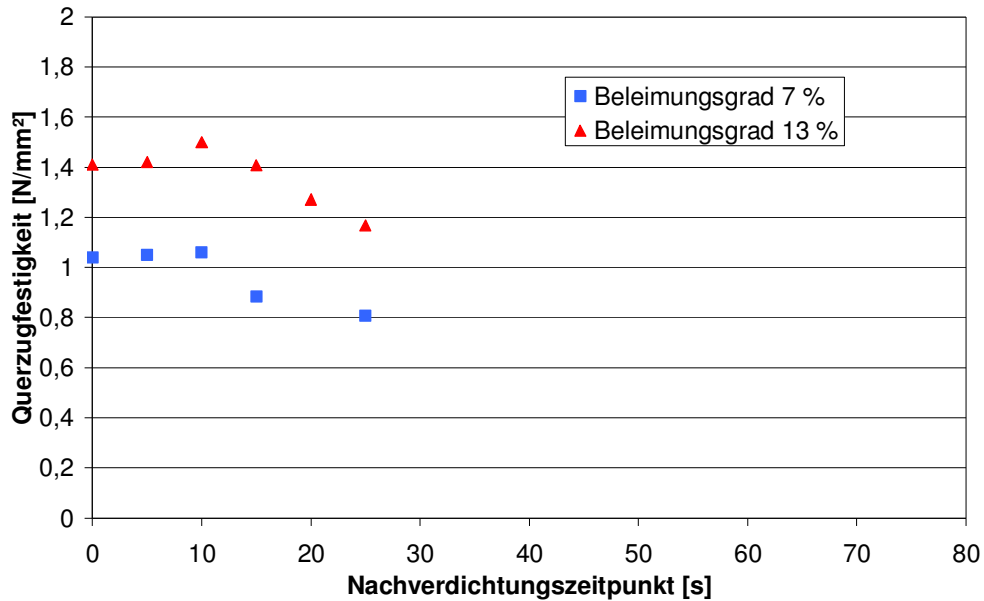


Abbildung 61: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Beleimungsgrade 7 % und 13 % (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m³, Kauratec 605.

Die maximale Festigkeit innerhalb der hier dargestellten Versuche bei einer Nachverdichtung bei 10 s wurde in einer weiteren Versuchsreihe genauer untersucht. Hierbei wurden die bisherigen Pressparameter beibehalten. Lediglich die Nachverdichtungszeitpunkte wurden innerhalb des Presszeitintervalls von 0 bis 20 s in 5 s Schritte unterteilt (Abbildung 61).

Die Messungen zeigen einen deutlichen Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf die Entwicklung der Querzugfestigkeit über die Presszeit. Nach Überschreitung eines Grenzzeitpunktes bis zu dem die Festigkeiten erhöhte bzw. gleich bleibende Festigkeiten gegenüber der Referenzprobe aufweisen, nehmen die Festigkeiten mit später eingeleiteter Nachverdichtung ab. Ein höherer Beleimungsgrad führt erwartungsgemäß zu einer höheren Querzugfestigkeit.

Tabelle 20: Statistische Auswertung der Hauptversuche mit den Indizes t = Steigung Trend; u, mm = Querzugfestigkeitsunterschied minimale und maximale Presszeit; u, Ref = Querzugfestigkeitsunterschied Referenz und maximale Presszeit.

		Klebstoff BASF				
		605		405		
Rohdichte [kg/m ³]		700 _a	700 _b	550	700	850
Beleimungsgrad [%]	7	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm} ; + _{u, Ref}	+ _{u, mm}
		+ _{u, Ref}	- _{u, Ref}	- _t	+ _t	+ _t
13		+ _{u, mm}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}
		+ _{u, Ref}	+ _{u, Ref}			

Die Bestätigung der gemachten Aussagen mittels einer Analyse der Steigung eines linearen Trends und der Unterschiedbestimmung der Querkzugfestigkeitswerte für den maximalen und den Referenzwert bzw. minimalen Wert sind in der Tabelle 20 zusammengefasst. Hierbei bedeutet $+_x$, die Annahme der Hypothese und $-_x$, die Ablehnung. Die Indizes x bestimmen die Steigung des Trends t , den Unterschied u_{mm} (Maximum : Minimum) sowie u_{Ref} (Maximum : Referenz).

6.2.1.3 Temperaturmessungen

Die Temperaturmessungen in der Mattenmittelschicht wurden bei einer Presstemperatur von 180°C für die drei untersuchten Rohdichten (550 kg/m^3 , 700 kg/m^3 und 850 kg/m^3) sowie vier Nachverdichtungszeitpunkte (0 s, 10 s, 25 s und 70 s) durchgeführt. Des Weiteren wurde als Klebharz das Kauritec 405 mit einem Beleimungsgrad von 7 % eingesetzt.

Der Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes bei jeweils einer Rohdichte ist in Abbildung 62 dargestellt. Bei den drei betrachteten Rohdichten beginnt der Temperaturanstieg nach dem Schließen der Presse zuerst bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 0 Sekunden, wobei bei den übrigen kein Unterschied feststellbar ist. Des Weiteren verzögert sich das Erreichen der 100°C mit später erfolgendem Nachverdichtungszeitpunkt von 30 Sekunden bei 0 Sekunden (I) auf 46 Sekunden (III), wobei bei die unterschiedlichen Rohdichten eines Nachverdichtungszeitpunktes innerhalb eines Zeitintervalls von 3 Sekunden liegen.

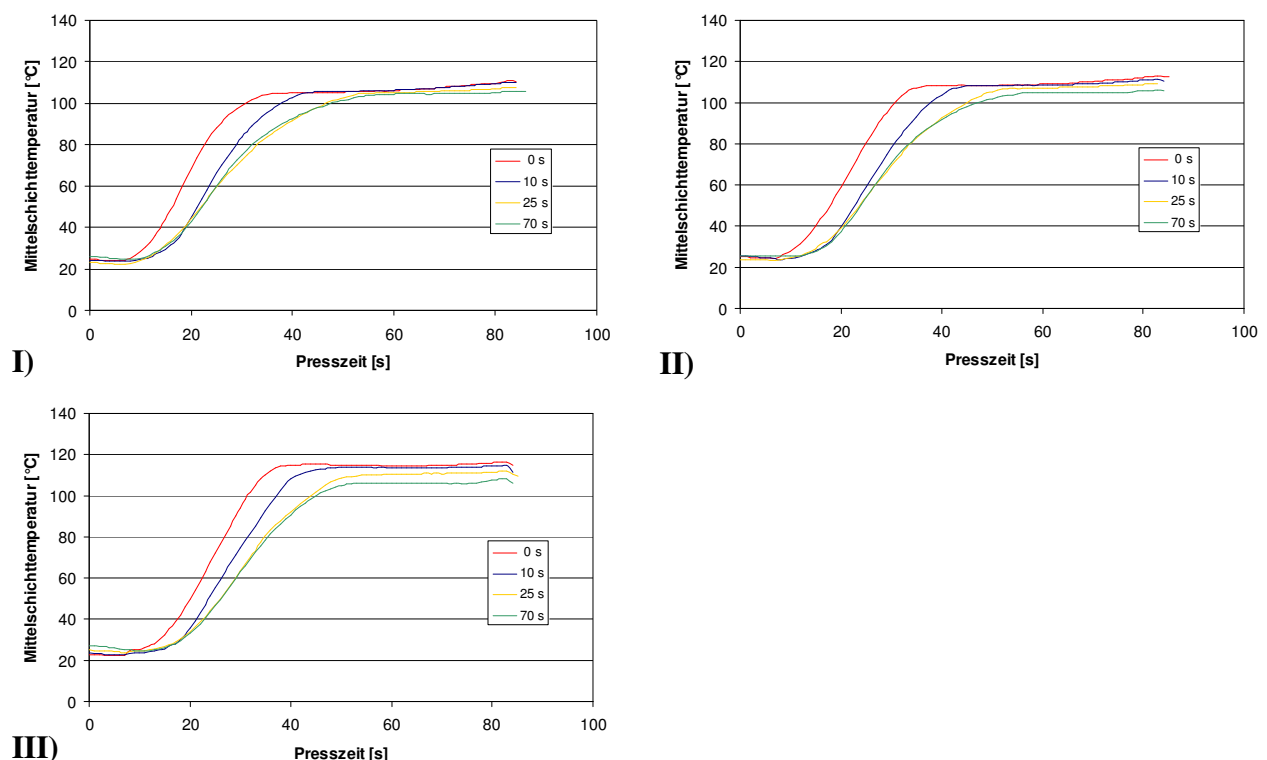


Abbildung 62: Entwicklung der Mittelschichttemperatur von Prüfkörpern mit einer Zieldicke von 5mm bei vier Nachverdichtungszeitpunkten und drei unterschiedlichen Rohdichten. I) 550 kg/m^3 , II) 700 kg/m^3 , III) 850 kg/m^3 .

In Abbildung 63 zeigt sich, dass die Endtemperatur bei einer Rohdichte von 850 kg/m^3 bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 0 Sekunden (I) über der von 700 kg/m^3 und diese über der von 550 kg/m^3 liegt. Dieser Temperaturunterschied gleicht sich bis zu einem Nachverdichtungszeitpunkt von 70 Sekunden (IV) auf ein annähernd gleiches, tieferes Temperaturniveau aus. Der Temperaturanstieg nach der Schließung der Presse erfolgt bei allen Nachverdichtungszeitpunkten später, je höher die Rohdichte der gemessenen Prüfkörper ist.

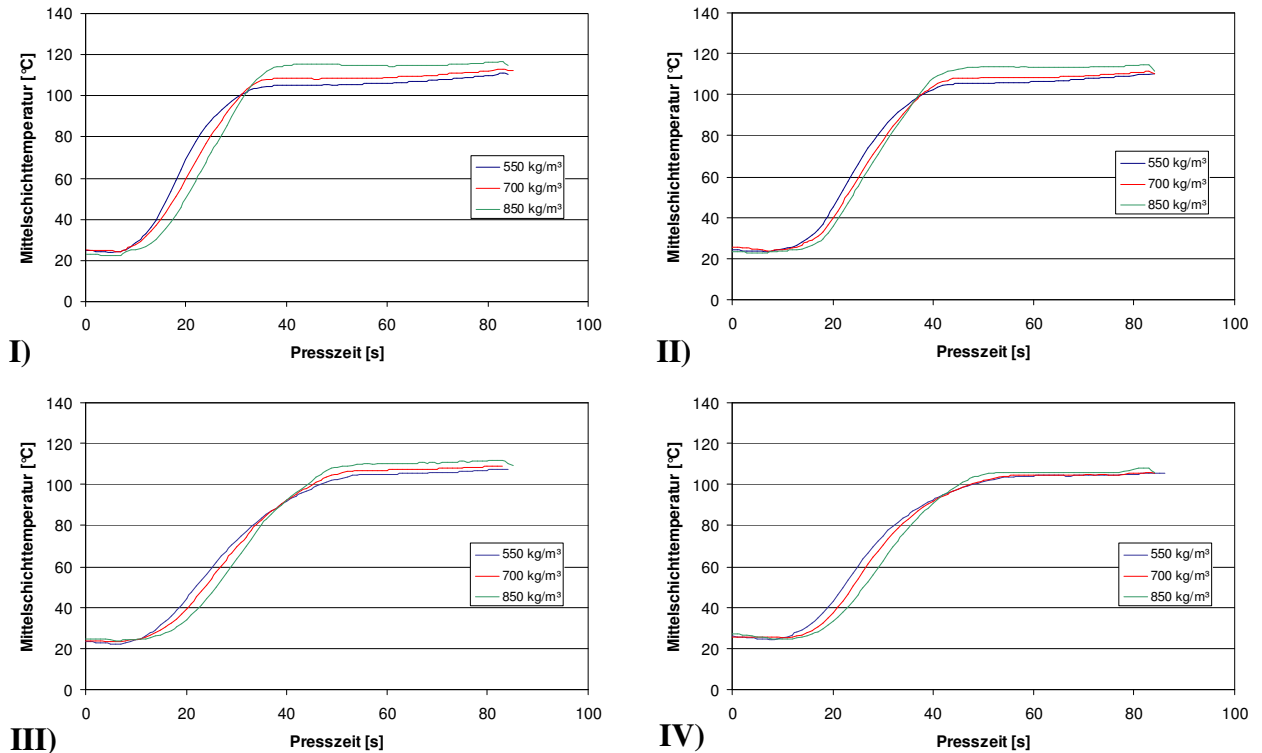


Abbildung 63: Entwicklung der Mittelschichttemperatur von Prüfkörpern mit einer Zieldicke von 5mm und drei Rohdichten bei vier unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. I) 0 Sekunden, II) 10 Sekunden, III) 25 Sekunden, IV) 70 Sekunden.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 21):

Tabelle 21: Einfluss der Rohdichte und des Nachverdichtungszeitpunktes auf die Mattenmittentemperatur.

Ursache	Wirkung
Rohdichte steigt	Temperaturanstieg später, Endtemperatur höher
Nachverdichtungszeitpunkt früher	Temperaturanstieg früher, 100°C früher

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen zeigen deutlich, dass die in den zugehörigen Querkzugtestversuchen bestimmte maximal Festigkeit bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 10 Sekunden (16 Sekunden Presszeit), nicht mit dem Erreichen der 100°C Mittelschichttemperatur übereinstimmt, sondern bei gemittelten 30°C liegt. Die Nachverdichtung bei einer Mittelschichttemperatur von 100°C führte in den angestellten Versuchen zu verringerten Querkzugfestigkeiten und deckt sich hiermit nicht mit Aussagen aus der Praxis, die zum Teil von einem optimalen Nachverdichtungszeitpunkt bei 100°C-Mittelschichttemperatur berichten.

Des Weiteren zeigen die Daten, dass die Nachverdichtung erst ab einem Nachverdichtungszeitpunkt von 40 Sekunden bei einer Mittelschichttemperatur über 100°C geschah. Dies zeigt sich auch im Verlauf des Mattengegendruckes (Abbildung 64), da dieser sich zu diesem Zeitpunkt erhöht, was auf eine Aushärtung des Klebstoffes bei Temperaturen um 100°C zurückzuführen ist. Da aber bereits die Nachverdichtung von 25 Sekunden zu Querkzugverlusten gegenüber der Referenzprobe führte, kann eine Beeinträchtigung der Mittelschicht aufgrund der Zerstörung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix nicht vorliegen. Die Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix müsste demnach in einer Mattenzwischenschicht passiert sein, was sich auch im Verlauf des Rohdichteprofils zeigt (vgl. Abbildung 57), da hier eine Anhebung der Zwischenschichtrohichte ab einem Nachverdichtungszeitpunkt von 25 s ersichtlich ist.

6.2.1.4 Mattengegendruck

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Zeitpunkt der Nachverdichtung einen Einfluss auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit hat. Mithilfe der Querkzugfestigkeitsentwicklung, des Temperaturverlaufs und der Entwicklung des Mattengegendrucks sollte nun der Versuch unternommen werden, eine Aussage über den Nachverdichtungseinfluss auf die Holzpartikel-Klebstoffmatrix zu erlangen.

Die verstärkte Abnahme der Querkzugfestigkeiten über die Nachverdichtungszeit (vgl. Abbildung 59) lässt sich mit zunehmender Rohdichte über die hierbei zunehmenden Flächendrücke bei der Herstellung der Probenkörper mit höherer Rohdichte erklären. In der Abbildung 64 sind die Flächendrücke, die bei den unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten auf den Probenkörper wirken, dargestellt. Hierbei erkennt man allgemein ein steigendes Flächendruckniveau mit zunehmender Rohdichte. Zum anderen eine Abnahme mit einem Minimum zwischen den Nachverdichtungsstufen von 25 Sekunden und 40 Sekunden. Die Ausgleichsgeraden zu Grunde gelegt, liegt dieses Minimum bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von ungefähr 37 Sekunden bzw. 43 Sekunden Presszeit. Zu diesem Zeitpunkt hat die Mattenmitte eine Temperatur von annähernd 100°C (Abbildung 63). Ist die Abnahme durch die zunehmende Plastifizierung des Fasermaterials mit ansteigender Presszeit zu erklären, so lassen sich für die Zunahme zwei Mechanismen zur Deutung heranziehen. Die innere Festigkeit der Matte und damit der aufzubringende Flächendruck für die Verdichtung, nimmt zum einen durch die Aushärtung des Klebstoffes, zum anderen durch eine Abnahme der Plastizität der Fasern durch Abbau der Mattenfeuchtigkeit zu.

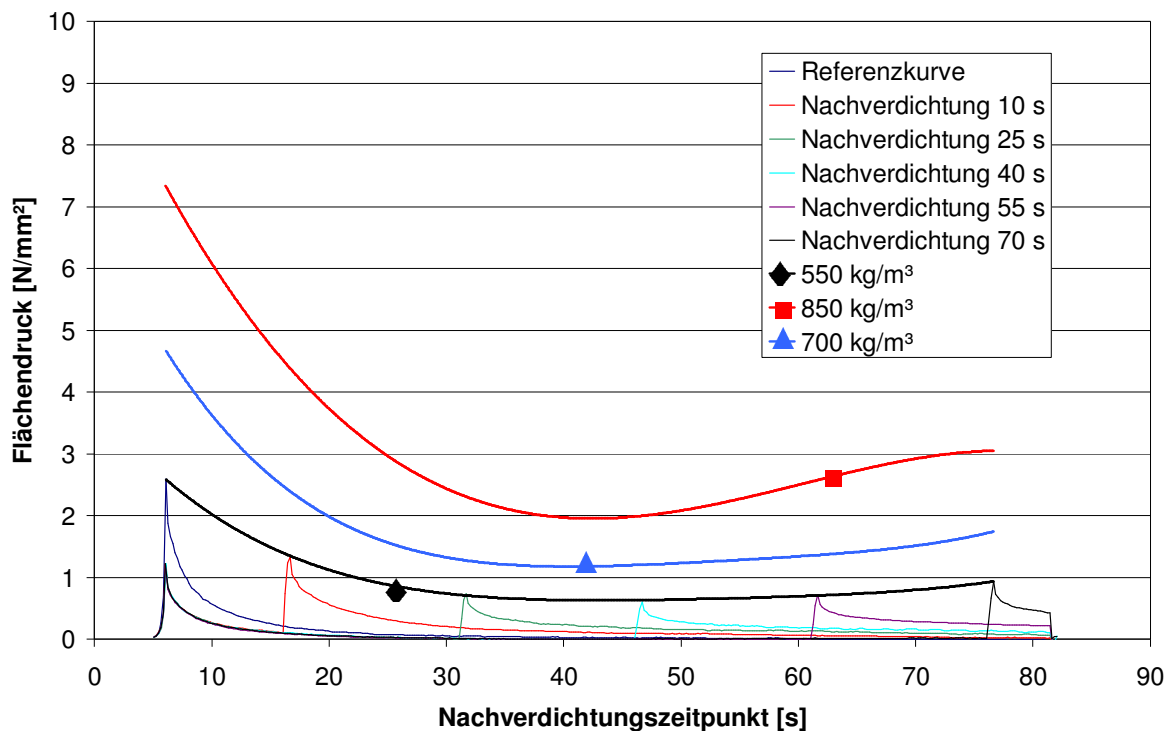


Abbildung 64: Darstellung des Verdichtungswiderstandes mittels polynomischen Trends über die Nachverdichtungszeitpunkte bei unterschiedlichen Rohdichten, Kauritec 405.

Die Aushärtung der Matte lässt sich über die Auftragung der Mattengegendrücke im beleimten und unbeleimten Zustand darstellen. Hierbei sollte der Gegendruck der Matte im beleimten Zustand eine Abweichung zu den unbeleimten Fasern aufweisen, wenn die Aushärtung der Mattenmittelschicht beginnt und somit die gesamte Matte steifer wird.

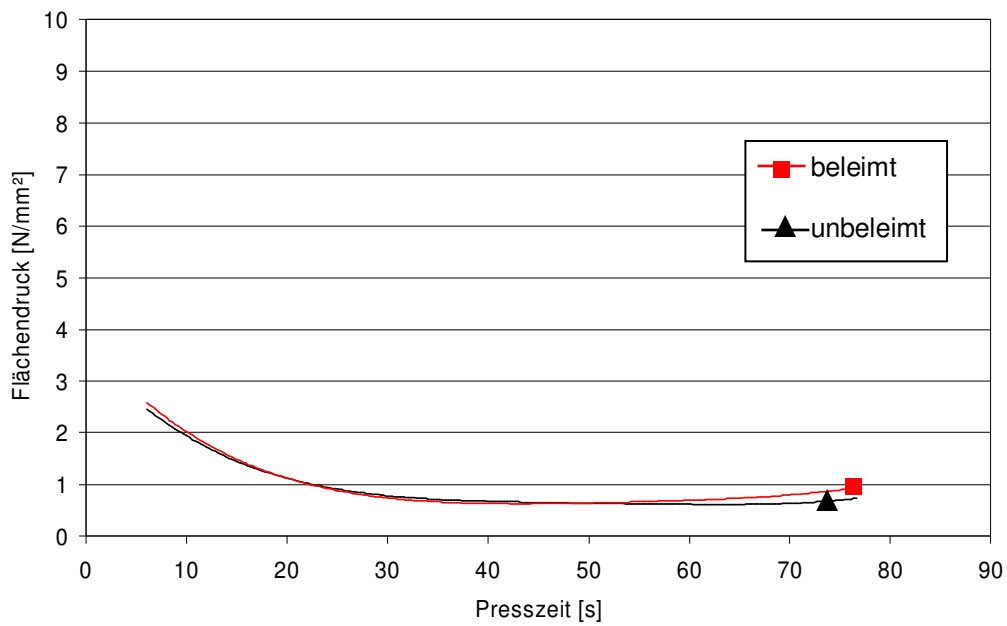


Abbildung 65: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbleimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 550 kg/m³, Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.

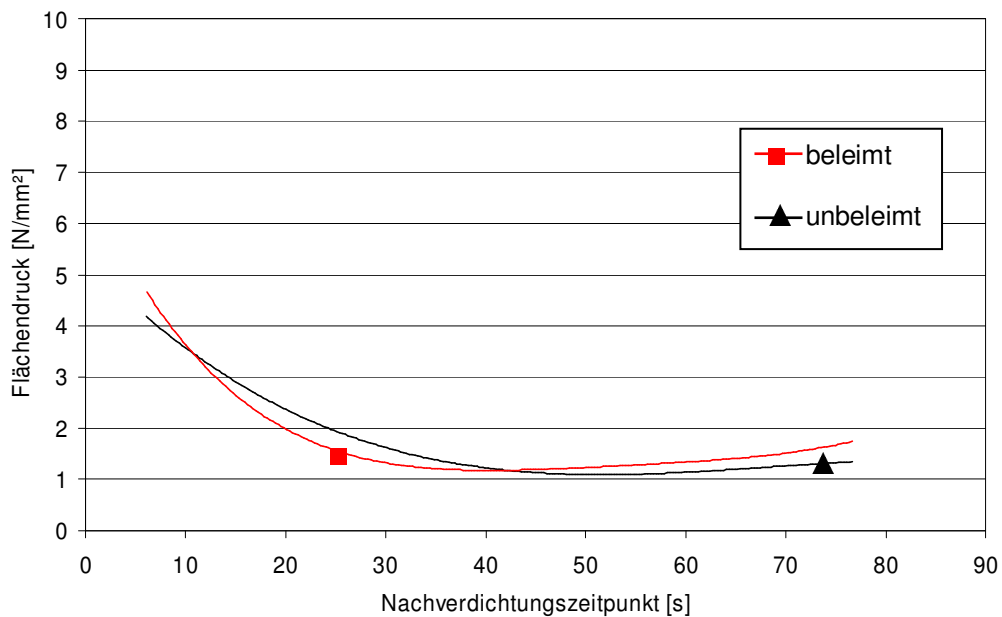


Abbildung 66: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbleimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 700 kg/m³, Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.

Der Vergleich der Mattengegendrücke von beleimten und unbleimten Fasern ist in Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67 dichteabhängig dargestellt, wobei sich diese für eine bessere Übersichtlichkeit auf eine Abbildung als polynomischen Verlaufs (vgl.

Abbildung 64) über den maximal aufgebrauchten Flächendruck des jeweiligen Nachverdichtungsschrittes beschränkt.

Die Verläufe zeigen, dass die Zunahme des Mattengegendrucks bei den beleimten Fasern vornehmlich auf die Aushärtung des Klebstoffs in der Mattenmittelschicht zurückzuführen ist und die Versteifung der Matte aufgrund des ausdampfenden Wassers vernachlässigbar erscheint. Die Differenz der beiden Gegendruckkurven (beleimt und unbeimt), bzw. die unterschiedliche Zunahme des nötigen Flächendrucks zum Verdichten der Matte nach dem Scheitelpunkt, weisen diesen Sachverhalt zum Pressende hin deutlich auf, so dass ab ca. 45 s, gleichbedeutend einer Nachverdichtung bei 40 s, von einer beginnenden Aushärtung der Mattenmittelschicht auszugehen ist. Die zunehmende Versteifung der Matte aufgrund der Klebstoffaushärtung zeigt sich zusätzlich mit zunehmender Plattenrohichte ausgeprägter. Verknüpft mit den bei den Temperaturmessungen gemachten Aussagen lässt sich somit darlegen, dass erst bei einem Nachverdichtungsschritt von 40 s mit einer Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix in der Mattenmittelschicht zu rechnen ist, wobei es bereits vorher zu Beeinträchtigungen in anderen Schichten kommen kann. Die Darstellung der Mattenaushärtung mittels des Mattengegendruckverlaufs unterstützt zudem die Beobachtung, dass die Querszugfestigkeitsabnahme bei einem Nachverdichtungsschritt von 25 s nicht durch Beeinträchtigung der Mittelschicht zu erklären ist, sondern in anderen Bereichen (Zwischenschichten) stattgefunden haben muss.

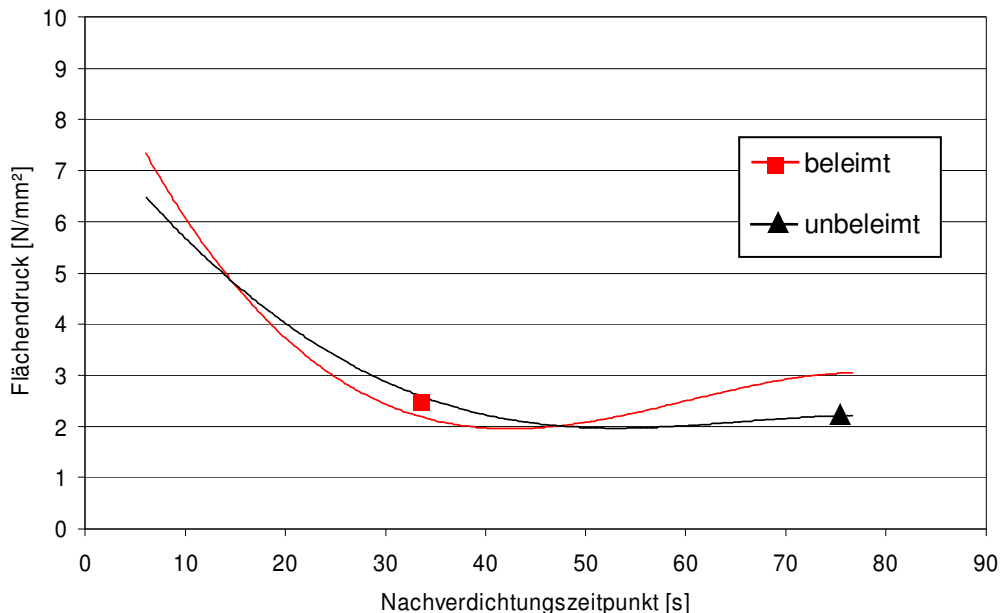


Abbildung 67: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbeimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 850 kg/m³, Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.

Vergleicht man mit diesem Hintergrund die Gegendruckzunahme von Fasern die einen Klebstoffanteil von 7 % und 13 % aufweisen (Abbildung 68), so weist der höhere Klebstoffanteil eine stärkere Zunahme zum Pressende hin auf.

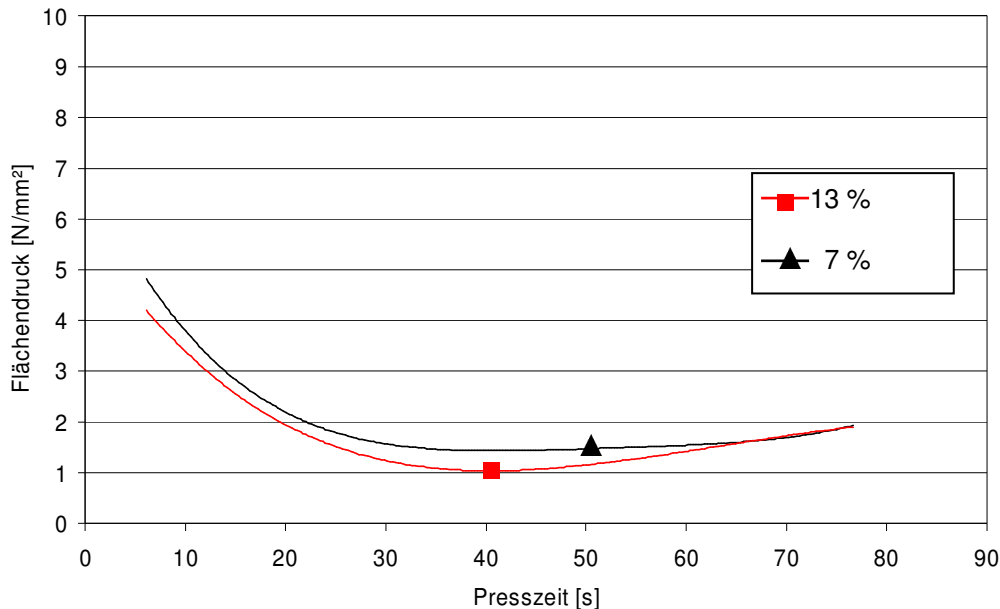


Abbildung 68: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von Faserproben mit verschiedenen Beilemungsgraden von 7 % und 13 % mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 700 kg/m³, Kauratec 605, Zielfeuchte 12 %.

Die Erhöhung der Querkzugfestigkeit, dargestellt mittels des Gegendruckverlaufs der Matte, lässt sich somit über den Aushärtungsbeginn der Mattenmittelschicht erklären, wobei die Schnittfläche des Gegendruckunterschiedes von beileimten und unbeileimten Proben bei Verschiebung des Scheitelpunktes auf ein Niveau eine Aussage über die erreichbare Festigkeit der Holpartikel-Klebstoffmatrix gibt. Dies belegen die Unterschiede innerhalb der Rohdichten und der Beilemungsgrade, indem die Flächen des Mattengegendruckunterschiedes proportional zu den erhaltenen Querkzugfestigkeiten sind. Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass sich die Ausbildung der Querkzugfestigkeit hauptsächlich zum Pressende mit der Aushärtung des Klebstoffes in der Mattenmitte einstellt, wobei es bereits vorher zu Beeinträchtigung von Zwischenschichten kommen kann.

6.3 Laborpresse

6.3.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanlage ist aus Abschnitt 5.1.2 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.1.3 zu entnehmen.

6.3.1.1 Rohdichteprofil

Exemplarisch ist das Rohdichteprofil einer Referenzplatte dargestellt. Es weist einen annähernd homogenen Verlauf auf (Abbildung 69). Es scheint, dass der gemessene Temperatur- und vermutete Feuchtegradient innerhalb der Matte keinen negativen Einfluss auf die Ausbildung des homogenen Rohdichteprofiles hatte, bzw. dass der unterschiedliche Plastifizierungsgrad der einzelnen Schichten nicht groß genug war, um eine unterschiedliche Verdichtung zu bewirken.

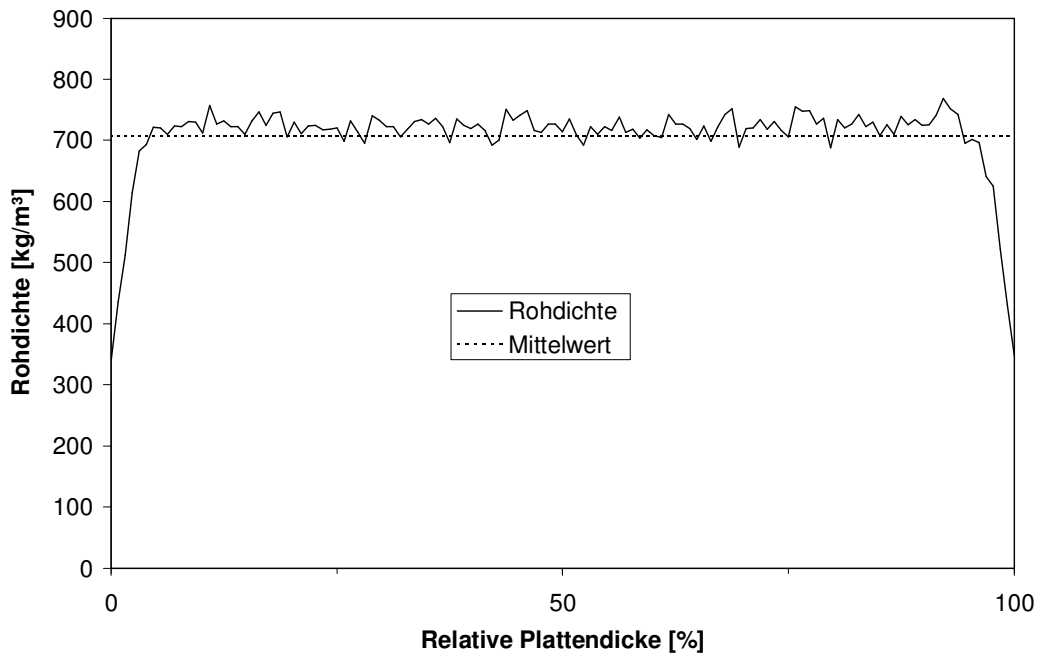


Abbildung 69: Rohdichteprofil einer Referenzplatte ohne Nachverdichtung. Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.

6.3.1.2 Festigkeitseigenschaften

Um nicht nur den Einfluss des Rohdichteprofiles auf die Festigkeitseigenschaften auszuschließen, sondern in einem weiteren Schritt auch die Rohdichte, wurden die Werte wie bereits in Abschnitt 6.2 beschriebenen Rohdichte bereinigt. Die Regressionsanalyse konnte für die Biegefestigkeit als auch für die Quellungswerte durchgeführt werden, jedoch nicht für die Querkzugfestigkeiten. Die Querkzugfestigkeit wird aus diesem Grund nicht dargestellt.

Die Entwicklung der Biegefestigkeit sowie der Quellung (Abbildung 70) abhängig vom Zeitpunkt der Nachverdichtung zeigt den maximalen Wert bei den Referenzplatten. Die nachverdichteten Platten zeigen generell eine niedrigere Festigkeit, die mit zunehmendem Nachverdichtungszeitpunkt signifikant abnimmt. Diese Resultate zeigen sich bei den Quellungswerten in einer Zunahme der Quellung woraus eine abnehmende Plattenfestigkeit folgt.

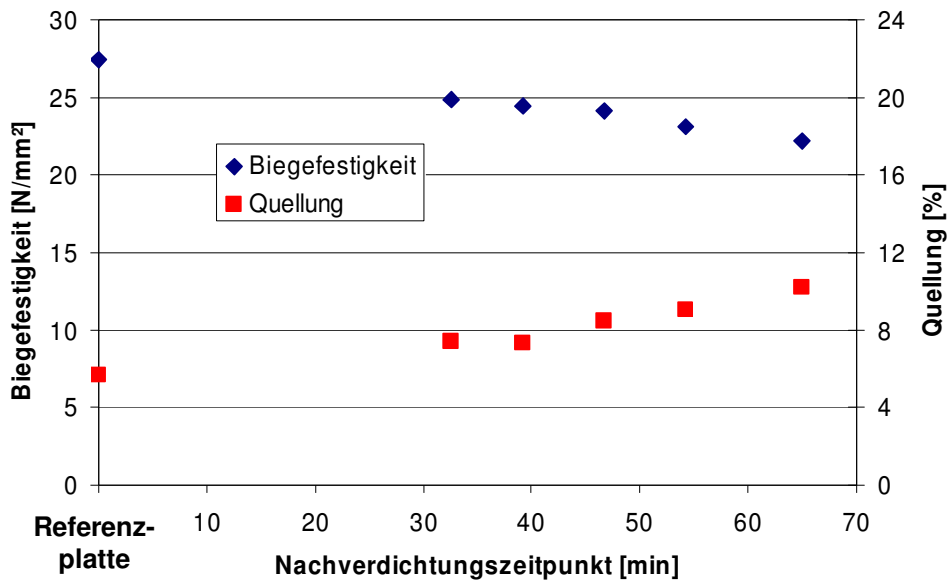


Abbildung 70: Biegefestigkeit und Quellung nach 24 h in Abhängigkeit des Nachverdichtungszeitpunktes, Rohdichte bereinigt. Rohdichte 650 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.

Die Bestätigung der gemachten Aussagen mittels einer linearen Trendanalyse und der Unterschiedbestimmung der Querszugfestigkeitswerte für den maximalen und den minimalen Wert sind in der Tabelle 22 zusammengefasst. Hierbei bedeutet +_x, die Annahme der Hypothese und –_x, die Ablehnung. Die Indizes x bestimmen die Steigung des Trends t und den Unterschied u_{mm} (Maximum : Minimum).

Tabelle 22: Statistische Auswertung, Laborpresse

Festigkeitseigenschaften	
Biegefestigkeit	Quellung
+u, mm; +t	+u, mm; +t

Die Ergebnisse zeigen, dass für die gesamte Versuchsreihe nicht nur das Rohdichteprofil, sondern auch die Rohdichte allgemein als einziger Indikator für die Platteneigenschaften ausscheiden. Es liegt nahe, dass andere Einflussfaktoren bei der Nachverdichtung die Festigkeitseigenschaften beeinträchtigt haben, wie z.B. ein mögliches Zerbrechen der Klebstoffverbindungen.

6.3.1.3 Temperaturverlauf

Mit der Wahl eines homogenen Plattenaufbaus sowie einer feuchte- und temperaturgradientenfreien Verpressung sollte es möglich sein, ein homogenes Rohdichteprofil zu erreichen. Durch die annähernd gleichmäßige Plastifizierung der zu verpressenden Matte sollte sich auch bei einem Nachverdichtungsschritt keine Rohdichtedifferenzierung über die Plattendicke einstellen. Die eingestellte Temperaturrampe während des Pressvorgangs musste eine relativ niedrige Steigung aufweisen, um eine möglichst temperaturgradientenfreie Platte verpressen zu können. Abbildung 71 zeigt den exemplarischen Temperaturverlauf einer Referenzplatte mit einem durchschnittlichen Temperaturgradienten von $1,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Die maximale Differenz zwischen der Deck- und der Mittelschichttemperatur betrug ca. 5°C .

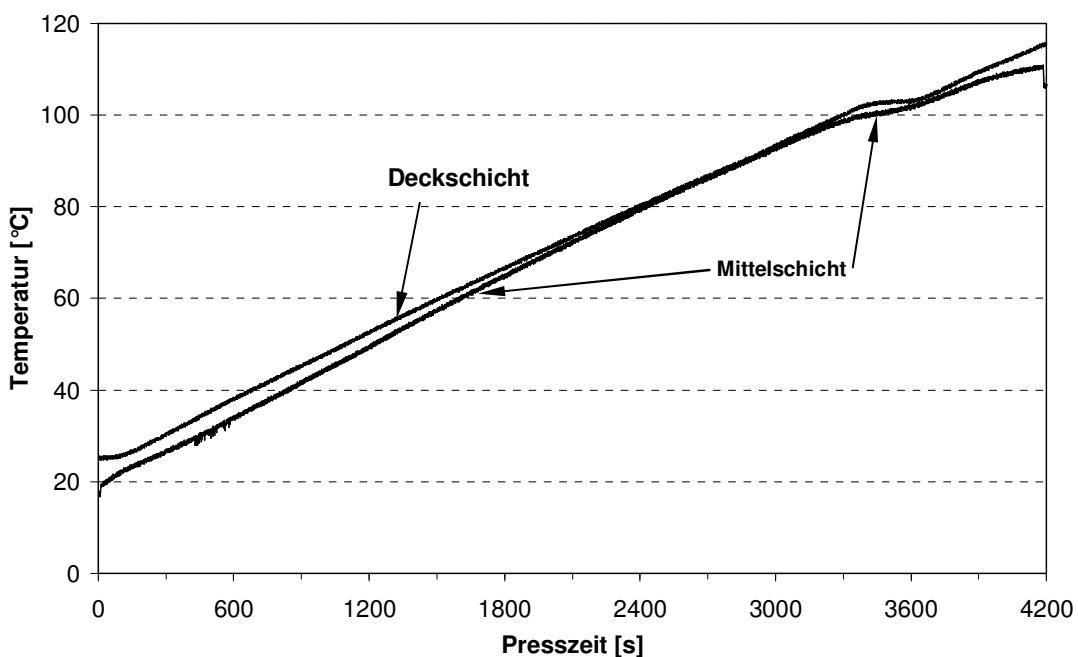


Abbildung 71: Temperaturverlauf von Heizplatte und Mittelschicht einer Referenzplatte ohne Nachverdichtung bei einer Erwärmung von $1,4^{\circ}\text{C}/60\text{ s}$. Rohdichte $650\text{ kg}/\text{m}^3$, Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.

In der obigen Abbildung ist eine allmähliche Annäherung der Mittelschichttemperatur an die Deckschichttemperatur bis kurz vor 100°C zu erkennen, die nach ca. 54 min (3300 s) erreicht wurden. Danach zeigt sich eine verzögerte Erwärmung der Mittelschicht- gegenüber der Deckschicht.

Der Temperaturverlauf ab 100°C legt nahe, dass die Mittelschicht zum Ende des Pressvorgangs einen höheren Feuchtigkeitsgehalt aufwies als die Deckschichten, da die Differenz zwischen Mittel- und Deckschichttemperatur ab diesem Zeitpunkt wieder zunimmt. Der höhere Feuchtigkeitsgehalt würde zu einer größeren Aufnahme von Wärmeenergie zum Ver-

dampfen des Wassers innerhalb der Mittelschicht und damit zu einer verspäteten Temperaturzunahme führen.

6.3.1.4 Mattengegendruck

Um zu ähnlichen Aussagen wie unter Abschnitt 6.2.1.4 gelangen zu können und um die Ergebnisse der Ipates- und der hier betrachteten Laborpressenversuche zu vergleichen wurde ebenfalls der Verlauf des Pressdruckes über die Presszeit gemessen. Der Verlauf des Mattengegendruckes ist in Abbildung 72 dargestellt.

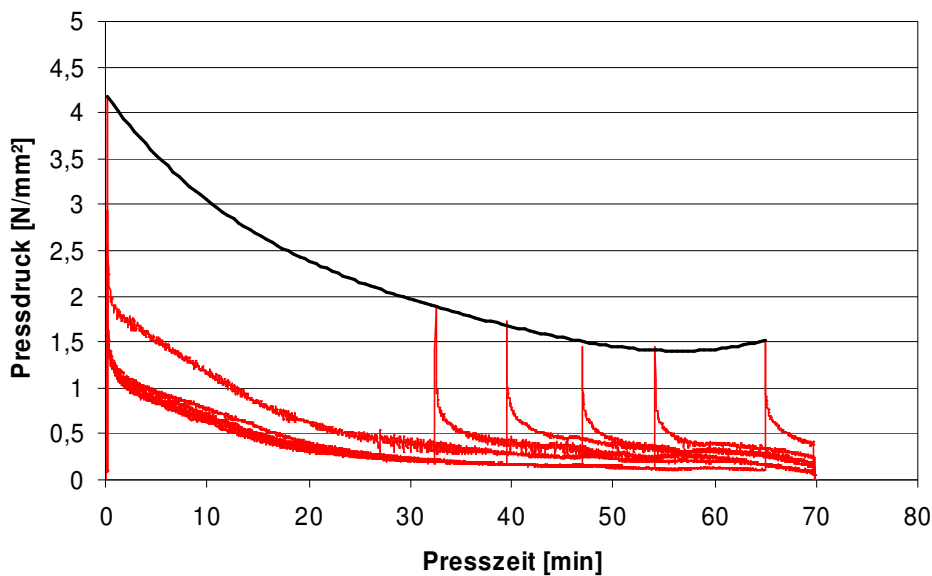


Abbildung 72: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von Fasermatten mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten bei einer Erwärmung von $1,4^{\circ}\text{C}/60\text{ s}$. Rohdichte 650 kg/m^3 , Beleimungsgrad 10% , Kaurit 350.

Auch in diesem Verlauf ist zu erkennen, dass der Pressdruck (Mattengegendruck) der Nachverdichtungen ab einer Mittelschichttemperatur von annähernd 100°C (54 min) aufgrund der verstärkten Härtung der Mittelschicht wiederum leicht zunimmt. Die Aushärtung des Klebstoffes geschieht demnach auch bei sehr langen Presszeiten erst ab einer Temperatur, bei der das Wasser aus dem Klebstoff und den Holzpartikeln verdampft bzw. die nötige Reaktionswärme zur Abbindung des Klebstoffes erreicht ist.

Ein Vergleich der Änderung der mechanischen Festigkeitswerte mit denen der Ipates-Versuche erscheint aufgrund der unterschiedlichen Pressparameter, wie Presstemperatur, Presszeit und Pressdruck nicht sinnvoll. Es kann keine Aussage über den Aushärtungsgrad des Klebstoffes bei den Proben mit homogenen Rohdichteprofil getroffen werden. Zwar waren die zum Pressende erreichten Presstemperaturen vergleichsweise niedrig ($<120^{\circ}\text{C}$), jedoch war die Presszeit wesentlich länger (70 min.). Der geringe Anstieg des Pressdruckes

nach Erreichen der 100°C (innerhalb der Nachverdichtungszeitpunkte von 54 min und 65 min) lässt darauf schließen, dass der Klebstoff bereits vorher an Viskosität zugenommen hat, wodurch die Festigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix verringert wurde. Dennoch lassen die Ergebnisse erkennen, dass es aufgrund der unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkte zu Veränderungen innerhalb der Holzpartikel-Klebstoffmatrix kam, die sich nicht über das Rohdichteprofil begründen lassen. Ob es sich hierbei nun um Mikrobrüche handelt oder aber um eine mit einer geringeren Bindefähigkeit des Klebstoffes (mit späterem Nachverdichtungszeitpunkt zunehmende Viskosität des Klebstoffes) einhergehenden Festigkeitsabnahme, kann an dieser Stelle noch nicht beantwortet werden.

Der Versuchsaufbau ist geeignet, um homogene Proben "ohne" Rohdichteprofil herzustellen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2. zeigt sich bei den untersuchten Temperaturen kein höherer Festigkeitswert als bei den Referenzwerten. Der in den Hauptversuchen maximal erreichte Querkzugfestigkeitswert bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 10 s und gemittelten 30°C in der Mittelschicht, je nach Plattenrohichte, lässt vermuten, dass bei den Laborplatten der Nachverdichtungszeitpunkt aufgrund der langsamen Erwärmung von 1,4°C/min zu spät erfolgte, um mit dem hier erfolgten Versuchsaufbau einen solchen Effekt darzustellen.

Die Auswertungen beweisen, dass selbst bei Proben mit homogenem Rohdichteprofil und gleicher Rohichte (durch die zusätzliche Rohdichtebereinigung) Einflüsse des Nachverdichtungszeitpunktes auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix nachweisbar sind.

6.4 Kritische Betrachtung Ipates

Die Auswertungen der durchgeführten Versuche bezüglich des Druckeinflusses auf die Querkzugfestigkeiten von MDF-Proben aufgrund des Pressprogramms und der Rahmenkonstruktion zeigen sowohl bei der Ipates als auch bei den an der Laborpresse am IHD gemachten Proben die gleichen Kernaussagen. Dennoch liegen bei der Ipates Besonderheiten vor, die die Herstellung und die Auswertung der Ergebnisse erschweren. Der Grundgedanke zur Konstruktion der Ipates lag ursprünglich darin, die Entwicklung der Klebfestigkeit von Klebstoffsystemen über die Presszeit zu bestimmen (Heinemann 2004).

Ein Vorteil der Ipates liegt darin, dass zur Herstellung eines plattenförmigen Probenkörpers nur eine vergleichsweise kleine Menge an entsprechendem Holzwerkstoffmaterial einzuwiegen ist. Somit erlaubt die Verwendung der Ipates eine Vielzahl von Wiederholungen bei einer beleimten Charge Material, die bei einer herkömmlichen Laborpresse nur zur Herstellung einer einzigen Platte reichen würde. Wie aber bereits in der Beschreibung der Methoden (Abschnitt 5.3) aufgezeigt, führt diese Arbeitsweise zu weiteren Problemen bei der Verwendung des beleimten Materials, da aufgrund der längeren Gebrauchsdauer der beleimten Charge die offene Zeit des Klebstoffes zu Einschränkungen bezüglich der Einsatzdauer führt. Der Klebstoff verändert hierbei seine Viskosität durch die Aufnahme des im Klebstoff befindlichen Wassers durch die trockeneren Holzwerkstoffpartikel. Wie gezeigt werden konnte, hat

dies einen direkten Einfluss auf die Querkzugfestigkeitsentwicklung von unter gleichen Pressparametern über die Zeit hergestellte Proben. Weiterhin wurde bewiesen, dass das Querkzugfestigkeitsniveau von unter gleichen Pressbedingungen hergestellten Proben aus zwei gleich beleimten Chargen dazu neigt unterschiedlich auszufallen. Der Durchlauf einer Versuchsanordnung mit einem wechselnden Pressparameter muss somit innerhalb einer Charge geschehen. Die Folge ist, dass sich die Versuchsplanung nach diesem Umstand richten muss und die Menge der herzustellenden Proben eines Versuchs begrenzt ist. Bedenkt man, dass der normale Herstellungsprozess einer Versuchsreihe durch eine rein zufällig ausgewählte Reihenfolge erfolgen sollte um systematische Fehler in den zu testenden Festigkeitseigenschaften der Proben zu vermeiden, so zeigt sich das Problem der begrenzten Probenanzahl innerhalb einer Charge.

Ein weiteres Problem der Ipates stellt die geringe Pressfläche dar. Da die Schüttung des zu verpressenden Materials manuell geschieht, ergeben sich partielle Schüttunterschiede (Oberflächengewicht), die eine Anhäufung des Materials in der Probenmitte zur Folge haben. Die Rohdichteunterschiede innerhalb der Probe, sowohl senkrecht als auch parallel zur Probenoberfläche kommen besonders durch die geringen Abmaße der hergestellten Holzwerkstoffproben zum Tragen.

Die Probenanzahl sollte aufgrund dessen höher liegen, als es in dieser Arbeit geschah. Hierdurch würde jedoch der Vorteil der Ipates, die Herstellung vieler Proben innerhalb eines kurzen Zeitraumes und damit die Variation der Pressparameter, gegenüber einer herkömmlichen Laborpresse verschwinden bzw. geringer ausfallen. Des Weiteren lassen sich die Einflüsse von geänderten Pressparametern nur durch die Versuchsergebnisse von Querkzugfestigkeiten ermitteln. Für andere Festigkeitskennwerte wie z.B. die Biegefestigkeit ist die Größe der Ipates-Proben zu gering.

Die Reproduzierbarkeit der mittels der IPATES erhaltenen Werte ist gegeben. Die Variationskoeffizienten liegen im Schnitt unterhalb 5%. Hierbei zeigt sich ein Gefälle von kurzen zu langen Presszeiten, des Weiteren ein Gefälle von niedrigen zu hohen Presstemperaturen. Gründe für Variationen liegen zum einen in Unregelmäßigkeiten bezüglich der benötigten Zeit bei der Probenvorbereitung direkt vor dem Verpressen. Diese Zeitunterschiede machen sich gerade bei kurzen Presszeiten bemerkbar und führen so zu größeren Variationskoeffizienten. Dieser Effekt verstärkt sich bei abnehmender Presstemperatur, da hier eine geringere Wärmemenge über die Zeit betrachtet in die Matte geführt wird. Das System ist gerade am Anfang sehr instabil für äußere Einflüsse, wie z.B. unterschiedliche Vorbereitungszeiten und damit einhergehenden unterschiedlichen Anfangstemperaturen der mit der Matte eingebrachten Pressplatten.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Ipates ein hervorragendes Instrumentarium für orientierende Untersuchungen ist, das für die grundlegende Einflussbestimmung von Pressparameteränderungen geeignet erscheint. Des Weiteren ist die Darstellung der Entwicklung der Festigkeit von Klebstoffen über die Presszeit mittels der Ipates, durch die bereits dar-

gestellte Querkzugfestigkeitsbestimmung im direkten Anschluss an den Pressvorgang, möglich. Es erscheint jedoch sinnvoll, die auf der Ipates gewonnenen Daten von Proben mit auf herkömmlichen Laborpressen gewonnenen Daten zu vergleichen. Zum einen erhalten die Ergebnisse auf diesem Wege eine sicherere Aussagekraft, zum anderen lassen sich noch andere mechanische Kennwerte als nur die Querkzugfestigkeit zur Schlussfolgerung heranziehen.

6.5 Vergleich Ipates und Laborpresse am IHD

Der Einfluss des Pressprogramms auf die mechanischen Eigenschaften von MDF wurde ebenfalls im Verlauf der Untersuchungen an einer Laborpresse des Instituts für Holztechnologie Dresden (IHD) im Rahmen des AIF-Projektes 13684 (Thoemen und Tobisch 2005) untersucht. Hierbei wurde unter Verwendung eines industrienahen Pressprogramms Variationen von Niveau und Dauer der einzelnen Programmphasen Erstverdichtung, Entlastung, Nachverdichtung nachgestellt. An den hergestellten Platten wurde hauptsächlich die Querkzugfestigkeit ermittelt. Zusätzlich wurden die Biegeeigenschaften, das Rohdichteprofil, die Rohdichte, die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung sowie der Feuchtegehalt bestimmt.

Die Auswertungen der Querkzugfestigkeitsverläufe über die Presszeit bestätigen die mittels der Ipates-Versuche erzielten Aussagen, obwohl die Pressparameter unterschiedlich waren. Die Faserplatten (460 mm x 420 mm) wurden mit einer Rohdichte von 750 kg/m³, sowie einer Rohplattendicke von 17,5 mm und einem Presszeitfaktor von 15 s/mm bei einer Presstemperatur von 220°C hergestellt. Die Laborversuche des IHD lassen bezüglich der ermittelten Prüfwerte Querkzugfestigkeitsverringerungen mittels folgender Pressprogrammvariationen erkennen:

- Stärkere Erstverdichtung (niedrigeres Erstverdichtungs-niveau)
- Längere Erstverdichtungsdauer (späterer Beginn der Entspannung)
- Höheres Entspannungsniveau
- Längere Dauer der Entspannung (bzw. späterer Beginn der Nachverdichtung)
- Nachverdichtung unter Niveau der Zieldicke (Höheres Nachverdichtungs-niveau)

Der größte Einfluss auf die Querkzugfestigkeiten wurde mittels der Variation der Entspannungsdauer erlangt.

Komplettierend kam das IHD im Rahmen des AIF-Projekts zu weiteren Ergebnissen. Eine Verbesserung der Biegefestigkeitseigenschaften konnte vor allem durch eine stärkere Erstverdichtung (niedrigeres Niveau in der Erstverdichtungsphase) sowie eine geringere Entlastung (niedrigeres Niveau) in der Entspannungsphase erzielt werden. Die größten Steigerungen bezüglich der Biegefestigkeiten wurden im Bereich des Niveaus der Erstverdichtung erzielt. Hinsichtlich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung konnten die deutlichsten Verbesserungen durch ein niedrigeres Erstverdichtungs-niveau und eine geringere Verdichtung

in der Entspannungsphase erzielt werden. Die niedrigsten (besten) Dickenquellungswerte wurden durch Veränderungen im Bereich des Entspannungsniveaus bewirkt.

6.6 Schlussfolgerung

Es konnte bestätigt werden, dass sowohl der Entlastungs- bzw. Verdichtungszeitpunkt wie auch das Niveau der Entlastung bzw. Verdichtung einen deutlichen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit hat.

Weitere Einflüsse auf die Querkzugfestigkeit aufgrund des Verdichtungszeitpunktes konnten bei der Variation der Zielrohddichte, nicht jedoch bei unterschiedlichem Beileimungsgrad nachgewiesen werden. Die Versuche zeigten weiter, dass es während des Pressprozesses zu maximalen Querkzugfestigkeiten aufgrund der Nachverdichtung kam, die über den Referenzwerten lagen. Man kann annehmen, dass bei der Verdichtung zwei sich beeinflussende Faktoren bestehen, die einen Einfluss auf die Ausbildung der Platteneigenschaften haben. Zum einen ist es die mit zunehmender Temperatur fortschreitende Plastifizierung der Holzpartikel, zum anderen das mit zunehmendem Aushärtungsgrad härter und spröder werdende Klebharz. Bei niedriger Temperatur ist die Plastifizierung der Holzpartikel gering, das Klebharz ist jedoch noch nicht ausgehärtet. Bei zunehmender Temperatur steigt die Verformbarkeit der Partikel und die Aushärtung des Harzes nimmt zu. Stellt man die Annahme, dass die Klebharzaushärtung der limitierende Faktor für eine Verdichtung ist, da nach einer zu weit fortgeschrittenen Kondensation Klebharz-Holzpartikelverbindungen beim Nachverdichten zerstört würden, so muss die Verdichtung vor diesem Kondensationszustand stattfinden. Das bedeutet, die Verdichtung sollte bei einem möglichst weit vorangeschrittenen Plastifizierungsgrad, jedoch vor dem eben erwähnten Kondensationszustand erfolgen, um die optimale Schnittmenge der sich beeinflussenden Faktoren zu erreichen. Andernfalls ist die Plastifizierung entweder zu gering oder die Klebharzkondensation zu weit fortgeschritten, um die optimalen mechanischen Platteneigenschaften zu bekommen. Bedenkt man die unterschiedliche Härtung der einzelnen Schichten, die sich aus den unterschiedlichen Temperaturverläufen ergeben, so zeigt sich die Angabe eines optimalen Verdichtungszeitpunktes als sehr schwierig.

Abschließend lässt sich folgern, dass Druckänderungen, die sich aufgrund des Pressprogramms ergeben einen direkten Einfluss auf die Ausbildung von Platteneigenschaften haben, der sich nicht über Rohdichteinflüsse erklären lässt, sondern über die Beeinflussung der Verklebungsgüte zustande kommt. Diese Beeinflussung könnte sowohl auf chemischer Ebene und zwar durch Störung der sich gerade ausbildenden Leimbrücken oder/sowie mechanisch in Form von Leimbrückenzerstörung bis hin zu Brüchen innerhalb der Fasern des Plattenmaterials stattfinden. Die Zusammenfassung des Einflusses von Be- und Entlastungen auf die Festigkeitseigenschaften ist in Abbildung 73 abgebildet.

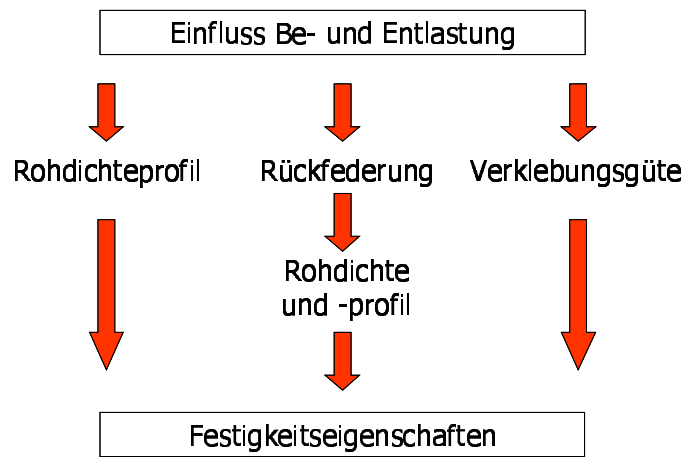


Abbildung 73: Einfluss von Be- und Entlastungen auf Festigkeitseigenschaften.

7 Druckschwankungen aufgrund der Rahmenkonstruktion

7.1 Theoretischer Ansatz

Das Vorkommen von Druck- und Distanzschwankungen innerhalb einer kontinuierlichen Heißpresse lässt sich durch theoretische Überlegungen vermuten. Lokale Druckmaxima und die korrespondierenden lokalen Distanzminima sollten sich aufgrund der Rahmenkonstruktion der kontinuierlichen Presse über den Pressrahmen zeigen.

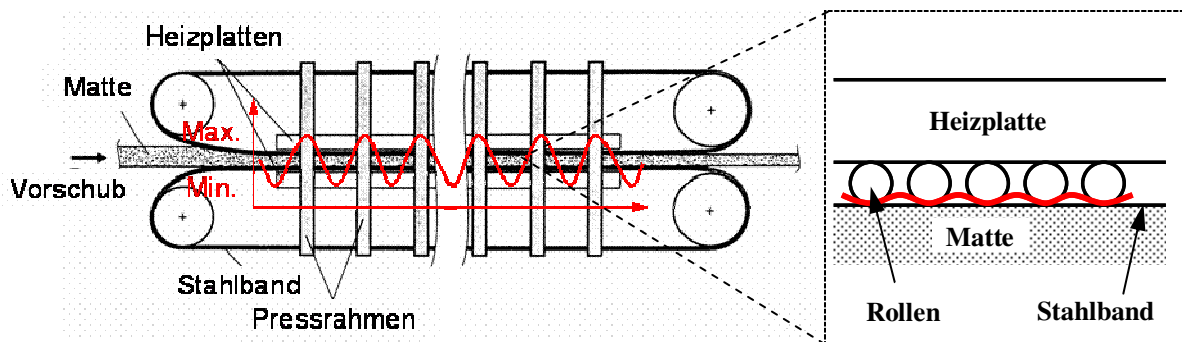


Abbildung 74: Übertriebene Darstellung von Druckschwankungen innerhalb einer kontinuierlichen Heißpresse aufgrund der Rahmenkonstruktion (links, verändert nach Thoemen und Tobisch 2005) und der Rollenkörper (rechts).

Eine Durchbiegung des Pressplatten-Rollenteppich-Stahlband-Systems ist zwischen den Pressrahmen zu vermuten (Abbildung 74).

Die angenommenen spezifischen Druck- und Distanzschwankungen in kontinuierlichen Heißpressen aufgrund der Rahmenbauweise lassen sich theoretisch entwickeln und aus einem hier vereinfachten eindimensionalen elasto-mechanischen Ansatz ableiten. Nimmt man die Pressrahmen als Auflager und die Heizplatte als Balken, so wirkt auf die Heizplatte eine Streckenlast. Diese Streckenlast führt zu einer Biegelinie der Heizplatte über die Pressenlänge und somit zu Mattendicken- und Druckschwankungen. Der unterschiedlich starke Einfluss des Rahmenabstandes, der Pressplattendicke und des spezifischen Druckes auf die Durchbiegung der Heizplatten lässt sich aus der allgemeinen Gleichung der Elastostatik (Gleichung 13) für die maximale Durchbiegung w_{max} sowie die Bestimmung des in dieser Formel enthaltenen Trägheitsmoments (Gleichung 13) ableiten.

$$w_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_0 l^4}{EI} \quad (13)$$

w_{\max}	Maximale Durchbiegung [mm]
q_0	Streckenlast [N/mm]
l	Abstand [mm]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
I	Trägheitsmoment [mm ⁴]

In der Gleichung für die maximale Durchbiegung w_{\max} geht der Rahmenabstand l in vierter Potenz in die Berechnung der maximalen Durchbiegung ein. Die Heizplattendicke d (hier die Dicke der betrachteten Fläche), die zur Berechnung des Flächenträgheitsmoments I (Gleichung 14) beiträgt, fließt in dritter Potenz und die Streckenlast q_0 bzw. der spezifische Druck einfach in die Gleichung der Biegelinie ein. Die Änderung des Rahmenabstands hat somit rechnerisch eine stärkere Auswirkung auf die maximale Durchbiegung w_{\max} als eine Veränderung der Heizplattendicke d und einen wesentlich stärkeren Einfluss als eine Veränderung der Streckenlast q_0 bzw. des spezifischen Drucks.

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (14)$$

I	Trägheitsmoment [mm ⁴]
b	Breite der betrachteten Fläche [mm]
d	Dicke der betrachteten Fläche [mm]

Am deutlichsten sollten sich die Auswirkungen im hinteren Pressenbereich, in der Kalibrierzone darstellen, während die Schwingungen in der Hochdruckzone wesentlich geringer wären (vgl. Abbildung 3). Im Vergleich zu der Kalibrierzone ließe sich dies auf den in der Hochdruckzone verringerten Pressrahmenabstand zurückführen. Zwar sind hier die spezifischen Drücke höher als im Kalibrierungsbereich, doch wirkt sich der verringerte Rahmenabstand stärker aus.

Der hier angeführte vereinfachte eindimensionale Ansatz geht von einem gleichbleibenden E-Modul des zu verpressenden Materials aus, woraus eine konstante Streckenlast resultiert, die über die Zeit linear bleibt. Aufgrund der mit der Durchbiegung bzw. des sich vergrößernden Pressspalts einhergehenden Rohdichteänderung erfährt die Matte jedoch eine Abnahme des E-Moduls, wodurch eine sich stetig verringernde Rückstellkraft auf die Heizplatten wirkt. Weiterhin führt die Durchbiegung auch zu einer nicht konstanten Streckenlast allein aufgrund der unterschiedlichen Dehnung, auch bei gleich bleibendem E-Modul. Die sich hieraus entwickelnde Biegelinie wäre aus diesem Grunde weniger stark ausgeprägt, als aus dem vereinfachten Ansatz abzuleiten. Dieser Effekt würde sich bei dünneren Platten stärker ausbilden, da bei

einer Durchbiegung w die entstehende Änderung des E-Moduls größer wäre, als bei einer vergleichenden dicken Platte. Weiter ließe sich daraus schließen, dass die sich hieraus ableitende Druckänderung bzw. Änderung der Rückstellkraft stärker wäre und bei dünneren Platten zu einer geringeren absoluten Durchbiegung w führen sollte.

Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sich der Distanzschwankung eine weitere überlagert, die durch eine Durchbiegung des Stahlbandes zwischen den Rollkörpern entsteht. Diese Durchbiegung aufgrund der Rollkörper ist im Vergleich zu den durch die Rahmenabstände hervorgerufenen Durchbiegungen jedoch relativ klein und wird hier nur aufgrund der Vollständigkeit aufgeführt. Die Frequenz f , mit der die hierdurch implizierten Schwingungen auftreten, lässt sich nach Gleichung 15 aus dem Abstand der Rollkörper s und der Vorschubgeschwindigkeit v_s errechnen.

$$f = \frac{I v_s}{2 s} \quad (15)$$

- f Frequenz aufgrund der Rollkörper [s^{-1}]
 v_s Vorschubgeschwindigkeit der Matte [cm/s]
 R Abstand der Rollkörper [cm]

Es lässt sich vermuten, dass vorliegende Druck- bzw. Distanzschwankungen sich nicht nur durch einen Druck- bzw. Distanzsensor nachweisen lassen, sondern sich ebenfalls im Gasdruckverlauf darstellen. Distanzänderungen würden das für ein Gas zur Verfügung stehende Volumen verändern und somit zu einer Gasdruckänderung führen, was sich aus dem idealen Gasgesetz ableiten lässt (Gleichung 16).

$$p = \frac{nRT_A}{V} \quad (16)$$

- p Druck des Gases [Pa]
 n Stoffmenge [mol]
 R Universelle Gaskonstante [J/(molK)]
 T_A Absolute Temperatur [K]
 V Volumen des Gases [m^3]

Des Weiteren ließe sich aus den Gasdruckmessungen die Distanzänderungen (Wegänderungen) und damit die Druckänderungen näherungsweise bestimmen. Die Berechnung ist aus Gleichung 17 ersichtlich.

$$\Delta d = d \frac{\Delta p}{p} \left(1 - \frac{\rho}{1500} \right) \quad (17)$$

Δd	Dickenänderung [mm]
d	Mattendicke [mm]
$\frac{\Delta p}{p}$	Relative Gasdruckänderung [-]
p	Absolutdruck [kPa]
$1 - \frac{\rho}{1500}$	Porenanteil [-]
ρ	Rohdichte [kg/m ³]

Mit der auf diesem Wege berechneten Dickenänderung Δd bzw. Dehnung der Matte ϵ ließe sich nach den von von Haas (1998) bestimmten E-Moduln E zu einem bestimmten Mattenzustand (Temperatur v , Feuchtigkeit u) eines definierten Materials (Faser, Span, Strand) die korrespondierende Druckänderung $\Delta \sigma$ näherungsweise bestimmen (Gleichung 18). In der Praxis ist diese Bestimmung allerdings schwierig, da starke Feuchte- und Temperaturunterschiede über den Mattenquerschnitt vorliegen.

$$\Delta \sigma = E \frac{\Delta d}{d} \quad (18)$$

$\Delta \sigma$	Druckänderung [N/mm ²]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
$\frac{\Delta d}{d}$	Relative Dickenänderung [-]

7.2 Druckmessungen während der industriellen MDF-Herstellung

7.2.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsapparatur ist aus Abschnitt 5.2 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.2.1 zu entnehmen.

Aufgrund des fehlenden linearen Einflusses der Temperatur auf den Widerstand (siehe Abschnitt 5.2.6) wurden die gemessenen spezifischen Druckwerte in zwei Temperaturbereiche aufgeteilt, deren Mittelschichttemperatur nicht mehr als $\pm 20^\circ\text{C}$ von den zur Verfügung stehenden Kalibrierkurven von 20°C und 80°C abwichen. Somit wurde die 20°C Kalibrierkurve bis auf eine Mittelschichttemperatur von 40°C und die 80°C Kalibrierkurve ab einer Mittelschichttemperatur von 60°C angewendet. Aufgrund der Verläufe der Kalibrierkurven kann festgehalten werden, dass die tatsächlichen spezifischen Drücke im Hochdruckbereich

des Presseneinlaufes über den der 20°C-Linie liegen, wobei sich die Unterschiede im Niederdruckbereich der Kalibrierungszone weniger auswirken und vernachlässigbar erscheinen.

Aus den vorliegenden ursprünglichen wie auch den extrapolierten Kalibrierkurven wurde eine Fehlerabschätzung über die Genauigkeit des Sensors abgeleitet. Aus den jeweils drei Einzelkurven der zugehörigen Kalibrierungskurven wurde für die drei untersuchten Temperaturen (20°C, 80°C und 150°C) eine mittlere Schwankungsbreite berechnet, bzw. für den Hochdruck- und Niederdruckbereich getrennt betrachtet.

Die in dieser Arbeit angestellten Aussagen zu den einzelnen Pressentypen beziehen sich nur auf die jeweils untersuchte Presse mit ihrem entsprechenden Baualter. Änderungen konstruktiver Art an neueren Pressentypen oder allgemein an anderen Pressen können in diese Betrachtungen nicht mit einfließen.

7.2.1.1 Druck- und Distanzschwankungen

Die Ergebnisse der spezifischen Druck- und Distanzmessungen sind exemplarisch in Abbildung 75 und Abbildung 76 dargestellt. In Abbildung 76 wurde aus Gründen der mit den Industriepartnern vereinbarten Vertraulichkeit auf die Darstellung der vollständigen Distanzkurve verzichtet. Aus gleichem Grund können hier auch keine weiteren Datenreihen dargestellt werden.

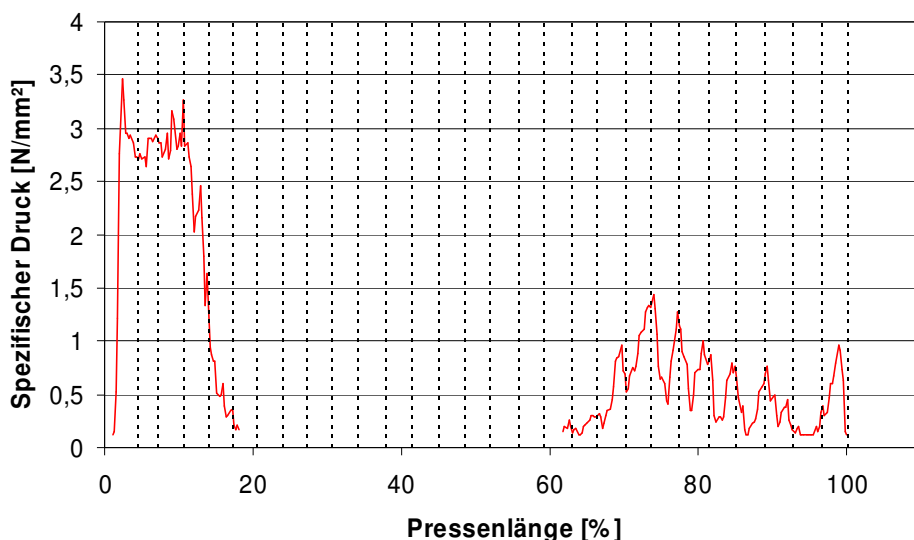


Abbildung 75: Spezifische Druckmessungen an einer kontinuierlichen Heißpresse. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.

In Abbildung 75 ist im hinteren Pressenabschnitt (Kalibrierzone) deutlich zu erkennen, dass die Druckmaxima und die Distanzminima jeweils auf die Pressrahmen fallen. Zwischen den Rahmen kommt es zu einer erkennbaren Entspannung des Druckes und zu einer leichten Vergrößerung der Mattendicke (siehe Abbildung 76). Im vorderen Pressenabschnitt (Hochdruckzone) hingegen, sind die Druck- als auch Distanzschwingungen nur ansatzweise erkenn-

bar, was auf die kleineren Rahmenabstände zurückzuführen ist. Die Druckwerte werden hier teilweise auch durch ein Rauschen des Messsignals überlagert, das sich durch den relativ flachen Verlauf der Kalibrierkurven im hohen Druckbereich erklärt (siehe Abbildung 35). Im mittleren Pressenabschnitt (Niederdruckzone) lag in sämtlichen Messungen ein sehr niedriger Druckverlauf vor. Diese niedrigen Drücke lagen außerhalb des Messbereichs des Drucksensors und konnten deshalb nicht aufgezeichnet werden. Die Dickenschwankungen in dieser Zone fielen teilweise deutlich geringer als in der Kalibrierzone aus.

In den übrigen Pressenabschnitten zeigte sich, dass schon kaum sichtbare Distanzänderungen zu deutlich erkennbaren Änderungen des spezifischen Drucks führen. Dieser Effekt lässt sich auf die im vorderen Bereich der Presse noch geringe Plastifizierung (hoher E-Modul) der Matte zurückführen. Somit muss für eine relativ geringe Distanzänderung ein relativ großer spezifischer Druck aufgewendet werden.

Die Messungen fanden am Rand der Matte statt, so dass die aufgenommenen Werte der Druck- und Distanzänderungen nur aus diesem Bereich dargestellt wurden. Bei diesem Vorgehen wird die Querkorrektur (Multipots) vernachlässigt. Je nach Einstellung der Querkorrektur können die damit quer zur Pressenlänge unterschiedlich aufgebrauchten Pressdrücke zu abweichenden Druck- und Distanzverläufen innerhalb der Pressenlänge führen. Die Anzahl der unterschiedlich angesteuerten Drucktöpfe über die Pressenbreite beeinflusst somit die Anzahl von unterschiedlichen Schwingungsverläufen in Pressenlängsrichtung.

7.2.1.2 Vergleich kontinuierlicher Pressen

Die für den Vergleich entscheidenden Unterschiede der drei untersuchten Pressentypen sind die Pressplattenstärke, die Stahlbanddicke, der Rahmenabstand sowie die Konstruktion der Rahmen und die Art der verwendeten Rollenstäbe oder Rollenketten mit ihren Abmaßen. Für die Darstellung der Ergebnisse wird in dieser Arbeit jedoch nur auf den Einfluss der Rahmenabstände näher eingegangen.

Verursacht durch die relativ großen Rahmenabstände weist die Dieffenbacher-Presse (CPS) die stärksten Druck- als auch Distanzschwankungen auf, während die Küsters- (ContiPress) und die Siempelkamp-Presse (ContiRoll) untereinander vergleichbare Schwankungen zeigen (Abbildung 76).

Die Frequenzen der Schwingungen werden ebenso durch die unterschiedlichen Rahmenabstände beeinflusst und wiesen bei der ContiRoll und der ContiPress einen Wert von $\frac{1}{4}$ Hz und bei der CPS eine Frequenz von $\frac{1}{6}$ Hz auf. Die Druckschwankungen aufgrund der Rahmenbauweise können, abhängig vom Pressentyp, bis zu 2 N/mm^2 und die Dickenschwankungen bis zu $0,3 \text{ mm}$ betragen. Während der Versuche wiesen die untersuchten Pressen annähernd gleiche Erstverdichtungen (Distanzen) auf, was durch die vergleichbar hergestellten MDF-Platten zu einem annähernd gleichen Niveau des spezifischen Druckes im vorderen Hochdruckbereich führt.

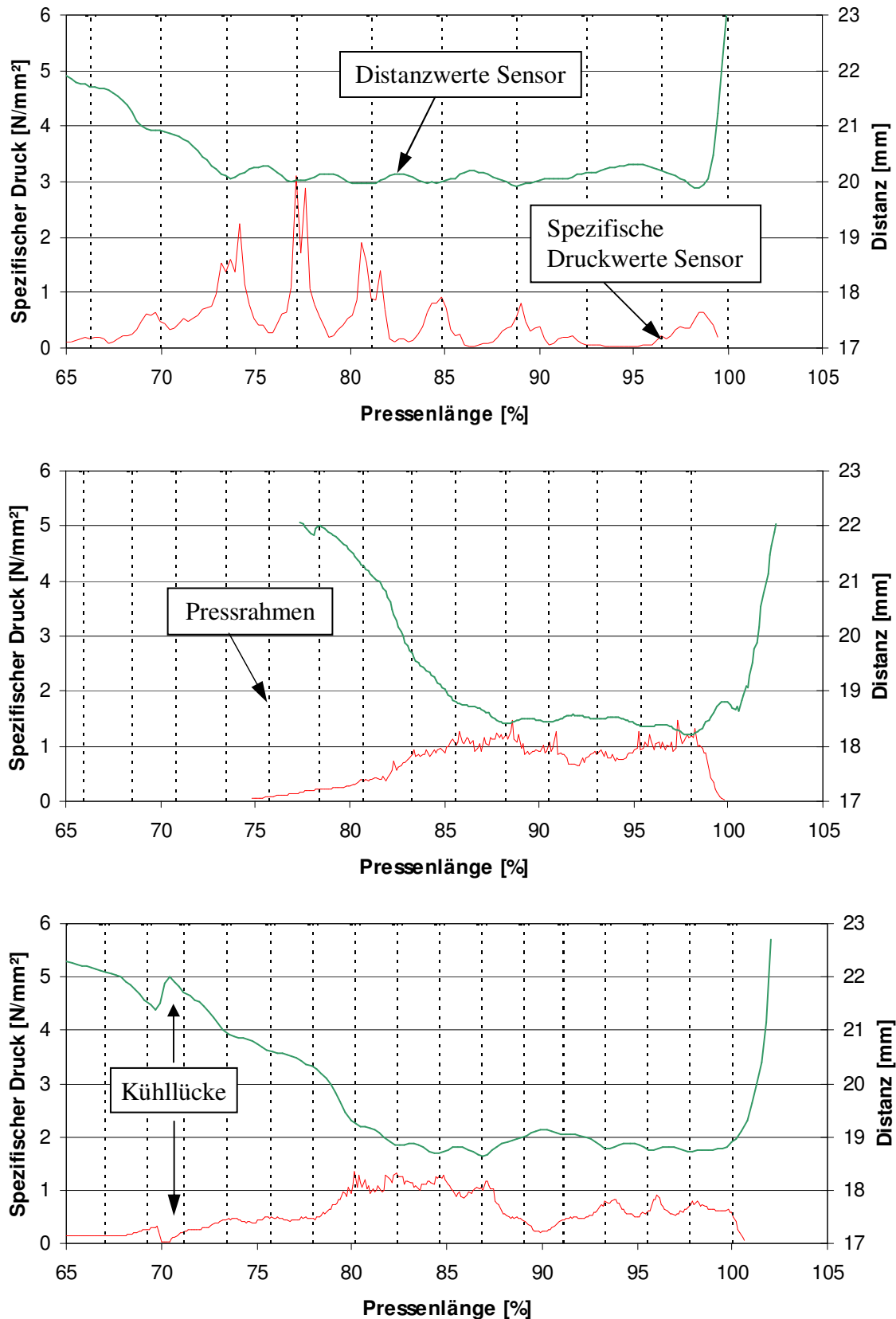


Abbildung 76: Vergleich des spezifischen Drucks und der Distanz dreier Pressentypen, CPS (oben), ContiRoll (mittig), ContiPress (unten). Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.

Alle drei Pressentypen zeigen Abweichungen von Pressendaten und Sensordaten auf. Hierbei fallen insbesondere einzelne Rahmen auf, die durch spezifische Druckspitzen und Distanzminima hervortreten. Besonders bei der ContiPress zeigen sich über die gesamte Pressenlänge spezifische Druckmaxima, die sich an einzelnen Pressrahmen, jedoch teilweise auch zwischen zwei Pressrahmen feststellen lassen. Zusätzlich weichen die Pressenanzeigen im Hochdruckbereich sowie im Niederdruckbereich teilweise erheblich von den gemessenen Bedingungen ab, und zwar sowohl in den Distanz- als auch den spezifischen Druckangaben. Eine hinreichende Erklärung kann über z.B. eine Schüsselung des Stahlbandes am Pressenrand nicht geliefert werden.

Darüber hinaus weist die ContiPress eine konstruktive Besonderheit im Vergleich zu den anderen beiden untersuchten Pressentypen auf. Eine Pressenteilung aufgrund einer Kühlzone im hinteren Pressenbereich (ab 70 % Pressenlänge) führt zu einer Distanzzunahme von 0,5 mm und einer nur geringen Abnahme des spezifischen Drucks aufgrund der Lage der Kühllücke in der Niederdruckzone.

Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Messungen an drei kontinuierlichen Pressen bestätigen die von Graf (2000) gemachten Aussagen, die jedoch nicht wissenschaftlich und systematisch untersucht wurden. Hierbei wird darauf verwiesen, dass es zu Verformungen der Pressplatten zwischen den Pressrahmen (Stützstellen) kommen kann, die bei 0,2-0,3 mm liegen. Die Distanzänderungen sollen demnach bei einer abnehmenden Elastizität der Matte während des Heißpressprozesses zu einer zunehmenden Druckänderung innerhalb der Matte führen, die insbesondere in der Kalibrierzone, in der es zu diesem Zeitpunkt in der Mittelschicht zu Abbindereaktionen kommt, zu Einbußen der Plattenqualität führen kann. Die Schwankungen können vermindert werden, indem die Rahmenabstände verkleinert oder die Heizplatte dicker ausgelegt wird. Da dies nicht akzeptable Mehrkosten zur Folge hätte, wird seitens Graf (2000) eine neue konstruktive Anordnung der Pressrahmen vorgeschlagen (Abbildung 77). Hierbei werden die durch die Heizplatte getrennten oberen und unteren gegenüberliegenden Pressrahmen versetzt angeordnet (Abbildung 78).

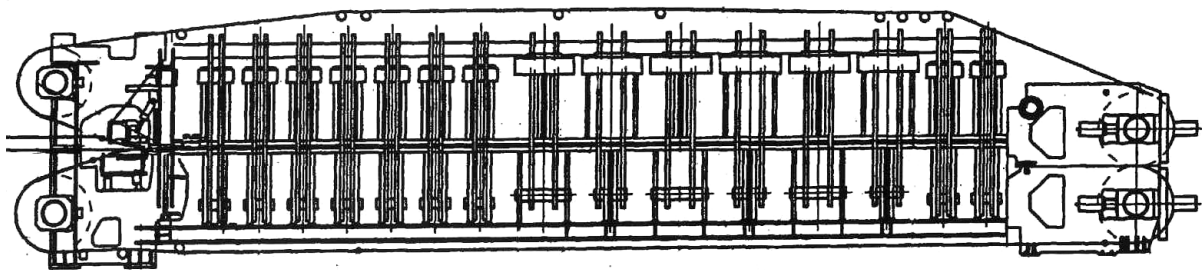


Abbildung 77: Kontinuierlich arbeitende Presse mit zueinander versetzt angeordneten Pressrahmen (Graf 2000).

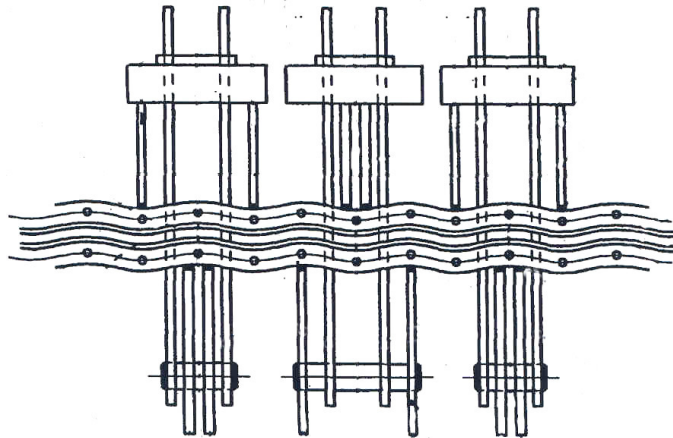


Abbildung 78: Ausführungsbeispiel von drei versetzt angeordneten Pressrahmen einer kontinuierlichen Heißpresse in der Kalibrierzone (Graf 2000).

Die hiermit erreichte Minimierung der Distanz- und Druckschwankungen könnte zu verbesserten physikalischen Eigenschaften des hergestellten Produktes bei gleicher Leimmenge, oder bei gleich bleibender physikalischen Eigenschaften zu einer Reduzierung der eingesetzten Leimmenge von 3-8 % führen (Graf 2000).

7.2.1.3 Ausblick Drucksensor

Der in dieser Arbeit entwickelte und zur Anwendung kommende Sensor hat eine maximale Dauereinsatztemperatur, die unterhalb der in Abschnitt 5.2.2 erwähnten von 220°C liegt. Die Ursache liegt in dem Temperaturverhalten des Hochtemperaturkunststoffes, dem eingesetzten Platinmaterial (Epoxidharz) und den notwendigen Kabelverbindungen, die gelötet sind und für eine höhere Einssatztemperatur geschweißt sein müssten. Für den Prototyp des Drucksensors wurde daher ein erlaubtes Temperaturintervall gewählt, indem die Messgenauigkeit und die Herstellungsbedingungen bzw. die Kosten im akzeptablen Rahmen blieben. Aus diesen Gründen wurde die Anwendung des Sensors auf den Mittelschichtbereich (<120°C) beschränkt. Die Bestimmbarkeit des Druckverlaufs konnte somit nur über die Pressenlänge erfolgen. Um Druckunterschiede aufgrund von Multipots/Querkorrekturen, gleichbedeutend mit einer Datenerfassung quer zur Vorschubrichtung, zu erfassen, müsste die Messung des Druckverlaufs über die Pressenbreite auf der Mattenoberfläche geschehen. Nur so wäre das Entfernen des Sensors nach dem Pressendurchlauf gewährleistet. Hierfür wäre allerdings eine Temperaturstandfestigkeit des Sensors von bis zu 220°C erforderlich, die in dem vorliegenden Prototypenstatus nicht erreicht wird.

Das Messprinzip des hier entwickelten Sensors ist jedoch in der Lage auch bei höheren Temperaturen den spezifischen Pressdruck zu erfassen, als in dieser Arbeit mit dem Prototyp realisiert wurde. Hierfür müsste ein Kunststoff zur Anwendung kommen, der eine wesentlich höhere Glasübergangstemperatur besitzt, um eine Änderung der Materialeigenschaften und damit den Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit zu minimieren. Um eine bessere Auf-

lösung auch bei höheren Temperaturen zu erreichen, sollte ein Hochtemperaturkunststoff mit einem E-Modul Verwendung finden, der über dem hier Anwendung gefundenen liegt. Die Folge wäre eine steilere Kalibrierungskurve bei den entsprechenden Temperaturen, gleichbedeutend mit einer besseren Auflösung. Des Weiteren ermöglicht das verwendete Messprinzip eine Zusammenschaltung von Einzelsensoren zu einer Sensormatrix, wodurch Druckverteilungen 3-dimensional darstellbar wären. Aufgrund der eingeschränkten Datenspeicherkapazität des eingesetzten Datenloggers wurde darauf im Entwicklungsstadium des Sensors nicht zurückgegriffen.

7.3 Gasdruckmessungen während der industriellen MDF-Herstellung

7.3.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.2.7 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.2.1 zu entnehmen.

7.3.1.1 Gasdruck

Der in Abbildung 79 dargestellte Gasdruck zeigt einen für MDF typischen Verlauf. Die durch die spezifischen Druck- und Distanzmessungen nachgewiesenen Schwankungen lassen sich, wie bereits in Abschnitt 7.1 angedeutet, auch in den Gasdruckmessungen erkennen.

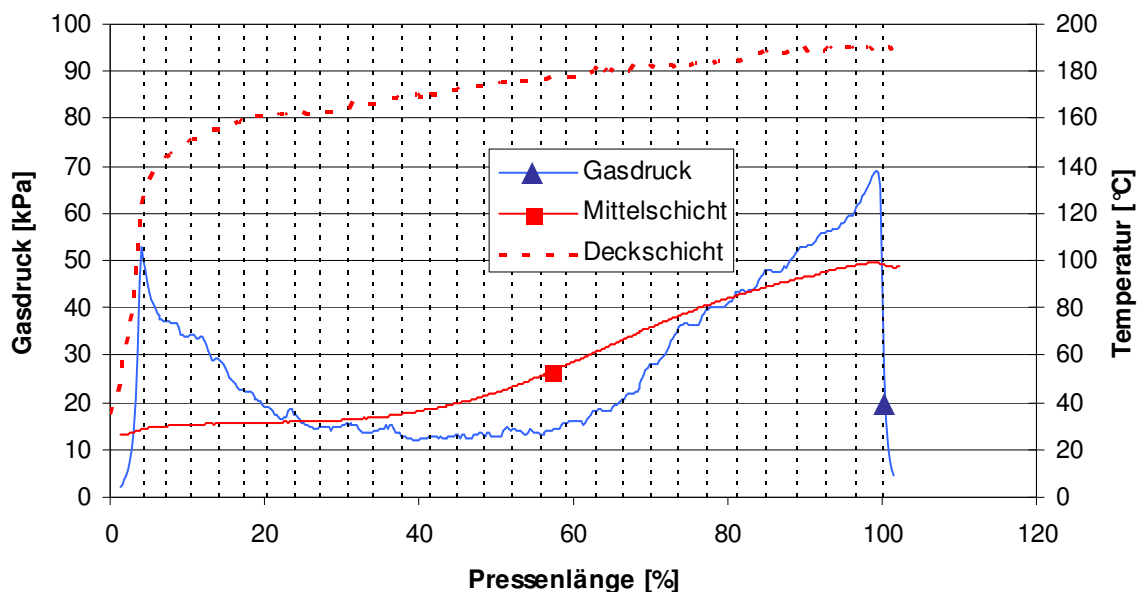


Abbildung 79: Gasdruck- und Temperaturmessungen an einer kontinuierlichen Heißpresse (MDF). Rohdichte 750 kg/m^3 , Plattendicke 20 mm. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.

Die Messungen zeigen die gleichen Schwingungen innerhalb des Gasdrucks, wie sie sich bereits in den Distanz- und spezifischen Druckmessungen dargestellt haben. Zusätzlich sind die Temperaturen der Mittel- und Deckschicht abgebildet.

7.3.1.2 Vergleich Gasdruck und spezifischer Druck

Der Vergleich von Gasdruck- und spezifischer Druckmessung in Abbildung 80 verdeutlicht, dass Gasdruckmessungen auch zum Nachweis von Dickenschwankungen geeignet sind (der Gasdruck nimmt ebenso wie der spezifische Druck zwischen den Pressrahmen ab). Die Distanzzunahme zwischen den Pressrahmen führt zu einer Vergrößerung des Mattenvolumens und somit zu einer temporären Verminderung des Gasdrucks. Diese Erscheinungen können bei bereits durchgeführten Gasdruckmessungen an verschiedenen kontinuierlichen Heißpressen nachvollzogen werden (z.B. Steffen *et al.* 1999, Meyer und Thoemen 2006).

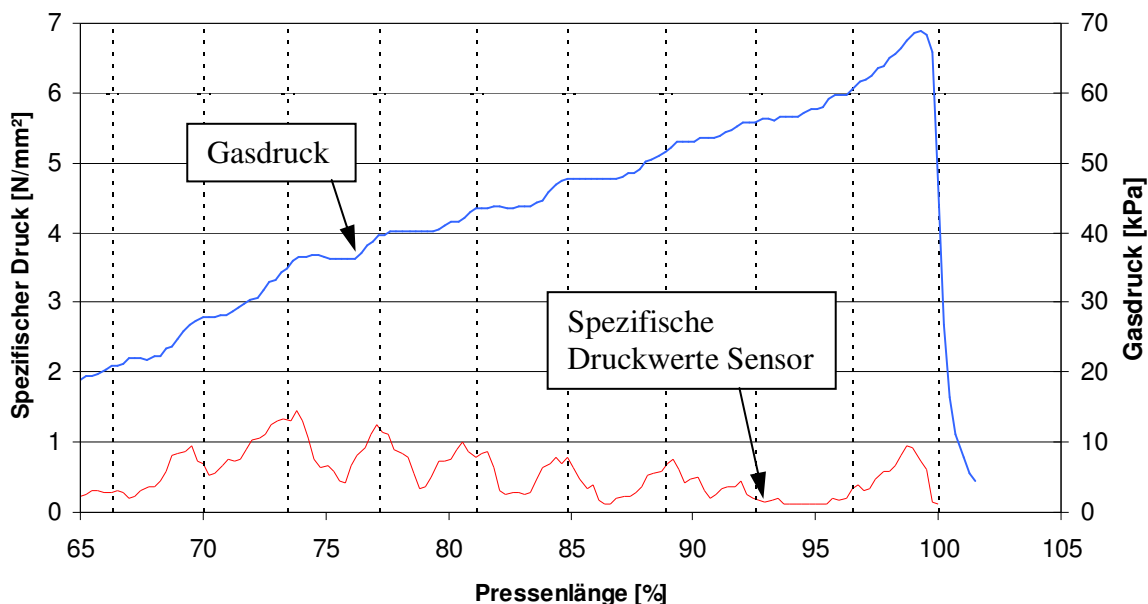


Abbildung 80: Vergleich von Gasdruck- und spezifischen Druckmessungen in einer kontinuierlichen Heißpresse. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.

Die im Vergleich der drei Pressentypen aufgeführten Zwischenmaxima (vgl. Abschnitt 7.2.1.2) zeigen sich ebenfalls im Gasdruckverlauf über die Pressenlänge (Abbildung 81). Hierbei weisen die ContiRoll und insbesondere die ContiPress diese Erscheinungen zusätzlich zu den Schwankungen aufgrund der Rahmenkonstruktion auf. Bei der CPS sind nur die Schwankungen aufgrund der Rahmenbauweise zu erkennen.

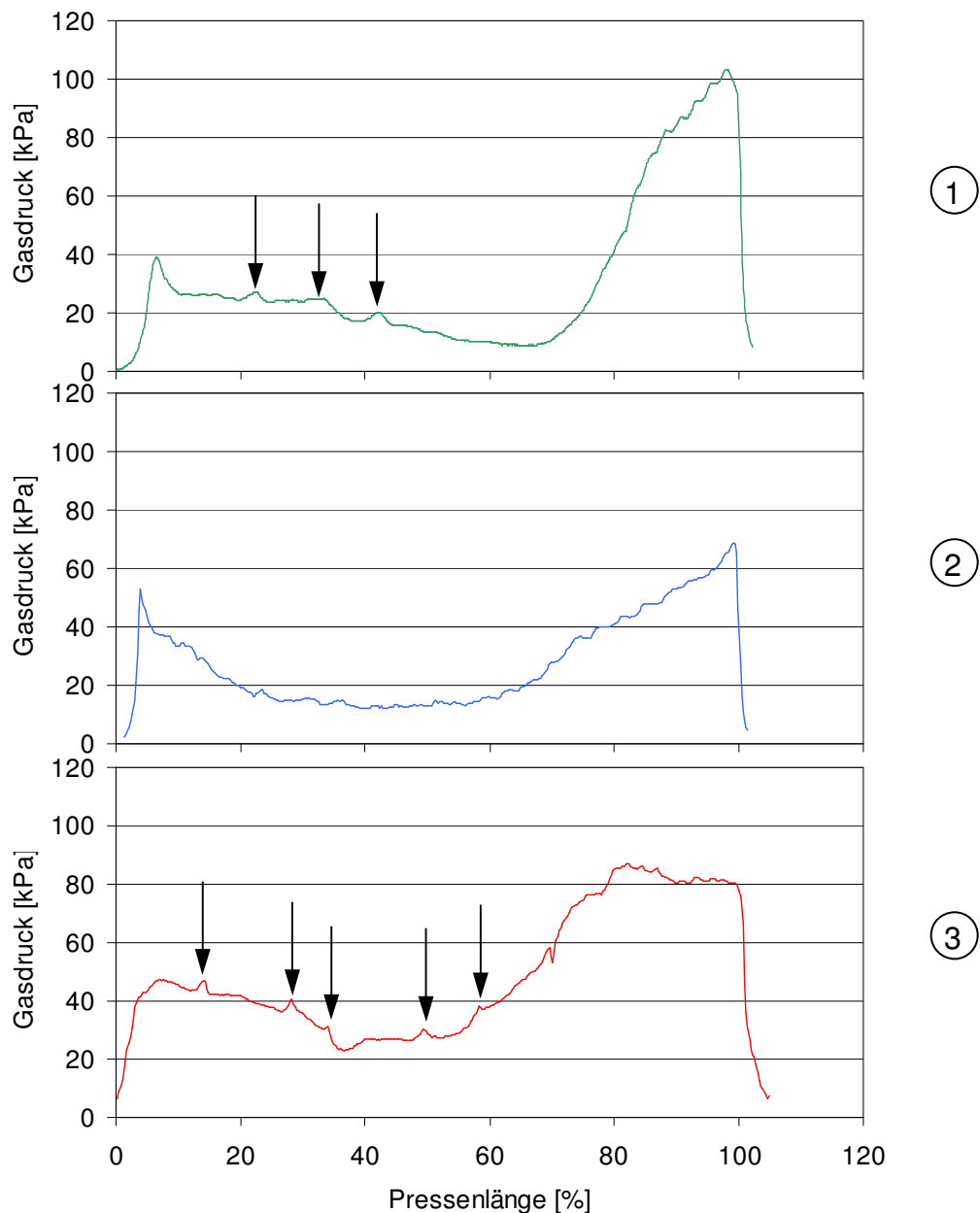


Abbildung 81: Vergleich des Gasdruckverlaufs von drei kontinuierlich hergestellten MDF mit Zwischenpeaks (Pfeile). 1 = ContiRoll, 2 = CPS, 3 = ContiPress.

7.3.1.3 Berechnung der Distanzänderung

Aus den Messungen folgert, dass Distanzänderungen anhand von Gasdruckmessungen nachweisbar sind. Wie in Abschnitt 7.1 dargelegt wurde, kann über Gleichung 17 die Dickenänderung der Matte aufgrund des Gasdruckunterschiedes berechnet werden. Die Rechnung soll am Beispiel aus Abbildung 80 bei 75 % Pressenlänge dargestellt werden.

Mit einer Mattendicke d von 20 mm, einer Gasdruckänderung Δp von 138,6 kPa auf 135,6 kPa und einer Rohdichte ρ von 750 kg/m³ ergibt sich ein Δd von 0,22 mm. Zum Ver-

gleich sei die bei den Industrierversuchen gemessene Dickenänderung Δd von 0,21 mm angegeben, woraus ersichtlich wird, dass mittels Gasdruckmessungen die Distanzänderung sehr genau errechnet werden kann.

7.4 Grundversuche Labor

Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.2.2 zu entnehmen.

Die Auswirkungen von Dickenschwankungen auf die Querkraftfestigkeiten sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. In Abbildung 82 lässt sich erkennen, dass die Querkraftfestigkeiten bis zu einer Temperatur von 140°C und einer Amplitude von 0,2 mm gegenüber den Referenzwerten keine Unterschiede aufweisen (die Ausnahme bildet die maximale Querkraftfestigkeit innerhalb der Versuchsreihe für 140°C bei einer Amplitude von 0,2 mm) und danach bis zu einer Amplitude von 1 Hz sinken. Bei einer Temperatur von 180°C ist dieser Festigkeitsabfall bereits ab einer Amplitude von 0,05 mm für 1 Hz signifikant.

Ein Unterschied zwischen den Frequenzen ist bei den Temperaturen von 110°C und 140°C nicht ersichtlich. Hingegen zeigt sich bei einer Temperatur von 180°C ein signifikant negativer Einfluss auf die Ausbildung der Querkraftfestigkeit bei einer Frequenz von 1 Hz gegenüber 0,5 Hz bei einer Amplitude von 1 mm.

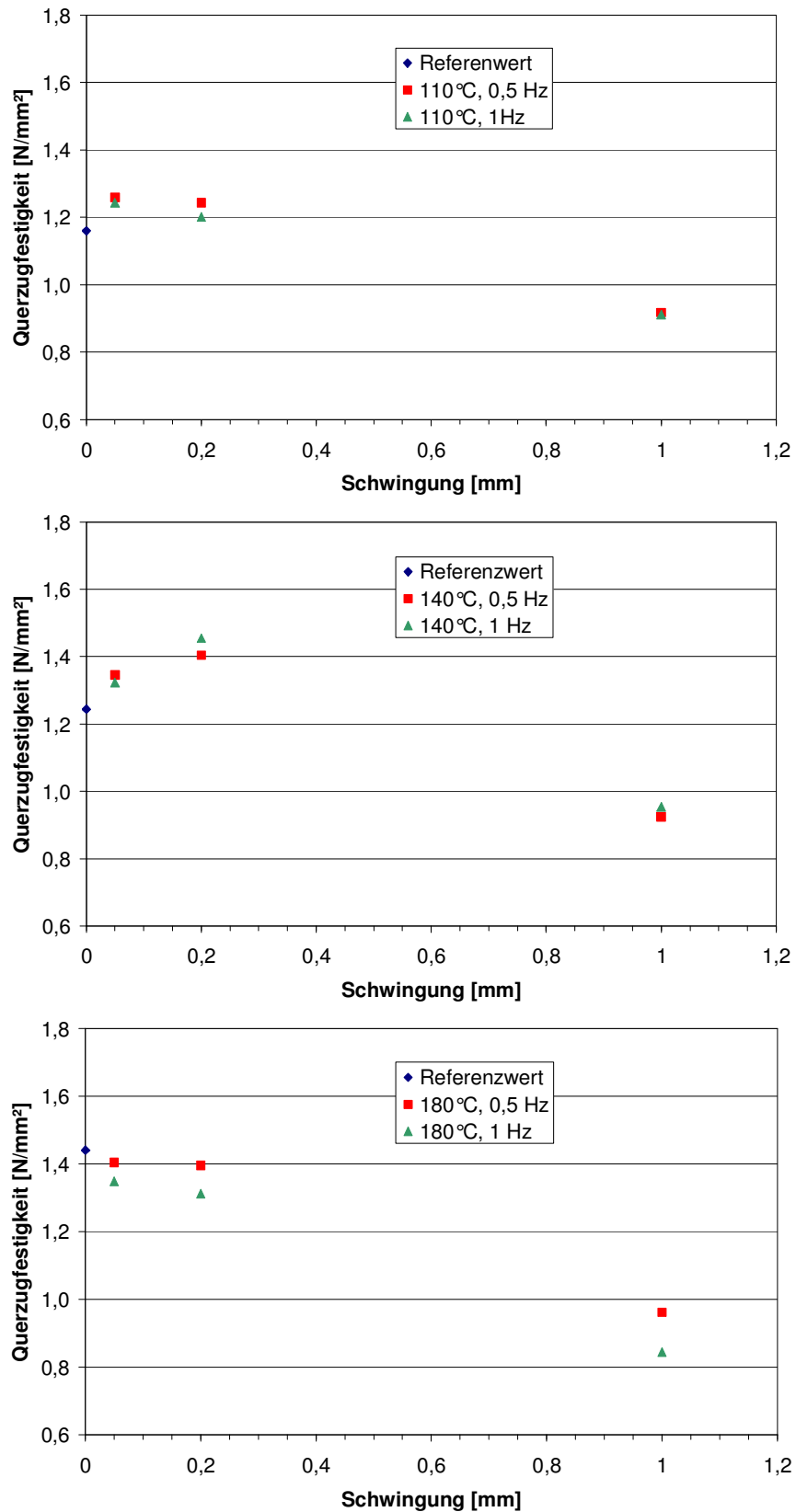


Abbildung 82: Querzugfestigkeitsverlauf über Amplitudenhöhe (Rohdichte bereinigt), 110°C (oben), 140°C (mittig) und 180°C (unten). Rohdichte 700 kg/m³, Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405.

Die Zusammenfassung der statistischen Auswertung findet sich in Tabelle 23. Dargestellt sind die Unterschiedsbestimmung der Querkzugfestigkeitswerte für die maximale und minimale Amplitude, Referenzwert und maximaler Wert sowie die Frequenz. Hierbei bedeutet $+_x$, die Annahme der Hypothese und $-_x$, die Ablehnung. Die Indizes x bestimmen den Unterschied $u_{\min\max}$, u_{Ref} und u_{F} .

Tabelle 23: Statistische Auswertung der Grundversuche bezogen auf die Querkzugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimale und maximale Presszeit; u, Ref = Unterschied Referenz- und maximaler Wert, u, F = Unterschied Frequenz.

Frequenz [Hz]	Presstemperatur [°C]					
	110		140		180	
	0,5	1	0,5	1	0,5	1
	$-_{u, \text{Ref}}$	$-_{u, \text{Ref}}$	$-_{u, \text{Ref}}$	$+_{u, \text{Ref}}$		
	$+_{u, \text{mm}}$	$+_{u, \text{m}}$	$+_{u, \text{mm}}$	$+_{u, \text{mm}}$	$+_{u, \text{mm}}$	$+_{u, \text{mm}}$
		$-_{u, \text{F}}$		$-_{u, \text{F}}$		$+_{u, \text{F}}$

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingungsamplitude, die Frequenz, die Temperatur und die untersuchte Rohdichte Einfluss auf die Ausbildung der Querkzugfestigkeit haben können. Je höher die Temperaturen, desto stärker sind die Auswirkungen auf die Festigkeiten. Dies lässt sich über die unterschiedlichen Aushärtungszustände des Klebstoffes bei unterschiedlichen Temperaturen erklären. Bemerkenswert ist der beobachtete Festigkeitsanstieg bei Temperaturen von 110°C und 140°C, bei Amplituden von 0,05 mm bzw. 0,2 mm und jeweils beiden untersuchten Frequenzen. Eine Erklärung hierfür kann zu diesem Zeitpunkt nicht geliefert werden. Es scheint jedoch, dass sich unter gewissen Amplituden die Vernetzung zwischen Klebstoff und Holzpartikel vorteilhafter ausbildet. Zusätzlich erfolgte Untersuchungen der Bruchfläche zeigten für die hier betrachteten Versuche Brüche in der Probenmittelschicht bei einem herkömmlichen, industrienahe Rohdichteprofil.

Für eine Überprüfung der in der Industrie gewonnenen Daten hinsichtlich des Einflusses von Schwankungen auf die Querkzugfestigkeiten ist nur die angewendete Presstemperatur von 180°C relevant, da sie die Stahlbandtemperatur unter industriellen Bedingungen am besten repräsentiert.

7.5 Hauptversuche Labor

7.5.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.2.3 zu entnehmen.

7.5.1.1 Querzugfestigkeiten

Die Darstellung des Einflusses der Amplitude bei einer Schwingung über die gesamte Presszeit auf die Querzugfestigkeit (Abbildung 83) zeigt für beide untersuchten Rohdichten von 850 kg/m³ und 550 kg/m³ und Frequenzen von ¼ Hz und 1 Hz einen signifikant abnehmenden Verlauf bei einem Vergleich der Referenzwerte- und Endwerte bei 0 mm und 0,5 mm Amplitudenhöhe. Die Abnahme der Querzugfestigkeit beträgt für eine Rohdichte von 850 kg/m³ im Mittel 20 %, im Vergleich von 15 % bei einer Rohdichte von 550 kg/m³.

Bei einem Vergleich der Referenzwerte mit einer Amplitude von 0,05 mm zeigt sich dieser abnehmende Trend nur für eine Frequenz 1 Hz bei einer Rohdichte von 850 kg/m³.

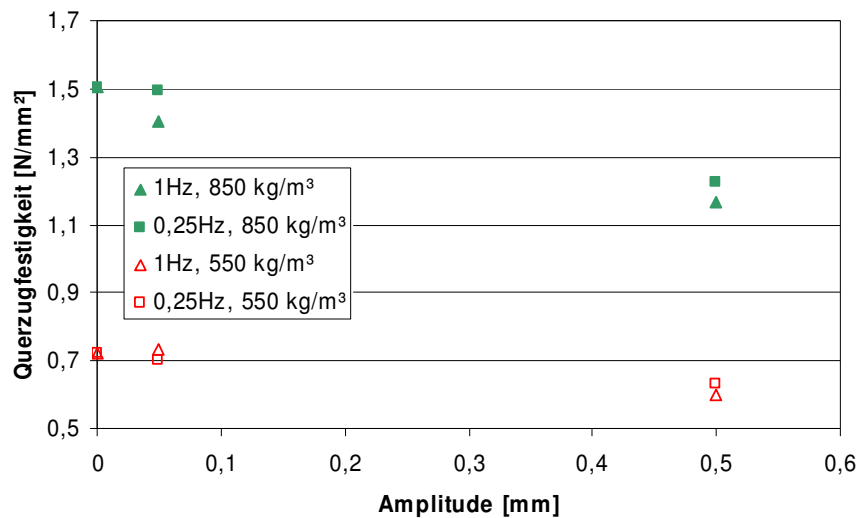


Abbildung 83: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 2: Schwingung "komplett", Rohdichte 550 kg/m³ und 850 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Hieraus resultierend lässt sich die Aussage treffen, dass eine Erhöhung der Amplitude über einen bestimmten Grenzwert während des Heißpressprozesses zu einer Querzugfestigkeitsabnahme führt, wobei der Trend durch eine höhere Rohdichte und Frequenz verstärkt wird. Diese Aussage zeigte sich bereits in den vorangestellten Grundversuchen.

Der Einfluss der Frequenz bei einer Schwingung über die gesamte Presszeit bei einer Rohdichte von 850 kg/m³ stellt sich für eine Amplitude von 1 % und 10 % dar. Hier ist die Querzugfestigkeit bei einer Frequenz von 1 Hz signifikant niedriger als bei ¼ Hz. Diese Aussagen zeigen sich weniger eindeutig bei einer untersuchten Rohdichte von 550 kg/m³. Hier sind die Unterschiede zwar ebenfalls signifikant, jedoch ist hier bei einer Amplitude von 1 %, im Gegensatz zu einer Amplitude von 10 %, die Querzugfestigkeit bei einer Frequenz von 1 Hz höher als bei ¼ Hz.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine höhere Frequenz, die gleichbedeutend mit einem geringeren Pressrahmenabstand bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit oder aber einem erhöh-

ten Vorschub bei gleich bleibenden Rahmenabstand ist, zu einer Querkzugfestigkeitserniedrigung bei hohen Rohdichten und einer Schwingung über die gesamte Presszeit führt.

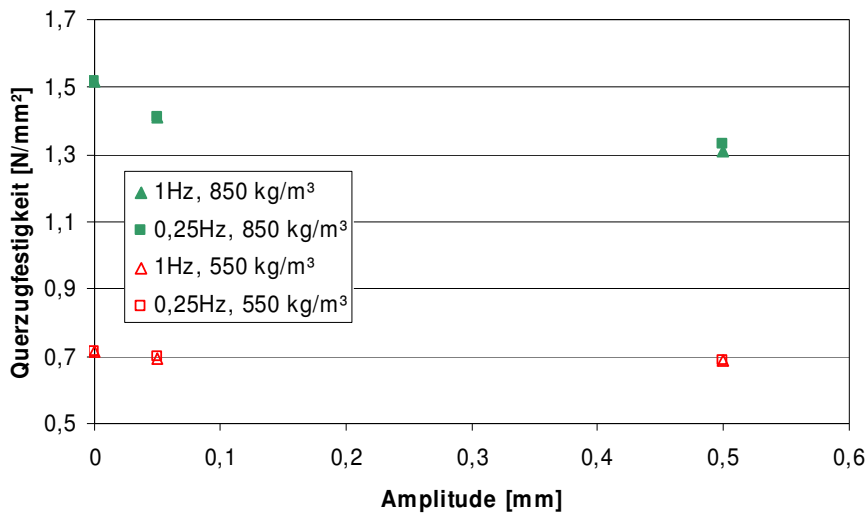


Abbildung 84: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 5: Schwingung "hinten", Rohdichte 550 kg/m³ und 850 kg/m³, Beileimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

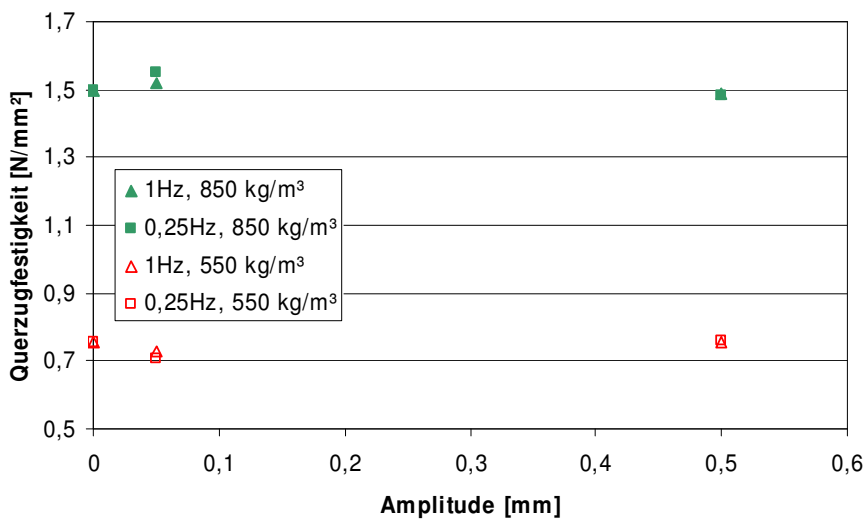


Abbildung 85: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 3: Schwingung "vorne", Rohdichte 550 kg/m³ und 850 kg/m³, Beileimungsgrad 10 %, Kauritec 405..

Die durchgeführten Versuche bezüglich der Auswirkung von Distanzschwingungen nur über einen Teilbereich der Presszeit auf die Querkzugfestigkeiten zeigten weiterhin, dass der größte Teil der Querkzugverluste im hinteren Pressenviertel (Abbildung 84) geschieht (sig-

nifikant für eine Rohdichte von 850 kg/m^3), wobei kein signifikanter Unterschied im Vergleich der Frequenzen bestand.

Eine Schwingung über die gesamte Presszeit (Pressprogramm 2) führte jedoch zu einer stärkeren Abnahme der Festigkeiten gegenüber der Referenzwerte (Pressprogramm 1). Eine Schwingung im vorderen Bereich (Abbildung 85) und im mittleren Bereich (Abbildung 86) zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Querkzugfestigkeitsentwicklung, sowohl beim Einflussfaktor Amplitude als auch Frequenz.

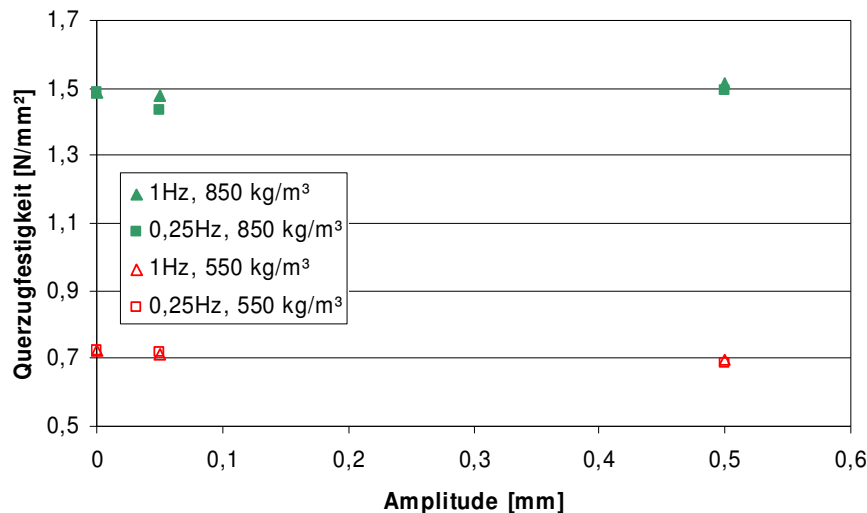


Abbildung 86: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 4: Schwingung "mittig", Rohdichte 550 kg/m^3 und 850 kg/m^3 , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Der Einfluss der gesamten Schwingung ist damit größer als die Summe der Einzelschwingungen. Bei dieser Versuchsdurchführung ist jedoch zu beachten, dass die Schwingungen vorne und mittig im Gegensatz zu der Schwingung komplett und hinten eine störungsfreie, d.h. schwingungsfreie Restpresszeit aufweist, die zu einer Verbesserung der Querkzugfestigkeiten führen könnte. Insgesamt betrachtet stellen sich die Einflüsse von Amplitude und Frequenz auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit bei einer Rohdichte von 850 kg/m^3 absolut stärker dar, was sich auf den hier erforderlichen höheren Pressdruck beim Heißpressprozess zurückzuführen scheint. Relativ zeigt sich bei beiden Rohdichten ein Unterschied von 5 % bei den Querkzugfestigkeiten aufgrund des Einflusses der Frequenz. Vergleichend mit den Einflüssen der Amplitude, fällt der Einfluss der Frequenz hingegen geringer aus und scheint zumindest für geringe Plattenrohddichten (hier 550 kg/m^3) vernachlässigbar als Einfluss auf die Querkzugfestigkeit.

Die Zusammenfassung der statistischen Auswertung findet sich in Tabelle 14. Dargestellt sind die Unterschiedsbestimmung der Querkzugfestigkeitswerte für die maximale und minimale Amplitude (Gesamttrend), Referenzwert und Amplitude 0,05 mm (Anlauf) sowie die Frequenz. Hierbei bedeutet $+_x$, die Annahme der Hypothese und $-_x$, die Ablehnung. Die

Indizes x bestimmen den Unterschied u_{minmax} , u_{Ref} und u_{F} . Die Werte für die Schwingung im vorderen und mittleren Bereich sind nicht aufgeführt, da hier sämtliche Unterschiede nicht signifikant waren.

Tabelle 24: Statistische Auswertung der Hauptversuche. Schwingung "komplett" und "hinten" bezogen auf die Querkzugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimale und maximale Amplitude; u, Ref = Unterschied Referenz- und maximaler Wert, u, F = Unterschied Frequenz.

Bereich	Frequenz [Hz]	Rohdichte [kg/m ³]				
		550		850		
		1 Hz	¼ Hz	1 Hz	¼ Hz	
komplett	Amplitude [mm]	0,05	+ u, mm	+ u, mm	+ u, mm	+ u, mm
			- u, Ref	- u, Ref	+ u, Ref	- u, Ref
		0,5	+ u_{F}		+ u_{F}	
			+ u_{F}		+ u_{F}	
hinten	Amplitude [mm]	0,05	- u, mm	- u, mm	+ u, mm	+ u, mm
			- u, Ref	- u, Ref	- u, Ref	+ u, Ref
		0,5	- u, F		- u, F	
			- u, F		- u, F	

Die Betrachtung des Einflusses des Beleimungsgrades auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit bei Schwingungen zeigt keine Unterschiede (Abbildung 87). Dieser Effekt zeigte sich ebenfalls bei der Untersuchung des Nachverdichtungszeitpunktes auf die Querkzugfestigkeit (vgl. Abschnitt 6.2.1.2). Auch hier hatte der Beleimungsgrad keinen Einfluss auf die Auswirkungen der Druckänderungen auf die Querkzugfestigkeiten aufgrund einer Nachverdichtung. Um die Darstellung des Vergleichs zu vereinfachen wurde in der Abbildung ein linearer Trend eingezeichnet, obwohl nach den vorherigen Auswertungen davon ausgegangen werden kann, dass sich die Entwicklung der Querkzugfestigkeit über die Höhe der Amplitude nicht linear vollzieht.

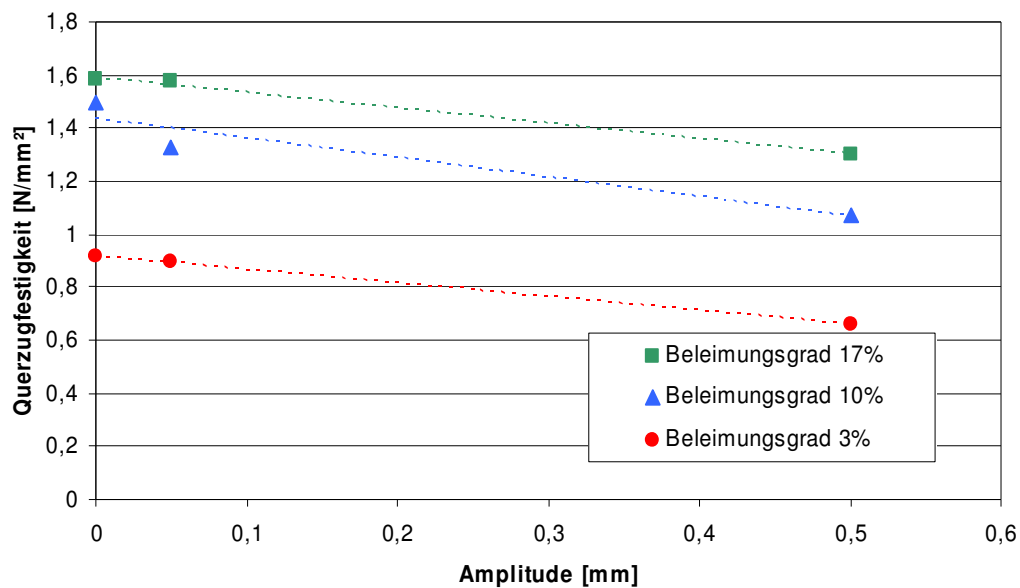


Abbildung 87: Einfluss der Amplitude auf die Querzugfestigkeit einer Faserplatte bei unterschiedlichen Beleimungsgraden: 3 %, 10 % und 17 % Kauritec 405. Programm 2: Schwingung "komplett", Rohdichte: 850 kg/m³, Frequenz: 1 Hz.

Die bisher dargelegten Ergebnisse lassen keinen Schluss darüber zu, ob die Abnahme der Querzugfestigkeit z.B. einem linearen oder polynomischen Trend folgt, da die Bestimmung eines Trends anhand von nur drei Werten fragwürdige Ergebnisse liefert. Aus diesem Grund wurde in einem zusätzlichen Versuch die Anzahl der gemessenen Amplituden auf sieben erhöht. Der Verlauf in Abbildung 88 weist keinen linearen Trend auf. Vielmehr scheint es, dass es bis zu einer gewissen Grenzamplitude keinen bedeutenden Querzugfestigkeitsverlust gibt. Erst im Anschluss daran kommt es zu verstärkten Einflüssen der Amplitude. Ein Problem bei der Auswertung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Matte bei höheren Amplituden verbunden mit höheren Presstemperaturen der Auslenkung der Pressplatten nicht mehr komplett folgte, was auf den fortschreitenden Härtegrad der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zurückzuführen ist. Matte und Pressplatte wiesen demzufolge einen Spalt auf, wodurch es zu einem Druck freien Bereich kam. Daraus würde eine stärkere Verringerung der Querzugfestigkeiten bei höheren Amplituden folgern, als sie in den Abbildungen dargestellt ist. Der Effekt wird im folgenden Abschnitt 7.5.1.3 Mattendrucke weiter verfolgt. Bedenkt man, dass die Matte höhere, in Abbildung 88 nicht mehr dargestellte Amplituden, nicht mehr aufnimmt, so erscheint ein minimaler Grenzwert der Querzugfestigkeit wahrscheinlich. Der für eine bessere Darstellung angenommene Trendverlauf würde sich somit bei höheren Amplituden asymptotisch einem Querzugfestigkeitsgrenzwert annähern. Es zeigt sich weiterhin, dass im Rahmen des durchgeführten Versuchsablaufs eine Querzugfestigkeitsabnahme erst ab einer Amplitude von 0,3 mm einsetzt.

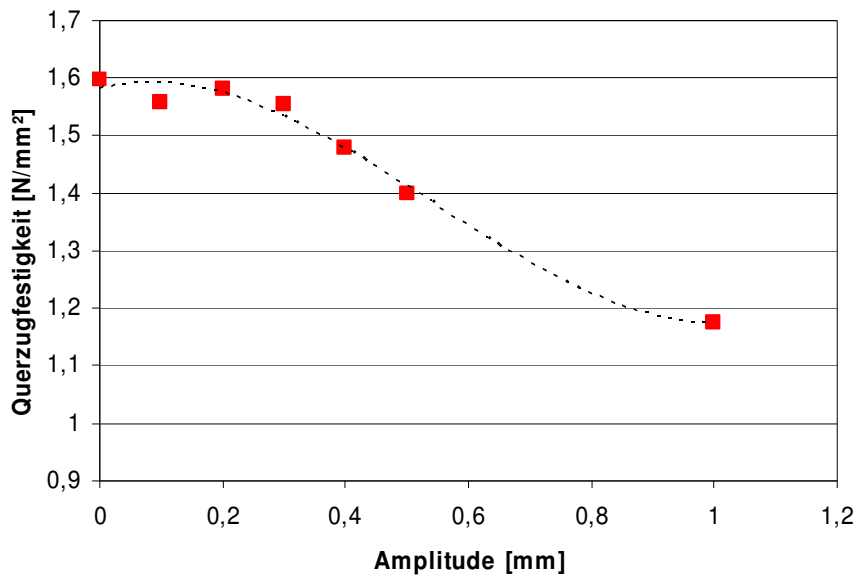


Abbildung 88: Einfluss der Amplitude auf die Querzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 2: Schwingung "komplett", 1 Hz, 850 kg/m³, Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Anhand der Distanzschwingung bei einer Rohdichte von 850 kg/m³ und einer Frequenz von 1 Hz (Abbildung 88) kann eine Aussage über den Einfluss auf die Platteneigenschaften der in der Industrie gemessenen Schwingungswerte getroffen werden, wenn davon ausgegangen wird, dass sich eine prozentual gleiche Schwingung bei unterschiedlichen Plattendicken auf den Verlauf der Querzugfestigkeit gleich auswirkt.

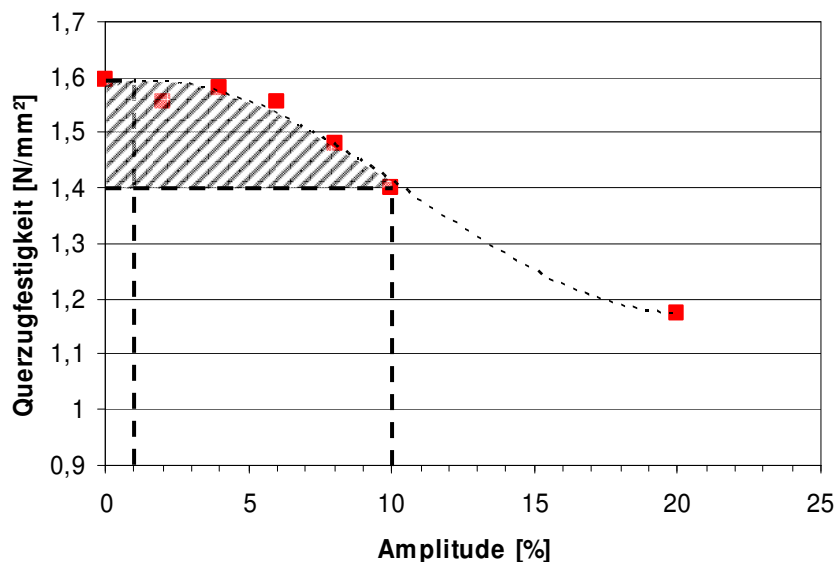


Abbildung 89: Einfluss einer Amplitude von 0,2 mm auf die Querzugfestigkeit von Faserplatten, Dicke von 20 mm (1 % Amplitude) und 2 mm (10 % Amplitude), Pressprogramm 2: Schwingung "komplett".

Abbildung 89 zeigt den prozentualen Einfluss einer 0,2 mm (Durchschnittswert, der in der Industrie gemessenen Schwankungen) starken Schwingung für die in der Industrie gemessenen Plattenstärken von 19-20 mm sowie für eine theoretische 2 mm Dünnpalte. Die Quersugfestigkeitsverringung ist für den Fall der 19-20 mm Platten nicht nachweisbar und liegt für die 2 mm Dünnpalte bei 13 %. Bei einer Schwingung von 0,4 mm ergäbe sich bereits eine Quersugfestigkeitsverringung von 25 %. Hieraus lässt sich erkennen, dass die Auswirkungen der Distanz oder Druckschwankungen nicht im Hinblick auf dicke Platten relevant sind. Dieses Problem kommt insbesondere bei dünneren Platten zum Tragen kommen, obwohl auch hier die Frage gestellt werden kann, inwieweit die Schwingungen innerhalb der Matte mit fortschreitender Aushärtung aufgenommen werden, wie Abschnitt 7.5.1.3 weiter diskutiert wird.

7.5.1.2 Temperaturverlauf

Die in Abbildung 90 und Abbildung 91 dargestellten Temperaturverläufe zeigen, dass innerhalb der Ipates die Schwingungen zu einem verspäteten Temperaturanlauf in der Mittelschicht führen. Je höher die Amplitude und je niedriger die Frequenz desto später wird die 100°C-Linie überschritten. Dieser Effekt zeigt sich bei einer Rohdichte von 850 kg/m³ deutlicher als bei einer Rohdichte von 550 kg/m³.

Der Temperaturverlauf unterstützt die Entwicklung der Quersugfestigkeit bezüglich des Einflussfaktors der Frequenzen. Bei einer Rohdichte von 550 kg/m³ sind im Gegensatz zu der Rohdichte von 850 kg/m³ keine Auswirkungen der Frequenz auf den Temperaturverlauf zu erkennen. Bei einer Rohdichte von 850 kg/m³ wird die 100°C-Linie bei einer Frequenz von 1 Hz früher erreicht als bei einer Frequenz von ¼ Hz, was wiederum gleichbedeutend ist mit einem höheren Aushärtungsgrad der Matte unter dem Einfluss der Schwingung und zu den dargestellten Quersugfestigkeitsunterschieden führen könnte.

Anders stellt sich die Entwicklung der Temperatur bei unterschiedlichen Amplituden von 0,05 mm und 0,5 mm dar. Obwohl die höhere Amplitude zu einer Verringerung der Quersugfestigkeiten führte, ist hier der Temperaturanlauf und damit das Erreichen der 100°C-Linie später als bei kleineren Amplituden. Für den Fall der Amplituden ist der Temperaturverlauf somit nicht ausreichend als Begründung für den Quersugfestigkeitsverlauf.

Die oben aufgeführten Ergebnisse stimmen nicht mit den im Rahmen des AiF-Projektes (Thoemen und Tobisch 2005) erzielten Temperaturmessungen bei Schwingungsversuchen überein. Die Ergebnisse wurden an einer herkömmlichen Laborpresse bei einer 17,5 mm Platte, mit einer Zielrohichte von 750 kg/m³, einer beleimten Feuchte von 8 %, einer Presstemperatur von 220°C und einem Presszeitfaktor von 15 s/mm erzielt. Die Schwankung betrug im Mittel 0,4 mm bei einer Frequenz von 1/3 Hz. Eine Erklärung hierfür kann der Aufbau der Ipates mit dem abgeschlossenen Presszylinder sein. Hierbei ist ein höherer Gasdruck aufgrund einer durch eine geringere Permeabilität verursachten verringerten Ausdampfung zu erwarten. Die thermodynamischen Verhältnisse hätten damit eine verlangsamte Tem-

peraturerhöhung mit einem höheren Temperaturplateau (erhöhte Sattdampf­temperatur aufgrund höherem absolut Druck) zu Folge.

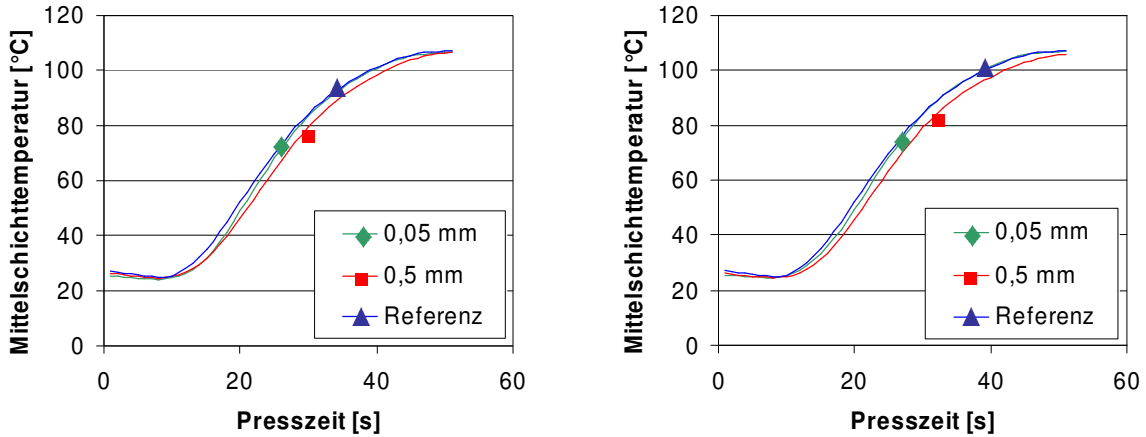


Abbildung 90: Mittelschichttemperaturverlauf einer Faserprobe mit 550 kg/m³, einer Frequenz von 1 Hz (links) und 1/4 Hz (rechts) und unterschiedlichen Amplituden von 0,05 mm und 0,5 mm. Beleuchtungsgrad 10 %, Kauritec 405.

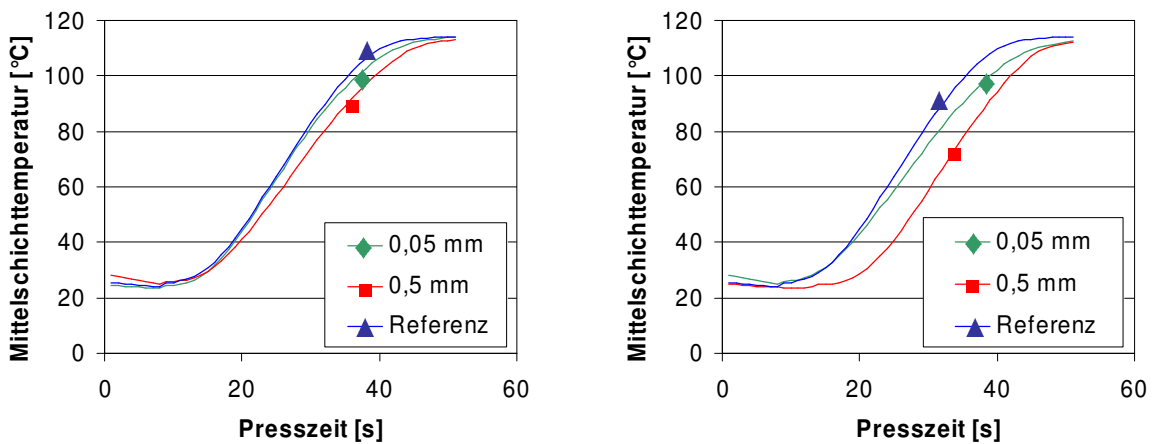


Abbildung 91: Mittelschichttemperaturverlauf einer Faserprobe mit 850 kg/m³, einer Frequenz von 1 Hz (links) und 1/4 Hz (rechts) und unterschiedlichen Amplituden von 0,05 mm und 0,5 mm. Beleuchtungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Des Weiteren ist aus den Labortemperaturmessungen zu erkennen, dass sich der Temperaturverlauf von den in den industriellen Versuchen bestimmten unterscheidet. Die 100°C wurden in den Laborversuchen eher erreicht. Der Aushärtungsgrad der Industrie- und Laborversuche unterschied sich somit und führte dazu, dass innerhalb der Laborversuche die zu verpressende Matte die Schwingungen gerade bei höheren Amplituden nicht mehr vollständig

aufnehmen konnte, was wiederum zu einer Verringerung des Einflusses auf die Querkzugfestigkeiten führte.

7.5.1.3 Mattengegendruck

Mithilfe des Verlaufs des Mattengegendruckes bzw. des Pressdruckes soll eine Aussage über dessen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit erfolgen. Der Verlauf der Mattengegendrücke spiegelt eindeutig die unterschiedlichen Zeitpunkte der Schwingung wieder. Die beiden unterschiedlichen Frequenzen von 1 Hz und $\frac{1}{4}$ Hz zeigten keinen Unterschied innerhalb des Pressdruckverlaufs. Eine höhere Rohdichte führt zu einem höheren Druckniveau und zu höheren Druckschwankungen über die Presszeit (Abbildung 92).

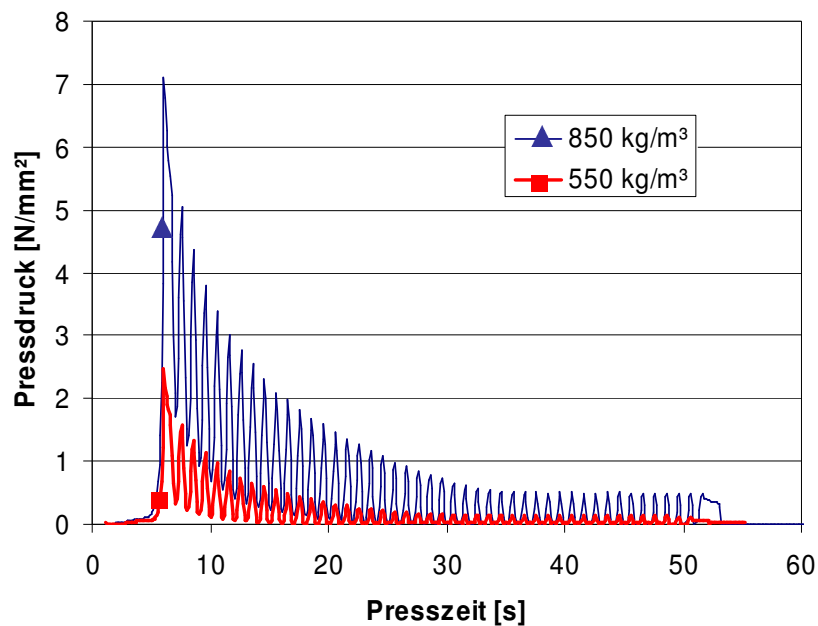


Abbildung 92: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs bei Rohdichten von 550 kg/m^3 und 850 kg/m^3 . Amplitude 0,5 mm, Beileimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Die Entwicklung des Mattengegendruckes bei unterschiedlichen Amplituden ist in Abbildung 93 dargestellt. Die Höhe der Druckschwankungen erhöht sich im vorderen Pressbereich stetig von niedrigen zu hohen Amplituden. Die Höhe der Druckschwankungen im hinteren Pressabschnitt erhöht sich jedoch nur bis zu einer Amplitude von 0,4 mm. Danach zeigen sich annähernd die gleichen Werte obwohl die entsprechende Querkzugfestigkeit weiterhin abfällt. Der Verlauf lässt mutmaßen, dass die Rückfederung bzw. rheologischen Eigenschaften des aushärtenden Probenkörpers nur bis zu einem gewissen Presszeitpunkt ausreichend sind, um der aufgetragenen Amplitude zu folgen. Mit zunehmendem Aushärtungsgrad verliert die Matte immer mehr ihr elastisches Verhalten, wird steifer, so dass sich die Pressplatte und die Oberfläche der Probe beim Öffnen jeder Schwingung trennen, so dass kein Kontakt mehr vorliegt. Diese Darlegung würde den sich kaum mehr ändernden Pressdruckverlauf nach einer Amplitude von 0,4 mm erklären. Interessanter Weise folgert hieraus, dass sich die niedrigeren

Querzugfestigkeiten bei Amplituden größer als 0,4 mm nicht durch eine Beeinträchtigung der Klebfestigkeit der Mittelschicht im hinteren Presszeitabschnitt aufgrund von Druckschwankungen erklären lassen.

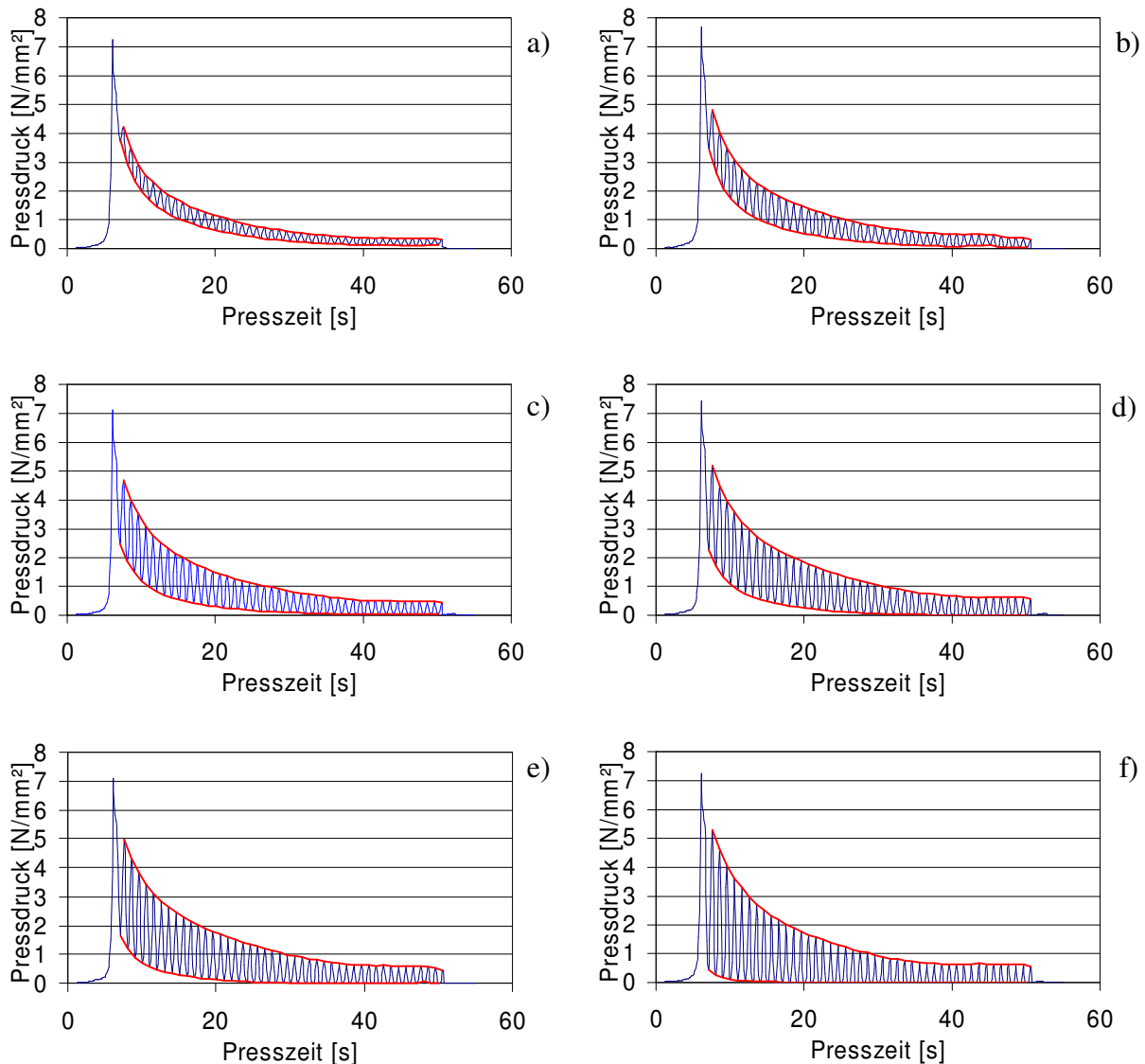


Abbildung 93: Vergleich des Mattengegendruckes von MDF mit einer Rohdichte von 850 kg/m^3 und einer Schwingung von a): 0,1 mm, b): 0,2 mm, c): 0,3 mm, d): 0,4 mm, e): 0,5 mm, f): 1 mm, Frequenz: 1Hz. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Da der genaue Zeitpunkt der Trennung von Pressplatte und Probe aufgrund des abgeschlossenen Presszylinders nicht bestimmt werden konnte, ist theoretisch bei vernachlässigbarem Druckeinfluss im hinteren Bereich die Distanzänderung bzw. Schwingungshöhe als möglicher Einfluss zu nennen. Die Beeinträchtigung der inneren Festigkeit muss, bei einem angenommenen hauptsächlich Einflussfaktor der Druckänderung und des Druckniveaus, im vorderen bzw. mittleren Bereich des Presszyklusses erfolgt sein. Die Mattengegendruckver-

läufe weisen gerade zum Pressbeginn unterschiede in den Höhen der Druckschwankungen und des Druckniveaus auf. Die Trennung der Pressplatten und der Probe während des Heißpressprozesses bei höheren Schwingungen lässt darauf schließen, dass die zugeordneten Querkzugfestigkeiten real niedriger sein müssten als im Rahmen dieser Versuche dargestellt.

Der Einfluss eines unterschiedlichen Beileimungsgrades auf den Mattengegendruckverlauf ist in der folgenden Abbildung 94 ersichtlich. Die erforderlichen Drücke zur Verdichtung der Matte sind bei einem Beileimungsgrad von 17 % niedriger als bei 3 %, wobei die resultierenden Festigkeiten fast doppelt so hoch sind. Aufgrund des höheren Klebstoffanteils ist eine geringere Einwaage an Fasermaterial bei gleicher Zielrohddichte nötig, wodurch sich der geringere Verdichtungswiderstand der höher beileimten Matte erklärt. Die Aushärtung und damit die Querkzugfestigkeitszunahme über die Presszeit der Faserprobe stellt sich somit nicht im Mattengegendruckverlauf dar. Es zeigt sich jedoch auch, dass die niedrigeren resultierenden Druckschwankungen bei einer Beileimung von 17 % die Ausbildung von höheren Querkzugfestigkeiten begünstigen, da sich die Querkzugfestigkeitsunterschiede der beiden Beileimungsgrade nicht erst durch die an den Pressvorgang anschließenden Konditionierungsvorgang ausbilden können.

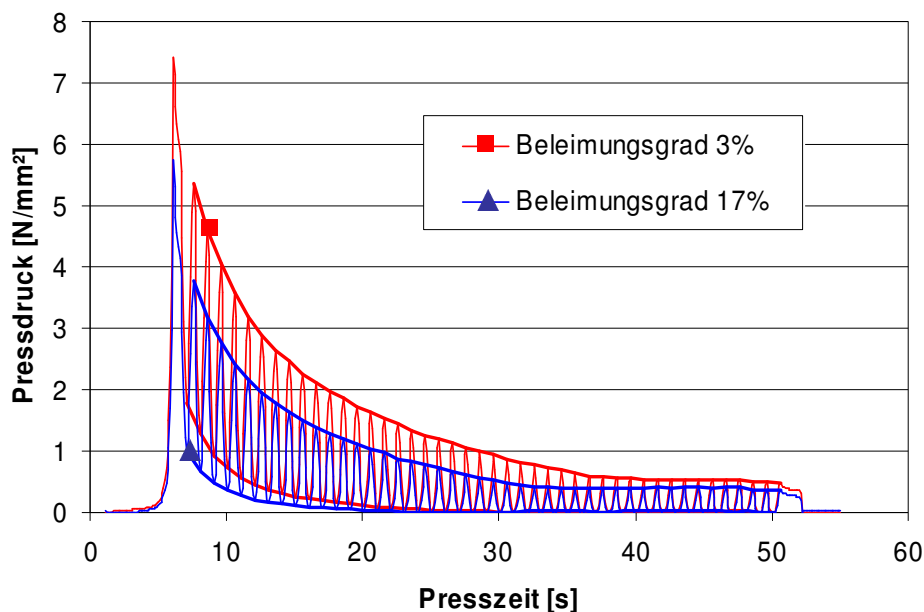


Abbildung 94: Vergleich des Mattengegendruckes von MDF mit einer Rohddichte von 850 kg/m³ und Beileimungsgraden von 3 % und 17 %, Kauritec 405.

Die bisher gemachten Auswertungen geben keine vollständige Erklärung für die Entwicklung der Querkzugfestigkeiten, da die Druckschwankungen bzw. das Druckniveau nicht das gesamte Verhalten einer aushärtenden Matte unter einer aufgetragenen Schwingung erklären. Der Verlauf der Temperatur in der Mittelschicht während des Heißpressprozesses kann

ein weiterer Indikator für die Querkzugfestigkeitsentwicklung sein und soll im Folgenden untersucht werden.

7.6 Schlussfolgerung

Die Messungen an kontinuierlichen Heißpressen im industriellen Herstellungsprozess zeigten Schwingungen der Distanz, des spezifischen Druckes und des Gasdruckes, die durch elastische Verformungen der Heizplatten zwischen den Pressrahmen zustande kamen. Die Ausprägung dieser Schwingungen hing wesentlich vom Rahmenabstand ab und variierte deshalb in Abhängigkeit von Presszone und Pressentyp. Die stärksten Schwingungen traten in der Regel in der Kalibrierzone auf; der Pressentyp mit dem größten Rahmenabstand zeigte die stärksten Schwingungen.

Die gemessenen, durch die Rahmenbauweise der Presse begründeten Schwingungen der Mattendicke fielen, bezogen auf die Zieldicke der betrachteten MDF-Platten von 19-20 mm, vernachlässigbar aus. Vergleicht man die in der Industrie gemessenen Schwingungen mit denen aus den Ergebnissen der Untersuchungen zum Einfluss derartiger Schwingungen auf die Querkzugfestigkeit, so ließ sich feststellen, dass von Schwingungen in dieser Größenordnung kein nennenswerter negativer Einfluss auf die Plattenfestigkeiten zu erwarten war. Bei der Herstellung von Dünnpplatten würden die Drücke, die über die Pressrahmen auf die Matte wirken, zu geringeren Distanzänderungen aber zu stärkeren Druckänderungen führen. Schwingungen, wie sie in den hier beschriebenen Industriemessungen bestimmt wurden, sollten aufgrund dieser Druckänderungen entsprechende Auswirkungen auf die Platteneigenschaften bewirken.

Die Ergebnisse im Rahmen der Laborversuche lassen weiterhin vermuten, dass durch die bei Dünnpplatten wesentlich schnellere Produktionsgeschwindigkeit und damit erhöhte Frequenz, negative Auswirkungen auf die Ausbildung der Platteneigenschaften zu erwarten sind. Zusätzlich nähme bei höher verdichteten Dünnpplatten ($>900 \text{ kg/m}^3$) mit einem insgesamt höheren spezifischen Druckniveau während des Heißpressprozesses, die Amplitude der Schwingungen zu, wie sich durch den elasto-mechanischen Ansatz (vgl. Gleichung 13) ersehen lässt. Die hier gemachten Aussagen werden weiterhin dadurch bestärkt, dass die in den Laborversuchen aufgebrachten Pressdrücke deutlich unter denen lagen, die in der Industrie gemessen wurden. Der Grund liegt in der Wahl des Pressprogrammes, bei dem während der Laboruntersuchungen keine Entgasungs- und Kalibrierphase verwendet wurde, wodurch die Pressdrücke besonders im Kalibrierbereich niedriger als in der Industrie ausfielen. Bedenkt man den Einfluss von Druckänderungen speziell in dieser Kalibrierzone, so beeinflusst dies die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Des Weiteren zeigte sich der Temperaturverlauf unterschiedlich, indem die 100°C in der Mittelschicht früher während des Pressprozesses erreicht wurden. Jedoch wurden auch nicht die individuell abgestimmten, hochreaktiven, industriellen Klebstoffsysteme verwendet, wodurch von einem anderen Ablauf der Klebstoffaushärtung während der Laborversuche auszugehen ist. Allerdings lagen die Querkzugfestigkeiten über

denen aus der Industrie, was auf einen höheren Aushärtegrad der Platte auch direkt nach dem Pressen schließen lässt. Die hier gemachten Aussagen lassen die Schwierigkeit erkennen, die Industrieergebnisse mit denen der Laborversuche direkt zu vergleichen und zu einer Abschätzung und Relativierung zu kommen. Eine Überprüfung der durch die Laborversuche gewonnenen Ergebnisse und gemachten Aussagen hinsichtlich des starken Einflusses von Schwankungen während der industriellen Produktion von dünnen oder dünnsten Holzwerkstoffen lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht durchführen, da Messungen unterhalb von 6-8 mm Plattenstärke zurzeit nicht möglich sind. Des Weiteren lässt sich das in den Laborversuchen angewandte Referenzprogramm ohne Schwankungen an einer kontinuierlichen Heißpresse nicht nachstellen.

Die resultierenden Auswirkungen auf die Ausbildung der Platteneigenschaften und hier insbesondere der Querkzugfestigkeit stellt sich als Superposition des Einflusses des Pressprogrammes und der Rahmenkonstruktion dar. Eine Überprüfung der Auswirkungen der kombinierten Faktoren fand während der Laborversuche nicht statt, sollte aber für eine präzisere Aussage durchgeführt werden. Weiterhin sollte der Einfluss von Druck- und Distanzschwankungen bei unterschiedlichen Plattendicken nachgestellt werden, so dass eine Übertragung der Ergebnisse von im Rahmen dieser Arbeit in Laborversuchen untersuchten 5mm Platten auf andere Plattenstärken hinfällig wäre. Zusätzlich müsste der Einfluss der Druckänderungen in der Art untersucht werden, dass mit einer Drucksteuerung der Laborpresse die Druckverhältnisse und -verläufe der Industrie nachgestellt würde.

Die Labormessungen bestätigten zudem, dass die Auswirkungen der Schwingungen in der Kalibrierzone einen stärkeren Effekt auf die Ausbildung der Querkzugfestigkeit hatten als in der Hochdruck und Niederdruckzone. Aus diesem Grund sollte darauf hingearbeitet werden, in dem Pressenabschnitt, in dem sich maßgeblich die Querkzugfestigkeit der Platte ausbildet, durch konstruktive Lösungen ein Schwingen der Distanz bzw. des spezifischen Druckes zu vermeiden. Die regelmäßigen Schwankungen ließen sich über einen kleineren Rahmenabstand oder eine dickere Heizplatte minimieren. Eine geänderte Aufteilung der Pressrahmen, wie sie bei Graf (2000) vorgeschlagen wird, erscheint ebenso sinnvoll, zumindest bei Presse Neubauten. Bei bestehenden Pressen, die bereits im Betrieb sind, sollte darauf hingearbeitet werden, die Pressdrücke insbesondere im Kalibrierbereich zu minimieren. Hierdurch ließen sich, nach Auswertung der Laborversuche, bei gleich bleibenden Prozessvariablen die Querkzugfestigkeitseigenschaften des herzustellenden Produktes verbessern oder aber bei einem gleich bleibenden Festigkeitsniveau Ressourcen in Form von Holz oder Klebstoff einsparen bzw. die Produktionsgeschwindigkeit erhöhen.

Deutlich größer als die regelmäßigen Schwingungen zwischen den einzelnen Pressrahmen fielen zudem die teilweise festzustellenden unregelmäßigen Druckmaxima aus, die sich im Pressenverlauf zeigten. Es sollte deshalb nicht nur eine Vermeidung der regelmäßigen Schwingungen sondern ebenso der unregelmäßigen Druckmaxima erfolgen. Die unregelmä-

ßigen Druckmaxima waren nicht allgemein erklärbar, sondern sind spezifisch für die einzelnen Presentypen und Bauarten.

Weiterhin lassen die dargestellten theoretischen Ansätze in Abschnitt 7.1 und hieraus abgeleitete Distanzänderungsberechnung in Abschnitt 7.3.1 vermuten, dass mit den Ergebnissen der Gasdruckmessungen eine überschlägigen Berechnung der verursachenden Distanzänderungen zu erstellen ist. Somit wäre es möglich mit bereits erfolgten Gasdruckmessungen an kontinuierlichen Heißpressen auf Distanzänderungen aufgrund der Rahmenkonstruktion zu schließen, auch wenn nicht zusätzlich mit dem hier in dieser Arbeit vorgestellten spezifischen Druck- und besonders Distanzsensor gemessen werden konnte.

Die bisher angestellten Laborversuche und deren Auswertung lassen noch keinen endgültige Aussage über die Mechanismen zu, die zu den beobachteten Quersugfestigkeitsverlusten aufgrund der Schwingungen führen. Die Faktoren Druckniveau, Druckschwingung und Mittelschichttemperatur wirken zusammen. Inwieweit sie jedoch die Holzpartikel-Klebstoffmatrix beeinflussen soll im nächsten Abschnitt genauer untersucht werden.

8 Analyse der Ursachen

8.1 Einfluss der Partikelgröße

8.1.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.3.1 zu entnehmen.

8.1.1.1 Nachverdichtung

Querzugfestigkeiten

In Abbildung 95 und Abbildung 96 ist der Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes bei variierendem Beileimungsgrad für die jeweilige gemeinsame Zielrohddichte dargestellt. Die Querzugfestigkeitsabnahmen sind für alle betrachteten Fälle signifikant. Der Beileimungsgrad hat jedoch keinen signifikanten Einfluss innerhalb der jeweiligen Rohddichte auf die Querzugfestigkeitsverringernung

Es zeigt sich weiterhin, dass der Einfluss des Beileimungsgrades ersichtlich wird, indem ein höherer Beileimungsgrad zu einer verstärkten Abnahme der Querzugfestigkeit führt.

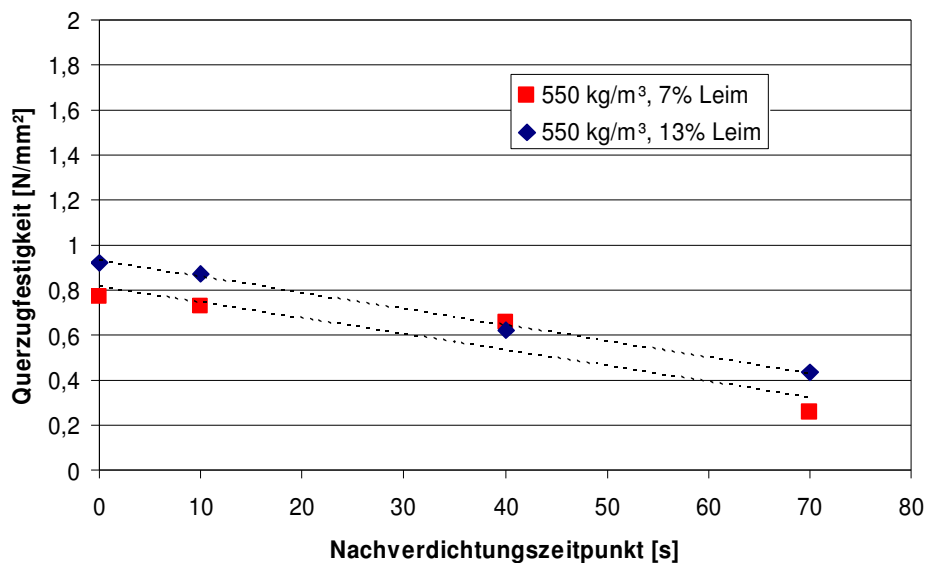


Abbildung 95: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Beileimungsgrade 7 % und 13 %, Kauritec 405, Rohddichte 550 kg/m³ (Rohddichte bereinigt).

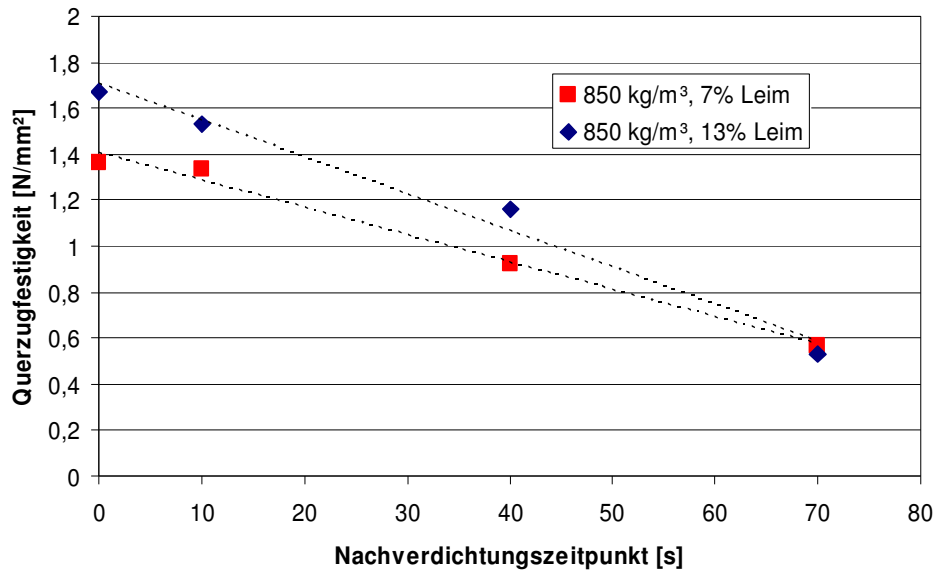


Abbildung 96: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Beleimungsgrade 7 % und 13 %, Kauritec 405, Rohdichte 850 kg/m³ (Rohdichte bereinigt).

In Abbildung 97 und Abbildung 98 ist der Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes bei variierender Rohdichte für den jeweiligen gemeinsamen Beleimungsgrad dargestellt. Es zeigt sich eine verstärkte Abnahme der Querzugfestigkeit mit höherer Rohdichte (und damit einhergehendem höheren Pressdruck) und höherem Beleimungsgrad.

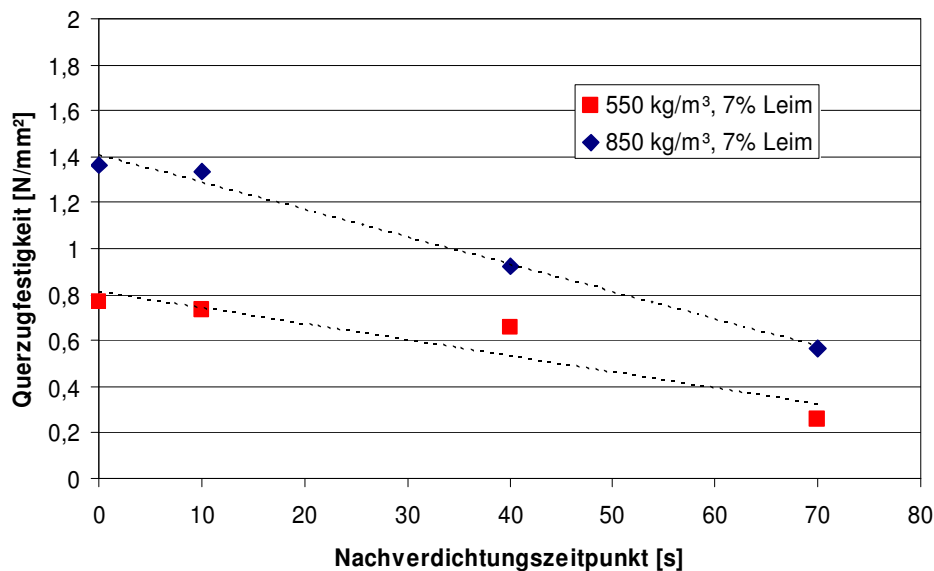


Abbildung 97: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Rohdichten 550 kg/m³ und 850 kg/m³, Beleimung 7 %, Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt).

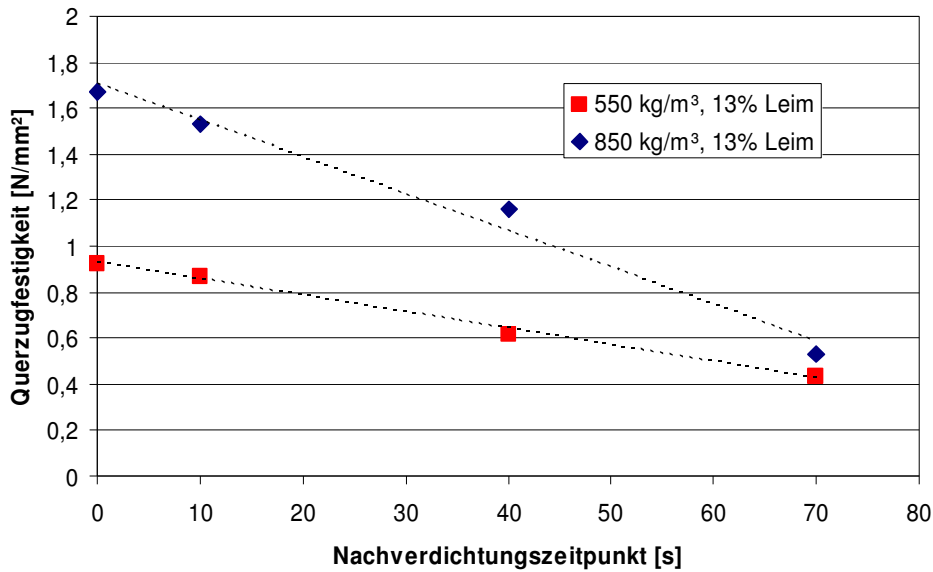


Abbildung 98: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Rohdichten 550 kg/m³ und 850 kg/m³, Beleimung 13 %, Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt).

Die Abbildungen zeigen im Gegensatz zu den vergleichbar durchgeführten MDF-Versuchen aus Abschnitt 6.2 einen Einfluss des Beleimungsgrades auf die Entwicklung der Querzugfestigkeit über den Nachverdichtungszeitpunkt bei hoher Rohdichte und hohem Beleimungsgrad. Der absolute Querzugverlust ist bei den Spanproben höher als bei den Faserproben, die sich zudem noch auf einem höheren Festigkeitsniveau befinden. Es lässt sich vermuten, dass die Ursachen für die Abnahme der Querzugfestigkeit mit späterem Nachverdichtungszeitpunkt für Span und MDF aufgrund ihrer Partikelgeometrie unterschiedlich sind. Bei der Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix scheint der beeinflussende Faktor bei den Faserproben eher der Holzpartikel, hingegen bei den Spänen der Klebstoff zu sein.

Die Zusammenfassung der statistischen Auswertung findet sich in Tabelle 25. Dargestellt sind die Unterschiedsbestimmungen der Querzugfestigkeitswerte für den maximalen und minimalen Nachverdichtungszeitpunkt, sowie die Steigung des Trends und die Unterscheidung der Steigungen. Hierbei bedeutet $+_x$, die Annahme der Hypothese und $-_x$, die Ablehnung. Die Indizes x bestimmen die Steigung des Trends t , den Unterschied der Steigungen u_s und den Unterschied u_{minmax} .

Tabelle 25: Statistische Auswertung der Span-Nachverdichtung bezogen auf die Querkzugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimaler und maximaler Nachverdichtungszeitpunkt; t = Steigung des Trends, s = Unterschied Steigung.

Beleimungsgrad [%]	Rohdichte [kg/m ³]					
	550		850		550/850	
	7	13	7	13	7	13
	+ _t	+ _t	+ _t	+ _t		
	+ _{u, mm}	+ _{u, m}	+ _{u, mm}	+ _{u, mm}		
		- _s		- _s	- _s	+ _s

Die statistische Überprüfung der gemachten Aussagen wurde zusätzlich mit einer Analyse der Geradensteigungen vorgenommen. Für die durchgeführte lineare Regression wurde eine Indikator-Variable für die zu untersuchenden Geradensteigungen eingeführt. Wich diese signifikant von Null ab, so waren die Geradensteigungen unterschiedlich.

Mattengegendrucke

Die Mattengegendruckverläufe in Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen den Vergleich zwischen Spanproben und den entsprechend hergestellten Faserproben. Die Druckverläufe der Spanproben weisen einen flacheren Verlauf über die Presszeit mit einer geringen Ab- und anschließenden Zunahme, aber auf einem höheren Druckniveau, auf. Aus diesem Verlauf lässt sich erkennen, dass die gleichen Prozessparameter bei der Verpressung von Spanproben im Vergleich zu Faserproben zu einer geringeren Plastifizierung der Partikel und zu einer verspäteten und damit niedrigeren Härtung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix führen. Der Scheitelpunkt der Ab- und Zunahme liegt bei den Spanproben 15 s hinter dem der Faserproben, womit der Härtevorgang der Span-Klebstoff-Matrix in der Mittelschicht später beginnt.

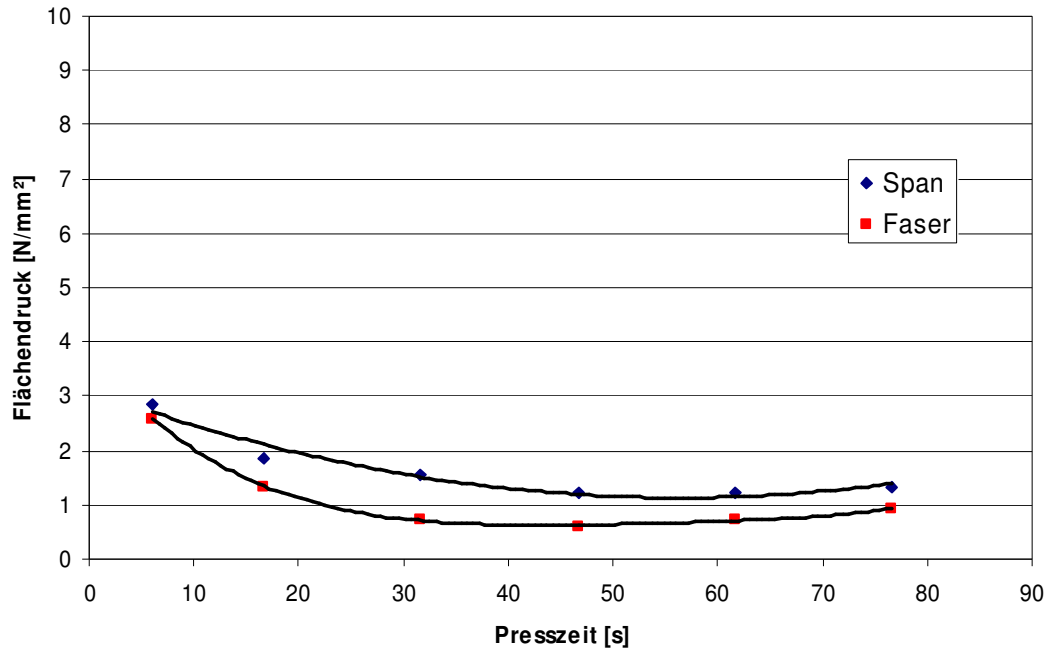


Abbildung 99: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 550 kg/m³, Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.

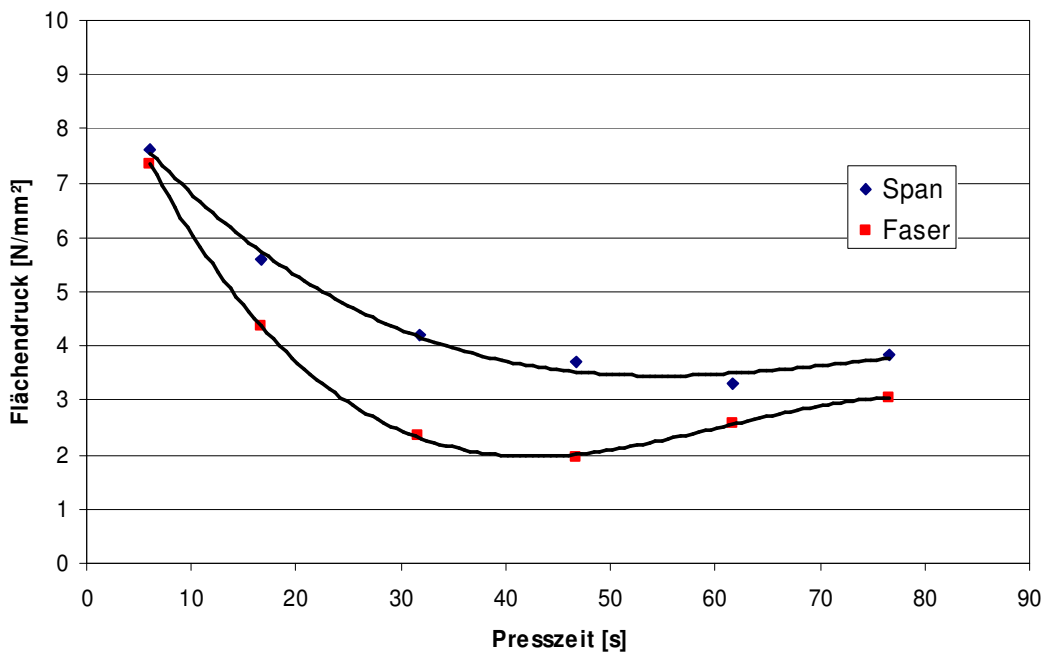


Abbildung 100: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 850 kg/m³, Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.

8.1.1.2 Schwingung

Querzugfestigkeiten

Die Abnahme der Querzugfestigkeit bei Faserproben mit steigender Amplitude stellt sich ebenfalls bei den Spanproben dar (Abbildung 101). Hierbei fällt die Abnahme bei 140°C Presstemperatur bei jeder untersuchten Amplitude höher aus als bei den vergleichbar hergestellten Faserproben.

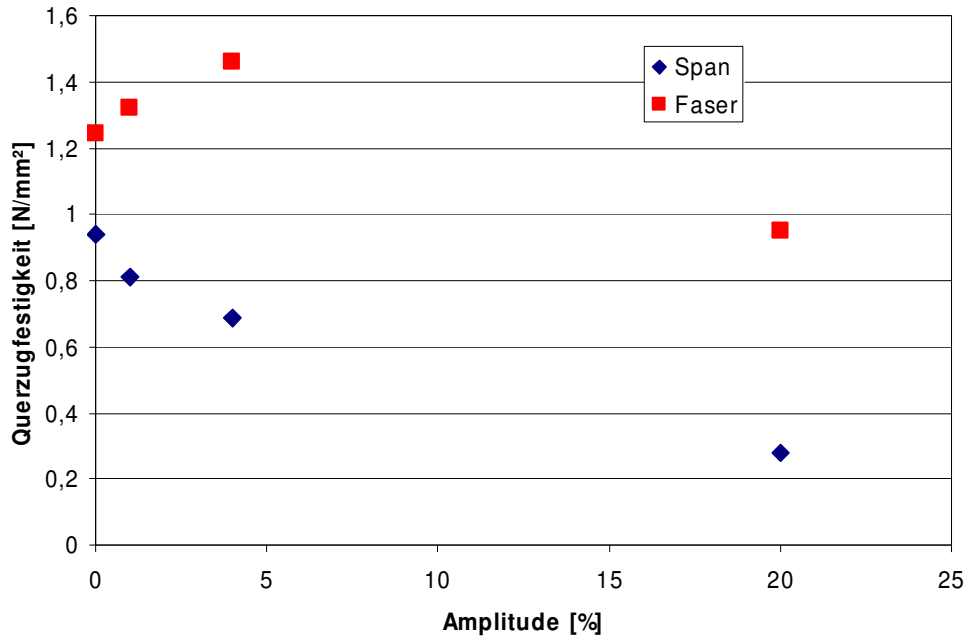


Abbildung 101: Vergleich des Querzugfestigkeitsverlaufs über Amplitudenhöhe von Span- und Faserproben (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405, Presstemperatur 140°C, Frequenz 1 Hz.

Der in Abbildung 102 dargestellte Verlauf der Querzugfestigkeit bei einer Presstemperatur von 180°C zeigt bis zu einer gemessenen Amplitude von 0,2 mm (4 %) nur eine relativ geringe Abnahme. Dieser Verlauf zeigte sich ebenfalls bei den Faserproben. Die Abnahme der Querzugfestigkeit bis zu einer Amplitude von 1 mm (20 %) fällt jedoch bei den Spanproben erheblich stärker aus als bei den zu vergleichenden Faserproben.

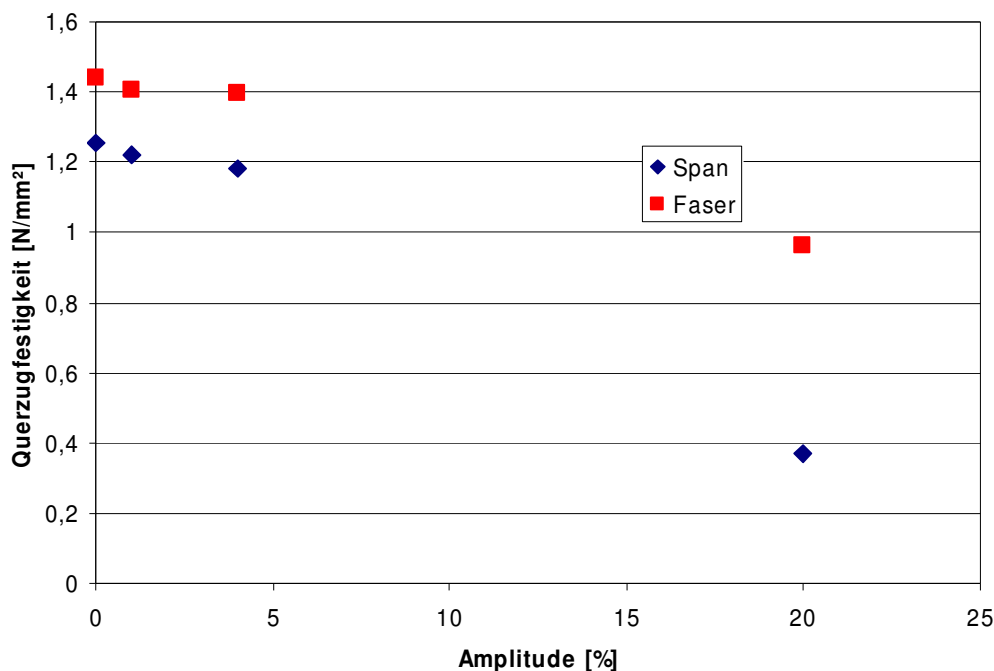


Abbildung 102: Vergleich des Querzugfestigkeitsverlaufs über Amplitudenhöhe von Span- und Faserproben (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405, Press-temperatur 180°C, Frequenzen 0,5 Hz.

Die bei den vorangegangenen Nachverdichtungsversuchen mittels des Mattengegendruckverlaufs aufgestellte Vermutung, dass die Spanplatte bei vergleichbaren Pressparametern später aushärtet, lässt den Schluss zu, dass es auch bei der Spanplatte zu keiner mechanischen Zerstörung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix kommt. Der Einfluss der Schwingung auf die Querzugfestigkeit ist bei Spanplatten größer, trotz vergleichbar späterer Aushärtung und damit einem geringeren Aushärtungsgrad während der Druckänderung. Die bereits erwähnte spätere Aushärtung der Spanproben im Vergleich zu den Faserproben lässt vermuten, dass die ohnehin schon stärkere Querzugfestigkeitsabnahme bei den Spanproben mit gleichem Aushärtungsgrad noch deutlicher ausfallen würde. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Beeinträchtigung der Klebfuge durch Druckänderungen zu einer stärkeren Verringerung der Querzugfestigkeit führt als eine Beschädigung der Fasern. Ob sich die Unterschiede der Querzugfestigkeitsabnahme über unterschiedliche Mattendrücke erklärt, kann nicht gesichert beantwortet werden.

Mattengegendrücke

Der Verlauf des Mattengegendruckes zeigt wie bereits bei den Nachverdichtungsversuchen ein höheres Druckniveau bei den Spanproben im Vergleich zu den Faserproben, woraus eine höhere Druckschwankung über die Presszeit resultiert (Abbildung 103). Dies gilt für alle variierten Pressparameter und wird hier nur exemplarisch dargestellt.

Des Weiteren zeigt sich aufgrund der langsameren Aushärtung der Spanproben, dass die aufgebrachten Amplituden von dem verpressten Spanmaterial länger elastisch aufgenommen werden als die vergleichbar hergestellten Faserproben (vgl. Abschnitt 7.5.1.3). Es besteht hier jedoch auch die Möglichkeit, dass innerhalb des betrachteten Zeitintervalls die Mattengegendruckabnahme aufgrund der einsetzenden Plastifizierung bei den Spänen höher ist, als die Mattengegendruckzunahme durch den steigenden Aushärtungsgrad der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix.

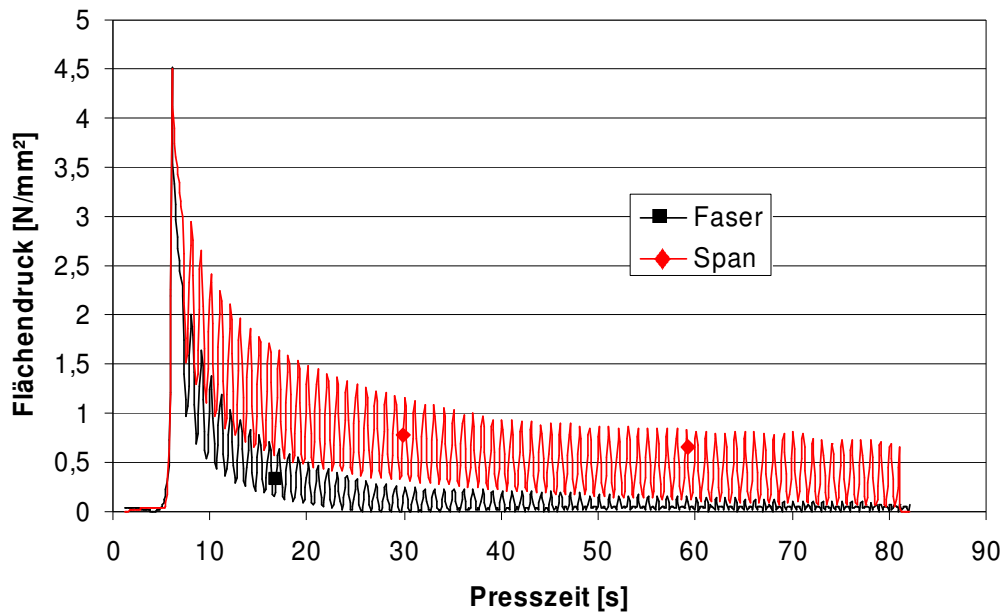


Abbildung 103: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben. Frequenz 1 Hz, Amplitude 0,2 mm.

8.2 ABES

8.2.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.3 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.3.2 zu entnehmen.

8.2.1.1 Temperatur

Um eine Aussage über den Aushärtungsgrad der Klebfuge treffen zu können, wurde die Temperatur in derselben mittels eines Thermodrahtes bestimmt. Die Temperaturverläufe für die unterschiedlichen Presstemperaturen sind aus Abbildung 104 ersichtlich.

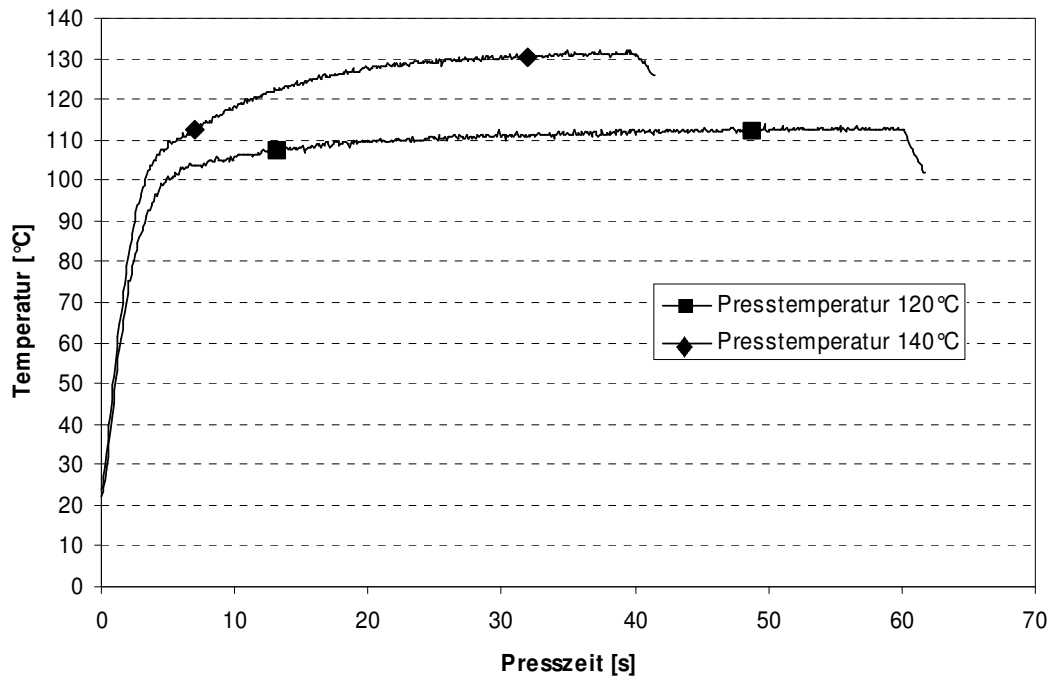


Abbildung 104: Temperaturverlauf in der Fuge zwischen zwei Furnierstreifen während des ABES-Tests..

Die Messungen zeigen einen Temperaturanstieg auf über 100°C innerhalb der ersten 5 Sekunden. Die erreichten Endtemperaturen liegen ca. 10°C unter den vorgegebenen Presstemperaturen.

8.2.1.2 Scherfestigkeit

Die Darstellung der Scherfestigkeitsentwicklung über den Nachverdichtungszeitpunkt bei 120°C (Abbildung 105) und 140°C (Abbildung 106) zeigen einen signifikant abnehmenden Charakter. Eine spätere Nachverdichtung führt hierbei zu einer Scherfestigkeitsabnahme. Die Aussagen bestätigen die Ergebnisse aus den Laborversuchen an MDF- (vgl. Abschnitt 6.2.1.2) und Spanproben (vgl. Abschnitt 8.1.1.1). Ein höherer Pressdruck weist zudem eine höhere Scherfestigkeit der Klebstoffuge der Referenzproben auf, die unter konstantem Druck über die Presszeit hergestellt wurden. Hieran zeigt sich der in der Literatur (z.B. Dunky und Niemz 2002) beschriebene Einfluss des Druckes auf die Fugendicke und die Benetzung der Furniere. Ein höherer Pressdruck führt bis zu einem Maximum zu höheren Festigkeiten. Dies erklärt sich über die Fugendicke, die einen idealen Zustand besitzt, sowie eine bessere Benetzung der Zellwände des Furniers unter Druck.

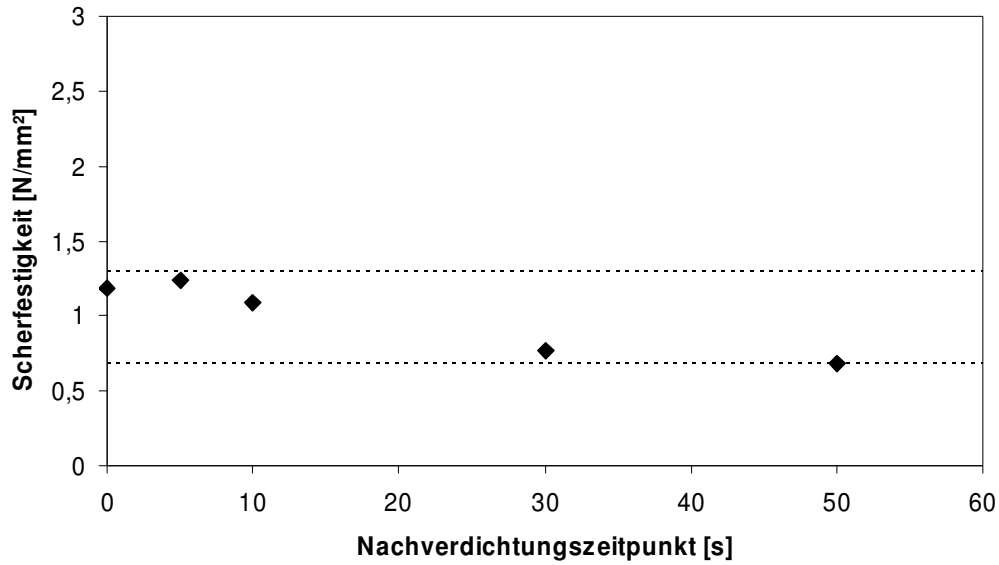


Abbildung 105: Einfluss einer Nachverdichtung von 1 bar auf 3 bar (Referenzwerte, gestrichelte Linien) auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 120°C, Kauritec 405.

Bei zunehmendem Aushärtungsgrad des Klebstoffes kommt es bei einer Druckerhöhung von 1 bar auf 3 bar zu einer Abnahme der Scherfestigkeit unter den Referenzwert von 1 bar. In Abbildung 106 zeigt sich dies bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 30 s.

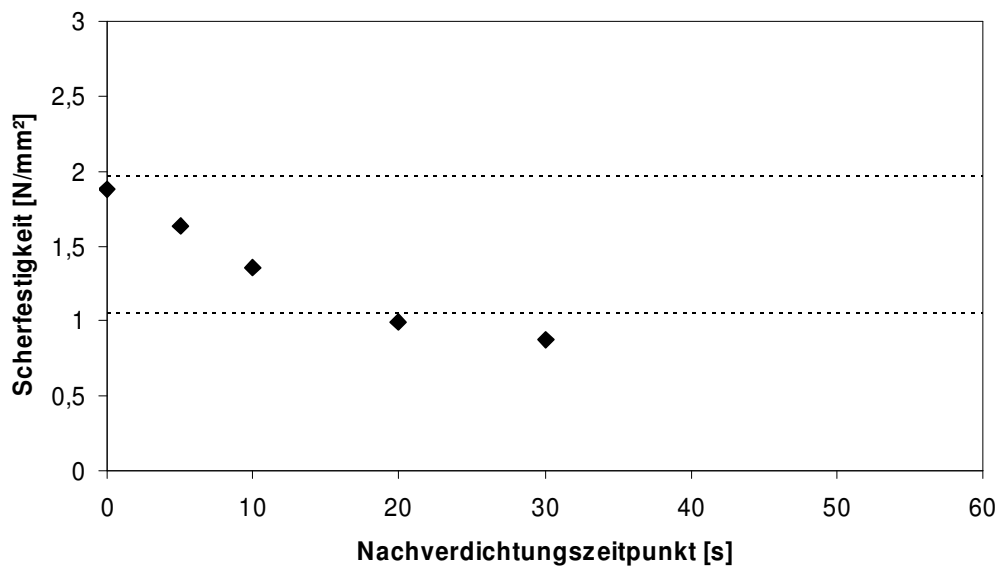


Abbildung 106: Einfluss einer Nachverdichtung von 1 bar auf 3 bar (Referenzwerte, gestrichelte Linien) auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 140°C, Kauritec 405.

Um den Einfluss der Restpresszeit nach der Verdichtung zu überprüfen, wie es bereits bei den MDF und Spanproben geschah, wurden für eine Presstemperatur von 140°C bezogen auf die Restpresszeit von 30 s bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 10 s die Nachverdichtungen bei 20 s und 30 s mit einer zusätzlichen Presszeit von 30 s beaufschlagt (Abbildung 107).

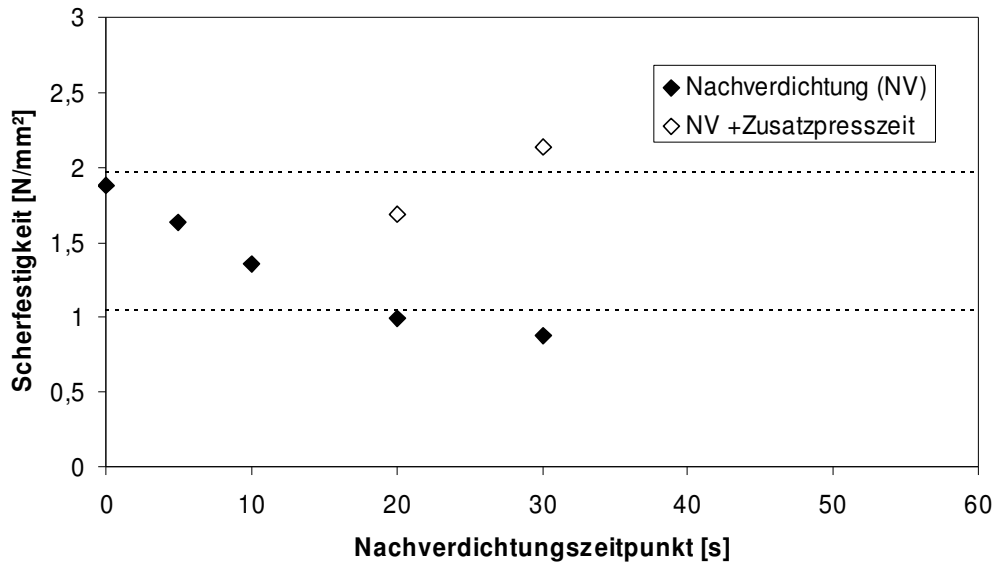


Abbildung 107: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 1 bar auf 3 (Referenzwerte, gestrichelte Linien) bar auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 140°C, Kauritec 405.

Die reine Klebfuge erfuhr durch die zusätzlich aufgebrachte Haltezeit eine signifikante Zunahme der Scherfestigkeit. Die durch die Druckänderung induzierte Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix ist durch eine längere Presszeit nicht nur reversibel, sie steigt sogar auf ein höheres Niveau. Und dies, obwohl aufgrund des gemessenen Temperaturverlaufs ein höherer Härtegrad des Klebstoffes vorlag. Bei vergleichbaren MDF-Proben (Abbildung 108) war dies bei einem Standard-Querzugtest nicht der Fall, jedoch bei Proben aus einem Mittelschichtspan (Abbildung 109).

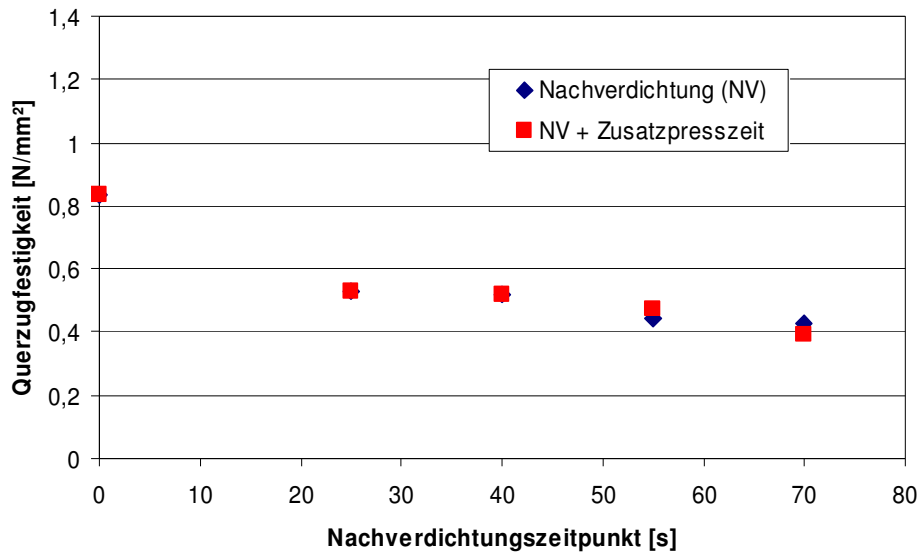


Abbildung 108: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Ipates MDF-Prüfkörpern. Rohdichte 550 kg/m³, Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.

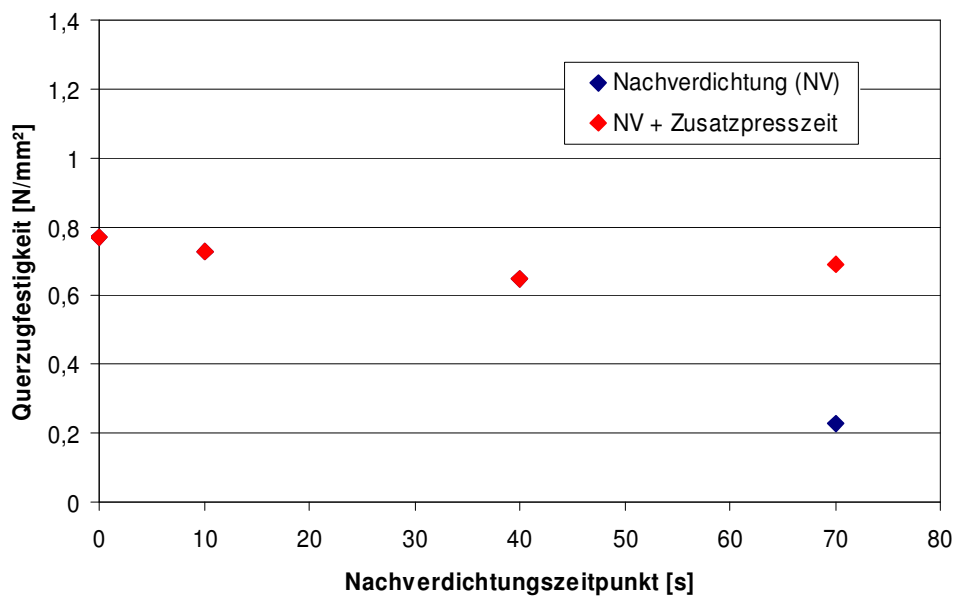


Abbildung 109: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Querzugfestigkeitsverlauf von Ipates Mittelschichtspan-Prüfkörpern. Rohdichte 550 kg/m³, Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.

Eine Erklärung hierfür kann eine mögliche Zerstörung der Zellwände bei MDF Proben sein, wohingegen Beeinflussungen der Klebfuge durch eine längere Presszeit ausgebessert werden können. Es handelt sich somit um eine Verhältnisverschiebung der Einflüsse Zellwanddefekt und Klebstoffdefekt. Dies muss jedoch nicht einen Bruch der Klebfuge bedeuten,

sondern kann auch das bereits erwähnte Wegschlagen (Verhungern) des Klebstoffes unter einem zu niedrigen Pressdruck als Ursache haben. Bei einem anschließenden Erhöhen des Druckes kann die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix nicht in der gleichen Zeit ein vergleichbares Festigkeitsniveau ausbilden. Eine zusätzliche Haltezeit liefert der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix anschließend die nötige Einwirkung der Wärme und des Drucks.

Ein Vergleich des Verlaufs der Probendicken (Abbildung 110 und Abbildung 111) unterstützt diese Hypothese. Sowohl für die Faser- als auch die Spanproben führt eine nachträgliche Haltezeit nach dem Nachverdichtungszeitpunkt zu einer weiteren Verfestigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix, die in einer Dickenverringerung gegenüber den Proben ohne zusätzlicher Haltezeit resultiert. Vergleicht man nun die Dickenverläufe mit den Querzugfestigkeitsverläufen, so zeigt sich, dass die mit der zusätzlichen Haltezeit einhergehende Verfestigung der Proben zu keiner Querzugfestigkeitszunahme der länger verpressten Faserproben führt (Abbildung 108). Bei den Spanproben lässt sich vermuten, dass durch die längere Haltezeit eine geringere Rückfederung der Proben erreicht wurde, die nach Jahic (2000) sonst zu einer Überschreitung der Bruchdehnung der Klebfuge in der Mittelschicht bzw. im Übergangsbereich von den Zwischenschichten führen kann. Auch von Haas (1998) stellt dar, dass mit zunehmender Rückfederung eine Abnahme der Querzugfestigkeit eintritt.

Eine verringerte Rückfederung führte bei den Faserproben jedoch nicht zu einer Zunahme der Querzugfestigkeiten. Die Ursache, die zu einer Abnahme der Querzugfestigkeiten bei den Faserproben führte, scheint somit, wie bereits vorher vermutet, auf eine Schädigung der Zellwände zurückzuführen zu sein. Dieser Defekt wäre durch eine zusätzliche Presszeit nicht reversibel und würde sich erst in einem anschließenden Querzugtest in einer verringerten Querzugfestigkeit zeigen.

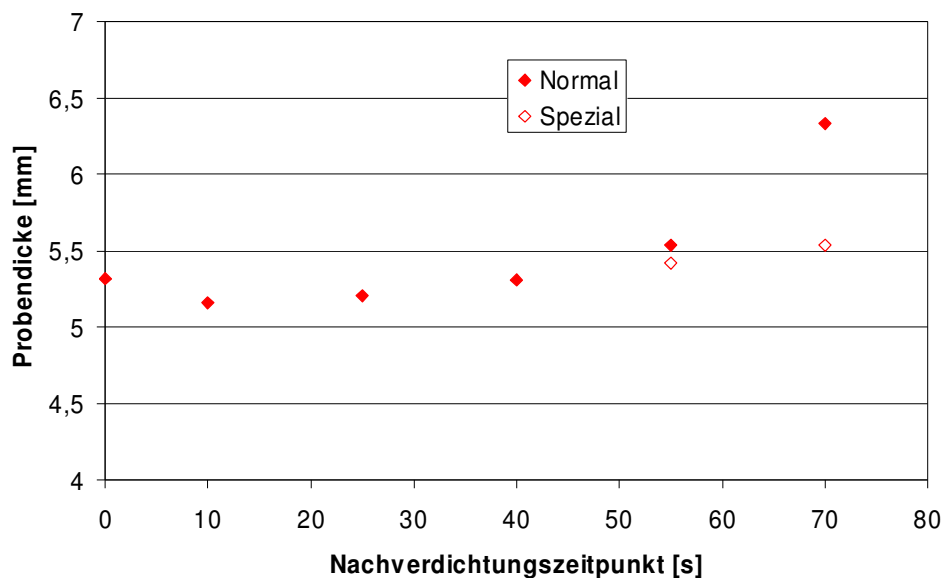


Abbildung 110: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Dickenverlauf von klimatisierten Ipates MDF Prüfkörpern.

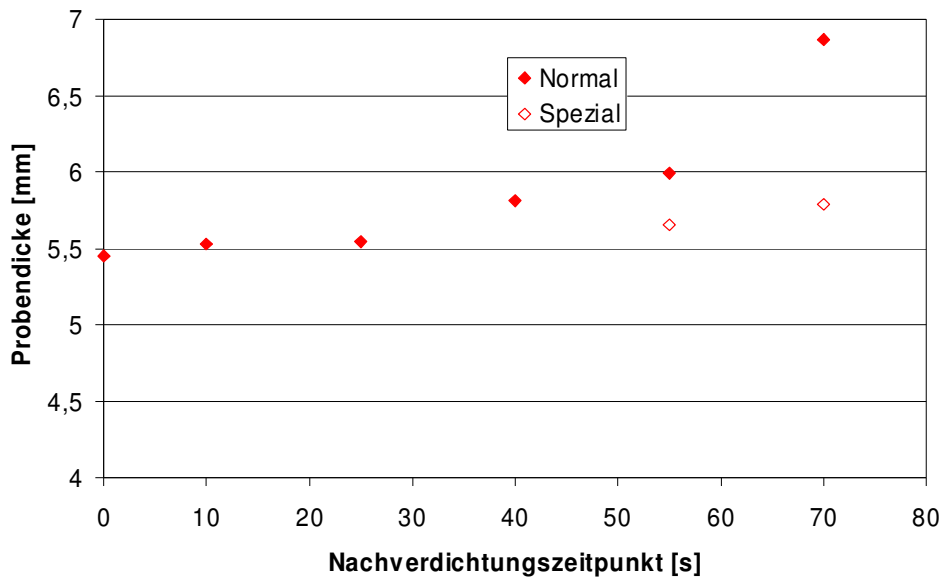


Abbildung 111: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Dickenverlauf von klimatisierten Ipates Mittelschichtspan-Prüfkörpern.

Ohlmeyer (2002) bestärkt diese Aussagen, indem er Untersuchungen über die Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffen nach dem Heißpressen anstellte. Hierbei vergleicht er die Querkzugfestigkeitsentwicklung industriell hergestellter UF-gebundener Spanplatten und MDF durch eine nachträgliche Wärmezufuhr durch eine Stapellagerung. Bei den Spanplatten zeigte sich eine bis zu 10 % ige Querkzugfestigkeitszunahme bei einer Stapeltemperatur um 80°C. Diese Zunahme war bei Faserplatten mit einer Stapeltemperatur von ca. 60°C nicht festzustellen. Die Ergebnisse von Ohlmeyer können daher ebenfalls als Hinweis darauf gewertet werden, dass im Gegensatz zu der Spanplattenherstellung bei der Faserplattenproduktion Schädigungen der Zellwände auftreten, die nicht mehr reversibel sind und somit keine Verbesserung der Querkzugfestigkeiten mittels einer zusätzlich einwirkenden Wärmemenge erzielt werden.

8.3 Weitere Analysemethoden

8.3.1 Extraktion von Faserplatten

8.3.1.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung des Versuchsablaufs ist aus Abschnitt 5.3.3.3 zu entnehmen.

Warmwasserextraktion

In den zur Herstellung der Platten verwendeten Industriefasern lässt sich ein geringer Harnstoffanteil von 0,09 % nachweisen (Abbildung 112), wobei dies offenbar auf die werks-

seitig vorliegende schwache Beleimung zurückgeführt werden muss (vgl. Abschnitt 4.2). Aus den nach unterschiedlichen Pressprogrammen hergestellten Faserproben lassen sich jeweils ca. 0,33 % Harnstoff extrahieren. Infolgedessen ist anzunehmen, dass der Einbau des Harnstoffs unabhängig vom verwendeten Pressprogramm erfolgt und bei allen Platten eine vergleichbare Netzwerkbildung stattgefunden hat.

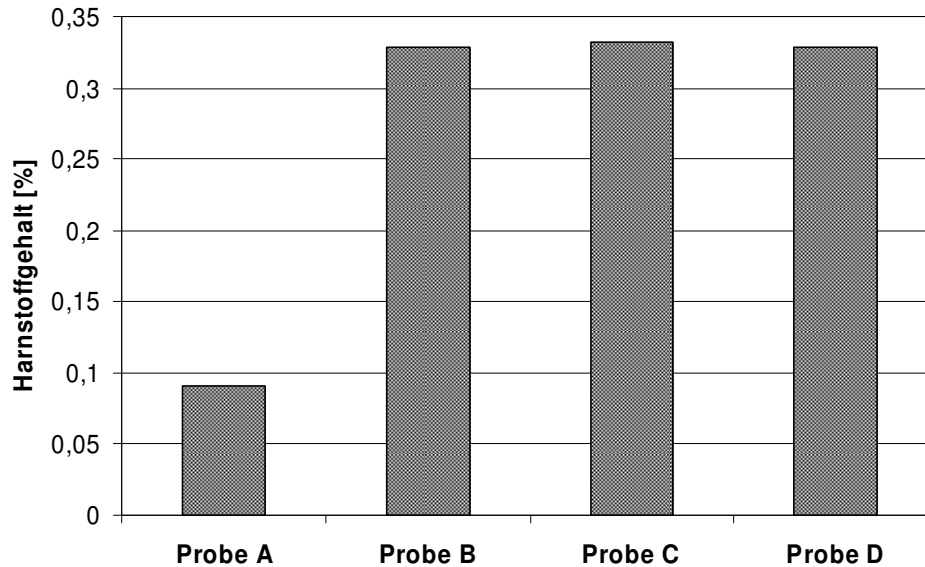


Abbildung 112: Extrahierbarer Harnstoffgehalt unterschiedlicher Faserproben. Probe A: unbeleimte Rohfasern, Probe B: Referenzprobe 180°C, Probe C: Nachverdichtung 180°C, Probe D: 110°C.

Aus den Versuchen zum Einfluss von Druckänderungen aufgrund der Rahmenkonstruktion und des Pressprogramms wurde geschlossen, dass der Beleimungsgrad keinen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit in Bezug auf den Nachverdichtungszeitpunkt oder die Amplitudenhöhe hat. Daraus folgte, dass sich die festgestellten Querkzugfestigkeitsverringerungen auch bei aus unbeleimten Fasern hergestellten Proben erkennen lassen sollten. Offenbar erfolgen während der Nachverdichtungsphase eher mechanische Veränderungen des Fasergefüges. Der gleichmäßige Einbau des Harnstoffs in den ausgehärteten Faserplatten zeigt, dass die gemessenen Querkzugfestigkeitsunterschiede der Faserplatten offenbar nicht auf unterschiedliche Härtingsgrade des eingesetzten Klebstoffes zurückgeführt werden können.

Die eingangs aufgestellten Hypothesen, dass eine Nachverdichtung bei Faserwerkstoffen zu einem geringeren Härtingsgrad führt, wurden mit der hier angewandten Messmethodik somit nicht bestätigt.

DMF-Extraktion

Im Gegensatz zur Warmwasserextraktion erlaubt die DMF-Methode keine Unterscheidung zwischen fasereigenen und leimspezifischen Komponenten. Daher wird selbst aus

den "unbeleimten" Industriefasern eine Extraktstoffmenge von nahezu 7 % (atro) erhalten (Abbildung 113). Die bei 180°C unter Standardpressbedingungen hergestellte Probe B ergibt 0,5 % weniger Extrakt als die nachverdichtete Probe C und die bei niedriger Presstemperatur erzeugte Probe D. Insgesamt sind die Unterschiede jedoch gering, so dass offenbar keine signifikanten Veränderungen der Extraktstoffmengen durch unterschiedliche Pressbedingungen bewirkt werden. Inwieweit die DMF-Extraktion zur Quantifizierung leimspezifischer Komponenten brauchbar ist, könnte nur die chemische oder chromatografische Analyse des extrahierten Produktgemisches zeigen.

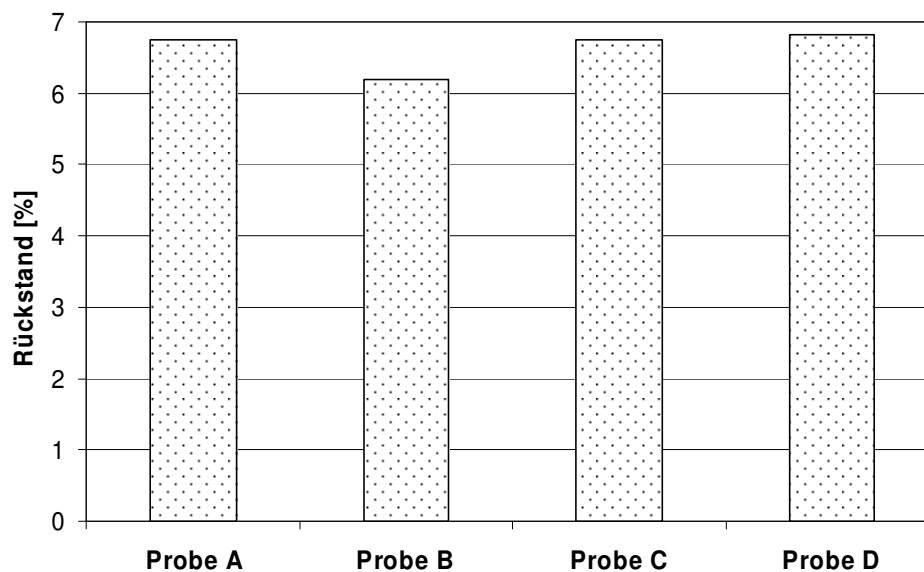


Abbildung 113: Mittels DMF extrahierbarer Rückstand (Gesamtextrakt) unterschiedlicher Faserproben. Probe A: unbeleimte Rohfasern, Probe B: Referenzprobe 180°C, Probe C: Nachverdichtung 180°C, Probe D: 110°C, n=2.

8.3.2 Rasterelektronenmikroskopie

8.3.2.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung des Versuchsablaufs ist aus Abschnitt 5.3.3.4 zu entnehmen.

Nachweis der Beileimung

Die REM-Aufnahmen lassen die Beileimung der Fasern erkennen (Abbildung 114). Hierbei zeigt sich, dass die Benetzung der Faseroberfläche flächig (links) oder auch tropfenförmig (rechts bei der Verklebung einer Faserkreuzungsstelle) sein kann.

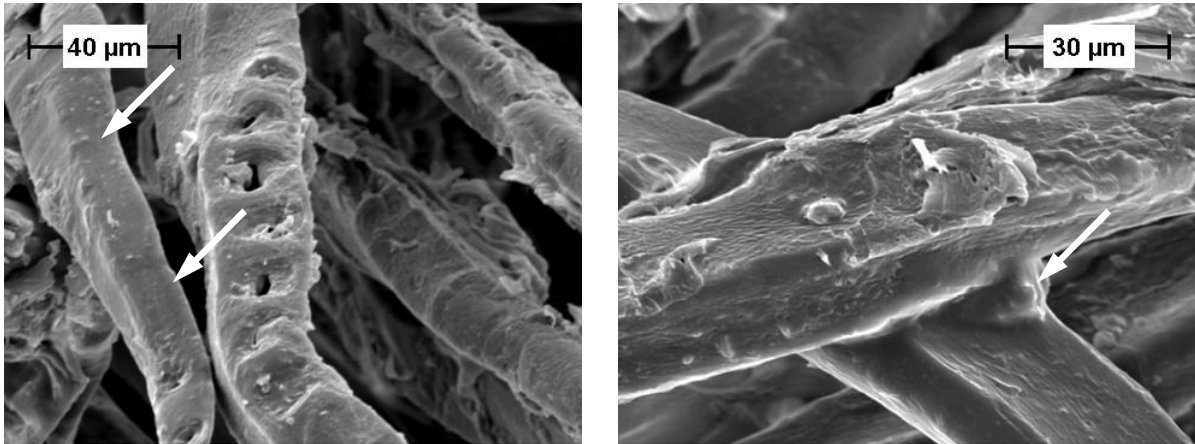


Abbildung 114: Beleimte Faser (Vergrößerung 690x), Rohdichte 550 kg/m³, Nachverdichtung bei 70 s (links) und beleimter Faserkreuzungspunkt (Vergrößerung 1000x), Rohdichte 550 kg/m³, Referenzprobe Schwingung, rechts.

Die Beleimung von Faserbündeln erscheint in den gemachten Aufnahmen als recht gering. Aber auch hier lassen sich einzelne beleimte, abgerissene Fasern (Typ 4) erkennen (Abbildung 115).

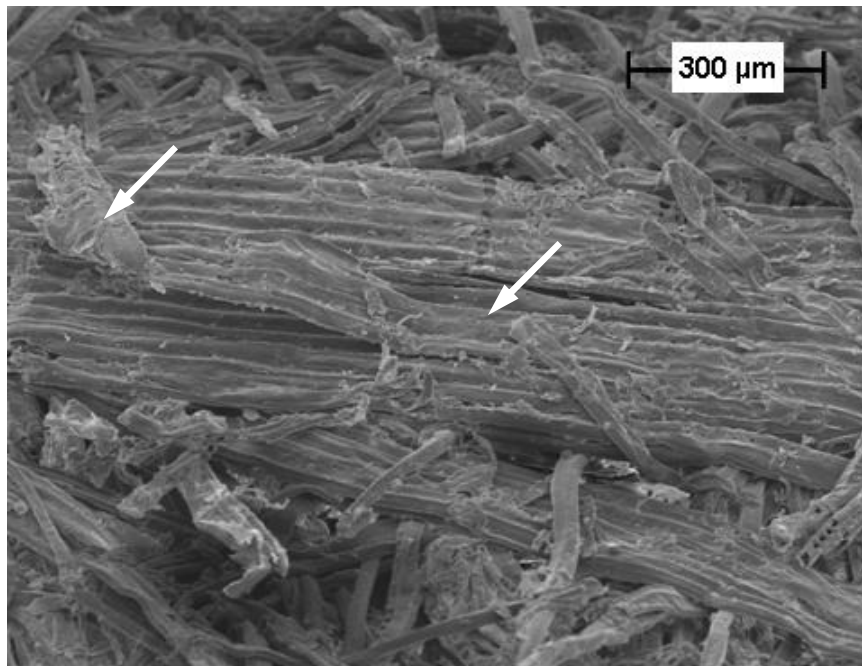


Abbildung 115: Übersicht Faserbündel (Vergrößerung 80x), Rohdichte 550 kg/m³, Referenzprobe Nachverdichtung.

Nachweis der Bruchflächen

Die Überprüfung der Bruchflächen zeigte bei der in dieser Untersuchung durchgeführten Probenherstellung keine erkennbaren Unterschiede. Dies stellte sich zwischen den Referenzproben und den Proben maximaler Einflussnahme sowohl für die Nachverdichtung als

auch die Schwingung dar. Zusätzlich war auch keine Unterscheidung der Bruchqualität bei abweichenden Rohdichten möglich.

Die von Butterfield *et al.* (1992) und Walther (2006) aufgezeigten Bruchmöglichkeiten bei Faserplatten wurden in der hier durchgeführten Untersuchung bei einigen Proben festgestellt. Die Autoren teilten die erkennbaren Versagensmuster zusammenfassend in drei Typen ein. Bei Typ 1 erscheint der Bruch im Bereich der S1 und der Mittellamelle (ML), bei dem sich Reste der obersten Zellwandschicht abbilden. Typ 2 weist tiefere Ablösungen innerhalb der Zellwand auf, so dass anhand der Mikrofibrillenwinkel auf Risse zwischen der S1 und der S2 geschlossen werden kann. Hingegen zeigt Typ 3 Faserreste, die aufgrund der gegenseitigen Verklebung von Fasern, auf der beteiligten Gegenfaser als Bruchstücke zu finden sind. Zusätzlich treten nach Walther (2006) Versagensbilder auf, bei denen die gesamte Faser oder sogar Faserbündel zerstört werden (hier als Typ 4 bezeichnet). Walther wie auch Butterfield *et al.* legen dar, dass die unterschiedlichen Typen des Zellwandversagens auf Unterschiede in der Beileimung zurückzuführen sind, beispielsweise einer ungleichmäßigen Beileimung (Typ 1) oder einer intakten Beileimung (Typ 3).

Abbildung 116 (links) zeigt den verklebten Zellwandrest einer Faser (Typ 3), wobei der Riss in der S1 anhand des Mikrofibrillenwinkels bestimmbar ist. Faseranhaftungen dieses Typs zeigen sich auch in der Abbildung 117.

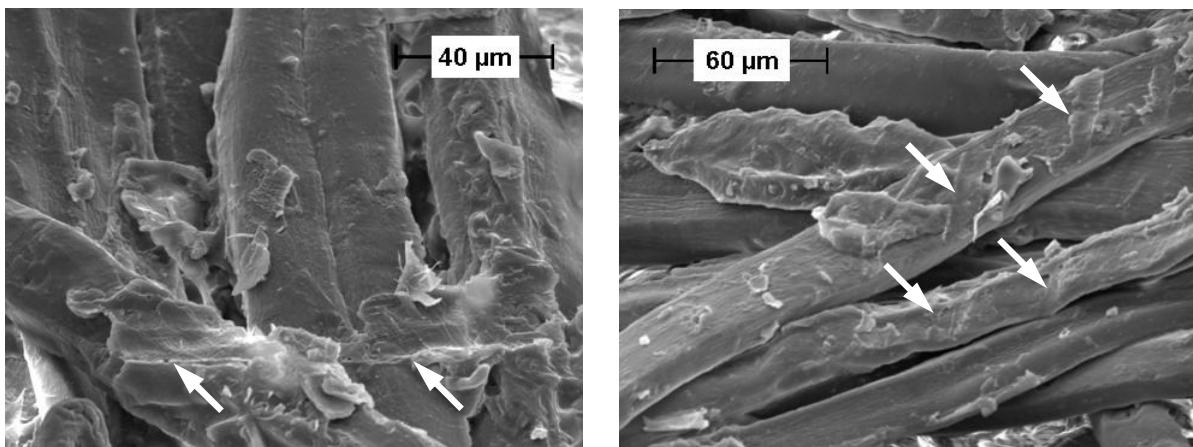


Abbildung 116: Abgelöste Faser mit Riss in der S1 (Vergrößerung 600x), Rohdichte 550 kg/m³, Referenzprobe Nachverdichtung (links) und Versagen in der Übergangszone (Vergrößerung 410x), Rohdichte 550 kg/m³, Nachverdichtung bei 70 s (rechts).

Die Festigkeit des Klebstoffes übersteigt bei diesem Versagensbild die Festigkeit der Zellwand. Zusätzlich ist bei der Überlappung der Fasern anzuführen, dass es bei einer Druckbelastung zu einer Übersteigerung der maximalen Druckfestigkeit des Wandmaterials kommen kann, wodurch Brüche in der Zellwand auftreten. Diese Stellen zeigen sich in REM-Aufnahmen an den Bereichen, an denen die Überlappungen (Kreuzungen) mit einem Klebstofftröpfchen fixiert wurden. Bei einem anschließend durchgeführten Querzugtest wird die

zerstörte Wandschicht aus der Faser herausgelöst, so dass eine Öffnung in der Faserwand, bzw. das anhaftende Faserstück zurückbleibt.

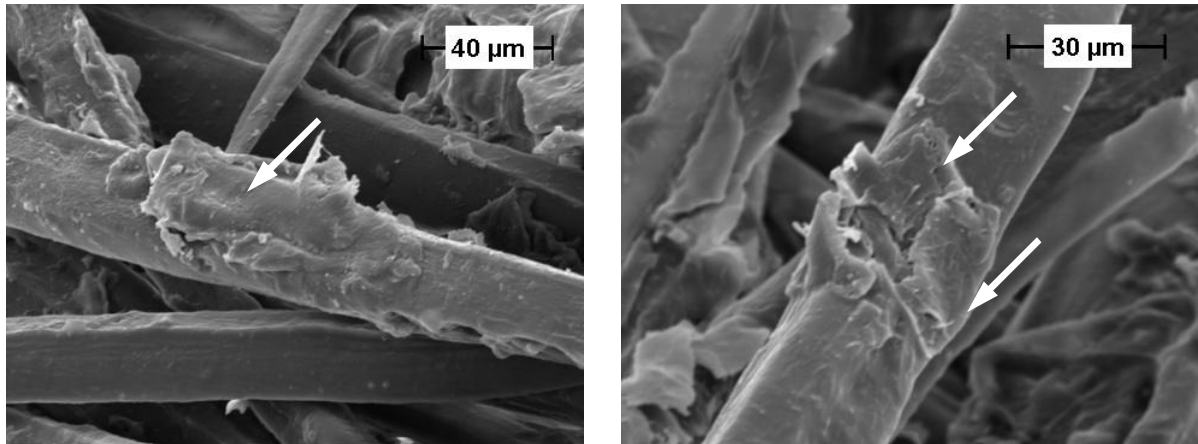


Abbildung 117: Faserrest mit Klebstoff (Vergrößerung 590x), Rohdichte 550 kg/m³, Nachverdichtung bei 70 s (links) und beleimte Faserreste mit Cellulosefibrillen (Vergrößerung 810x), Rohdichte 850 kg/m³, Nachverdichtung bei 70 s (rechts).

Die Ablösung einer vorher zumindest aufliegenden Faser zeigt sich an Faserstauchungen in Abbildung 118. Eine Zuordnung zu den Versagenstypen ist nicht möglich.

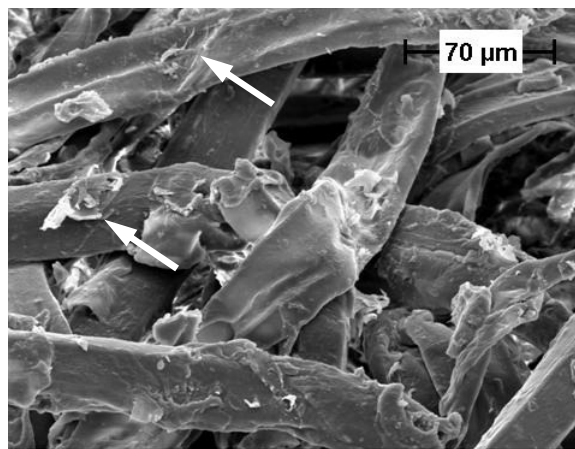


Abbildung 118: Quetschung und abgerissene Faser (Vergrößerung 390x), Rohdichte 850 kg/m³, Nachverdichtung.

Wie bereits erwähnt, zeigt sich in den durchgeführten REM-Aufnahmen kein Unterschied innerhalb der verschiedenen hergestellten Faserproben. Eventuell kommt es durch die Aufbringung einer Schwingung während des Heißpressens eher zu einer Beeinträchtigung des Fasermaterials als zu einer des Klebstoffes. Hierbei nimmt die Mittelschicht die mit der Druckänderung verbundene Wegänderungen über den Mattenquerschnitt betrachtet am längs-

ten auf. Die weiter außen liegenden Schichten härten aus und geben die Wegänderung an die am geringsten gehärtete Schicht weiter.

Aufgrund dieser schwingenden Druckänderungen kann es nach Kollmann (1975) zu einer Abnahme des plastischen Verhaltens kommen, das durch den Abbau von amorphen Cellulosebereichen sowie dem amorphen Ligninnetzwerk innerhalb der Zellwände zu erklären ist. Die zunehmende elastische Verformung, die aufgrund von kristallinen Cellulosebereichen vorliegt, führt zu einer verringerten Zunahme der bleibenden Verformung bzw. Stauchung. Diese Umlagerungsprozesse könnten zu einer Beeinträchtigung des Fasermaterials führen.

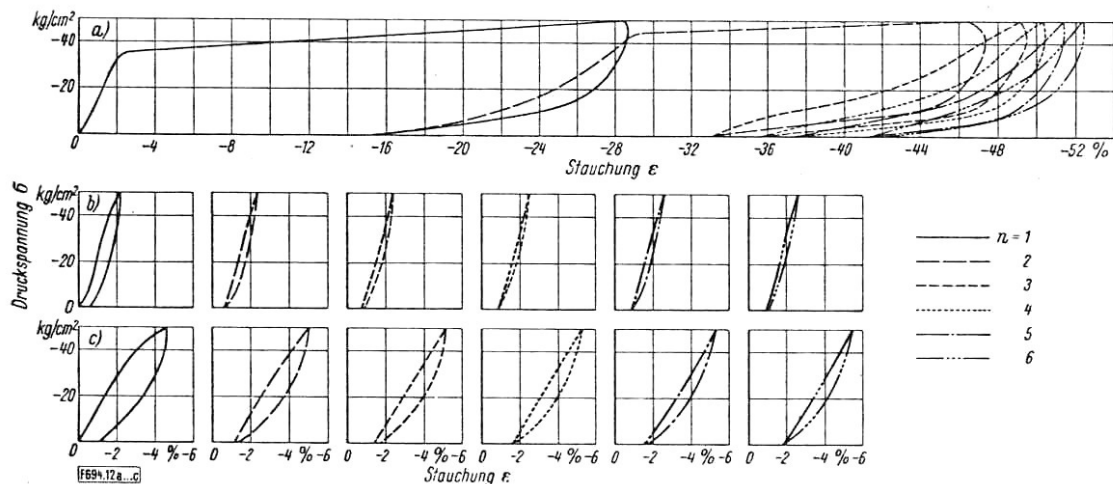


Abbildung 119: Einfluss von Druckschwankungen (5 N/mm²) auf den Druckspannungs-Stauchungs-Verlauf bei Fichtenholz (a), Tischlerplatte (b) und Spanplatte (c) (Kollmann 1957).

Kollmann (1957) bestätigt diese Vermutung bei Versuchen an fertigen Holzwerkstoffplatten, bei denen er Drücke von 2,5 N/mm² und 5 N/mm² schwingend auf die zu untersuchenden Proben aufbringt (Abbildung 119). Hierbei schließt er aufgrund der aufgenommenen Druckspannung-Stauchungs-Verläufe auf Gefügeveränderungen innerhalb der Holzsubstanz. Die daraus resultierende Abnahme der Plastizität zu Gunsten der Elastizität zeigte sich mit zunehmendem Druck verstärkt bei Vollholz, woraus gefolgert werden kann, dass bei Holzwerkstoffen der Klebstoff zu einer Versteifung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix führt und somit einen Teil der einwirkenden Belastungen aufnimmt. Es lässt sich mutmaßen, dass die REM-Aufnahmen daher keinen Unterschied der Einflussvariationen auf die Ausbildung Bruchfläche zeigte, da die Beschädigungen innerhalb der Zellwandsubstanz stattfanden.

Eine zusätzliche Untersuchung mittels einer dreidimensional auflösenden Mikro-Computer-Tomografie (Walther 2006), um die Auswirkungen von Druckänderungen an einer ohne dem Querzugtest zerstörten Probe vorzunehmen, lieferte zwar ein Bild der eventuell zerstörten Zellwände, jedoch nicht, wo die mechanische Schwachstelle wäre. Dies zeigt sich erst nach einem Querzugtest bzw. Schertest daran, an welchen Stellen (Faser, Klebfuge) die Probe zerrissen wurde.

8.4 Schlussfolgerung

Die im Abschnitt 8 erhaltenen Ergebnisse wiesen nach, dass die Auswirkungen von Druck- und Wegänderungen auf die Quertzugfestigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bei Holzwerkstoffen aus gröberem Holzpartikeln (hier Spanplatten) stärker als bei Holzwerkstoffen aus feinen Holzpartikeln (hier Faserplatten) sind. Hierbei zeigte sich, dass es bei gröberem Partikeln eher zu einer Beeinflussung des Klebstoffes und bei feineren Partikeln eher zu einer Beeinträchtigung des Holzmaterials kommt. Die Ergebnisse lassen zudem vermuten, dass die in den Industrierversuchen gemessenen Druck- und Distanzschwingungen gerade bei Holzwerkstoffen aus gröberem Material, wie z. B. Späne und Strands, zu schwerwiegenderen Auswirkungen auf die mechanischen Plattenqualitäten führen, als in den Laborversuchen für Faserplatten dargestellt.

Betrachtet man das Gefüge von Holzwerkstoffmatten, so lässt sich ein entscheidender Unterschied zwischen Feinpartikeln (Faser) und Grobpartikel (Mittelschichtspan) ausmachen. Das Fasermaterial orientiert sich bei der Verpressung in zur Oberfläche paralleler Anordnung. Bei einem gröberem Material, wie z.B. Mittelschichtspanmaterial kommt es aufgrund der Partikelgeometrie zu einer Versetzung der Späne gegeneinander. Eine Druckänderung führt daher eher bei Matten aus gröberem Holzpartikeln zu Schälspannungen, die exzentrisch senkrecht auf die Überlappungsfläche wirken und für die Klebfuge schädlicher als reine Zug-, Druck- oder Scherkräfte sind (Habenicht 1990). Zudem kommt es durch die mit den Druck- einhergehenden Wegänderungen bei gröberem Partikeln zu einer größeren Auslenkung pro Partikel und beteiligter Klebfuge. Die einwirkenden Kräfte führen aus diesem Grund bei einer Be- als auch Entlastung gerade bei gröberem Partikeln zu einer stärkeren Biegebeanspruchung und damit exzentrischen Zugbelastung senkrecht zur Oberfläche. Und zwar auch obwohl diese aufgrund der Dicke ein höheres Biegegegenstandsmoment und damit eine höhere Partikelsteifigkeit aufweisen. Die Belastung bzw. Schälbelastung ist bei Spanmaterial daher größer als bei Fasern zu vermuten.

Zusätzlich wird bei der Heißverpressung eines Holzwerkstoffes der Einfluss der Biegung und der Schälbelastung auf einen Holzpartikel bzw. ein verklebtes Holzpartikelpaar über die Presszeit verändert. Je plastischer das Holzmaterial, desto geringer die resultierende Belastung der Klebfuge. Hieraus lässt sich ableiten, dass gerade die am wenigsten plastifizierte Mittelschicht Biege-, als auch Schälbeanspruchungen am längsten über die Presszeit betrachtet ausgesetzt wird. Die schlechtere Aufnahme von Schälspannungen verstärkt sich zudem durch den Einsatz eines spröden Duromers, wie es die in dieser Arbeit Verwendung findenden Klebstoffe darstellen.

Mit den eingesetzten Extraktionsmethoden konnten die löslichen Bestandteile von unterschiedlich hergestellten Faserplatten erfasst werden. Verglichen mit der DMF-Methode ist die Warmwassermethode mit nachfolgender Quantifizierung des freien Harnstoffes allerdings spezifischer im Hinblick auf die Abschätzung der Klebstoffqualität. Insgesamt deuten die Ergebnisse beider Verfahren aber darauf hin, dass die gewählten Pressbedingungen den

Anteil der aus der Platte herauslösbaren Bestandteile offenbar nicht signifikant beeinflussen. Hierzu sind statistisch abgesicherte Aussagen allerdings erst dann möglich, wenn die Extraktionsmethodik durch umfangreichere Versuchsreihen abgesichert wird.

Möchte man trotz allem bei der durchgeführten Stichprobengröße eine Aussage treffen, so ließe sich darstellen, dass eine Nachverdichtung im Vergleich zu einer nicht nachverdichteten Referenzprobe zu einem höheren Extraktionsrückstand führte. Hierbei war die Menge an extrahiertem Harnstoff je nach Faserbehandlung nicht zu unterscheiden und ließ sich somit nicht zur Erklärung der Vorgänge, die zu einer Erniedrigung der Quersugfestigkeiten mittels einer Nachverdichtung führten heranziehen. Daraus folgert, dass die erhöhte Extraktstoffmenge bei einer Nachverdichtung unabhängig vom Harnstoffgehalt war, so dass hier eher von herausgelösten Faserbestandteilen ausgegangen werden kann. Die chemischen Untersuchungen bestätigen für den hier durchgeführten Versuchsablauf die Aussage, dass es bei Druckänderungen während der Faserprobenherstellung zu keinen relevanten Auswirkungen auf den Klebstoff kommt.

Um zu entscheiden welche Bestandteile (Klebstoff, Zellwandmaterial) sich im Gesamtextrakt befinden, sollten die Rückstände der DMF-Extrakte mittels einer Stickstoffbestimmung nach z.B. Kjeldahl auf ihren Harnstoffgehalt hin untersucht werden. Zudem ließen sich die Bestandteile des Extraktes mittels einer HPLC-Analyse (High-Performance-Liquid-Chromatography) bestimmen. Mit diesem chromatografischen Trennverfahren können Substanzen bzw. chemische Verbindungen voneinander getrennt und anschließend mittels Standardwerten verglichen und benannt werden. Erst nach der Bestimmung der chemischen Bestandteile könnte damit eine Aussage darüber getroffen werden, wie eine Druckänderung auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix wirkt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten REM-Aufnahmen an Quersugbruchflächen von MDF-Prüfkörpern zeigten, dass sich die Brucharten so vielschichtig wie die Verklebungstheorien darstellen, so dass es zu verschiedenen Versagenstypen bei einem durchgeführten Quersugtest kam. Die Unterschiede innerhalb der ermittelten Quersugfestigkeiten der verschiedenen hergestellten Prüfkörper waren mit den REM-Aufnahmen qualitativ nachvollziehbar, jedoch nicht quantitativ. Nach dem jetzigen Stand führen Druckänderungen bei Fasermatten zu einer Verringerung der Festigkeitseigenschaften, die eventuell durch eine Schädigung der Zellwand verursacht werden. Für eine Überprüfung dieser Hypothese sollten zusätzliche optische Methoden mit Einfärbungen des Klebstoffes angewandt werden, um zu überprüfen, ob die Beeinflussung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix mittels Druckänderungen überhaupt auf optischem Wege darzustellen ist.

Die Ergebnisse bestätigen die Aussagen der durchgeführten mechanischen und chemischen Analysemethoden. So war bei den Faserproben die Quersugfestigkeitsentwicklung während des Heißpressens relativ unabhängig vom Beleimungsgrad, so dass auf einen Einfluss der Druckänderungen auf die Fasern geschlossen wurde. Des Weiteren zeigte sich kein signifikanter Unterschied beim Vernetzungsgrad des Klebstoffes (bzw. der Holzpartikel-

Klebstoff-Matrix). Aus den gesammelten Ergebnissen lässt sich schließen, dass Druckänderungen bei Fasermatten eher zu Auswirkungen seitens der Holzpartikel als des Klebstoffs führen.

9 Simulation

Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Pressprogramm bzw. anlagenbedingten Be- und Entlastungen beim Heißpressen und den mechanischen Platteneigenschaften sind für die Bewertung und Optimierung von Pressprogrammen von erheblicher Bedeutung. Zur Unterstützung von derartigen Optimierungsaufgaben sind in den letzten Jahren von verschiedenen Forschergruppen Softwarepakete entwickelt worden, mit denen der Heißpressvorgang von Holzwerkstoffen simuliert werden kann. Diese Simulationsprogramme basieren auf analytischen Modellen, die den Heißpressvorgang durch fundamentale physikalische Gesetzmäßigkeiten beschreiben. Ein im Rahmen der AIF-Projekte 10359 N und 12026 N sowie durch weiterführende Arbeiten durch die Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit der Oregon State University entwickeltes Modell ist derzeit das weltweit umfassendste und vollständigste dieser Art. Neben den entsprechenden Abschlussberichten sind Einzelheiten zur Modellierung unter Thoemen und Humphrey (2003, 2006) sowie Thoemen *et al.* (2006) nachzulesen. Mit dem bestehenden Modell lassen sich mittels der Module Wärme- und Stofftransport sowie Rheologie, die Entwicklung von Temperatur, Feuchtegehalt, Gasdruck und Dichte in der Holzwerkstoffmatte beim Verpressen simulieren. Von Heinemann (2004) wurde das Modell um ein Modul Adhäsion zur Beschreibung der Klebstoffaushärtung ergänzt. Zusätzlich ist die Simulation der Querkzugfestigkeit in Ansätzen möglich (Abbildung 120).

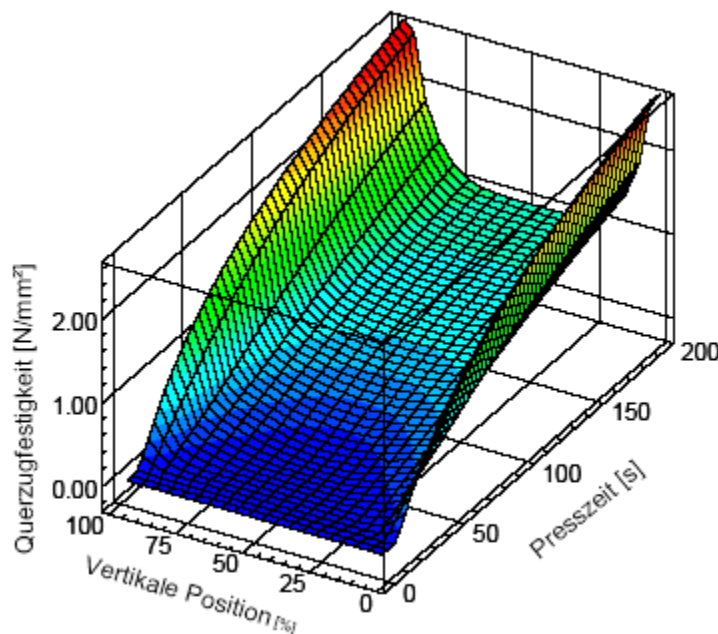


Abbildung 120: Simulierte Entwicklung der Querkzugfestigkeit in den verschiedenen Mattenschichten beim Verpressen von MDF in einer Taktpresse (Heinemann 2004).

Weitere in der Literatur beschriebene Modelle (z.B. Dai *et al.* 2000, Carvalho *et al.* 2001, Zombori 2001) sind teilweise in der Lage, die Entwicklung der Klebharzaushärtung während des Pressvorgangs vorherzusagen, wobei dies für die Querkzugfestigkeit und andere elastomechanische Platteneigenschaften nicht ausreichend gelingt. Dieses muss aber ein wesentliches Ziel bei der Weiterentwicklung von Modellen des Heißpressvorgangs sein.

9.1 Ergebnisse und Diskussion

9.1.1 Grundversuche

Die Beschreibung der Versuchsanordnung ist aus Abschnitt 5.1.1 und des Versuchsaufbaus aus Abschnitt 5.3.4.1 zu entnehmen.

9.1.1.1 Querkzugfestigkeiten

Die Referenzkurven (ohne Nachverdichtung) in Abbildung 121 und Abbildung 123 sind mit den Kurven der Querkzugfestigkeitsentwicklung, die Heinemann 2004 bestimmt hat, in ihrem prinzipiellen Verlauf über die Presszeit vergleichbar. Heinemann hatte in seiner Arbeit einen annähernd logarithmischen Verlauf der Klebstoffaushärtung über die Presszeit dargestellt.

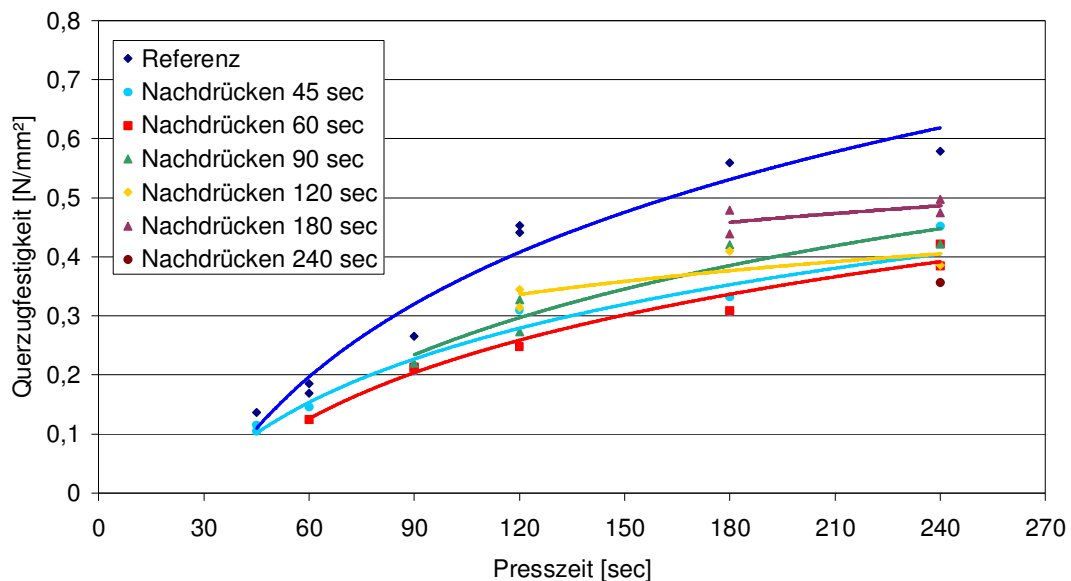


Abbildung 121: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von Faserproben bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm bei einer Presstemperatur von 180°C und einer Rohdichte von 583 kg/m³.

Der Einfluss des Nachdrückens und der anschließenden Haltezeit ist grundsätzlich für alle untersuchten Parameter vergleichbar; nur die Höhe der Auswirkung ist abweichend. Allgemein lässt sich darstellen, dass ein Nachdrücken zu einer abnehmenden Festigkeit über die anschließende Halte- bzw. Presszeit führt. Hierbei ist die Abnahme der Querkzugfestigkeiten im Vergleich zur Referenzkurve umso höher, je später das Nachdrücken erfolgt. Abweichend

hierzu sind nur die ersten Nachdrückzeitpunkte, die gleich hohe oder höhere Querkzugfestigkeiten aufweisen als die Referenzwerte. Betrachtet man die Entwicklung der Querkzugfestigkeit über die anschließende Presszeit, so zeigt sich für die Nachverdichtungszeitpunkte 45 s und 60 s, dass die Abnahme der Querkzugfestigkeit (Differenz zur Referenzkurve) zunimmt (siehe Abbildung 121). Lässt man hingegen die frühen Nachverdichtungszeitpunkte unberachtet (< 120 s), so verläuft die Querkzugfestigkeit annähernd parallel zur Referenzkurve (Abbildung 122).

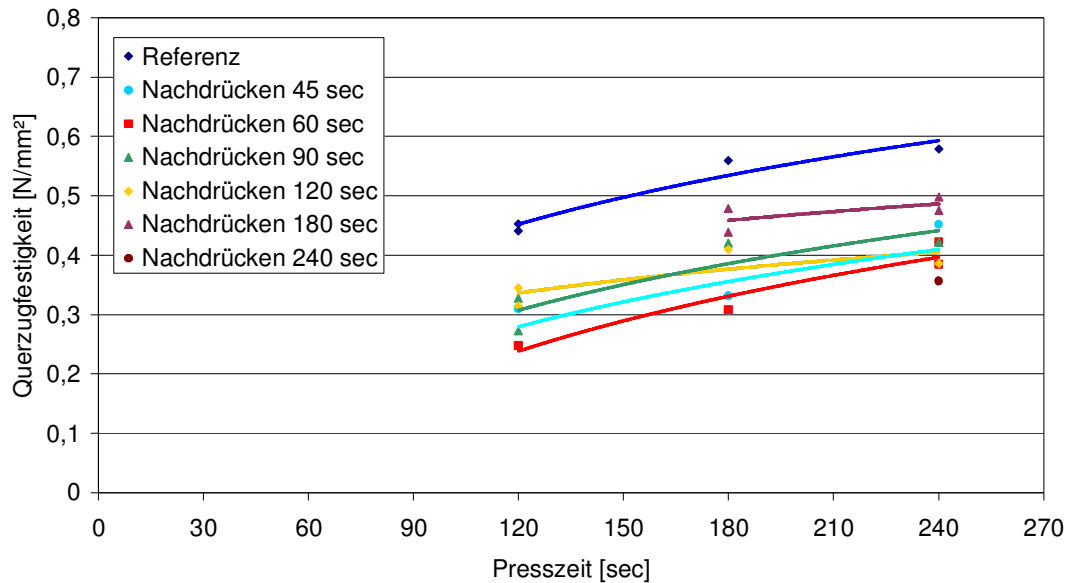


Abbildung 122: Entwicklung der Querkzugfestigkeit ab einer Nachverdichtung bei 120 s bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm und einer Presstemperatur von 180°C und einer Rohdichte von 583 kg/m³ (gleiche Datenbasis wie in Abbildung 121).

Die in Abbildung 121 bei einer Presszeit von 45 Sekunden und Abbildung 123 bei 60 Sekunden durch das Nachdrücken nicht erniedrigten Querkzugfestigkeiten lassen jedoch erkennen, dass selbst Einflüsse, die zum Zeitpunkt des Geschehens keinen negativen Auswirkungen auf den Verlauf der Festigkeitsausbildung haben, im anschließenden Verlauf zu Querkzugfestigkeitseinbußen führen können. Im Hinblick auf den Einfluss einer Nachverdichtung auf die Festigkeitsentwicklung der Holzpartikel-Klebstoffmatrix (vgl. Abschnitt 6) ergibt sich mit diesem Ergebnis, dass der in den vorangegangenen Versuchen (vgl. Abschnitt 8) angeführte Mechanismus bei Faserplatten, bei dem die Pressdrücke zu Deformationen und Zerstörung der Faserzellwände führen, auch hier darstellbar ist (Abbildung 121 und Abbildung 123). Bei geringeren Aushärtungsgraden der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix ist die Festigkeit der Klebfuge nicht hoch genug, um Zellwandbrüche bei einem anschließenden Querkzugtest zu entfernen. Zu diesem Zeitpunkt besteht kein Unterschied zwischen einer Referenz- und einer nachverdichteten Probe. Erst mit weiter voranschreitender Presszeit und damit einhergehender Härtung des Klebstoffes, kann die gegenüber der Referenzprobe durch eine Nachverdichtung

zusätzlich zerstörte Zellwand entfernt werden. Aufgrund des geringeren Widerstandes der zerstörten Zellwände gegen die aufgebrachte Zugkraft im Vergleich zum weiter härtenden Klebstoff kommt es zu Querkzugfestigkeitsverringerungen der nachverdichteten Proben.

Hier stellt sich die Frage, ab welchem Zeitpunkt die Festigkeit des Klebstoffes die der Zellwand überschreitet, so dass bei einer Nachverdichtung die Druckänderung in der Zellwand zu einer zusätzlichen Beeinträchtigung der inneren Festigkeit führt. Bei einem ausreichenden Härungsgrad und einer nachträglichen Verdichtung mit entsprechendem Druckanstieg muss nicht zwingend eine Zerstörung von Klebstoffbrücken bzw. der Klebfuge erfolgen. Die Zerstörung würde mit höher aufgebrachten Pressdrücken, aufgrund des höheren Härungsgrades der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix, in der Zellwand geschehen. Hierdurch würde die Querkzugfestigkeit als Indiz für die Klebstofffestigkeit an Relevanz verlieren, da mit fortschreitender Härtung des Klebstoffs ein zunehmender Anteil an Faserausbrüchen die potentielle Festigkeit herabsetzte.

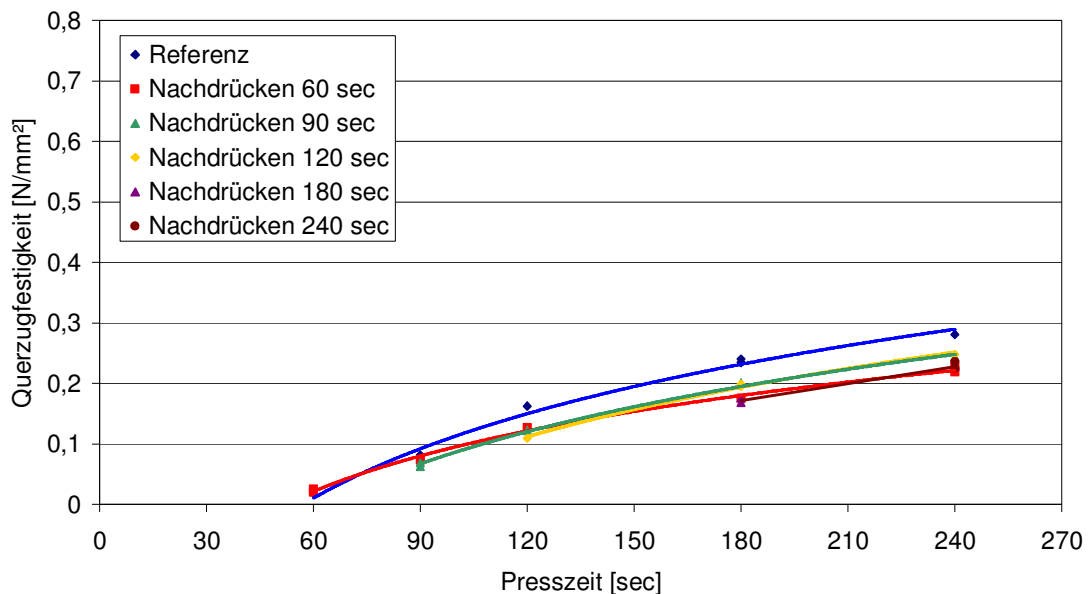


Abbildung 123: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von Faserproben bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm bei einer Presstemperatur von 100°C und einer Rohdichte von 583 kg/m³.

9.1.1.2 Temperaturmessungen

Die Temperaturmessungen erfolgten für die drei untersuchten Rohdichten (583 kg/m³, 750 kg/m³ und 900 kg/m³) sowie die drei Presstemperaturen (100°C, 140°C und 180°C). In Abbildung 124 lassen sich die Unterschiede der Mittelschichttemperaturverläufe für die unterschiedlichen Rohdichten und Presstemperaturen erkennen.

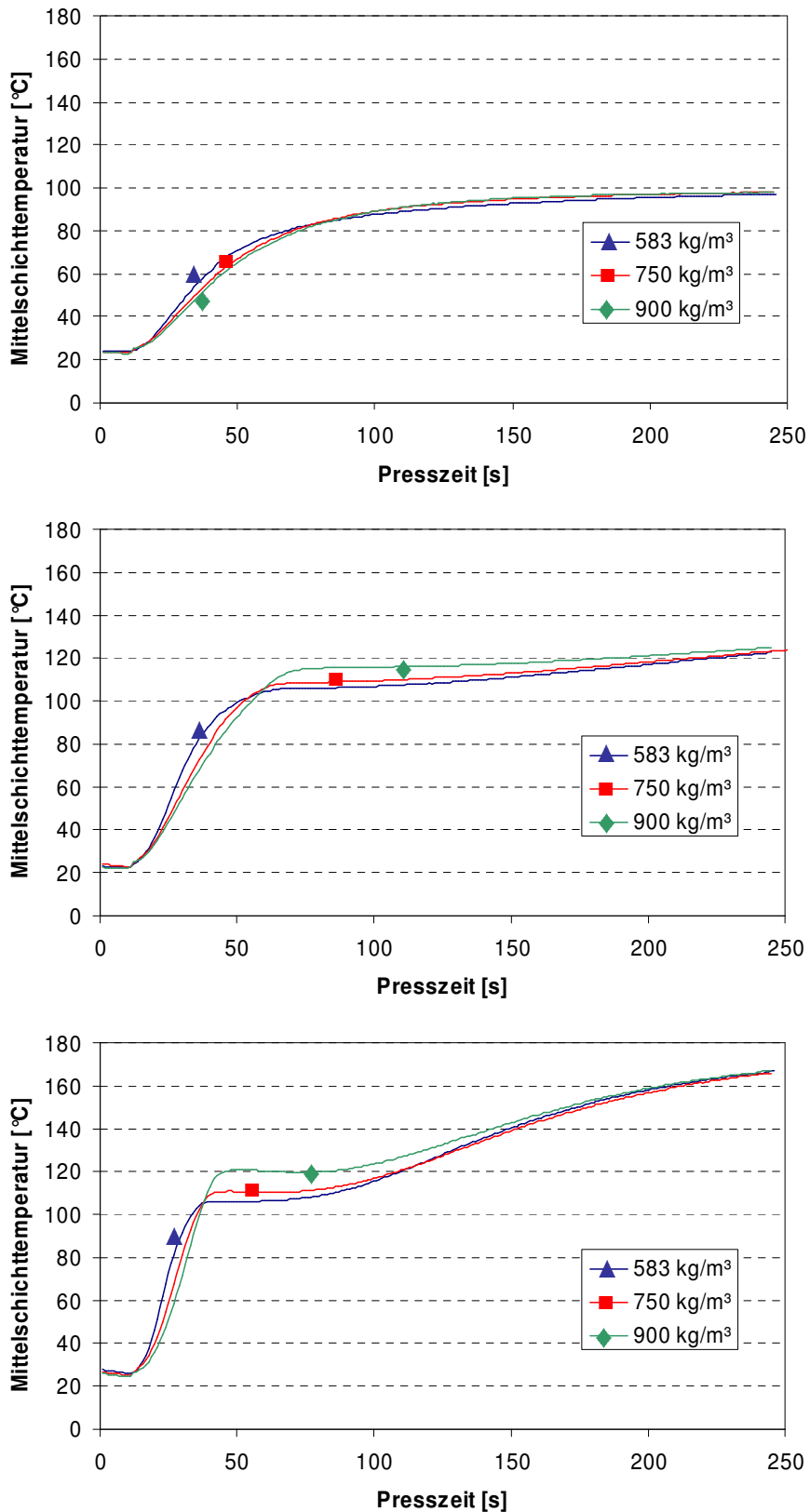


Abbildung 124: Mittelschichttemperaturmessungen bei einer Presstemperatur von 100°C (oben), 140°C (mittig) sowie 180°C (unten) und 6 mm Prüfkörperdicke. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.

Der Vergleich der drei Rohdichten zeigt, dass bei einer Rohdichte von 583 kg/m^3 die 80°C -Linie bei einer Presstemperatur von 100°C und die 100°C -Linie bei einer Presstemperatur von 140°C bzw. 180°C eher als bei den beiden übrigen Rohdichten erreicht wird. Mit zunehmender Presstemperatur wird dazu ein Temperaturplateau deutlicher, bei dem die Presstemperatur solange annähernd konstant bleibt, bis auch das Wasser innerhalb der Mittelschicht die Satttdampf Temperatur entsprechend dem vorherrschenden Gasdruck erreicht hat und verdampft. Dieses Plateau wird mit zunehmender Rohdichte und damit verringerter Permeabilität zu höheren Temperaturen verschoben, da der interne Gasdruck entsprechend ansteigt. Die Endtemperatur ist für die untersuchten Rohdichten bei den jeweiligen Heiztemperaturen zum Ende des Heißpressprozesses nach 240 Sekunden annähernd gleich.

Die Temperaturmessungen zeigen, dass die jeweils ersten Nachverdichtungen bei Presstemperaturen von 140°C und 180°C bei über 100°C in der Mittelschicht und damit bei einsetzender Härtung des Klebstoffs mit Zunahme der Querkzugfestigkeit, geschah. Dieses Stadium wird bei einer Presstemperatur von 100°C nur annähernd bis zur maximalen Presszeit von 240 Sekunden erreicht.

9.1.1.3 Aussagen für die Simulation

Die für die Entwicklung eines Modellansatzes wesentlichen Erkenntnisse der Grundversuche mit einer Nachverdichtung während des Heißpressprozesses sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

- Ein Nachverdichtungsschritt führt je nach Zustand der Matte zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit.
- Der Querkzugfestigkeitsverlust ist umso größer, je höher die Querkzugfestigkeit (Aushärtungsgrad) bei der Nachverdichtung ist. Exemplarisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung 125 dargestellt.
- Vereinfachend angenommen bleibt der Querkzugfestigkeits-Verlust annähernd konstant, wenn der Pressvorgang nach dem Nachverdichtungsschritt fortgesetzt wird. (siehe Abbildung 122)
- Die Beziehung zwischen der Querkzugfestigkeit, bei der die Nachverdichtung durchgeführt wurde, und dem Querkzugfestigkeitsverlust hängt von der Stärke der Nachverdichtung ab, ist aber in grober Annäherung unabhängig von Temperatur und Dichte (hier nicht dargestellt).

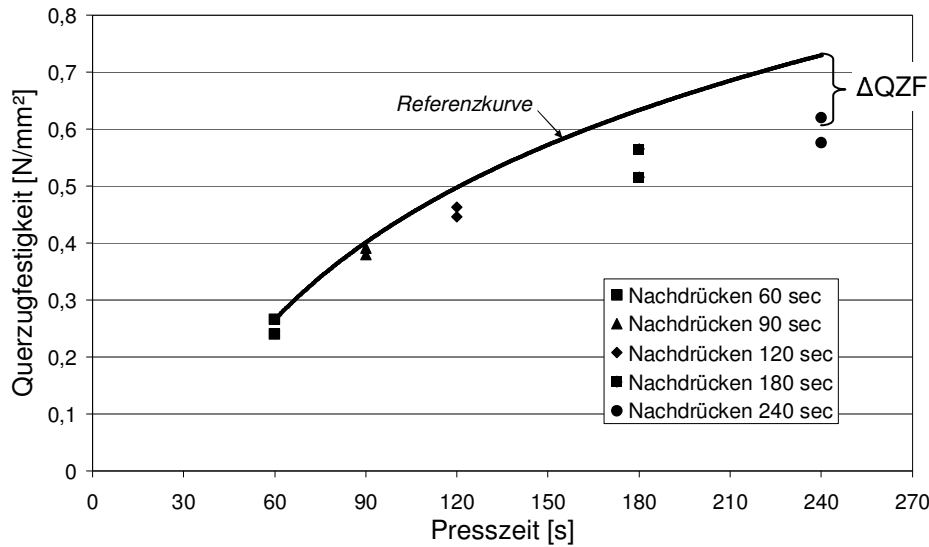


Abbildung 125: Querzugfestigkeitsverluste ΔQZF aufgrund der Mattennachverdichtung für verschiedene Nachverdrückungszeitpunkte gegenüber einer Referenzkurve ohne Nachverdichtung.

Trägt man die Querzugfestigkeitsniveaus, bei denen nachverdichtet wurde, als x-Werte und die Querzugfestigkeitsverluste als y-Werte in einem Diagramm auf (für alle Temperatur- und Dichtestufen bei 1 mm Nachverdichtungsschritt), so lässt sich in grober Näherung ein quadratischer Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeitsniveau und Querzugfestigkeitsverlust ableiten (siehe Abbildung 126). Der quadratische Trend führt allerdings zu einem überproportional starken Ansteigen des Querzugfestigkeitsverlustes bei höheren QZF. Für Querzugfestigkeiten oberhalb von $0,75 \text{ N/mm}^2$ ist dieser Trend nicht durch Messungen bestätigt. Die Annahme eines linearen Trends erscheint ebenfalls möglich und ist durch das vorliegende Datenmaterial zu rechtfertigen.

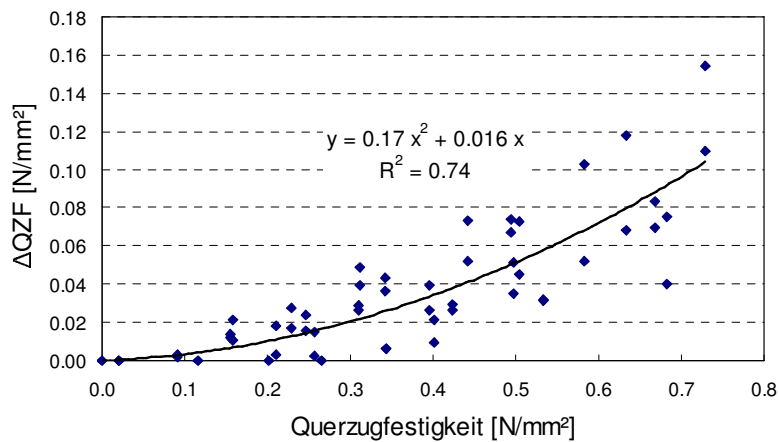


Abbildung 126: Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeitsverlust ΔQZF und Querzugfestigkeit unmittelbar vor dem Nachverdichtungsschritt.

Eine Regressionsanalyse ergab für den Zusammenhang zwischen Querkzugfestigkeitsverlust ΔQZF [N/mm²], Querkzugfestigkeitsniveau QZF [N/mm²] bei dem nachverdichtet wurde und Stärke der Nachverdichtung Δs [%] der Ausgangsdicke folgende Abhängigkeit (19) mit einer hohen Korrelation von 0,74.

$$\Delta QZF = (1,05 * 10^{-2} * QZF^2 + 9,879 * 10^{-4} QZF) * \Delta s \quad (19)$$

In die Regression nicht einbezogen wurden die ermittelten Daten für 180°C und 750 bzw. 900 kg/m³, da diese bei längeren Presszeiten offensichtliche Festigkeitsabnahmen aufwiesen. Eine Begründung liegt in dem sich hierbei aufbauenden hohen Gasdruck, der die innere Festigkeit beim Pressenöffnen verringern kann (vgl. Abschnitt 7.3.1).

Gleichung (19) besagt, dass der Querkzugfestigkeitsverlust ΔQZF umso stärker ist, je höher das Querkzugfestigkeitsniveau liegt und je stärker nachverdichtet wird. Die lokalen Querkzugfestigkeitsverluste sind von den jeweiligen, aufgrund der Klebstoffaushärtung zu erwartenden Querkzugfestigkeiten abzuziehen, um die durch die Nachverdichtung geminderten Querkzugfestigkeiten zu erhalten. Für die Berechnung wird so vorgegangen, dass sowohl die Werte, die sich alleine aufgrund der Klebstoffaushärtung ergeben würden, als auch die Querkzugfestigkeitsverluste für den vollständigen Pressvorgang berechnet und gespeichert werden.

9.1.2 Simulation

9.1.2.1 Rohdichteprofil

In Abbildung 127 ist zunächst die Entwicklung des Rohdichteprofiles über die Plattendicke dargestellt. Für die Interpretation der Grafiken, die die Querkzugfestigkeitsentwicklung zeigen, ist die Betrachtung der Rohdichteprofilentwicklung hilfreich. Zu erkennen ist, dass die Rohdichte in den Deckschichten bereits nach wenigen Metern annähernd ihr endgültiges Niveau erreicht. Aufgrund der zwischenzeitlichen leichten Öffnung der Presse, die nach 6 m eingeleitet wird, sinkt vor allem die Mittelschichtdichte ab. Schließlich wird die Presse nach 21 m wieder geschlossen und die Matte dabei auf seine Zieldicke verdichtet. Erkennbar ist in Abbildung 127, dass die unmittelbare Mattenmitte weniger stark nachverdichtet wird als die direkt anschließenden Mattenschichten. Zwischen diesen Zwischenschichten und den hoch verdichteten Deckschichten befindet sich allerdings eine Schicht, zu der hin sich das Dichteebene nochmals verringert. Diese Schwankungen in den mittleren Mattenschichten werden zum großen Teil durch die Nachverdichtung hervorgerufen, sind aber nur unter Berücksichtigung der Vorgänge im bis dahin durchlaufenen Pressenabschnitt schlüssig zu erklären. Am Pressenende nach 28 m kommt es zu einem leichten Zurückfedern der Matte, was an der Dichteabnahme im mittleren Mattenbereich erkennbar ist.

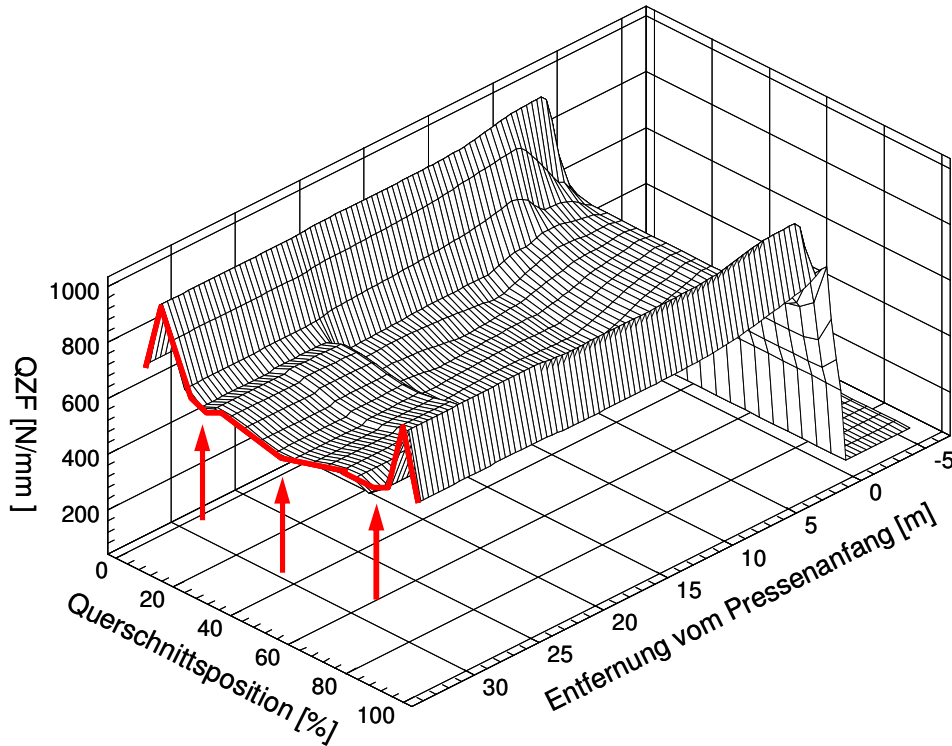


Abbildung 127: Simulierte Entwicklung des Rohdichteprofiles von MDF in einer kontinuierlichen Heißpresse mit Rohdichteminima in verschiedenen Schichten (Pfeile). Nachverdichtung hier nach 21 m.

9.1.2.2 Querzugfestigkeit

Die Entwicklung des Querzugfestigkeitsprofils über die Plattendicke ist für beide Nachverdichtungszeitpunkte in Abbildung 128 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass die Querzugfestigkeit in den äußeren Schichten erheblich früher und auch schneller ansteigt als in den mittleren Mattenschichten. Würde nur die Querzugfestigkeitsentwicklung aufgrund der Klebstoffaushärtung berechnet werden, so müssten die Werte für die einzelnen Schichten ständig steigen. In Abbildung 128 ist aber nach 21 bzw. 24 m für die mittleren Mattenschichten eine Abnahme der Querzugfestigkeiten erkennbar, welche durch den Nachverdichtungsschritt hervorgerufen wird.

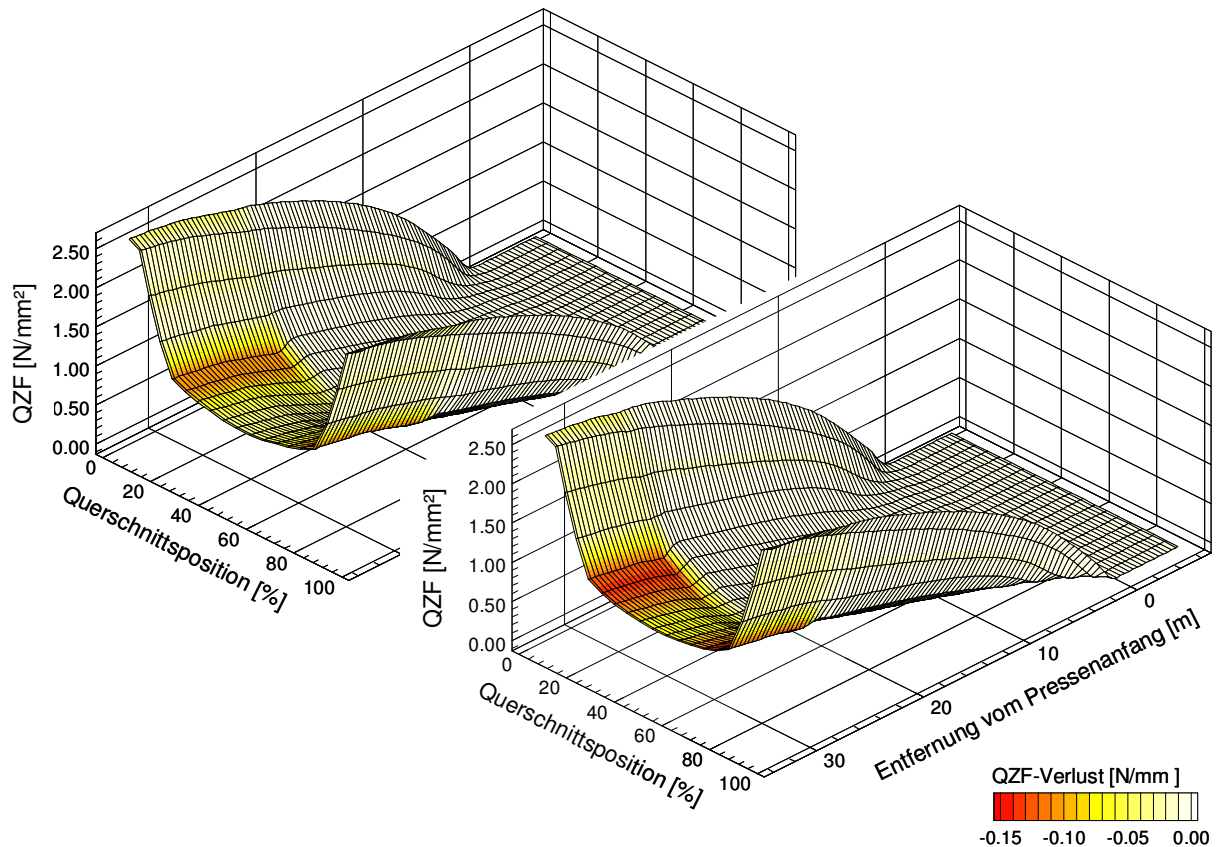


Abbildung 128: Simulierte Entwicklung des Querszugfestigkeitsprofils. Nachverdichtung nach 21 m (links) bzw. 24 m (rechts).

Darüber hinaus gibt die Konturfarbe (gelb bis rot) an, um wie viel die lokale Querszugfestigkeit durch eine Nachverdichtung reduziert wird. Dabei wird zum einen erkennbar, dass in beiden hier betrachteten Fällen die Abnahme der Querszugfestigkeit in den Zwischenschichten am stärksten ist. Außerdem zeigt sich, dass die Minderung der Querszugfestigkeit bei einer späteren Nachverdichtung (nach 24 m) ein größeres Ausmaß hat als bei einer Nachverdichtung nach 21 m.

In Abbildung 129 ist der simulierte Querszugfestigkeitsverlust über die Plattendicke für die beiden Szenarien nochmals verdeutlicht. Neben dem bereits aufgezeigten Muster, das durch den Nachverdichtungsschritt entsteht, ist in der hier gewählten Darstellungsform erkennbar, dass es bereits vorher zu einer Reduzierung der Querszugfestigkeit kommen kann. Diese Abnahmen ergeben sich aus der von außen nach innen fortschreitenden Plastifizierung der Matte und der damit einhergehenden Verdichtung einzelner Mattenschichten. Diese Querszugfestigkeitsverluste vor dem Nachverdichtungsschritt allerdings sehr gering.

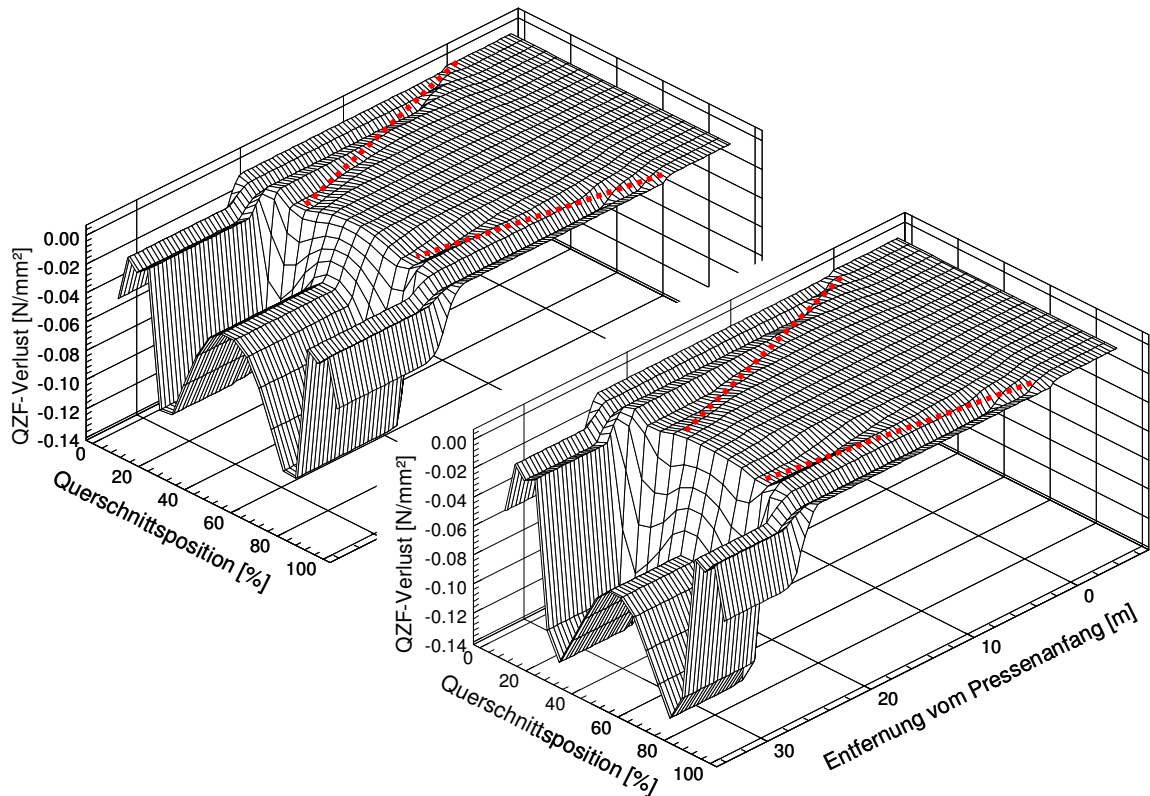


Abbildung 129: Simulierte Minderung der Querkzugfestigkeit aufgrund einer Nachverdichtung der Matte nach 21 m (links) bzw. 24 m (rechts). Die gestrichelten Linien stellen die Abnahme der Querkzugfestigkeit aufgrund der fortschreitenden Plastifizierung dar.

In den beiden hier betrachteten Szenarien beträgt der Querkzugfestigkeitsverlust durch die Nachverdichtung maximal $0,14 \text{ N/mm}^2$. Unter veränderten Rahmenbedingungen ließen sich jedoch noch deutlichere Querkzugfestigkeitsminderungen erreichen. Hierbei kann die Querkzugfestigkeit in den Zwischenschichten so weit vermindert werden, dass diese Schichten zur Schwachstelle der gesamten Probe werden, auch wenn hier nicht das Dichteminimum liegt. Die Simulation bestätigt damit die in den Grundversuchen (vgl. Abschnitt 6.1.1.2) gemachten Beobachtung an den Bruchflächen von Querkzugproben, bei denen die Bruchfläche nicht notgedrungen mit dem Rohdichteminimum zusammenfiel.

Bisher wurde im Rahmen der hier dargestellten Simulation ausschließlich auf die Einflüsse aus Nachverdichtungen eingegangen, nicht aber auf Entlastungen. Die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Experimente erscheinen zwar auch geeignet für die Ermittlung von Entlastungseinflüssen, hierzu wäre aber das den Experimenten zugrunde liegende Pressprogramm zu modifizieren. Um dennoch eine Aussage über eventuelle Entlastungseinflüsse auf die Querkzugfestigkeit machen zu können, wurde in einer Reihe weiterer Simulationsläufe (hier nicht dargestellt) davon ausgegangen, dass die Querkzugfestigkeitsminderung bei einer Entlastung den gleichen Wert annimmt wie eine entsprechend starke Nachverdichtung. Es zeigte sich bei dieser Betrachtung, dass die aufsummierten Querkzugfestigkeitsminderungen aufgrund

von Entlastungen relativ gering ausfallen (mit Ausnahme des "springback" am Pressenauslauf). Dieses liegt darin begründet, dass Entlastungsschritte in der Regel wirksam werden, wenn der Klebstoff noch nicht oder nur ansatzweise Festigkeit (fortschreitende Aushärtung) entwickelt hat. Entsprechend Gleichung 19 fallen dadurch die Querkzugfestigkeitsverluste gering aus.

9.2 Schlussfolgerung

Mit der hier beschriebenen Erweiterung des Moduls Adhäsion wurde eine Verbesserung der Vorhersagequalität des dargestellten Simulationsprogramms erreicht. Die durchgeführten Versuche zur Erweiterung lassen nun erstmals auch die Simulation der Auswirkung eines Nachverdichtungsschrittes auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix zu. Die Simulation zeigt, dass eine spätere und höhere Nachverdichtung zu einer Verringerung der Querkzugfestigkeiten führt, wobei die stärkste Beeinträchtigung auch in einer Zwischenschicht stattfinden kann, die nicht zwingend die geringste Rohdichte über den Dickenquerschnitt aufweisen muss.

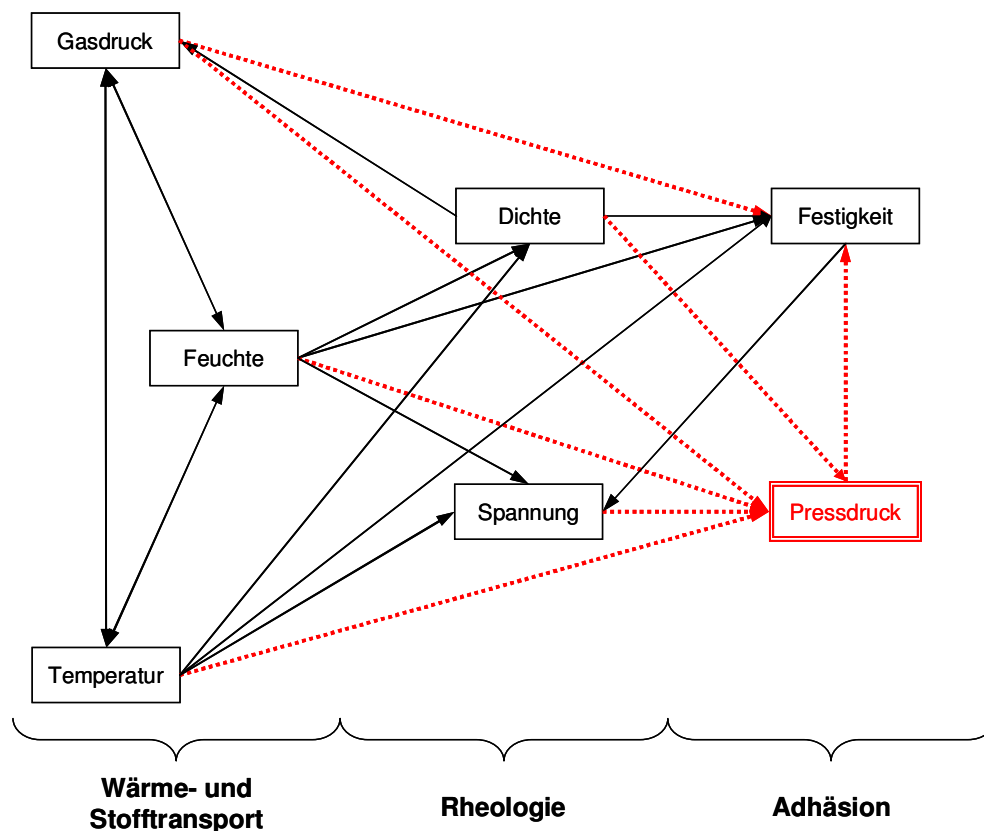


Abbildung 130: Erweitertes Modell der grundlegenden Mechanismen während des Heißpressprozesses (verändert nach Humphrey 1994). Gestrichelt dargestellt sind die zusätzlichen Wechselwirkungen mit dem neuen Modul Pressdruck.

Diese Feststellung machte bereits Humphrey (1990), wobei er nicht die Rohdichte, sondern nur die Temperatur und den Feuchtegehalt der Matte zur Erklärung heranzog. Sein simulierter Quersugfestigkeitsverlauf über den Dickenquerschnitt weist die geringsten Werte ebenfalls in Mattenschichten auf, die neben der Mattenmittelschicht liegen.

Die Ergebnisse der Simulation sowie die Aussagen der Versuche im Rahmen dieser Arbeit führen zu einer Erweiterung des Modells von Humphrey (1994). In dem Modell, das die grundlegenden Mechanismen und ihre Wechselwirkung während des Heißpressprozesses aufzeigt, fehlt der Einfluss des Pressdruckes als Bestandteil des Moduls Adhäsion. Wie im Laufe der vorliegenden Arbeit hinreichend gezeigt wurde, steht der Pressdruck im gegenseitigen Einfluss mit verschiedenen Abläufen wie Wärme- und Stofftransport, Rheologie, der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix und vor allem der mechanischen Festigkeit. Der zu dem bestehenden Modell hinzugefügte Einflussfaktor Pressdruck und die Wechselwirkungen mit den anderen Modulen sind in Abbildung 130 ersichtlich.

10 Maßnahmenkatalog

10.1 Ergebnisse und Diskussion

Die Beschreibung des Versuchsablaufs aus Abschnitt 5.3.5 zu entnehmen.

Die in den folgenden Darstellungen aufgezeigten Änderungen der Einflussgrößen sind durch Pfeile gekennzeichnet. Die Änderungen sind als Abweichungen von einer Prozessparameterzusammensetzung zu verstehen, die zu einem Rohdichteprofil mit hohen Deckschichtrohdsichten und niedrigeren Mittelschichtrohdsichten führen würden. Die Bedeutung der Veränderungen (Pfeile) innerhalb der jeweils dargestellten Einflussgröße ist aus Tabelle 26 ersichtlich.

Tabelle 26: Bedeutung der Pfeile

Veränderung		Bedeutung
Horizontal	+	später, langsamer
	-	früher, schneller
Vertikal	+	höher
	-	tiefer

Die direkten Auswirkungen der Pressdruckänderungen auf die Ausbildung des Rohdichteprofiles sind jeweils für die beiden zu vergleichenden Fälle zusätzlich grafisch dargestellt.

10.1.1 Schließgeschwindigkeit

Die Auswertung des Einflusses der Schließgeschwindigkeit ist in Abbildung 133 dargestellt. Die Beschleunigung der Schließgeschwindigkeit (-) bewirkt über die damit erhöhten Presswiderstände der Matte, bzw. den aufzubringenden Pressdruck eine Erhöhung der Deckschichtrohdsichten und damit bei gleich bleibender Plattendicke eine steilere und dünnere Flanke (Strickler 1959, v. Bismarck 1974). Die Erhöhung des Mattenwiderstandes gegenüber einer Verdichtung bei einer Erhöhung der Schließgeschwindigkeit bestätigt v. Haas (2000). Der Zusammenhang des aufzubringenden Pressdruckes und des hieraus abgeleiteten Rohdichteprofiles ist in Abbildung 131 dargestellt.

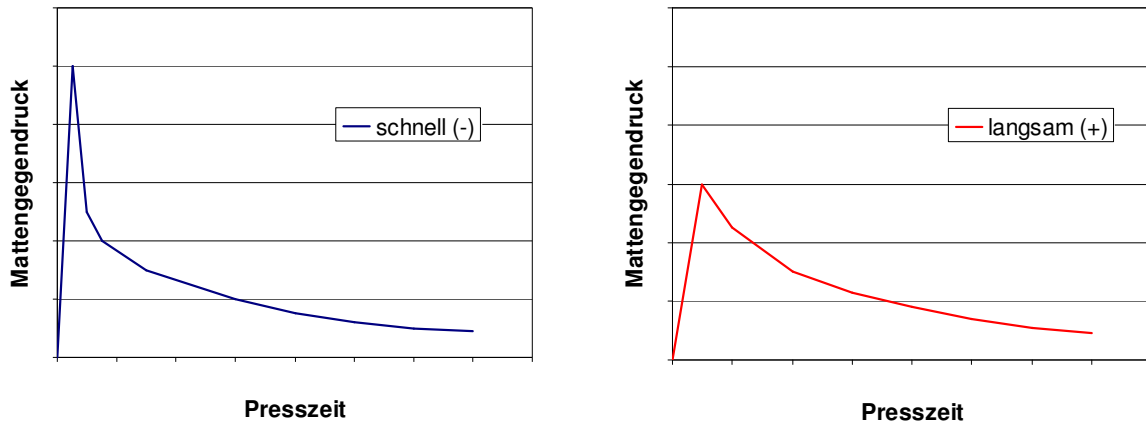


Abbildung 131: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geänderter Schließgeschwindigkeit.

Eine Steigerung des Pressdruckes mit Erhöhung der Schließgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung der Grenzfläche zwischen Heizplatte und Holzpartikel (Gefahrt 1977) sowie zwischen den einzelnen Holzpartikeln selbst, was wiederum zu einer verbesserten Wärmeübertragung innerhalb der Matte mittels Konduktion (Strickler 1959) führt. Hierdurch und zusätzlich durch den hiermit ebenfalls verstärkten Dampfstoßeffect kommt es zu einer schnelleren Erwärmung der Mattenmitte auf 100°C, wodurch eine höhere Querkzugfestigkeit aufgrund der verbesserten Klebstoffhärtung erlangt werden kann. Nach Bismarck (1974) besteht jedoch eine Schließgeschwindigkeit, bei der es ab dem Erreichen eines Grenzwertes zu keinem weiteren wesentlichen Anstieg des Verhältnisses von Mittelschicht- und Deckschichtrohichte kommt, obwohl der Pressdruck weiter ansteigt (Abbildung 132).

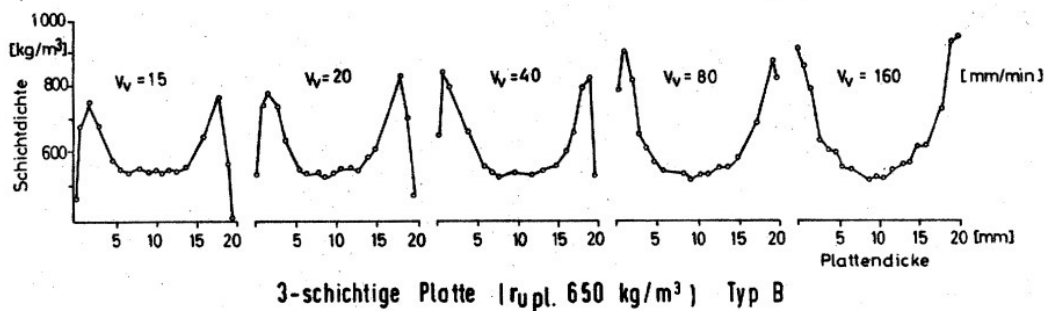
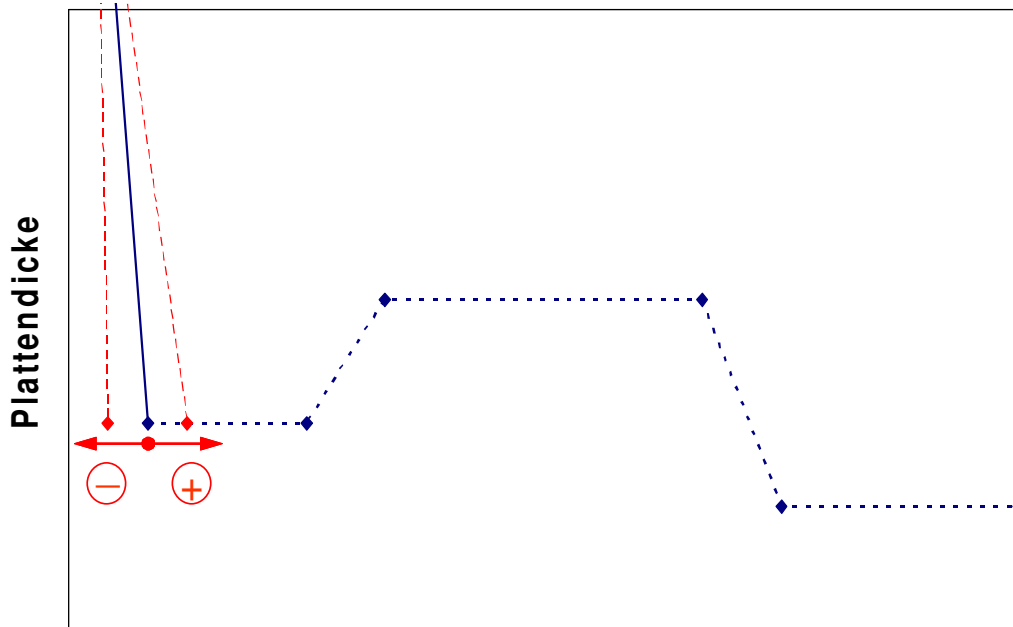


Abbildung 132: Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf das Rohdichteprofil (Bismarck v. 1974).

Schließgeschwindigkeit



Pressenlänge

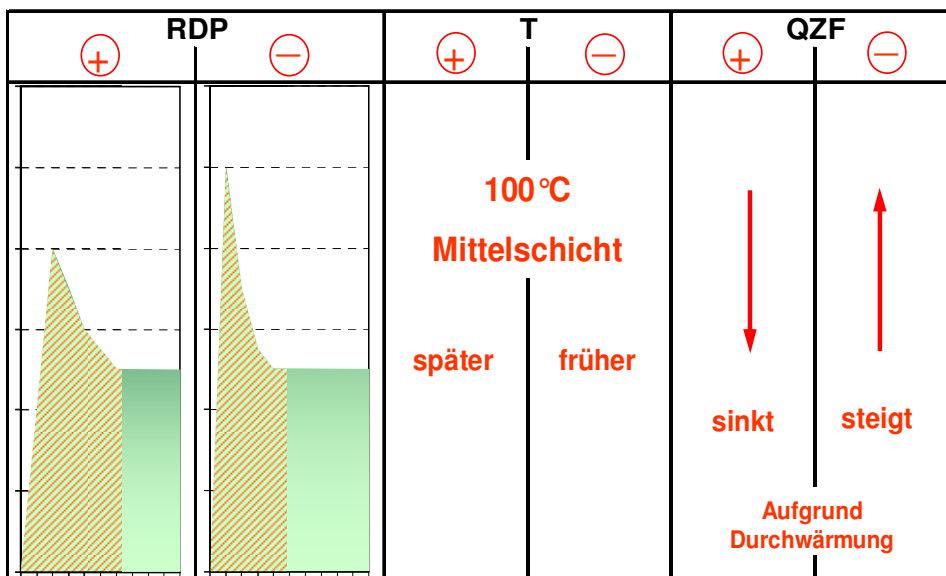


Abbildung 133: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Schließgeschwindigkeit.

10.1.2 Niveau Erstverdichtung

Die Auswertung des Einflusses des Niveaus der Erstverdichtung ist in Abbildung 135 dargestellt. Ein tieferes Niveau der Erstverdichtung (-) führt aufgrund der erhöhten Pressdrücke zu einer Erhöhung der Deckschichtrohndichten mit einer einhergehenden Verringerung der Mittelschichtrohndichten (Thoemen und Tobisch 2005), was aus Abbildung 134 ersichtlich wird.

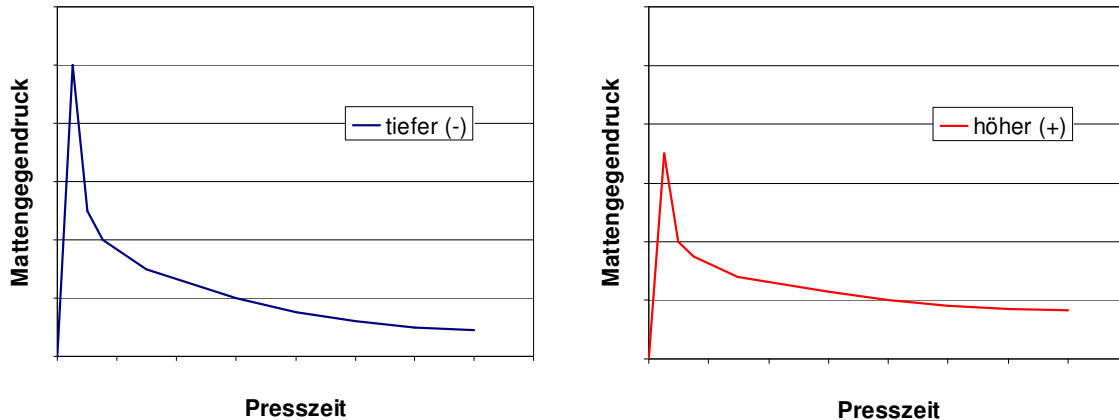


Abbildung 134: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Erstverdichtungs niveau.

Die Mechanismen, die bereits bei der Schließgeschwindigkeit zu einem verbesserten Wärmeeintrag in die Matte führten, greifen auch in diesem Fall. Die erwähnten vergrößerten Kontaktflächen führen auch bei geringerem Erstverdichtungs niveau zu einer verstärkten konduktiven Wärmeleitung. Des Weiteren bewirkt der steilere Temperaturgradient von der Deckschicht zur Mittelschicht, der sich aufgrund der erhöhten Verdichtung ausbildet, eine Beschleunigung des Dampfstromes (Dampfstoß) zu Beginn des Pressvorgangs. Dies wird dadurch unterstützt, dass die höheren Pressdrücke zu einer Abnahme der Mittelschichtrohndichte und damit zu einer verbesserten Durchlässigkeit für das heiße Gas führen, die die Mittelschichttemperatur schneller als bei einem hohen Erstverdichtungs niveau ansteigen lassen. Die niedrigeren Mittelschichtrohndichten führen letztendlich zu einer sinkenden Querszugfestigkeit.

Die gemachten Aussagen und Beobachtungen stehen im Widerspruch zu diversen Literaturstellen, die jedoch den Pressprozess im Labormaßstab untersuchten. Hierbei führt ein höheres Erstverdichtungs niveau zu einer schnelleren Durchwärmung der Matte. Jedoch sind die Verhältnisse innerhalb einer takt-verpressten Matte im Labormaßstab unterschiedlich zu denen in einer industriellen und kontinuierlich verpressten Holzwerkstoffmatte. Für den letzteren Fall sind aufgrund der größeren Mattenabmaße (Breite x Länge) die Werte für die Permeabilität (Humphrey und Bolten 1989) und damit des Gasdruckes und der Temperatur sowie des Feuchtigkeitshaushaltes nicht mit Labormatten vergleichbar. Die mit steigenden Mattenabmaßen einhergehende Zunahme des Weges für das Gas von der Mattenmitte zur Mattenkante führt zu beträchtlich erhöhten Gasdrücken (Bolton und Humphrey 1989).

Niveau Erstverdichtung

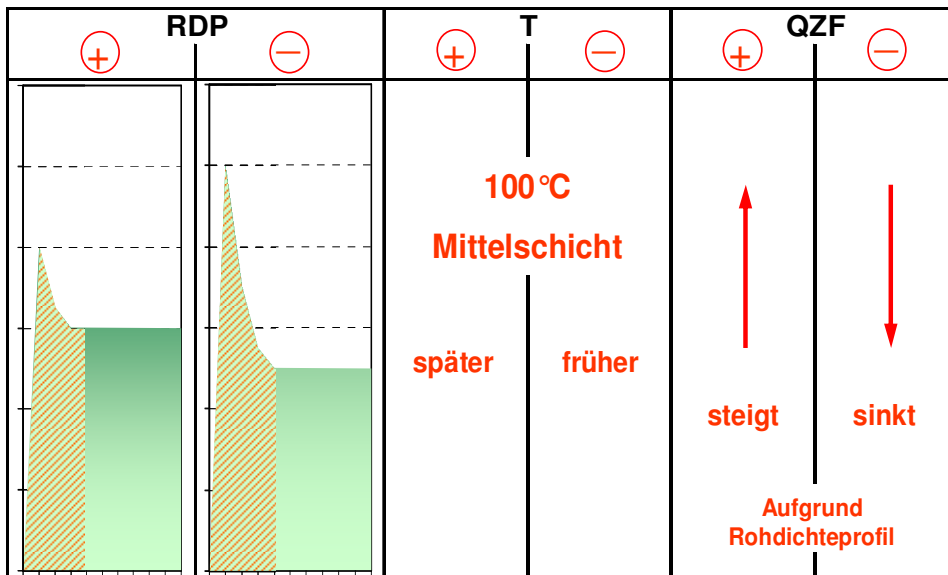
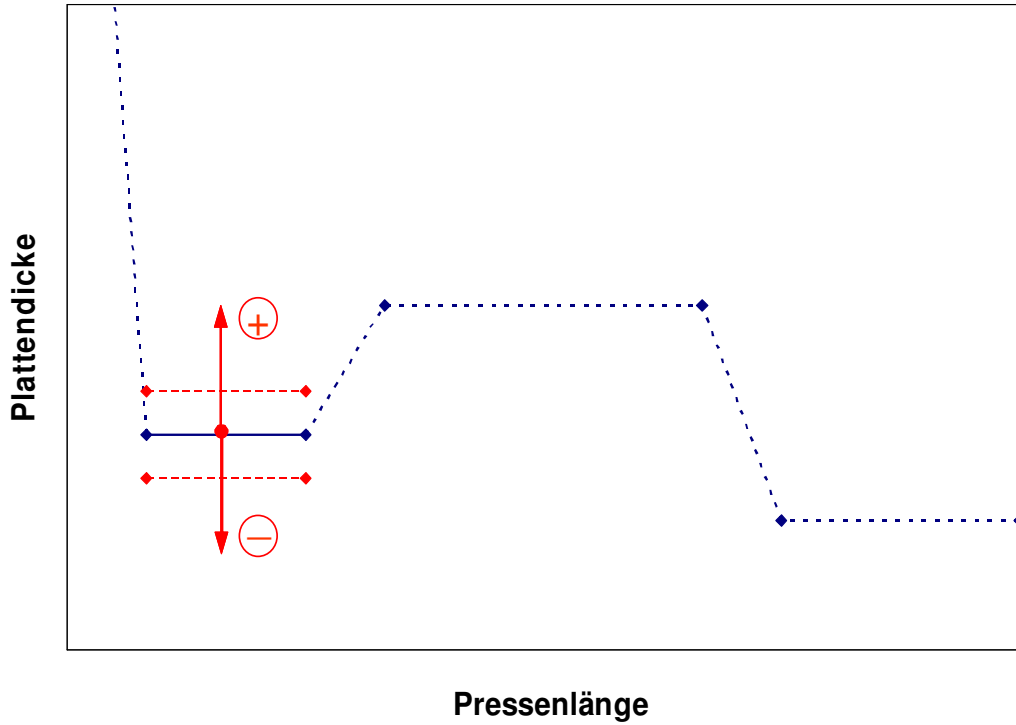


Abbildung 135: Maßnahmenkatalog mit Einflussgröße Niveau Erstverdichtung.

10.1.3 Entspannungszeitpunkt

Die Auswertung des Einflusses des Entspannungszeitpunktes ist in Abbildung 137 dargestellt. Ein späterer Entspannungszeitpunkt (+) bewirkt, dass der spezifische Pressdruck innerhalb der Matte länger auf einem höheren Niveau gehalten wird (Abbildung 136).

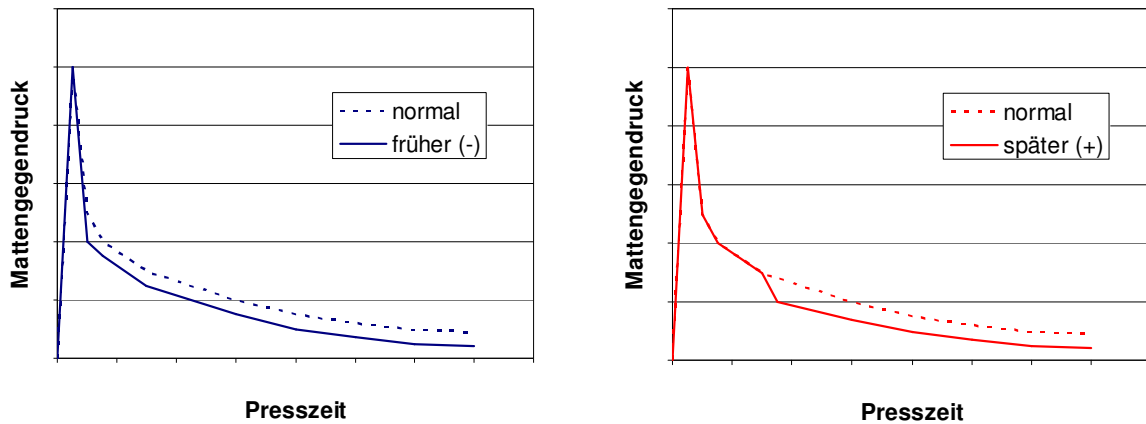


Abbildung 136: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Entspannungszeitpunkt.

Hierdurch wird die Rohdichte in den Übergangszonen angehoben, was zu einer breiteren Flanke (Camm und Quilter 2001) und im Extremfall zu einem Rohdichtezwischenmaximum führen kann.

Durch die spätere Entspannung bleibt zudem die Mattenrohdsichte länger hoch, was durch die verschlechterte Permeabilität zu einer verlangsamten Mattenmittenerwärmung führt. Die Temperaturanstiegsverzögerung sowie die durch das Zwischenmaximum im Rohdichteprofil verringerte Mattenmittenrohdsichte bewirken eine Verschlechterung der Quersugfestigkeiten.

Entspannungszeitpunkt

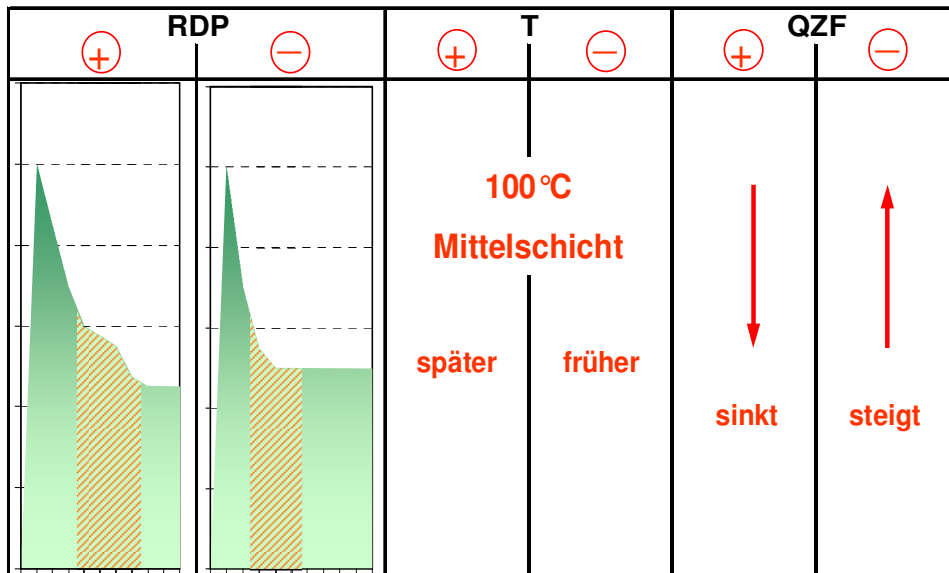
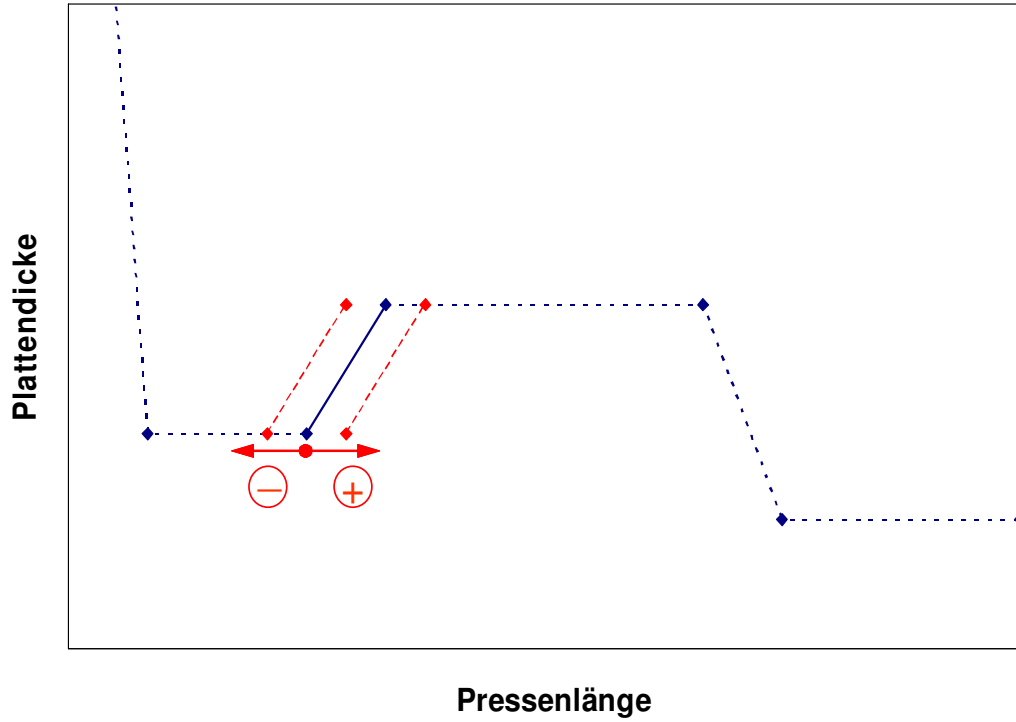


Abbildung 137: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Entspannungszeitpunkt.

10.1.4 Niveau Entspannung

Die Auswertung des Einflusses des Niveaus der Entspannung ist in Abbildung 139 dargestellt. Eine geringe Mattenentspannung (-) während der Entgasungsphase bewirkt, dass der spezifische Pressdruck innerhalb der Matte länger auf einem höheren Niveau gehalten wird, was im Zusammenspiel mit der Härtung des Klebstoffes zu einem Zwischenmaximum des Rohdichteprofiles bzw. zu einer breiteren Flanke führen kann (Abbildung 138). Eine stärkere Entspannung der Matte (+) sollte im Extremfall (hier nicht dargestellt) sogar zu einer Verringerung der Rohdichte im Übergangsbereich (schraffierte Fläche in Abbildung 138) führen, die in der Praxis auch "Schweineohren" genannt werden.

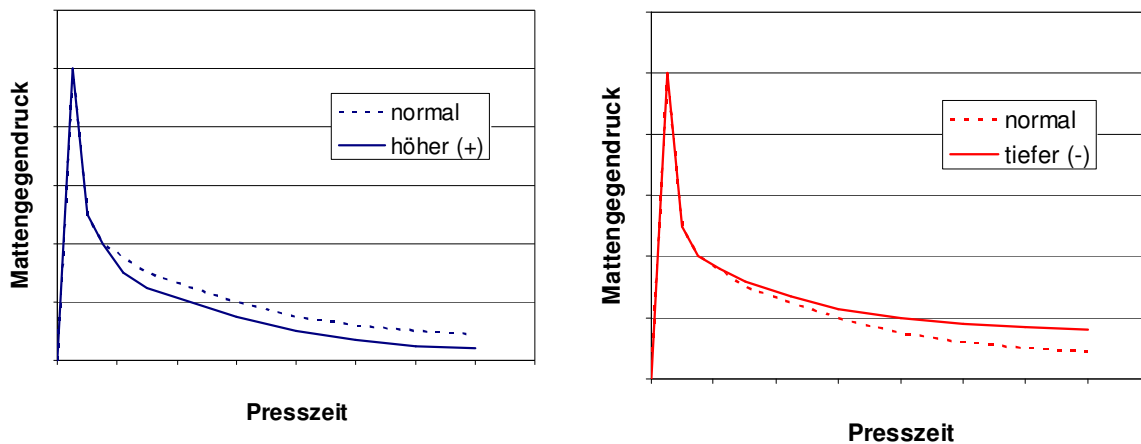


Abbildung 138: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Entspannungsniveau.

Durch eine geringere Entgasung kommt es zu einer Verzögerung der Mattenmittenerwärmung. Zum einen kann die Verringerung des Entspannungsniveaus zu einer Erhöhung der Querkzugfestigkeiten, im Gegensatz zu einer zu starken Entspannung, durch den Erhalt der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix führen [Fall a)], zum anderen wird bei einer zu geringen Entgasung die Querkzugfestigkeit aufgrund der geringeren Permeabilität und der durch das Zwischenmaximum letztendlich verringerten Mattenmittenrohdsichte erniedrigt [Fall b)].

Niveau Entspannung

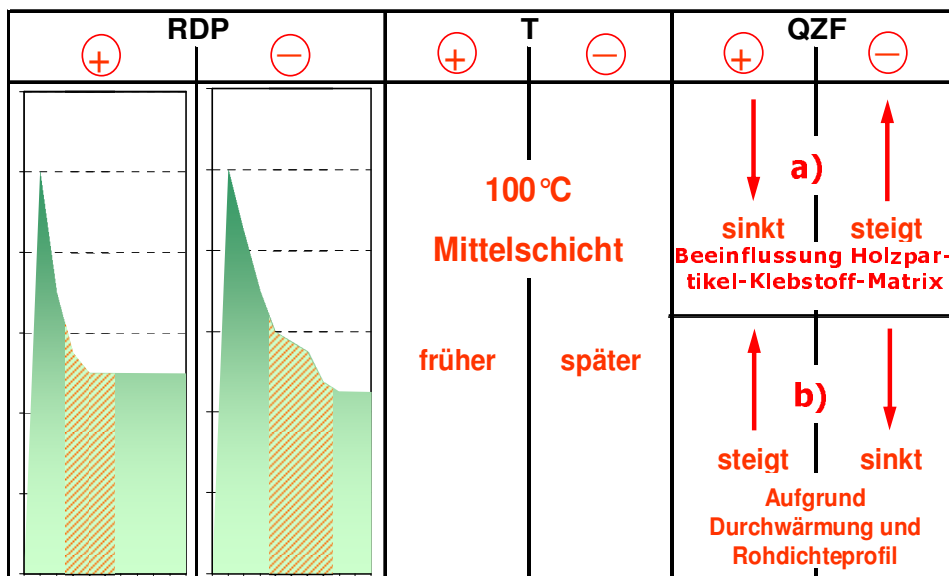
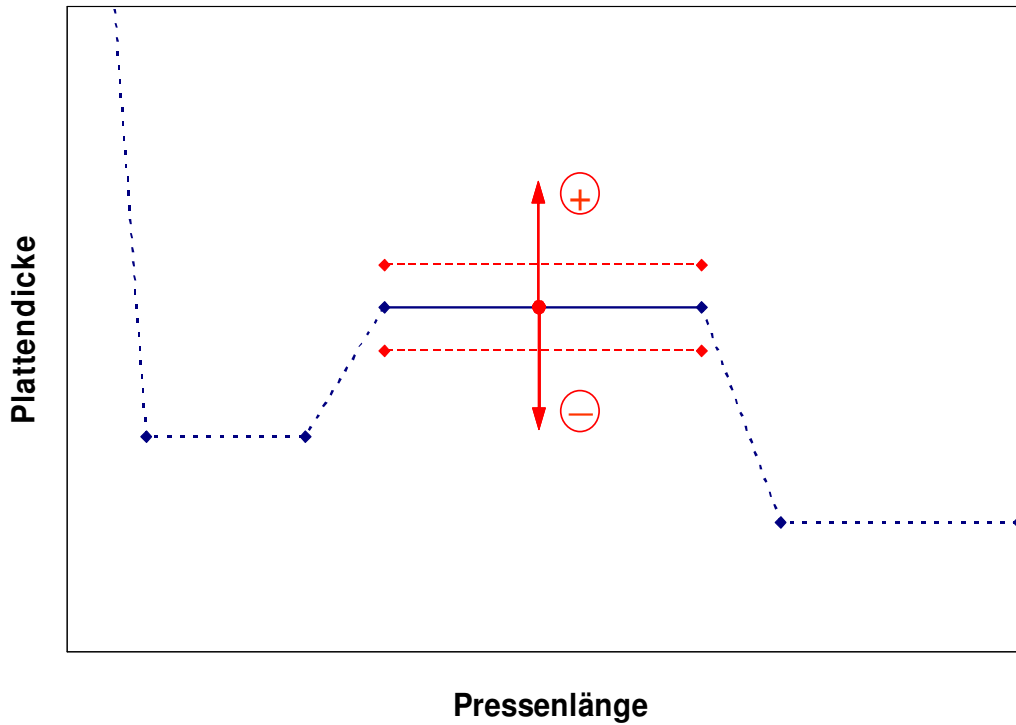


Abbildung 139: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Niveau Entspannung.

10.1.5 Kalibrierungszeitpunkt

Die Auswertung des Einflusses des Kalibrierungszeitpunktes ist in Abbildung 141 dargestellt. Durch einen zu frühen Kalibrierungszeitpunkt (-) erhöht sich der Mattengegendruck zu einem Zeitpunkt, bei dem durch die noch geringe Plastifizierung der Mattenmitte die besser plastifizierte Zwischenschicht in ihrer Rohdichte erhöht wird (Abbildung 140).

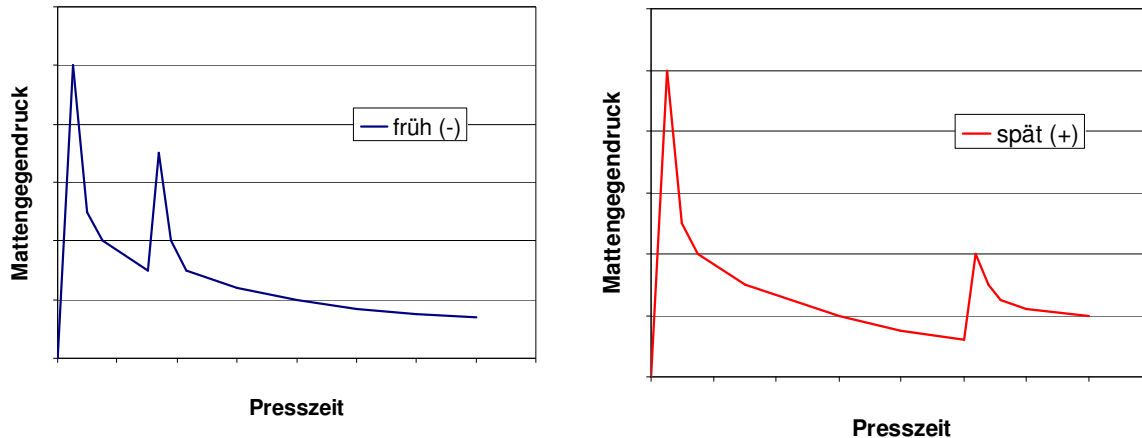
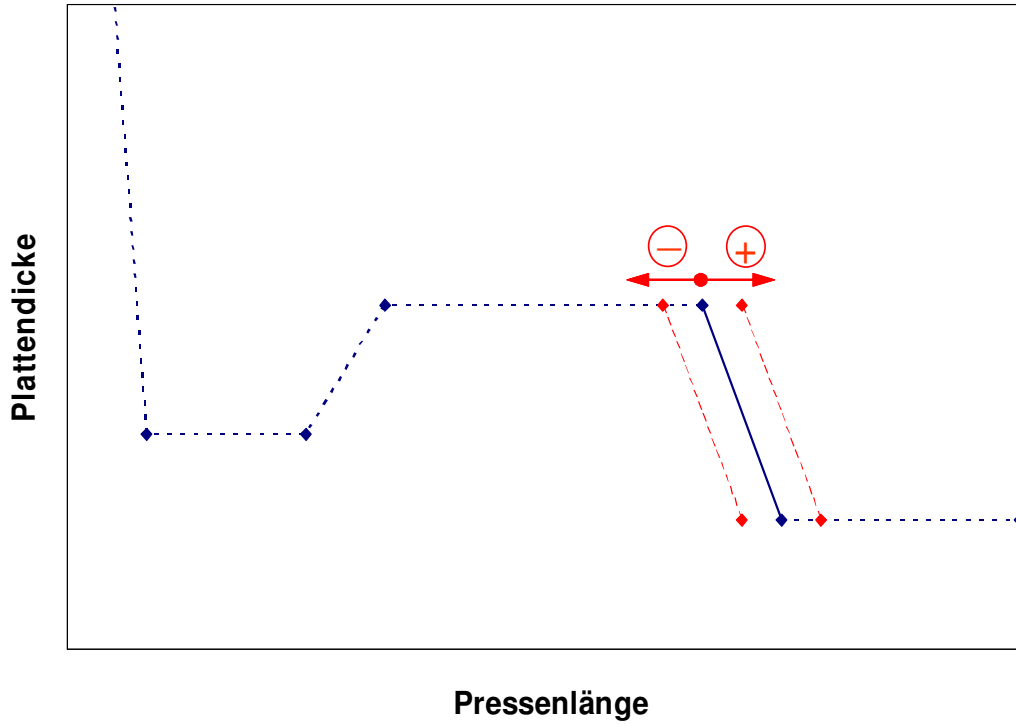


Abbildung 140: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Kalibrierungszeitpunkt.

Dies ist gleichbedeutend mit einer Kalibrierung bei einer zu hohen Vorschubgeschwindigkeit, bei der die Verdichtung auf eine unzureichend plastifizierte Mittelschicht trifft und zu einer Anhebung der Zwischenschichten führt (Kamm und Quilter 2001). Eine zu späte Kalibrierung (+) hat eine Anhebung der Mattenmittenrohichte zur Folge, da die restliche Matte bereits zu trocken und zu weit ausgehärtet und damit weniger verformbar ist, und letztendlich ebenfalls zu einer Anhebung des Mattengegendruckes zu einem nicht vorteilhaften Zeitpunkt führt.

Die frühe Kalibrierung (-) lässt zudem die Mattenendtemperatur ansteigen (Thoemen und Tobisch 2005), da durch die frühere Verdichtung die Konduktion besser wirken kann. Obwohl die Mattenendtemperatur steigt, gibt es einen idealen Kalibrierzeitpunkt, bei dem die höchsten Querzüge erreicht werden.

Kalibrierungszeitpunkt



RDP		T		QZF	
+	-	+	-	+	-
		Endtemperatur		↓	
		↓	↑	↓	↓
		sinkt	steigt	sinkt	sinkt
Idealer Kalibrierzeitpunkt vorhanden					

Abbildung 141: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Kalibrierungszeitpunkt.

10.2 Schlussfolgerung

Bei den hier dargestellten Auswirkungen von Druckänderungen aufgrund von Verdichtungen und Entspannungen während des Heißpressprozesses von Holzwerkstoffen auf das Rohdichteprofil, den Temperaturverlauf innerhalb der Matte und die entstehende Quersugfestigkeit zeigte sich ein gravierender Einfluss auf die Prozesse (Wärme- und Stofftransport), die Auswirkungen auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix hervorriefen. Die Auswertungen stellten ferner dar, dass selbst ohne weitere Einflussgrößen wie z.B. Vorschubgeschwindigkeit, Press-temperatur, Mattenfeuchte, eine Beeinflussung der Matteneigenschaften erzielt wird. Die Darstellung dieser Einflussgrößen auf das Rohdichteprofil ist jedoch bei Thole (2001) sowie Camm und Quilter (2001) ersichtlich, wobei die hieraus entstehende Beeinflussung stärker ausfällt, als in dem hier vorgestellten Maßnahmenkatalog.

Die dargestellten Auswirkungen zeigen somit nur einen Ausschnitt der möglichen, und erheben in keiner Weise den Anspruch der Vollständigkeit. Dennoch geben die Darstellungen einen zu den bereits bekannten Einflussgrößen zusätzlichen Einblick in die Beeinflussbarkeit der Matteneigenschaften während des Heißpressprozesses. Es wird weiterhin ersichtlich, wie komplex die Mechanismen während des Heißpressprozesses sind und die angeführten Einflussgrößen jeweils ein Mosaiksteinchen im Gesamtbild abgeben.

Camm und Quilter berichten über ein bereits bestehenden Maßnahmenkatalog zur Vermeidung ungewollter Rohdichteprofile. Hierbei ist der Fokus jedoch auf andere als die hier betrachteten Pressparameter wie Plattenfeuchtigkeit und Vorschub gerichtet (Abbildung 142).

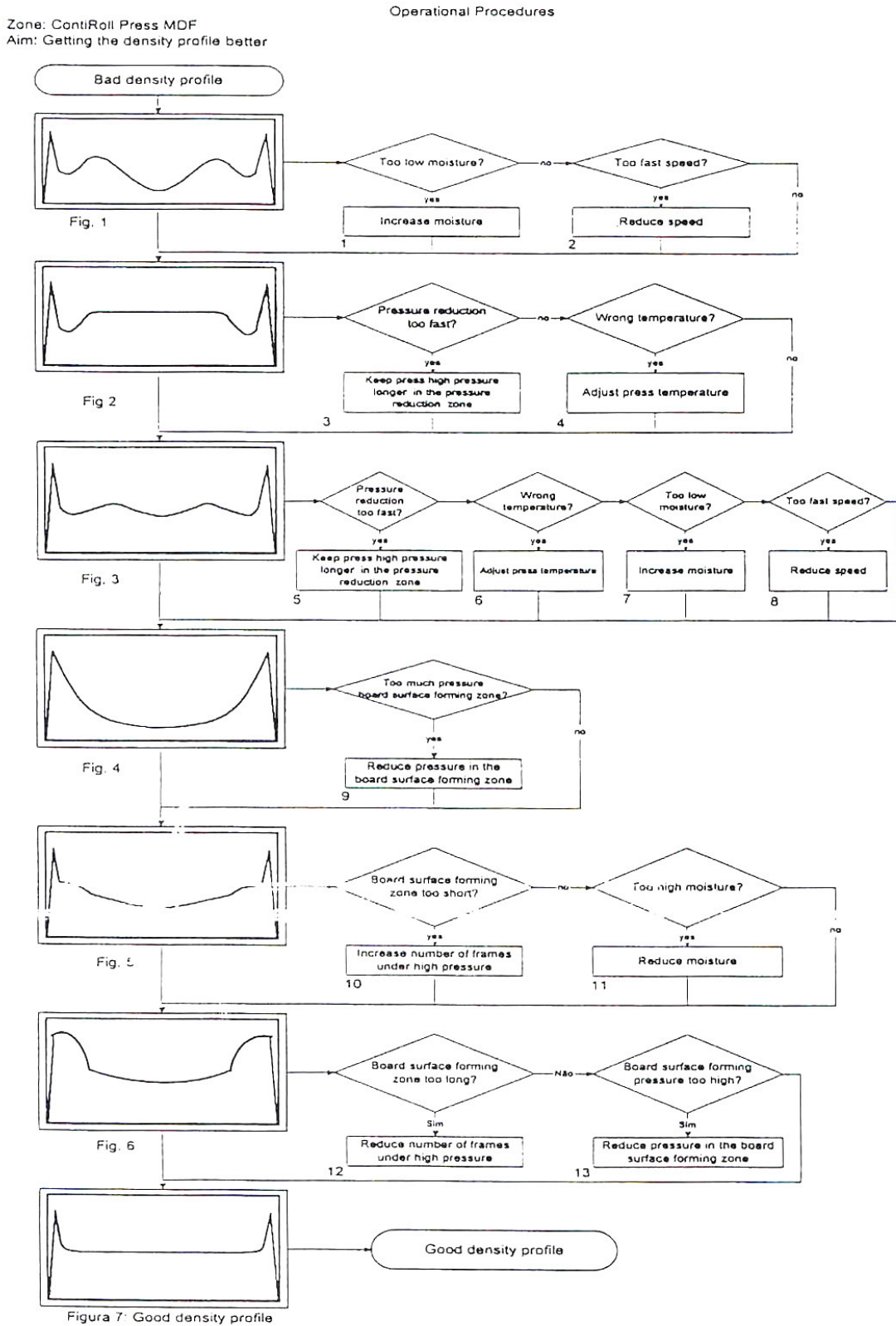


Abbildung 142: Auswirkung auf das Rohdichteprofil während des kontinuierlichen Heißpressprozesses (Nach Fa. Siempelkamp in Camm und Quilter 2001).

11 Folgerungen für die Praxis

Mit Messungen mit einem neu entwickelten Druckmesssystem sowie einem Distanzsensor an kontinuierlichen Heißpressen im industriellen Herstellungsprozess wiesen Schwingungen der Distanz, des spezifischen Druckes und des Gasdruckes nach, die durch elastische Verformungen der Heizplatten zwischen den Pressrahmen zustande kamen. Die Ausprägung dieser Schwingungen hing wesentlich vom Rahmenabstand ab und variierte deshalb in Abhängigkeit von Presszone und Pressentyp. Die stärksten Schwingungen traten in der Regel in der Kalibrierzone auf; der Pressentyp mit dem größten Rahmenabstand zeigte die stärksten Schwingungen. Die Nachstellung der gemessenen Industriewerte in Laborversuchen lassen vermuten, dass durch die bei Dünnpfatten wesentlich schnellere Produktionsgeschwindigkeit und damit erhöhte Frequenz, negative Auswirkungen auf die Ausbildung der Platteneigenschaften zu erwarten sind. Zusätzlich nähme bei höher verdichteten Dünnpfatten ($>900 \text{ kg/m}^3$) mit einem insgesamt höheren spezifischen Druckniveau während des Heißpressprozesses, die Amplitude der Schwingungen zu. Die Labormessungen bestätigten ferner, dass Schwingungen in der Kalibrierzone einen stärkeren Effekt auf die Ausbildung der Quersugfestigkeit haben als in der Hochdruck und Niederdruckzone. Aus diesem Grund sollte darauf hingearbeitet werden, in dem Pressenabschnitt, in dem sich maßgeblich die Quersugfestigkeit der Platte ausbildet, durch konstruktive Lösungen ein Schwingen der Distanz bzw. des spezifischen Druckes zu vermeiden. Die regelmäßigen Schwankungen ließen sich über einen kleineren Rahmenabstand oder eine dickere Heizplatte minimieren. Eine geänderte Aufteilung der Pressrahmen erscheint ebenso sinnvoll, zumindest bei Pressenneubauten. Bei bestehenden Pressen, die bereits im Betrieb sind, sollte darauf hingearbeitet werden, die Pressdrücke insbesondere im Kalibrierbereich zu minimieren. Hierdurch ließen sich, nach Auswertung der Laborversuche, bei gleich bleibenden Prozessvariablen die Quersugfestigkeitseigenschaften des herzustellenden Produktes verbessern oder aber bei einem gleich bleibenden Festigkeitsniveau Ressourcen in Form von Holz oder Klebstoff einsparen bzw. die Produktionsgeschwindigkeit erhöhen.

Weiterhin zeigt sich, dass mit Gasdruckmessungen eine überschlägigen Berechnung der verursachenden Distanzänderungen zu erstellen ist. Somit wäre es möglich mit Gasdruckmessungen an kontinuierlichen Heißpressen auf Distanzänderungen aufgrund der Rahmenkonstruktion zu schließen, auch wenn nicht zusätzlich mit dem hier in dieser Arbeit vorgestellten spezifischen Druck- und besonders Distanzsensor gemessen werden konnte.

Zusätzlich angestellte Laborversuche zeigen, dass Pressprogramm-bedingte Druckänderungen aufgrund des Entlastungs- bzw. Verdichtungszeitpunktes sowie des Niveaus der Entlastung bzw. Verdichtung während des Heißpressprozesses einen signifikanten Einfluss auf die Quersugfestigkeit von Holzwerkstoffen haben. Für die Herstellung von Holzwerkstoffen folgert hieraus, dass starke und zu späte Be- und Entlastungen während des Prozesses vermieden werden sollten, um eine maximale Ausbildung der Plattenfestigkeiten zu erreichen. Die resultierenden Auswirkungen auf die Ausbildung der Platteneigenschaften und hier insbe-

sondere der Querkzugfestigkeit stellt sich als Superposition des Einflusses des Pressprogrammes und der Rahmenkonstruktion dar.

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen wiesen nach, dass die Auswirkungen von Druckschwankungen auf die Querkzugfestigkeit der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bei Holzwerkstoffen aus gröberem Holzpartikeln (hier Spanplatten) stärker als bei Holzwerkstoffen aus feinen Holzpartikeln (hier Faserplatten) sind. Es lässt sich mutmaßen, dass es bei gröberem Partikeln eher zu einer Beeinflussung des Klebstoffes und bei feineren Partikeln eher zu einer Beeinträchtigung des Holzmaterials kommt, da Extraktionsversuche keinen Unterschied beim Vernetzungsgrad des Klebstoffes (bzw. der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix) bei Faserplatten aufgrund von Druckänderungen aufzeigten. Die in den Industrieversuchen gemessenen Druck- und Distanzschwingungen sollten daher gerade bei Holzwerkstoffen aus gröberem Material, wie z. B. Späne und Strands, zu schwerwiegenderen Auswirkungen auf die mechanischen Plattenqualitäten führen.

Wie im Laufe der vorliegenden Arbeit hinreichend gezeigt wurde, steht der Pressdruck im gegenseitigen Einfluss mit verschiedenen Abläufen wie Wärme- und Stofftransport, Rheologie, der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix und vor allem der mechanischen Festigkeit. Druckänderungen sollte somit, bezüglich ihres Einflusses auf die mechanischen Festigkeiten von Holzwerkstoffen, eine hohe Aufmerksamkeit entgegengebracht werden. Es muss eine Abwägung des Druckeinflusses auf das Rohdichteprofil und die Ausbildung der mechanischen Festigkeiten stattfinden, um einen Kompromiss zwischen diesen beiden produktionsrelevanten Faktoren für die Holzwerkstoffproduktion zu erlangen.

12 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss von anlagen-, wie auch steuerungsbedingten Be- und Entlastungsphasen in kontinuierlich arbeitenden Heißpressen auf die Ausbildung von Platteneigenschaften erfasst und untersucht. Für die Aufnahme der durch diese Phasen in der zu verpressenden Matte hervorgerufenen Druckschwankungen wurde ein Druckmesssystem entwickelt, mit dem erstmalig der unmittelbar auf die Matte wirkende Pressdruck in einer kontinuierlich arbeitenden Heißpresse messbar war. Ferner wurden ein Prototyp eines Distanzsensors, der den Abstand zwischen den Stahlbändern misst, sowie ein Messsystem (PressMAN[®]), das den Mattengasdruck und die Mattentemperatur aufnehmen kann, innerhalb der in der Industrie durchgeführten Messungen eingesetzt. Die Industriemessungen fanden an drei unterschiedlichen Pressentypen (CPS, ContiRoll, ContiPress) statt, wobei Schwingungen der Stahlbanddistanz, des spezifischen Druckes und des Gasdruckes aufgrund der Rahmenbauweise der kontinuierlichen Heißpressen nachgewiesen werden konnten. Die aufgezeichneten Schwingungen stellten sich im hinteren Pressenbereich, der Kalibrierzone, am deutlichsten dar.

Der direkte Einfluss von Be- und Entlastungsphasen während der Heißpressung von Holzwerkstoffmatten auf die mechanischen Eigenschaften der fertigen Platte wurde in Laborpressen quantifiziert. Die Nachstellung der in der Industrie aufgezeigten Druckschwankungen bei den entsprechenden Plattendicken ließ keinen negativen Einfluss auf die Ausbildung der Querkzugfestigkeiten erkennen. Die Laborversuche zeigten jedoch, dass bei der Herstellung von Dünnplatten, die mit einer höheren Rohdichte und schnelleren Produktionsgeschwindigkeiten produziert werden als die hier zum Vergleich zur Verfügung stehenden, mit Druckschwankungen zu rechnen ist, die die Querkzugfestigkeitsbildung negativ beeinflussen können. Weiterhin wurde die Aussage getroffen, dass beim Einwirken einer Schwingung auf die zu verpressende Matte eine Grenzamplitude besteht, ab der erst Beeinträchtigungen der Querkzugfestigkeiten zu erwarten sind. Generell konnte bei Betrachtung der Querkzugfestigkeitswerte eine sehr gute Übereinstimmung mit den an einer Miniaturpresse und einer herkömmlichen Laborpresse ermittelten Ergebnissen und Zusammenhängen festgestellt werden.

Die im Laufe dieser Arbeit durchgeführten Verfahren zur Ursachenklärung der Querkzugfestigkeitsverluste aufgrund von Druckänderungen, induziert vom Pressprogramm und der Rahmenkonstruktion zeigten, dass der Beleimungsgrad bei MDF keinen Einfluss auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeitsabnahme bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten und unterschiedlichen Schwingungsamplituden aufwies. Hieraus wurde gefolgert, dass die beobachtete Festigkeitsabnahme auch bei der Verpressung eines unbeleimten Faserstoffes zu erkennen wäre, was auf eine Beeinträchtigung der Fasern selbst schließen ließe. Der durch die Versuchsanordnungen unterschiedlich aufgebrachte Pressdruck während des Verpressens hätte eine Deformation bzw. Zerstörung der Fasern im Überlappungsbereich und damit im Bereich von Druckspitzen zur Folge. Diese Beobachtung würde auch erklären, wa-

rum eine zusätzlich aufgebrauchte Presszeit nach einer Nachverdichtung zu keiner Verbesserung der Querkzugfestigkeiten bei den MDF-Proben führte, da diese nur eine weitere Aushärtung des Klebstoffes aber keine nachträgliche Reparatur der zerstörten Faserwände nach sich ziehen könnte. Dieser Einfluss zeigte sich bei der Verpressung von größeren Holzpartikeln weniger stark ausgeprägt. Bei entsprechend den Faserproben hergestellten Spanproben zeigte die nachträglich aufgebrauchte Zusatzpresszeit eine signifikante Erhöhung der Querkzugfestigkeiten. Noch ausgeprägter war dieser Trend bei den in der ABES getesteten Furnierstreifen. Hierbei war der Zugewinn an Querkzugfestigkeit noch einprägsamer darzustellen. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen unabhängig von der Zerstörung der Faserwände, dass es zu keinem mechanischen Bruch innerhalb der Klebfuge während einer Druckänderung im Rahmen des Heißpressprozesses kommt. Die Querkzugfestigkeiten liegen nach dem Heißpressprozess auf einem 25 %-Niveau von klimatisierten und vollständig ausgehärteten Prüfkörpern. Ein Zerbrechen der Klebfuge während des Prozesses scheint schon aufgrund der noch elastischen Klebfuge nach dem Heißpressprozess als wenig realistisch. Eine Bestätigung erfährt diese Hypothese dadurch, dass bei den Span- als auch den Furnierproben eine weitere Haltezeit zu einer Querkzug- bzw. Scherfestigkeitszunahme führte. Bei dem Vorliegen eines Bruches würde dieses Verfahren nicht zu einem solchen Effekt führen. Die durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass Druckunterschiede je nach belastetem Holzpartikel, zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix führen. Je feiner die Partikel desto eher ist von einer Beeinträchtigung des Holzmaterials auszugehen. Bei Zunahme der Partikelgröße ist die Beeinträchtigung eher auf der Seite des Klebstoffes zu finden. Hierbei handelt es sich jedoch nicht notgedrungen um mechanische Brüche der Klebfuge.

Im Weiteren wurden die Auswirkungen von Druckänderungen auf die Holzpartikel-Klebstoff-Matrix mit Extraktions- und optischen Methoden untersucht. Hierbei wurden Rasterlektronenmikroskopaufnahmen an Bruchflächen von druckbelasteten Faserproben durchgeführt. Zusätzlich kamen Extraktionsmethoden zur Anwendung, die den Harnstoffgehalt bzw. den Gesamtextraktstoffgehalt der behandelten Faserproben bestimmten. Bei allen Methoden ließ sich kein Unterschied der verschiedenen Herstellungsparameter an den Faserproben feststellen. Der Vernetzungsgrad der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix war gleich, was sich durch den extrahierbaren Harnstoffgehalt als auch den Gesamtextrakt darstellte. Die REM-Aufnahmen wiesen keinen Unterschied in der Qualität oder Quantität von Bruchbildern auf, die durch den Querkzugtest herbeigeführt wurden. Dies unterstützt die Aussage, die durch die mechanischen Laborversuche getroffen wurde, dass die Beeinträchtigung der Holzpartikel-Klebstoff-Matrix bei Faserproben eher auf Seiten der Holzpartikel liegt.

Die gesammelten Erkenntnisse der Laborversuche wurden zu einer Erweiterung und Verbesserung eines computergestützten Simulationsmodells des Heißpressvorgangs verwendet, und erreichten eine Optimierung der Vorhersage von Platteneigenschaften und hier insbesondere der Querkzugfestigkeit. Das Simulationsmodell besteht aus drei Modulen, wobei das Modul Adhäsion weiter komplettiert wurde. Das Modell ist nun in der Lage, den Einfluss ei-

nes Nachverdichtungsschrittes während des Heißpressens auf die Ausbildung der Quersugfestigkeit zu berechnen und abzubilden.

Abschließend führten die angestellten Untersuchungen zu der Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Vermeidung von kritischen Be- und Entlastungen während des kontinuierlichen Heißpressvorgangs. Hierbei wurde die Auswirkung einer Distanzänderung als Einflussgröße bei unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb des Pressprogramms auf das Rohdichtepprofil, die Mattentemperatur und die Quersugfestigkeit als Zielgrößen dargestellt. Die Ergebnisse der angestellten Laborversuche wurden hierbei verarbeitet und mit Erfahrungen von Industriepartnern abgeglichen.

Die erzielten Ergebnisse der Arbeit können zur Optimierung sowohl der Verfahrenstechnik hinsichtlich des Heißpressvorgangs bei Holzwerkstoffen, als auch der konstruktiven Lösung von kontinuierlichen Heißpressen beitragen.

13 Literatur

Avramidis S., Hatzikiriakos S.G. (1995): Convective heat and mass transfer in nonisothermal moisture desorption. *Holzforschung* 49: 163-167

Baehr H.D. (1992): *Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen.* Springer-Verlag. 460 S.

Bismarck C.v.(1974): Zur Optimierung des Spanplattenpressens, Herstellung harnstoffverleimter Spanplatten unter Anwendung spezieller Regelsysteme beim Pressen. *Holz-Zentralblatt* 80: 1247-1249

Bodig J. (1965): The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression. *Forest Products Journal* 15: 197-202

Bolton A.J., Humphrey P.E. (1988): The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part I. A review of the literature, identifying the primary physical processes and the nature of their interaction. *Holzforschung* 42: 403-406

Bolton A.J., Humphrey P.E., Kavvouras P.K. (1989): The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part VI. The importance of stresses in the pressed mattress and their relevance to minimisation of pressing time, and the variability of board properties. *Holzforschung* 43: 406-410

Buschbeck L., Kehr E. (1960): Untersuchungen zur Verkürzung der Presszeit beim Heißpressen von Spanplatten. *Holztechnologie* 1: 112-123

Butterfield B., Chapman K., Christie L., Dickson A. (1992): Ultrastructural characteristics of failure surfaces in medium density fibreboard. *Forest Products Journal* 42: 55-60

Camm A., Quilter K. (2001): Discussion on the effect of moisture and heat transfer during continuous MDF pressing. *Proceedings of the 5. European panel products symposium.* Llandudno, Wales, UK: 50-60

Carvalho L.M.H., Costa M.R.N., Costa C.A.V. (2001): Modelling rheology in the hot-pressing of MDF: Comparison of mechanical models. *Wood Fiber Sci.* 33(3): 395-411

Dai C., Yu C. Hubert P. (2000): Modelling vertical density profile in wood composites during hot pressing. *Proc. of the 5th Rim Bio-Based Composites Symp.* Canberra, Australia, S. 220-226

Denisov O.B. (1973): Die Überwachung des Pressvorgangs bei der Spanplattenherstellung. *Holztechnologie* 14: 43-46

Denisov O.B., Juskov V.V. (1974): Die Berechnung der Presszeit bei der Herstellung von Spanplatten aus Holz. *Holztechnologie* 15: 168-172

- Denisov O.B., Anisov P.P., Zuban P.E. (1975): Untersuchung der Permeabilität von Spanvliesen. Holztechnologie 16: 10-14
- Deppe H.-J., Ernst K. (1996): MDF – Mitteldichte Faserplatten. DRW-Verlag Stuttgart. 200 S.
- Dobrinski P., Krakau G., Vogel A. (1988): Physik für Ingenieure. 7. Auflage. Teubner-Verlag. 642 S.
- Dunky M., Niemz P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. 1. Auflage. Springer-Verlag. 954 S.
- Fahrni F. (1956): Das Verpressen von Spanplatten bei gefeuchteten oder feuchteren Deckspänen. Holz Roh- Werkstoff 14: 8-10
- Gaber E. (1940): Druckversuche quer zur Faser an Nadel- und Laubhölzern. Holz Roh- Werkstoff 3: 222-226
- Gefahrt J. (1977): Zur Spänevorwärmung mit Hochfrequenzenergie - Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufs in Vliesmitte bei der Heißpressung. Holz als Roh- und Werkstoff 35: 183-188
- Graf M. (2000): Kontinuierlich arbeitende Presse zur Herstellung von Werkstoffplatten. DE 19926258 A1
- Gressel P. (1981): Spanplatten für das Bauwesen. Holz als Roh- und Werkstoff 39: 63-78
- Haas G.v. (1998): Untersuchungen zur Heißpressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens, der Permeabilität, der Temperaturleitfähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit. Dissertation. Universität Hamburg. 264 S.
- Haas G.v., Frühwald A. (2000): Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten. Holz als Roh- und Werkstoff 58: 317-323
- Haas G.v., Frühwald A. (2001): Untersuchungen zum rheologischen Verhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten. Holz Roh- Werkstoff 58: 415-418
- Habenicht G. (1990): Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. 2. Auflage. Springer-Verlag. 620 S.
- Hänsel A., Niemz P., Brade F. (1988): Untersuchungen zur Bildung eines Modells für das Rohdichteprofil im Querschnitt dreischichtiger Spanplatten. Holz Roh- Werkstoff 46: 125-132
- Heinemann C. (2004): Charakterisierung der Aushärtung von Aminoharzen in einer Holzpartikelmatrix durch Evaluierung von Festigkeiten und Reaktionskinetik. Dissertation, Univ. Hamburg.

- Humphrey P.E., Bolton A.J. (1989a): The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Part II. Simulation model for heat and moisture transfer, and typical results. *Holzforschung* 43: 199-206
- Humphrey P.E. (1990): Some physical transformations that occur during the cure of thermosetting adhesive-to-wood bonds. *Proceedings of Wood Adhesive in 1990: status and needs*, Pullman, WA, 86-90
- Humphrey P.E. (1994): Engineering composites from oriented natural fibres: A strategy. *Proceedings of the 2nd Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*. Vancouver, Canada: 2-9
- Irlle M.A., Bolton A.J. (1991): Physical aspects of wood adhesives bond formation with formaldehyde based adhesives. Part III. The creep behavior of formaldehyde based resins at different relative humidities. *Holzforschung* 45: 69-73
- Jahic J. (2000): Herstellung von Spanplatten bei höheren Spanfeuchten. Dissertation. Univ. Hamburg.
- Kamke F.A., Casey L.J. (1988a): Gas pressure and temperature in the mat during flakeboard manufacture. *Forest Products Journal* 38: 41-43
- Kamke F.A., Casey L.J. (1988b): Fundamentals of flakeboard manufacture: internal-mat conditions. *Forest Products Journal* 38: 38-44
- Kavvouras P.K. (1977): Fundamental process variables in particleboard manufacture. Ph.D. Thesis. University of Wales. U.K. 156 pp
- Keylwerth R. (1958): Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte. *Holz Roh- Werkstoff* 16: 419-430
- Kolmann F., Schnülle F., Schulte K. (1955): Untersuchung zur Beileimung von Spangemischen. *Holz Roh- Werkstoff* 13: 440-449
- Kollmann F. (1957a): Über den Einfluss von Feuchtigkeitsunterschieden im Spangut vor dem Verpressen auf die Eigenschaften von Holzspanplatten. *Holz Roh- Werkstoff* 15: 35-44
- Kollmann F. (1957b): Über Unterschiede im rheologischen Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen bei Querdruckbelastung. *Forsch. Ing.-Wes.* 23: 49-54
- Kollmann F., Krech H. (1961): Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit von Holzspanplatten. *Holz Roh- Werkstoff* 19: 113-118
- Kruse K., Bröker F.-W., Frühwald A. (1996): Zusammenhang zwischen Quersfestigkeit, Rohdichteprofil und Ultraschallgeschwindigkeit von Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54: 295-300
- Kundert (2004): Kunststoff-Halbzeug. Broschüre. 10 S.

Kunesh R.H. (1968): Strength and elastic properties of wood in transverse compression. *Forest Products Journal* 18: 65-72

Maku T., Hamada R. (1955): Studies on the chipboard. Part 1. Mechanical properties. *Wood Research* 15: 38-52

Marra A.A. (1992): Technology of wood bonding. Principles in practice. Van Nostrand Reinhold. 454 P.

May H.A. (1970): Einflüsse der Pressenregelung auf Wirtschaftlichkeit und Qualität der Spanplattenherstellung. *Holz Roh- Werkstoff* 10: 391-396

May H.A., Keserü G. (1982): Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten. Teil 1. Sichtung von Spangemischen und Methoden zur Beurteilung ihrer Eignung für die Herstellung von Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 40: 105-110

May H.A. (1983): Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten. Teil 4. Einflüsse der Dichteunterschiede und Rohstoffe auf die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und die Scherfestigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 41: 271-275

McNatt J.D. (1975): Effect of rate of loading and duration of load on properties of particleboard. USDA Forest Serv. Res. Pap. FPL 270. Forest Prod. Lab., Madison, Wis.

McNatt J.D. (1978): Lineare Regression of Fatigue Data. *Wood Sci.* 11 (1): 39-41

Meyer N., Thoemen H. (2006): Gas pressure measurements during continuous hot-pressing of particleboard. *Holz Roh- Werkstoff*, Online First, DOI: 10.1007/s00107-006-0140-x, 7 S.

Neusser H. (1966): Das Verhalten von Fußbodenoberflächen aus Holz und Holzwerkstoffen bei Belastung kleiner Flächenabschnitte. *Holzforschung und Holzverwertung* 18: 47-52

Ohlmeyer M. (2002): Untersuchung über die Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffplatten nach dem Heißpressen. Dissertation. Universität Hamburg. 228 S.

Pecina H., Bernaczyk Z. (1991): Untersuchungen zur Herstellung harter Holzfaserplatten im Trockenverfahren unter Verwendung von Lignin-Phenol-Bindemitteln. *Holz Roh- Werkstoff* 49: 207-211

Pichelin F., Pizzi A., Frühwald A., Triboulot P. (2001): Exterior OSB preparation technology at high moisture content. Part I. Transfer mechanism and pressing parameters. *Holz Roh- Werkstoff* 59: 256-265

Pichelin F., Pizzi A., Frühwald A., Triboulot P. (2002): Exterior OSB preparation technology at high moisture content. Part II. Transfer mechanism and pressing parameters. *Holz Roh- Werkstoff* 60: 9-17

- Plath E., Schnitzler E. (1974): Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 32: 443-449
- Rackwitz G. (1954): Ein Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge bei der Verleimung von Holspänen zu Spanholzplatten in beheizten hydraulischen Pressen. Dissertation. Technische Hochschule Braunschweig. 152 S.
- Ranta L., May H.-A. (1978): Zur Messung von Rohdichteprofilen an Spanplatten mittels Gammastrahlen. Holz als Roh- und Werkstoff 36: 467-474
- Rauch W. (1984): Temperatur- und Dampfdruckverlauf bei der Herstellung von Spanplatten und ihr Einfluss auf die technologischen Eigenschaften. Holz Roh- und Werkstoff 42: 281-286
- Ren S. (1991): Thermo-hygro rheological behavior of materials used in the manufacture of wood-based composites. Ph.D. Thesis. Oregon State University. 226 pp
- Römpf (1995): CD Römpf Chemie Lexikon - Version 1.0. Thieme Verlag.
- Roffael E., Dix B., Schneider T., Kraft R. (2003): Extrahierbarer Harnstoff in MDF, hergestellt nach dem Blowline- und Blender-Verfahren. Holz Roh- Werkstoff 61: 73-74
- Roll H., Barbu M., Beck P., Hoepner D., Kaiser U., Lerach K. (2001): Continuous hot press with cooling section for MDF. Proceedings of the 5. European panel products symposium. Llandudno, Wales, UK: 61-72
- Roos T. (2000): Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Querkzugfestigkeit von Holzwerkstoffen. Diplomarbeit Universität Hamburg, Fachbereich Biologie: 107 S
- Ruf C. (2003): Einfluss des Pressprogramms auf das Rohdichteprofil von Holzwerkstoffen Diplomarbeit. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Hamburg, S. 119
- Sandvik (2001): Stahlbänder für die Produktion von Holzwerkstoffplatten. Broschüre. S. 10
- Schulte M., Frühwald A. (1996a): Some investigations concerning density profile, internal bond and relating failure position of particleboard. Holz Roh- Werkstoff 54: 289-294
- Schulte M., Frühwald A. (1996b): Shear modulus, internal bond and density profile of medium density fibre board (MDF). Holz Roh- und Werkstoff 54: 49-55
- Schwab E. (2003): Sammlung technologischer Untersuchungen an Holz und Holzwerkstoffen. Kennwerte des Querdruckverhaltens von Spanplatten. Arbeitsbericht Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg: 98-111
- Schweitzer F. (1992): Modellierung des Heißpressvorgangs zur Herstellung von Spanplatten in diskontinuierlich arbeitenden Pressen. Dissertation. Technische Universität Dresden.

- Sekino N., Inoue M., Irle M., Adcock T. (1999): The mechanisms behind the improved dimensional stability of particleboards made from steam-pretreated particles. *Holzforschung* 53: 435-440
- Steffen A., von Haas G., Rapp A., Humphrey P.E., Thoemen H. (1999): Temperature and gas pressure in MDF-mats during industrial continuous hot pressing. *Holz Roh- Werkstoff* 57: 154-155
- Strickler M.D. (1959): Effect of press cycles and moisture content on properties of douglas-fir flakeboard. *Forest Product Journal* 9: 203-215
- Suchsland O. (1967): Behavior of a particleboard mat during the press cycle. *Forest Products Journal* 17: 51-57
- Suzuki S., Mijagawa H. (2003): Effect of element type on internal bond quality of wood-based panels determined by three methods. *J. Wood Sci.* 49: 513-518
- Tabarsa T., Chui Y.H. (1997): Effects of hot-pressing on properties of white spruce. *Forest Products Journal* 47: 71-76
- Technocell Dekor (2002): The analysis of decor paper. A compendium of quality parameters and test methods.
- Thoemen H., Humphrey P.E. (2001): Computer simulation of the continuous hot pressing process of wood-based composites: A tool for industrial and research applications. *Proceedings of the 3. European wood-based panel symposium. Hanover, Germany*: 1-14
- Thoemen H., Humphrey P.E. (2003): Modeling the continuous pressing process for wood-based composites. *Wood Fiber Sci.* 35(3): 456-468
- Thoemen H., Humphrey P.E. (2006): Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part I. Heat and mass transfer. *Holz Roh- Werkstoff* 64: 1-10
- Thoemen H., Haselein C., Humphrey P.E. (2006): Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part II. Rheology. *Holz Roh- Werkstoff* 64: 125-133
- Thoemen H., Tobisch S. (2005): Untersuchungen zum direkten Einfluss von Pressprogrammen und anlagenbedingten Druckänderungen beim Heißpressen von Holzwerkstoffen auf Produktionsgeschwindigkeit und Platteneigenschaften. Abschlussbericht AIF-Projekt 13684. 154 S.
- Thole V., Jahic J., Lewark M. (2000): Auf's Pressprogramm kommt's an. Durchwärmung, Plastizität und Spannungen bei kontinuierlicher MDF-Produktion. *MDF-Magazin*. S. 80-85
- Thole V. (2001): The plastification of the fibre mat as influencing factor for the density profile of the MDF. *Proceedings of the 3rd European Wood-Based Panel Symposium, Hanover*

- Thompson R.J.H., Ansell M.P., Bonfield P.W., Dinwoodie J.M. (2002): Fatigue in wood-based panels. Part 1: The strength variability and fatigue performance of OSB, chipboard and MDF. *Wood Sci. Technol.* 36: 255-269
- Thompson R.J.H., Ansell M.P., Bonfield P.W., Dinwoodie J.M. (2005): Fatigue in wood-based panels. Part 2: property changes during fatigue cycling of OSB, chipboard and MDF. *Wood Sci. Technol.* 39: 311-325
- Tränkler H.R., Obermeier E. (1998): *Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft.* Springer-Verlag. 1584 S.
- Tuohino K. (1984): Neue Entwicklungen bei der Steuerung von Taktpressen. *Holz Roh-Werkstoff* 42: 271-274
- Walther T. (2006): *Methoden zur qualitativen und quantitativen Analyse der Mikrostruktur von Naturfaserstoffen.* Dissertation, Univ. Hamburg
- Wang S., Winistorfer P.M. (2000): Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part II. Methodology of vertical density formation under dynamic conditions. *Wood Fiber Sci.* 32(2): 220-238
- Wang S., Winistorfer P.M., Moschler W.W., Helton C. (2000): Hot-pressing of oriented strandboard by step-closure. *Forest Prod. J.* 50(3): 28-34
- Wang S., Winistorfer, P.M., Young, T. M., Helton, C. (2001a): Step-closing pressing of medium density fiberboard. Part 1. Influences on the vertical density profile. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59: 19-26
- Wang S., Winistorfer P.M., Young T.M., Helton C. (2001b): Step-closing pressing of medium density fibreboard. Part II. Influences on panel performance and layer characteristics. *Holz Roh- Werkstoff* 59: 311-318
- Weiß, K. (2002): *Sensor zur Messung von mechanischen Kräften.* DE 19750671 C2
- Weiss Robotics (2004): *Taktile Sensorsysteme von Weiss Robotics.* Broschüre. 3 S.
- Winistorfer P.M., Young T.M., Walker E. (1996): Modelling and comparing vertical density profiles. *Wood and Fiber Science* 28: 133-141
- Xu W., Winistorfer P.M. (1995): Layer thickness swell and layer internal bond of medium density fibreboard and oriented strandboard. *Forest Prod. J.* 45(10): 67-71
- Zeppenfeld G., Grunwald D. (2005): *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie.* DRW-Verlag. 352 S.
- Zombori B.G. (2001): *Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites.* Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnical Institute and State Univ.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Heißpresse (links, Thoemen 2000) und der Rollenkörper (rechts).....	1
Abbildung 2: Grundlegende Mechanismen während des Heißpressvorgangs von Holzwerkstoffmatten (Humphrey 1994).	2
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines MDF-Pressprogrammes (Weg-Druck-Diagramm) mit einer Verdichtungszone 1 (Hochdruckbereich), einer Entlastungszone 2 (Niederdruckbereich) und einer Kalibrierzone 3 (Mitteldruckbereich) (verändert nach Thoemen 2000).....	3
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Stoff- und Wärmetransporte (Verändert nach Gefahrt 1977 sowie Thoemen und Humphrey 2001).	8
Abbildung 5: Spannungsverlauf bei Verdichtung von unterschiedlichem Mattenmaterial und einer Presstemperatur von 190°C (von Haas 1998).....	11
Abbildung 6: 5-Elemente Burgers-Humphrey Modell, links (Thoemen et al. 2005, nach Ren 1991) und Verformungskomponenten als Funktion Funktion der Zeit t und Spannung σ (Thoemen et al. 2005).	12
Abbildung 7: Vernetzung einer Klebstoffbindung. Vernachlässigbare Zonen sind schraffiert dargestellt (Marra 1992).....	15
Abbildung 8: Dickenabnahme von Proben unter Flächendruck (Neusser 1966).	21
Abbildung 9: Quetschgrenze von Vollholzproben bei unterschiedlichem Lastwinkel (Gaber 1940).	22
Abbildung 10: Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf Rohdichtedifferenzierung (links) und technologische Eigenschaften (rechts) (Bismarck v. 1974).	24
Abbildung 11: Auswirkungen eines schrittweisen Pressens auf Matteschichten während des Heißpressprozesses sowie daraus resultierender Erhöhung der Oberflächenschichten bei 200 s (links) und daraus resultierende Rohdichteprofile, rechts (Wang et al. 2001a).....	25
Abbildung 12: Schematische Darstellung der vertikalen Rohdichteprofilausbildung während des Pressens (Wang und Winistorfer 2000).	25
Abbildung 13: Darstellung von Spannungsspitzen aufgrund einer exzentrischen Zugbelastung- (links) als auch Schälbelastung (rechts) auf eine Klebverbindung (Habenicht 1990).	28
Abbildung 14: Qual-Scan (McCarthy Products).....	33
Abbildung 15: Analyse der Industriefasern. Faserlänge (links) und Faserbreite (rechts).....	33
Abbildung 16: Siebfraktion des verwendeten Spanmaterials. Dargestellt sind Mittelwerte aus jeweils drei Messungen.	34
Abbildung 17: Spanprobe aus Mittelschichtspan (links) und nach Querzugtest (mittig und rechts).....	35
Abbildung 18: Darstellung des pH-Wert-Verlaufs von Faser- und Spanmaterial bei der Titration von 0,01 m NaOH und 0,01 m H ₂ SO ₄	36
Abbildung 19: Miniaturpresse IPATES (links) und Querzugtest "sofort" an einem Prüfkörper (rechts).....	38
Abbildung 20: Verdichtungszyylinder (links), Presszylinder (mittig) und Presskolben mit Presszylinder Aufnahme (rechts).....	39
Abbildung 21: Reaktivität von Kauritec 405.....	40

Abbildung 22: IPATES-Probenkörper mit Prüfkörper für die Dichtepfil- und Querkzugfestigkeitsbestimmung.	41
Abbildung 23: Prüfkörper nach Querkzugtest mit unterschiedlichen Bruchebenen. 1: Mittelschicht-, 2: Zwischenschicht-, 3: Oberflächenbruch.....	41
Abbildung 24: Presszylinder (1) für die Temperaturmessungen , links mit Thermolement (2)	42
Abbildung 25: Probenschnittplan für Biegefestigkeit, Querkzugfestigkeit (Q), Dickenquellung (S) und Rohdichtepfil (R).	43
Abbildung 26: Prüfmaschine ABES. 1: Presszylinder, 2: Pressköpfe, 3: Probenspannklemmen.....	44
Abbildung 27: Verklebung zweier Furnierstreifen in der ABES (Heinemann 2004).	44
Abbildung 28: Aufbaubeispiel eines Sensors (Tränkle und Obermeier 1998).....	46
Abbildung 29: Taktile Drucksensoren (1) links und 3D-Darstellung der Messwerte (2) rechts (Weiss Robotics 2004).....	47
Abbildung 30: Ausführungsbeispiel einer zweidimensionalen Sensormatrix. Sensormaterial (1), Sensorelektrode (2), Gegenelektrode (3), Grundplatte (4) (nach Weiß 2002)	48
Abbildung 31: Pyramide der Thermoplaste (Kundert 2004).....	50
Abbildung 32: Statische Druck-Spannungs-Kennlinie bei 120°C von einer mit Leitruß angereicherten PTFE-Probe.	51
Abbildung 33: Wechselbelastungstest bei 120°C von einer mit Leitruß angereicherten PTFE-Probe.	51
Abbildung 34: Kalibrierungskurven des spezifischen Drucksensors für drei unterschiedliche Temperaturen (20°C, 80°C, 150°C).	52
Abbildung 35: Extrapolierte Kalibrierungskurven des spezifischen Drucksensors für drei unterschiedliche Temperaturen (20°C, 80°C, 150°C).....	52
Abbildung 36: Darstellung des Pressdrucksensors, links (1) sowie die Verbindung an den mobilen Datenlogger, rechts (2) mit Messspitze (3).	53
Abbildung 37: Darstellung der Ipates-Pressprogramme. Entspannungsversuch mit 20 % Entspannungsniveau (links) und Nachverdichtungsversuch mit 30 % Verdichtungsniveau (rechts) für Grundversuche.	55
Abbildung 38: Darstellung des Pressprogramms "Nachverdichtung" für Hauptversuche.	56
Abbildung 39: Darstellung des Pressprogramms "Nachverdichtung" für die Laborpresse.....	58
Abbildung 40: Distanzsensor mit Anschluss an den PressMAN® (Quelle: ARC).....	59
Abbildung 41: Anwendung des Drucksensors und des Datenloggers in einer Heißpresse (verändert nach ARC).....	59
Abbildung 42: Anwendung des Distanzensors und des Datenloggers in einer Heißpresse (verändert nach ARC).....	60
Abbildung 43: Darstellung des Pressprogramms "Schwingung" für Grundversuche.	61
Abbildung 44: Darstellung der Pressprogramme. 1: Referenzprogramm, 2-5: Schwingungsvariation.	63
Abbildung 45: Verhältnis von Querkzug- zu Scherfestigkeit bei OSB, MDF und Spanplatten (nach Suzuki und Miyagawa, 2003).....	67
Abbildung 46: Vernetzungsgrad von Harzfilmen über die Pressezeit (Technocell Dekor 2002).	69
Abbildung 47: Darstellung eines exemplarischen Pressprogramms mit einem Nachverdichtungsschritt.	72
Abbildung 48: Verlauf von Stahlbandtemperatur und Mattendicke als Input-Parameter für das Simulationsbeispiel. Nachverdichtungsschritt hier nach 21 m Pressenlänge.	74
Abbildung 49: Einteilung eines Pressprogramms für den Maßnahmenkatalog.....	75

Abbildung 50: Darstellung eines Box-Plots auch Box and Whisker Plot genannt.....	77
Abbildung 51: Rohdichteprofile und Probendickenänderungen bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten bei zwei unterschiedlichen Nachverdichtungs-niveaus mit 30 % (links) und 15 % (rechts), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 % Kauritec 405.	79
Abbildung 52: Rohdichteprofil und Bruchebene bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Hohes Nachverdichtungs-niveau (links) und niedriges Nachverdichtungs-niveau (rechts), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 % Kauritec 405.	80
Abbildung 53: Einfluss des Entspannungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 110°C und zwei unterschiedlichen Entspannungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %.....	82
Abbildung 54: Einfluss des Entspannungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 180°C und zwei unterschiedlichen Entspannungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %.....	82
Abbildung 55: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 110°C und zwei unterschiedlichen Verdichtungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %.....	83
Abbildung 56: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Kauritec 405 bei einer Presstemperatur von 180°C und zwei unterschiedlichen Verdichtungs-niveaus (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %.....	83
Abbildung 57: Rohdichteprofil bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten mit zunehmender Probendicke.	85
Abbildung 58: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Beleimungsgrade, 7% und 13% (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Kauratec 605.....	87
Abbildung 59: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Rohdichten, 550 kg/m ³ , 700 kg/m ³ und 850 kg/m ³ (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.	87
Abbildung 60: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Klebstoffsysteme, Kauratec 605 und Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 7 %, Rohdichte 700 kg/m ³	88
Abbildung 61: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsvergleich unterschiedlicher Beleimungsgrade 7 % und 13 % (Rohdichte bereinigt), Rohdichte 700 kg/m ³ , Kauratec 605.....	89
Abbildung 62: Entwicklung der Mittelschichttemperatur von Prüfkörpern mit einer Zieldicke von 5mm bei vier Nachverdichtungszeitpunkten und drei unterschiedlichen Rohdichten. I) 550 kg/m ³ , II) 700 kg/m ³ , III) 850 kg/m ³	90
Abbildung 63: Entwicklung der Mittelschichttemperatur von Prüfkörpern mit einer Zieldicke von 5mm und drei Rohdichten bei vier unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. I) 0 Sekunden, II) 10 Sekunden, III) 25 Sekunden, IV) 70 Sekunden.	91
Abbildung 64: Darstellung des Verdichtungswiderstandes mittels polynomischen Trends über die Nachverdichtungszeitpunkte bei unterschiedlichen Rohdichten, Kauritec 405.	93

Abbildung 65: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbeleimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 550 kg/m ³ , Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.	94
Abbildung 66: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbeleimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 700 kg/m ³ , Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.	94
Abbildung 67: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von beleimten (Beleimungsgrad 7 %) und unbeleimten Faserproben mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 850 kg/m ³ , Kauritec 405, Zielfeuchte 12 %.	95
Abbildung 68: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von Faserproben mit verschiedenen Beleimungsgraden von 7 % und 13 % mittels polynomischen Trends bei verschiedenen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 700 kg/m ³ , Kauratec 605, Zielfeuchte 12 %.	96
Abbildung 69: Rohdichteprofil einer Referenzplatte ohne Nachverdichtung. Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.	97
Abbildung 70: Biegefestigkeit und Quellung nach 24 h in Abhängigkeit des Nachverdichtungszeitpunktes, Rohdichte bereinigt. Rohdichte 650 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.	98
Abbildung 71: Temperaturverlauf von Heizplatte und Mittelschicht einer Referenzplatte ohne Nachverdichtung bei einer Erwärmung von 1,4°C/60 s. Rohdichte 650 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.	99
Abbildung 72: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs von Fasermatten mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten bei einer Erwärmung von 1,4°C/60 s. Rohdichte 650 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kaurit 350.	100
Abbildung 73: Einfluss von Be- und Entlastungen auf Festigkeitseigenschaften.	105
Abbildung 74: Übertriebene Darstellung von Druckschwankungen innerhalb einer kontinuierlichen Heißpresse aufgrund der Rahmenkonstruktion (links, verändert nach Thoemen und Tobisch 2005) und der Rollkörper (rechts).	106
Abbildung 75: Spezifische Druckmessungen an einer kontinuierlichen Heißpresse. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.	110
Abbildung 76: Vergleich des spezifischen Drucks und der Distanz dreier Pressentypen, CPS (oben), ContiRoll (mittig), ContiPress (unten). Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.	112
Abbildung 77: Kontinuierlich arbeitende Presse mit zueinander versetzt angeordneten Pressrahmen (Graf 2000).	113
Abbildung 78: Ausführungsbeispiel von drei versetzt angeordneten Pressrahmen einer kontinuierlichen Heißpresse in der Kalibrierzone (Graf 2000).	114
Abbildung 79: Gasdruck- und Temperaturmessungen an einer kontinuierlichen Heißpresse (MDF). Rohdichte 750 kg/m ³ , Plattendicke 20 mm. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.	115
Abbildung 80: Vergleich von Gasdruck- und spezifischen Druckmessungen in einer kontinuierlichen Heißpresse. Pressrahmen sind durch gestrichelte Linien schematisch dargestellt.	116
Abbildung 81: Vergleich des Gasdruckverlaufs von drei kontinuierlich hergestellten MDF mit Zwischenpeaks (Pfeile). 1 = ContiRoll, 2 = CPS, 3 = ContiPress.	117

Abbildung 82: Querkzugfestigkeitsverlauf über Amplitudenhöhe (Rohdichte bereinigt), 110°C (oben), 140°C (mittig) und 180°C (unten). Rohdichte 700 kg/m ³ , Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405.	119
Abbildung 83: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 2: Schwingung "komplett", Rohdichte 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	121
Abbildung 84: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 5: Schwingung "hinten", Rohdichte 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	122
Abbildung 85: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 3: Schwingung "vorne", Rohdichte 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	122
Abbildung 86: Einfluss von Amplitude und Frequenz auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 4: Schwingung "mittig", Rohdichte 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	123
Abbildung 87: Einfluss der Amplitude auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte bei unterschiedlichen Beleimungsgraden: 3 %, 10 % und 17 % Kauritec 405. Programm 2: Schwingung "komplett", Rohdichte: 850 kg/m ³ , Frequenz: 1 Hz.	125
Abbildung 88: Einfluss der Amplitude auf die Querkzugfestigkeit einer Faserplatte. Programm 2: Schwingung "komplett", 1 Hz, 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	126
Abbildung 89: Einfluss einer Amplitude von 0,2 mm auf die Querkzugfestigkeit von Faserplatten, Dicke von 20 mm (1 % Amplitude) und 2 mm (10 % Amplitude), Pressprogramm 2: Schwingung "komplett".	126
Abbildung 90: Mittelschichttemperaturverlauf einer Faserprobe mit 550 kg/m ³ , einer Frequenz von 1 Hz (links) und ¼ Hz (rechts) und unterschiedlichen Amplituden von 0,05 mm und 0,5 mm. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	128
Abbildung 91: Mittelschichttemperaturverlauf einer Faserprobe mit 850 kg/m ³ , einer Frequenz von 1 Hz (links) und ¼ Hz (rechts) und unterschiedlichen Amplituden von 0,05 mm und 0,5 mm. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	128
Abbildung 92: Vergleich des Mattengegendruckverlaufs bei Rohdichten von 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ . Amplitude 0,5 mm, Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	129
Abbildung 93: Vergleich des Mattengegendruckes von MDF mit einer Rohdichte von 850 kg/m ³ und einer Schwingung von a): 0,1 mm, b): 0,2 mm, c): 0,3 mm, d): 0,4 mm, e): 0,5 mm, f): 1 mm, Frequenz: 1Hz. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	130
Abbildung 94: Vergleich des Mattengegendruckes von MDF mit einer Rohdichte von 850 kg/m ³ und Beleimungsgraden von 3 % und 17 %, Kauritec 405.	131
Abbildung 95: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Beleimungsgrade 7 % und 13 %, Kauritec 405, Rohdichte 550 kg/m ³ (Rohdichte bereinigt).	135
Abbildung 96: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Beleimungsgrade 7 % und 13 %, Kauritec 405, Rohdichte 850 kg/m ³ (Rohdichte bereinigt).	136
Abbildung 97: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Rohdichten 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimung 7 %, Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt).	136
Abbildung 98: Einfluss des Nachverdichtungszeitpunktes auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Spanproben, Rohdichten 550 kg/m ³ und 850 kg/m ³ , Beleimung 13 %, Kauritec 405 (Rohdichte bereinigt).	137

Abbildung 99: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 550 kg/m ³ , Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.	139
Abbildung 100: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben mittels polynomischen Trends bei unterschiedlichen Nachverdichtungszeitpunkten. Rohdichte 850 kg/m ³ , Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.	139
Abbildung 101: Vergleich des Querkzugfestigkeitsverlaufs über Amplitudenhöhe von Span- und Faserproben (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405, Presstemperatur 140°C, Frequenz 1 Hz.	140
Abbildung 102: Vergleich des Querkzugfestigkeitsverlaufs über Amplitudenhöhe von Span- und Faserproben (Rohdichte bereinigt), Beleimungsgrad 13 %, Kauritec 405, Presstemperatur 180°C, Frequenzen 0,5 Hz.	141
Abbildung 103: Vergleich des Mattengegendruckes von Span- und Faserproben. Frequenz 1 Hz, Amplitude 0,2 mm.	142
Abbildung 104: Temperaturverlauf in der Fuge zwischen zwei Furnierstreifen während des ABES-Tests.	143
Abbildung 105: Einfluss einer Nachverdichtung von 1 bar auf 3 bar (Referenzwerte, gestrichelte Linien) auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 120°C, Kauritec 405.	144
Abbildung 106: Einfluss einer Nachverdichtung von 1 bar auf 3 bar (Referenzwerte, gestrichelte Linien) auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 140°C, Kauritec 405.	144
Abbildung 107: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 1 bar auf 3 (Referenzwerte, gestrichelte Linien) bar auf die Scherfestigkeit einer Klebfuge bei einer Presstemperatur von 140°C, Kauritec 405.	145
Abbildung 108: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Ipates MDF-Prüfkörpern. Rohdichte 550 kg/m ³ , Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.	146
Abbildung 109: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Querkzugfestigkeitsverlauf von Ipates Mittelschichtspan-Prüfkörpern. Rohdichte 550 kg/m ³ , Beleimungsgrad 7 %, Kauritec 405.	146
Abbildung 110: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Dickenverlauf von klimatisierten Ipates MDF Prüfkörpern.	147
Abbildung 111: Einfluss der Haltezeit nach der Nachverdichtung von 7 mm auf 5 mm auf den Dickenverlauf von klimatisierten Ipates Mittelschichtspan-Prüfkörpern.	148
Abbildung 112: Extrahierbarer Harnstoffgehalt unterschiedlicher Faserproben. Probe A: unbeleimte Rohfasern, Probe B: Referenzprobe 180°C, Probe C: Nachverdichtung 180°C, Probe D: 110°C.	149
Abbildung 113: Mittels DMF extrahierbarer Rückstand (Gesamtextrakt) unterschiedlicher Faserproben. Probe A: unbeleimte Rohfasern, Probe B: Referenzprobe 180°C, Probe C: Nachverdichtung 180°C, Probe D: 110°C, n=2.	150
Abbildung 114: Beleimte Faser (Vergrößerung 690x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Nachverdichtung bei 70 s (links) und beleimter Faserkreuzungspunkt (Vergrößerung 1000x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Referenzprobe Schwingung, rechts.	151
Abbildung 115: Übersicht Faserbündel (Vergrößerung 80x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Referenzprobe Nachverdichtung.	151
Abbildung 116: Abgelöste Faser mit Riss in der S1 (Vergrößerung 600x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Referenzprobe Nachverdichtung (links) und Versagen in der Übergangszone (Vergrößerung 410x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Nachverdichtung bei 70 s (rechts).....	152

Abbildung 117: Faserrest mit Klebstoff (Vergrößerung 590x), Rohdichte 550 kg/m ³ , Nachverdichtung bei 70 s (links) und beleimte Faserreste mit Cellulosefibrillen (Vergrößerung 810x), Rohdichte 850 kg/m ³ , Nachverdichtung bei 70 s (rechts).	153
Abbildung 118: Quetschung und abgerissene Faser (Vergrößerung 390x), Rohdichte 850 kg/m ³ , Nachverdichtung.	153
Abbildung 119: Einfluss von Druckschwankungen (5 N/mm ²) auf den Druckspannungs-Stauchungs-Verlauf bei Fichtenholz (a), Tischlerplatte (b) und Spanplatte (c) (Kollmann 1957).	154
Abbildung 120: Simulierte Entwicklung der Querkzugfestigkeit in den verschiedenen Mattenschichten beim Verpressen von MDF in einer Taktpresse (Heinemann 2004).	158
Abbildung 121: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von Faserproben bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm bei einer Presstemperatur von 180°C und einer Rohdichte von 583 kg/m ³	159
Abbildung 122: Entwicklung der Querkzugfestigkeit ab einer Nachverdichtung bei 120 s bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm und einer Presstemperatur von 180°C und einer Rohdichte von 583 kg/m ³ (gleiche Datenbasis wie in Abbildung 121).	160
Abbildung 123: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von Faserproben bei einer Zwischenverdichtung von 2 mm bei einer Presstemperatur von 100°C und einer Rohdichte von 583 kg/m ³	161
Abbildung 124: Mittelschichttemperaturmessungen bei einer Presstemperatur von 100°C (oben), 140°C (mittig) sowie 180°C (unten) und 6 mm Prüfkörperdicke. Beleimungsgrad 10 %, Kauritec 405.	162
Abbildung 125: Querkzugfestigkeitsverluste ΔQZF aufgrund der Mattennachverdichtung für verschiedene Nachverdichtungszeitpunkte gegenüber einer Referenzkurve ohne Nachverdichtung.	164
Abbildung 126: Zusammenhang zwischen Querkzugfestigkeitsverlust ΔQZF und Querkzugfestigkeit unmittelbar vor dem Nachverdichtungsschritt.	164
Abbildung 127: Simulierte Entwicklung des Rohdichteprofiles von MDF in einer kontinuierlichen Heißpresse mit Rohdichteminima in verschiedenen Schichten (Pfeile). Nachverdichtung hier nach 21 m.	166
Abbildung 128: Simulierte Entwicklung des Querkzugfestigkeitsprofils. Nachverdichtung nach 21 m (links) bzw. 24 m (rechts).	167
Abbildung 129: Simulierte Minderung der Querkzugfestigkeit aufgrund einer Nachverdichtung der Matte nach 21 m (links) bzw. 24 m (rechts). Die gestrichelten Linien stellen die Abnahme der Querkzugfestigkeit aufgrund der fortschreitenden Plastifizierung dar. .	168
Abbildung 130: Erweitertes Modell der grundlegenden Mechanismen während des Heißpressprozesses (verändert nach Humphrey 1994). Gestrichelt dargestellt sind die zusätzlichen Wechselwirkungen mit dem neuen Modul Pressdruck.	169
Abbildung 131: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geänderter Schließgeschwindigkeit.	172
Abbildung 132: Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf das Rohdichteprofil (Bismarck v. 1974).	172
Abbildung 133: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Schließgeschwindigkeit.	173
Abbildung 134: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Erstverdichtungsniveau.	174
Abbildung 135: Maßnahmenkatalog mit Einflussgröße Niveau Erstverdichtung.	175
Abbildung 136: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Entspannungszeitpunkt.	176

Abbildung 137: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Entspannungszeitpunkt.	177
Abbildung 138: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Entspannungsniveau.	178
Abbildung 139: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Niveau Entspannung.	179
Abbildung 140: Auswirkung des Pressdruckes auf das Rohdichteprofil bei geändertem Kalibrierungszeitpunkt.	180
Abbildung 141: Maßnahmenkatalog mit der Einflussgröße Kalibrierungszeitpunkt.....	181
Abbildung 142: Auswirkung auf das Rohdichteprofil während des kontinuierlichen Heißpressprozesses (Nach Fa. Siempelkamp in Camm und Quilter 2001).....	183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Literaturstellen für den Einfluss von Druckänderungen. k.A.: keine Angaben, E: Entlastung, V: Verdichtung, ZS: Zwischenschicht, ZW: Zellwand.....	19
Tabelle 2: pH-Wert und Pufferkapazität des eingesetzten Materials.....	36
Tabelle 3: Variation der Pressparameter während der Grundversuche Ipates.....	55
Tabelle 4: Variation der Pressparameter	56
Tabelle 5: Variation der Pressparameter für die Laborpresse.....	57
Tabelle 6: Nachverdichtung.....	57
Tabelle 7: Variation der Pressparameter	62
Tabelle 8: Variation der Pressparameter	62
Tabelle 9: Variation der Pressparameter für Nachverdichtung	65
Tabelle 10: Variation der Pressparameter für Schwingung.....	66
Tabelle 11: Pressparameter.....	66
Tabelle 12: Pressparameter für chemische Untersuchung.....	67
Tabelle 13: Variation der Pressparameter für REM-Proben mit Nachverdichtung.	70
Tabelle 14: Variation der Pressparameter für REM-Proben mit Schwingung.	70
Tabelle 15: Variation der Pressparameter	72
Tabelle 16: Versuchsplan für die Simulation	73
Tabelle 17: Input-Parameter für das Simulationsbeispiel.....	74
Tabelle 18: Statistische Auswertung der Grundversuche mit den Indizes t = Steigung Trend; u, mm = Querszugfestigkeitsunterschied minimale und maximale Presszeit; n = Niveau der Entlastung (Verdichtung).	84
Tabelle 19: Statistische Auswertung der Hauptversuche mit den Indizes t = Steigung Trend; u, mm = Querszugfestigkeitsunterschied minimale und maximale Presszeit; u, Ref = Querszugfestigkeitsunterschied Referenz und maximale Presszeit.	89
Tabelle 20: Einfluss der Rohdichte und des Nachverdichtungszeitpunktes auf die Mattenmitten-temperatur.....	92
Tabelle 21: Statistische Auswertung, Laborpresse	98
Tabelle 22: Statistische Auswertung der Grundversuche bezogen auf die Querszugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimale und maximale Presszeit; u, Ref = Unterschied Referenz- und maximaler Wert, u, F = Unterschied Frequenz.	120
Tabelle 23: Statistische Auswertung der Hauptversuche. Schwingung "komplett" und "hinten" bezogen auf die Querszugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimale und maximale Amplitude; u, Ref = Unterschied Referenz- und maximaler Wert, u, F = Unterschied Frequenz.	124
Tabelle 24: Statistische Auswertung der Span-Nachverdichtung bezogen auf die Querszugfestigkeit mit den Indizes u, mm = Unterschied minimaler und maximaler Nachverdichtungszeitpunkt; t = Steigung des Trends, s = Unterschied Steigung.....	138
Tabelle 25: Einflussgrößen des Pressprogramms	76
Tabelle 26: Bedeutung der Pfeile.....	171

Anhang Statistik

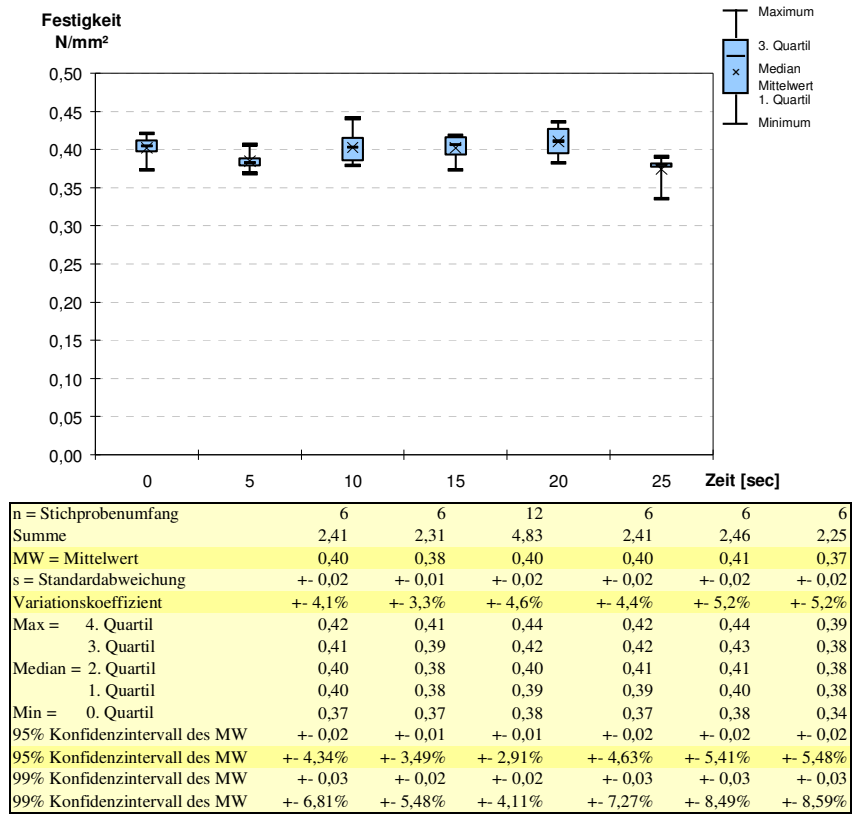


Abbildung 53: 20 % Entspannung.

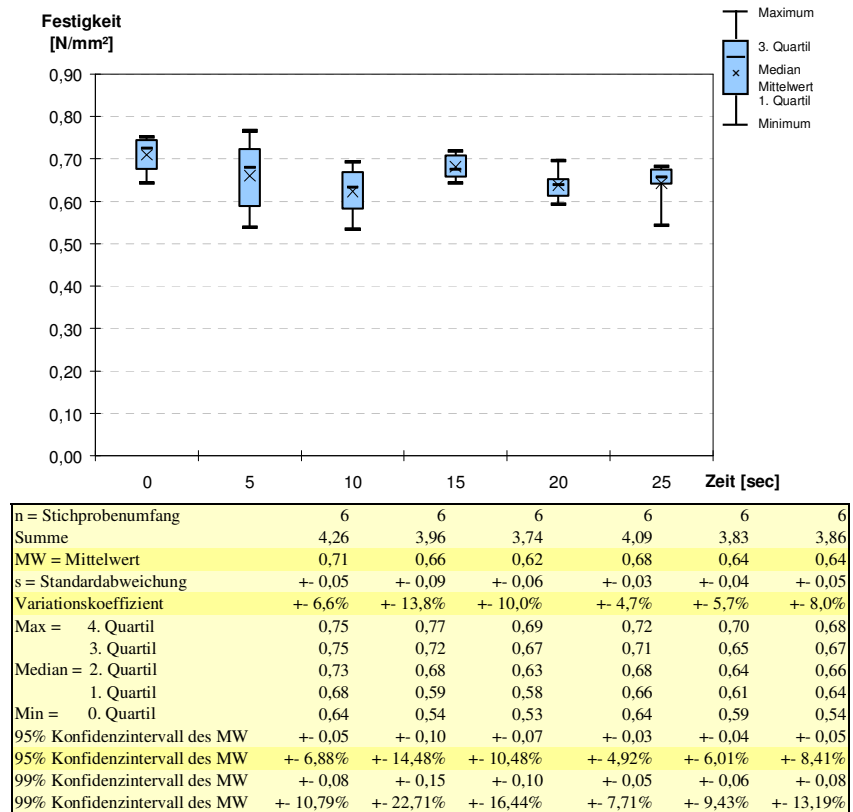


Abbildung 53: 10 % Entspannung.

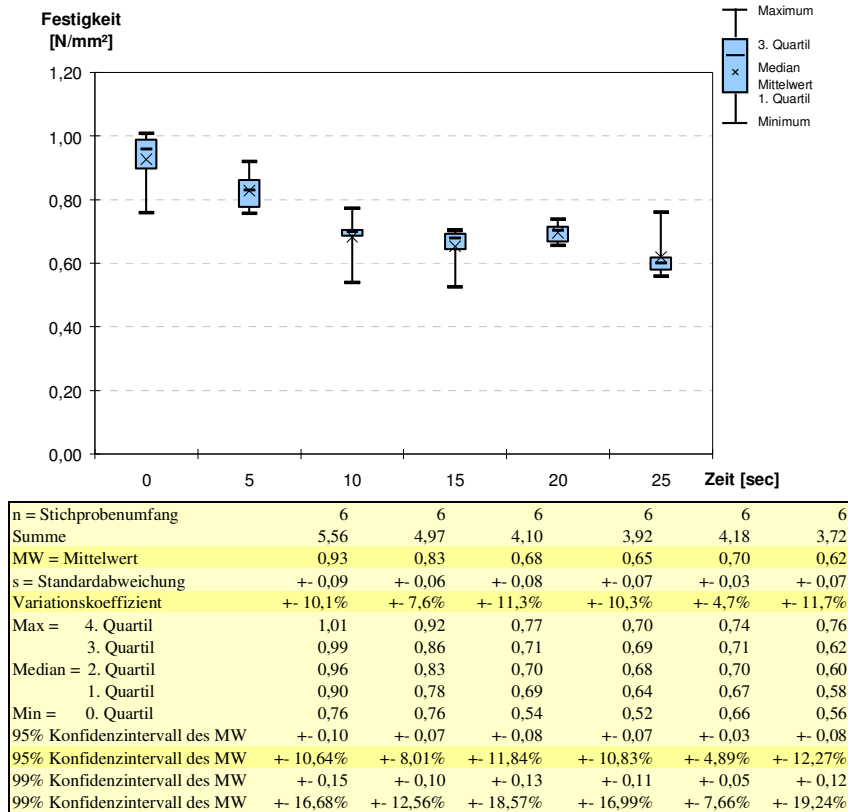


Abbildung 54: 20 % Entspannung.

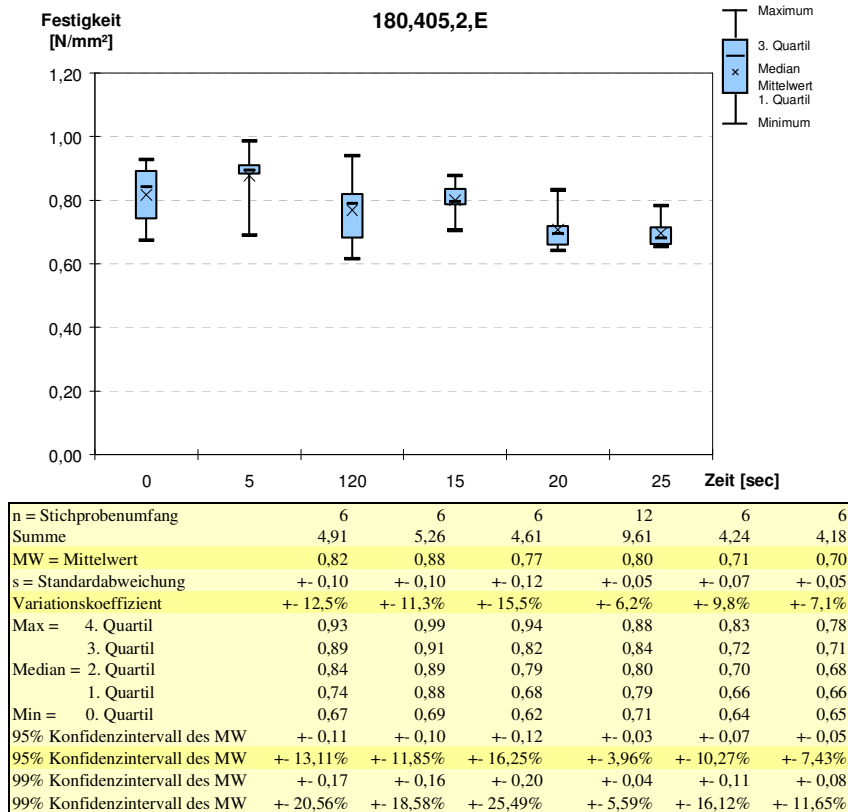


Abbildung 54: 10 % Entspannung.

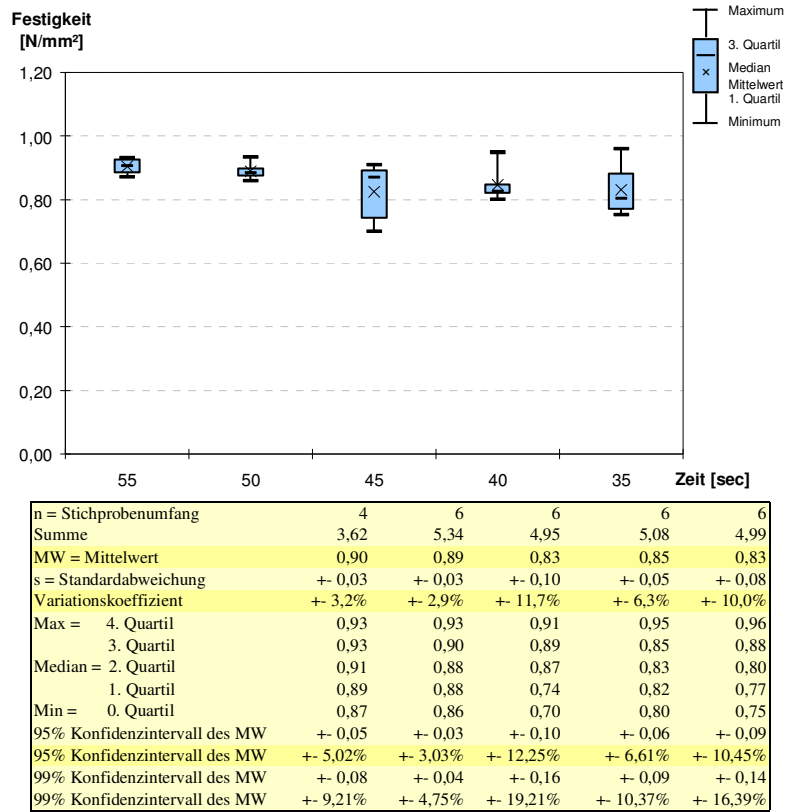


Abbildung 55: 30 % Verdichtung.

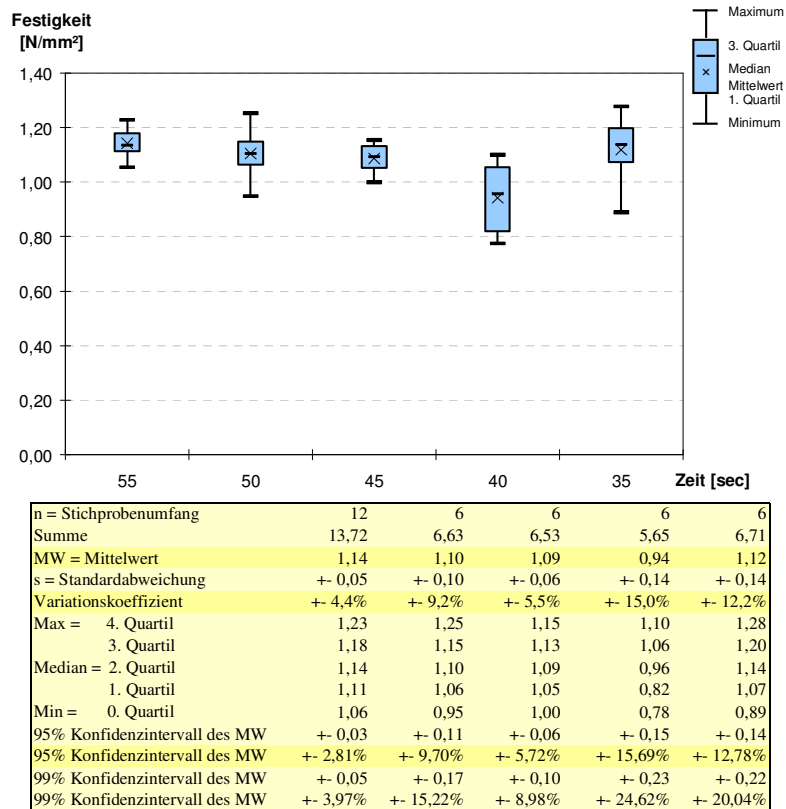


Abbildung 55: 15 % Verdichtung.

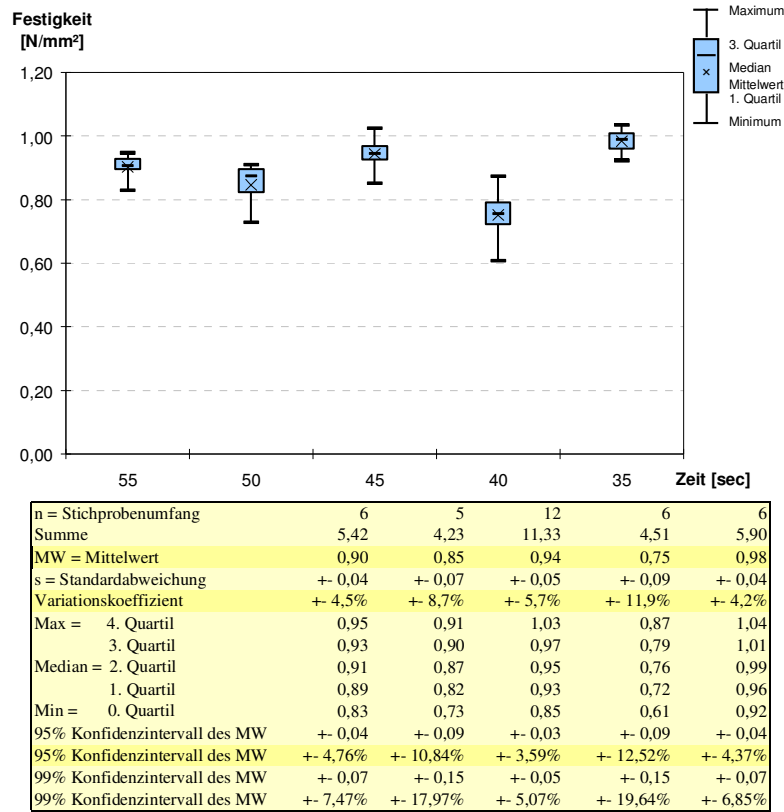


Abbildung 56: 30 % Verdichtung.

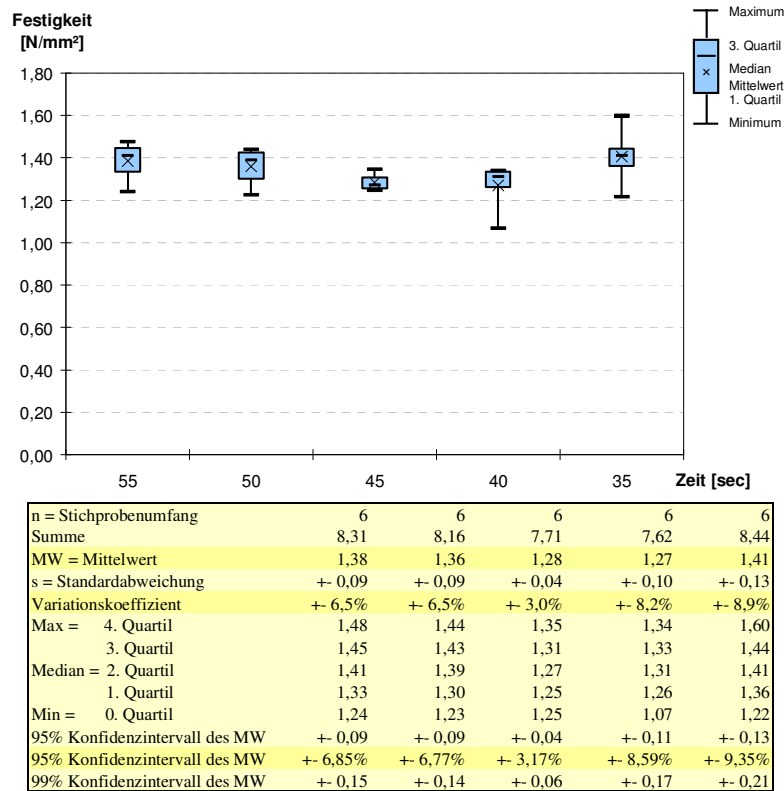


Abbildung 56: 15 % Verdichtung.

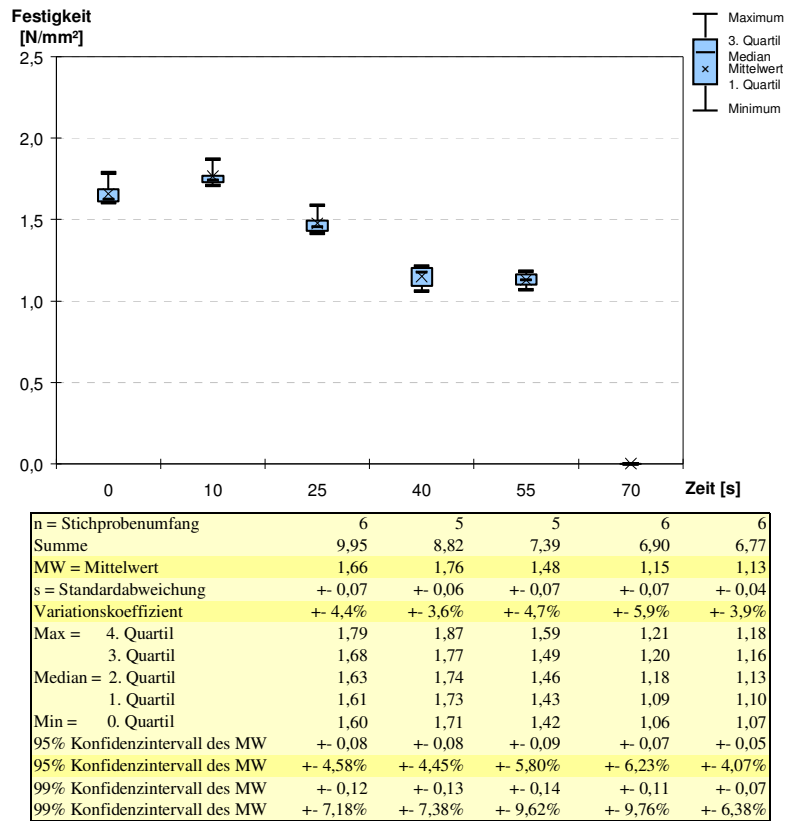


Abbildung 58: Beileimungsgrad 13 %.

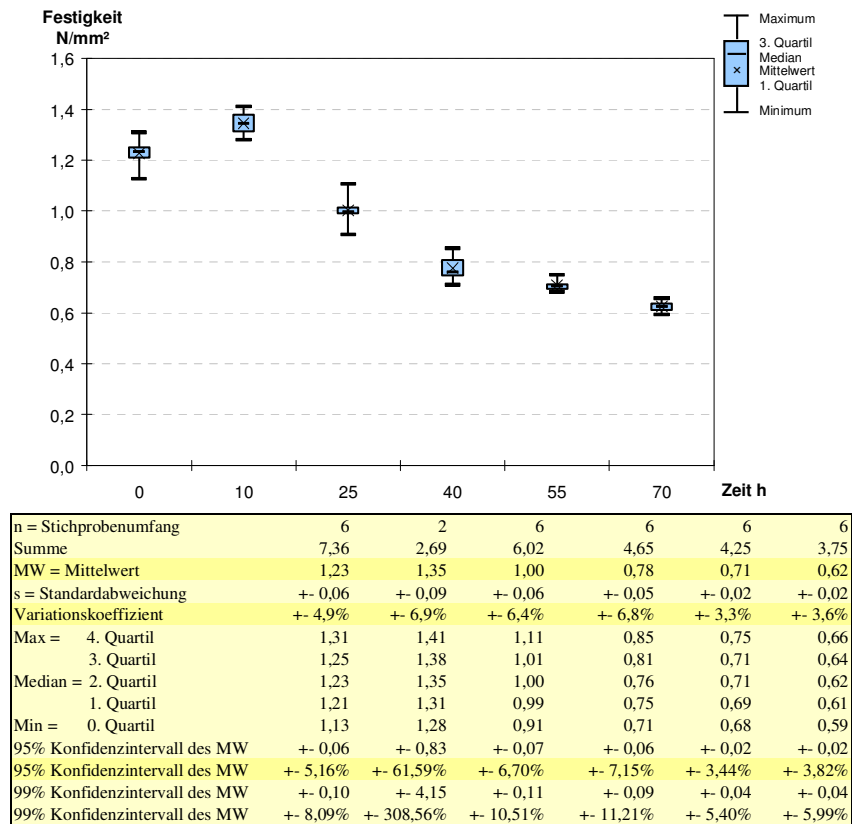


Abbildung 58: Beileimungsgrad 7 %.

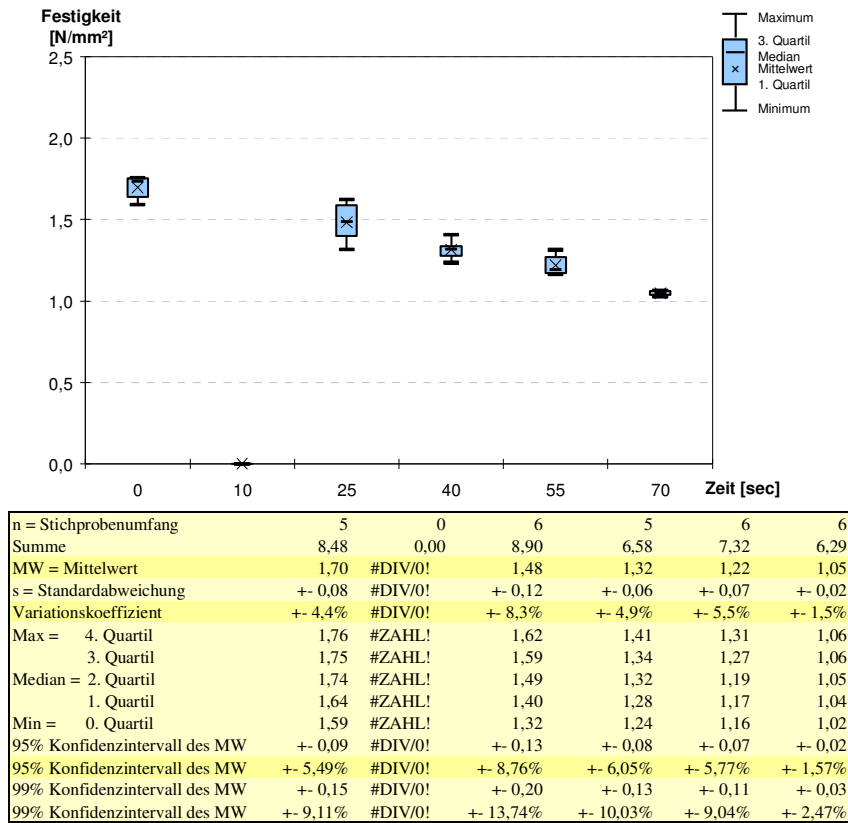


Abbildung 59: Rohdichte 850 kg/m³.

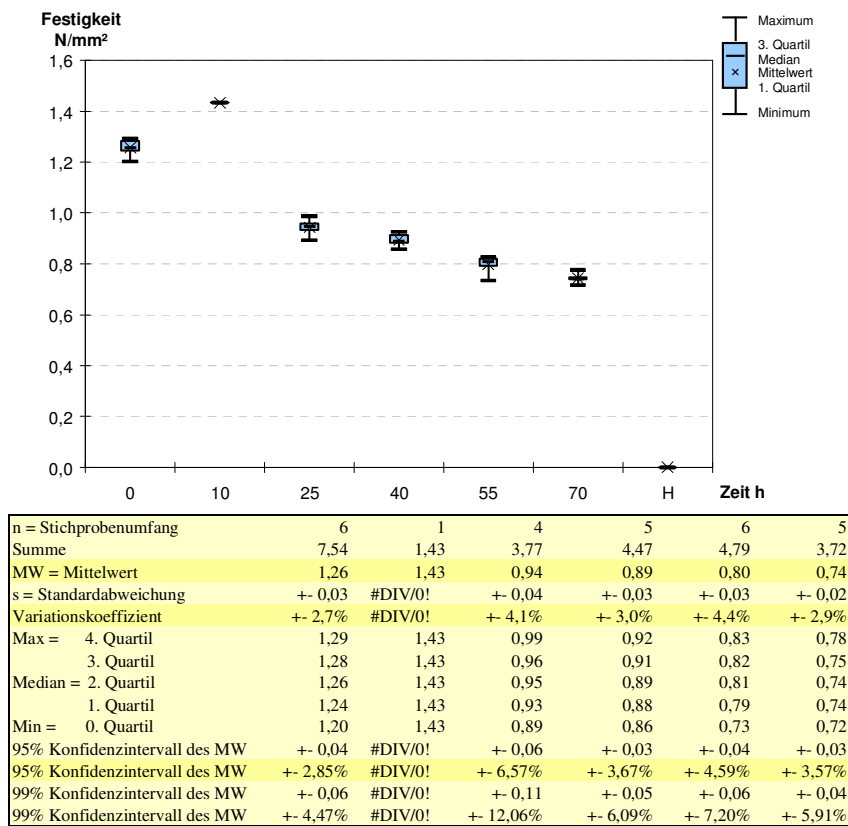


Abbildung 59: Rohdichte 700 kg/m³.

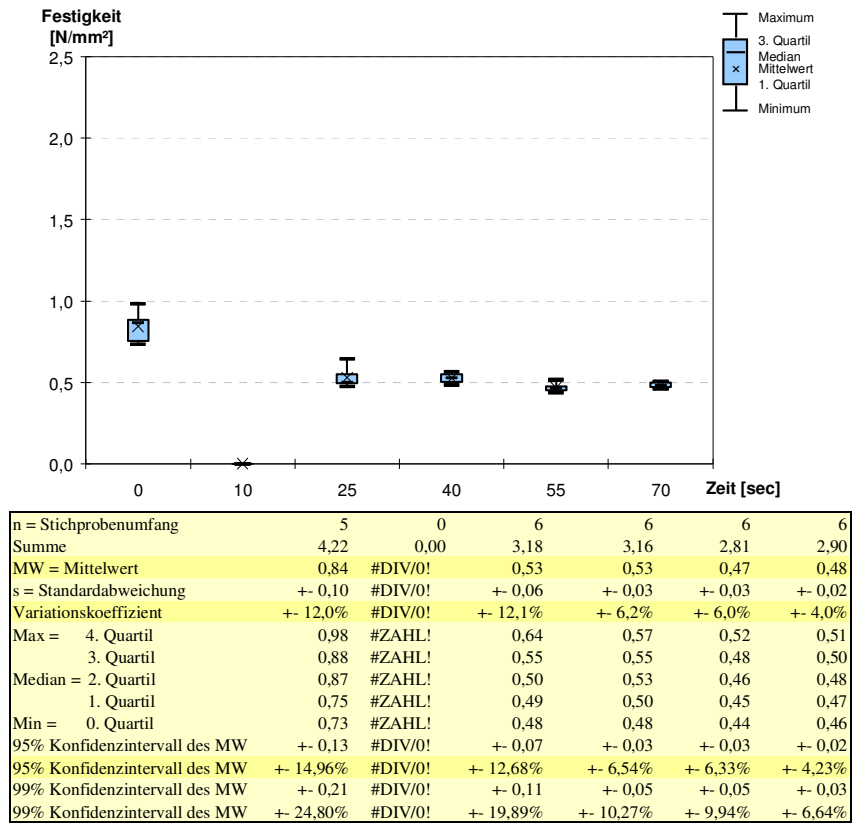
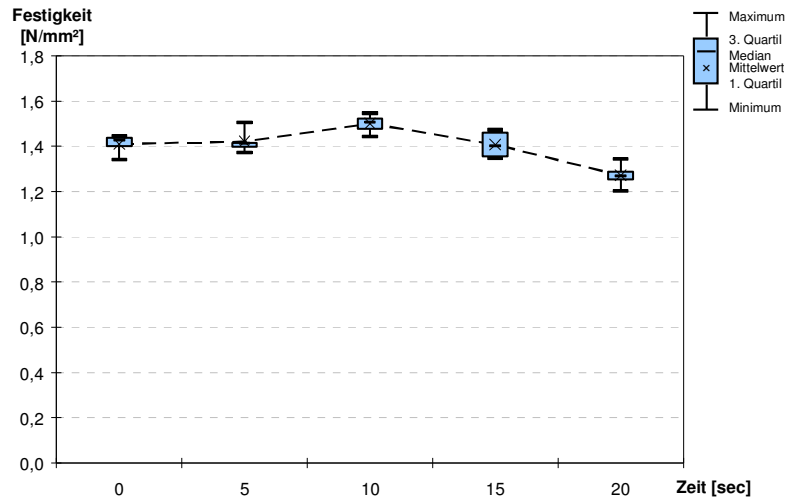
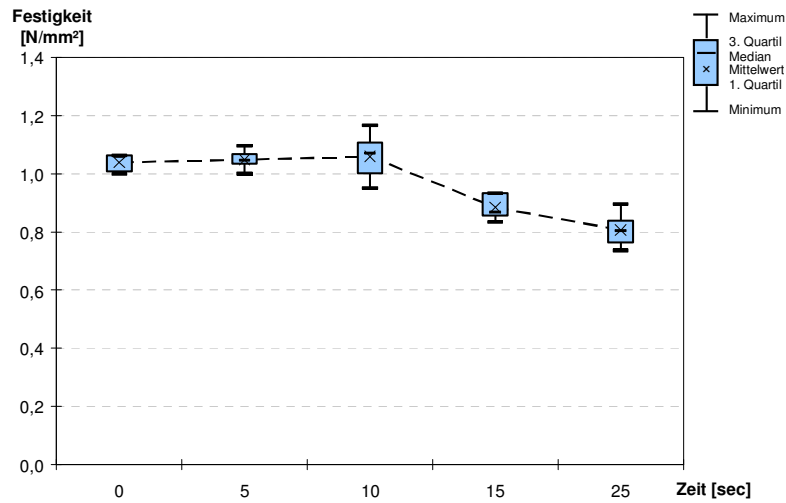


Abbildung 59: Rohdichte 550 kg/m³.



n = Stichprobenumfang	4	5	6	6	6	6
Summe	5,64	7,11	9,00	8,44	7,63	7,00
MW = Mittelwert	1,41	1,42	1,50	1,41	1,27	1,17
s = Standardabweichung	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,04	+ 0,06	+ 0,05	+ 0,07
Variationskoeffizient	+ 3,3%	+ 3,6%	+ 2,5%	+ 4,1%	+ 3,7%	+ 6,0%
Max = 4. Quartil	1,44	1,51	1,55	1,47	1,34	1,24
3. Quartil	1,44	1,42	1,52	1,46	1,29	1,22
Median = 2. Quartil	1,43	1,41	1,51	1,40	1,27	1,18
1. Quartil	1,40	1,40	1,48	1,36	1,25	1,13
Min = 0. Quartil	1,34	1,37	1,44	1,35	1,20	1,06
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,07	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,06	+ 0,05	+ 0,07
95% Konfidenzintervall des MW	+ 5,31%	+ 4,42%	+ 2,63%	+ 4,33%	+ 3,87%	+ 6,27%
99% Konfidenzintervall des MW	+ 0,14	+ 0,10	+ 0,06	+ 0,10	+ 0,08	+ 0,11
99% Konfidenzintervall des MW	+ 9,75%	+ 7,33%	+ 4,12%	+ 6,79%	+ 6,08%	+ 9,84%

Abbildung 61: Beleimungsgrad 13 %.



n = Stichprobenumfang	5	6	6	5	6
Summe	5,19	6,29	6,36	4,42	4,84
MW = Mittelwert	1,04	1,05	1,06	0,88	0,81
s = Standardabweichung	+ 0,03	+ 0,03	+ 0,08	+ 0,05	+ 0,06
Variationskoeffizient	+ 3,1%	+ 3,2%	+ 7,6%	+ 5,2%	+ 7,4%
Max = 4. Quartil	1,06	1,10	1,17	0,93	0,89
3. Quartil	1,06	1,07	1,11	0,93	0,84
Median = 2. Quartil	1,06	1,05	1,07	0,87	0,80
1. Quartil	1,01	1,03	1,00	0,85	0,76
Min = 0. Quartil	1,00	1,00	0,95	0,83	0,74
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,08	+ 0,06	+ 0,06
95% Konfidenzintervall des MW	+ 3,84%	+ 3,32%	+ 7,99%	+ 6,44%	+ 7,72%
99% Konfidenzintervall des MW	+ 0,07	+ 0,05	+ 0,13	+ 0,09	+ 0,10
99% Konfidenzintervall des MW	+ 6,36%	+ 5,21%	+ 12,54%	+ 10,68%	+ 12,11%

Abbildung 61: Beleimungsgrad 7 %.

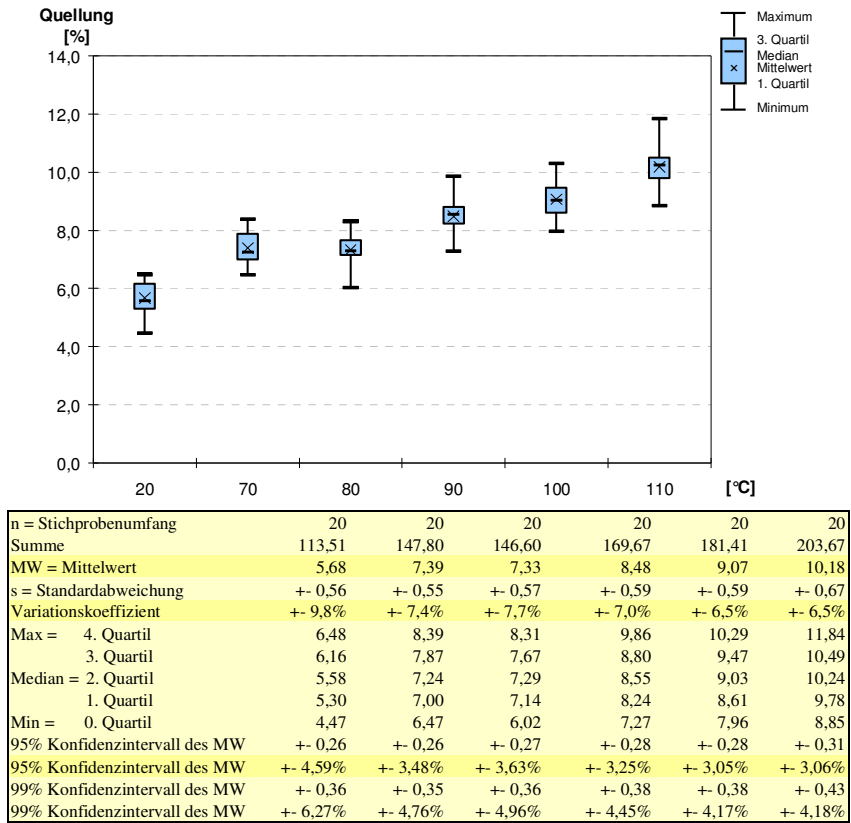


Abbildung 70: Quellung.

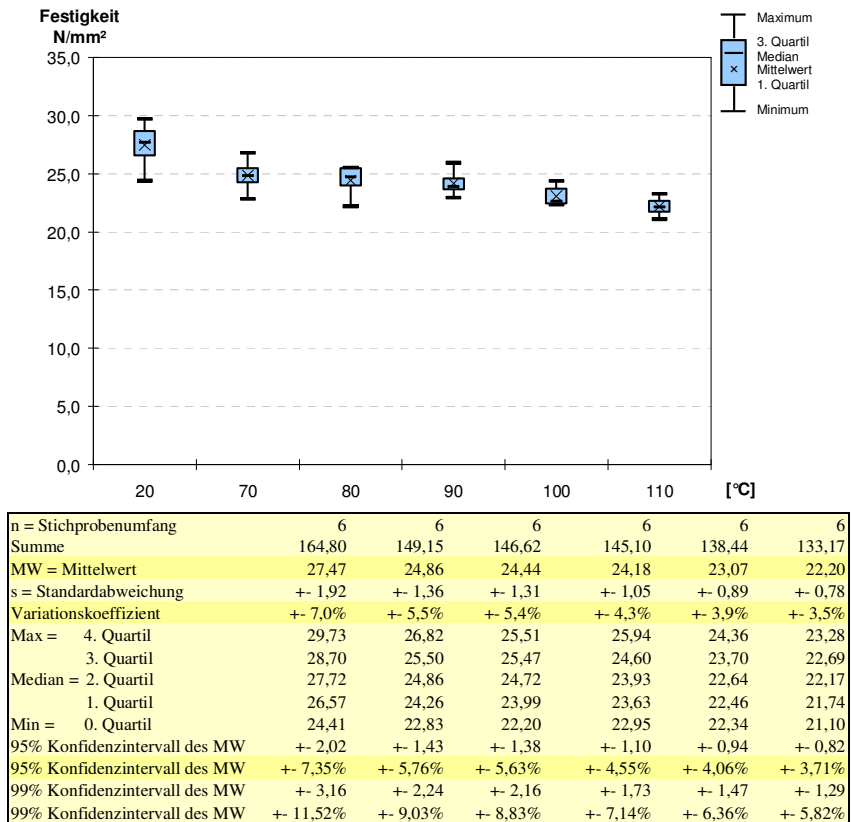


Abbildung 70: Biegefestigkeit.

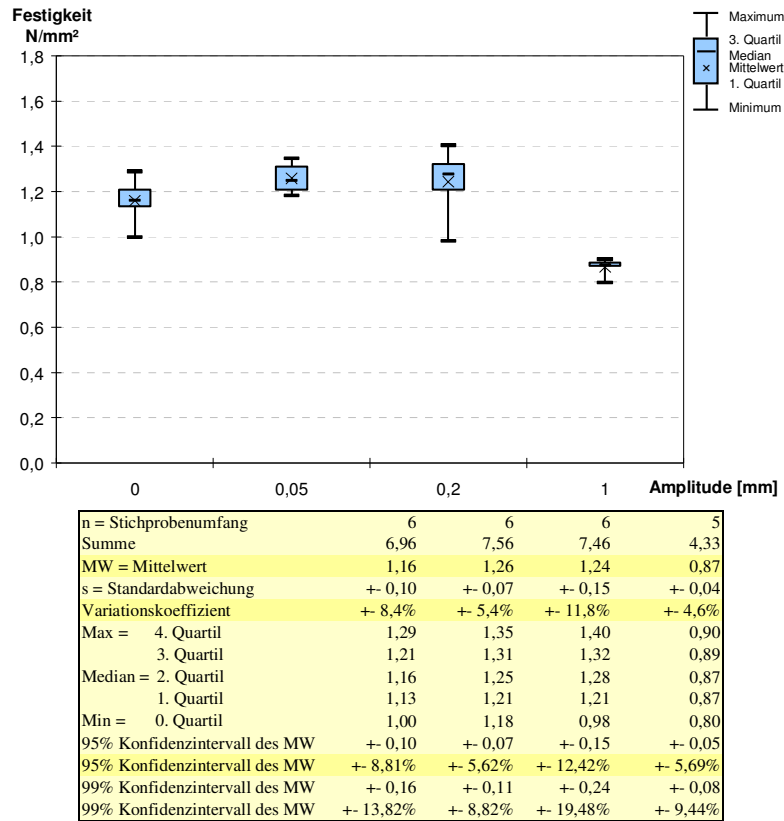


Abbildung 82: 110°C, 0,5 Hz.

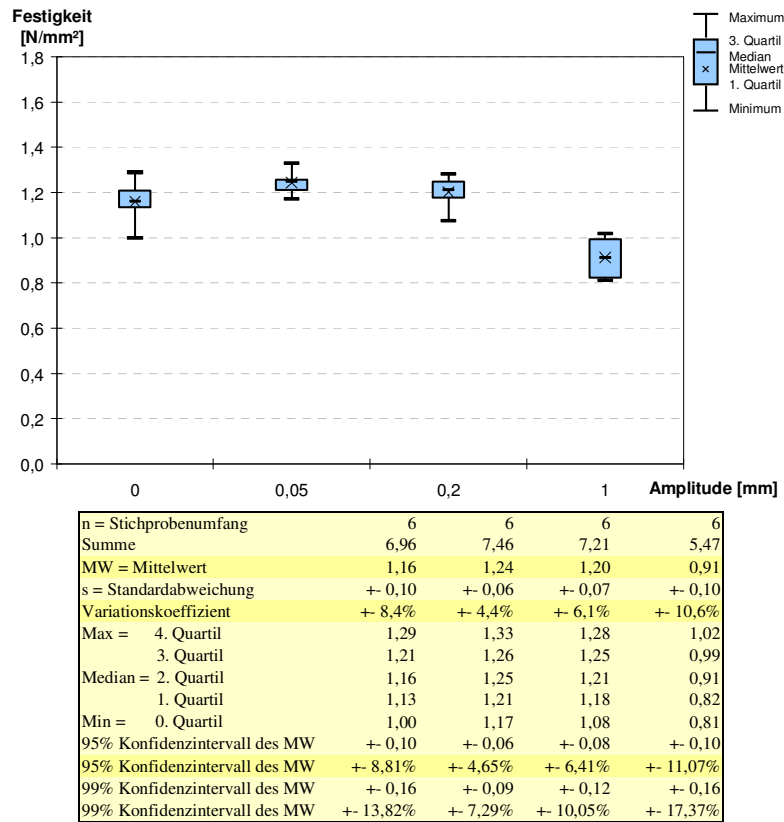


Abbildung 82: 110°C, 1 Hz.

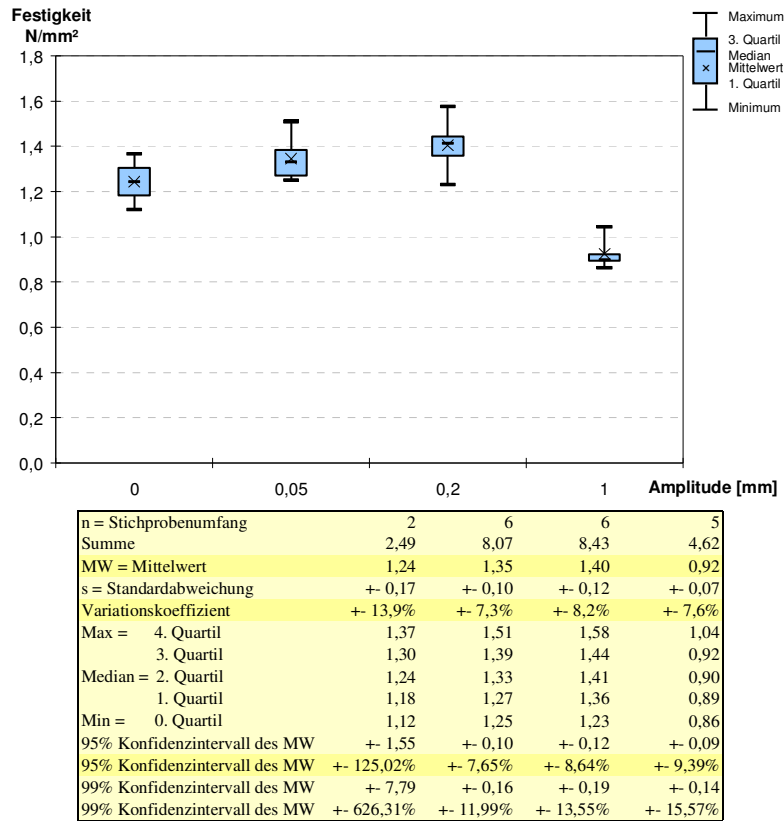


Abbildung 82: 140°C, 0,5 Hz.

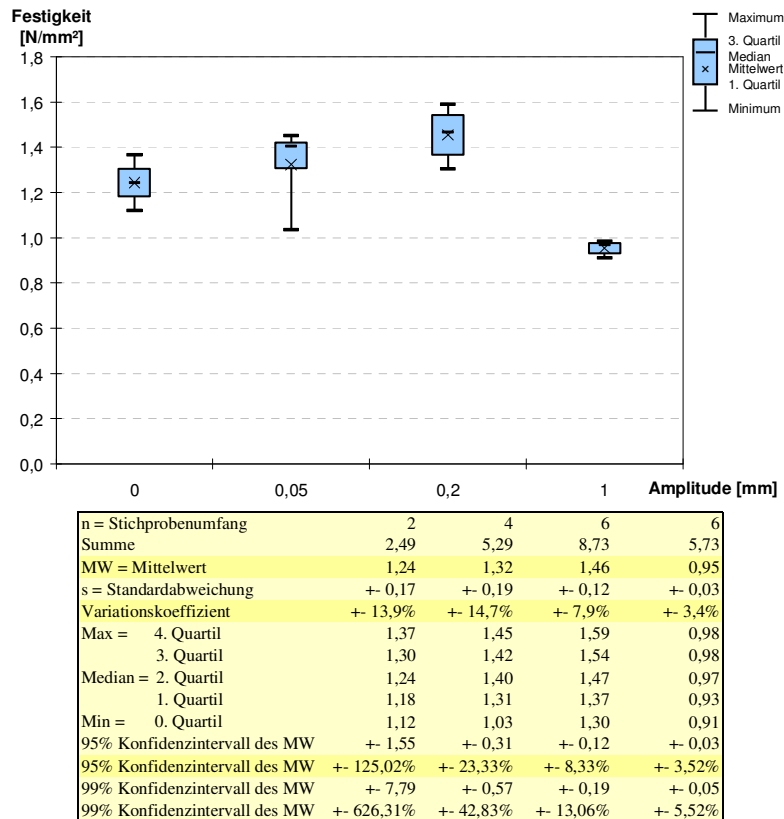


Abbildung 82: 140°C, 1 Hz.

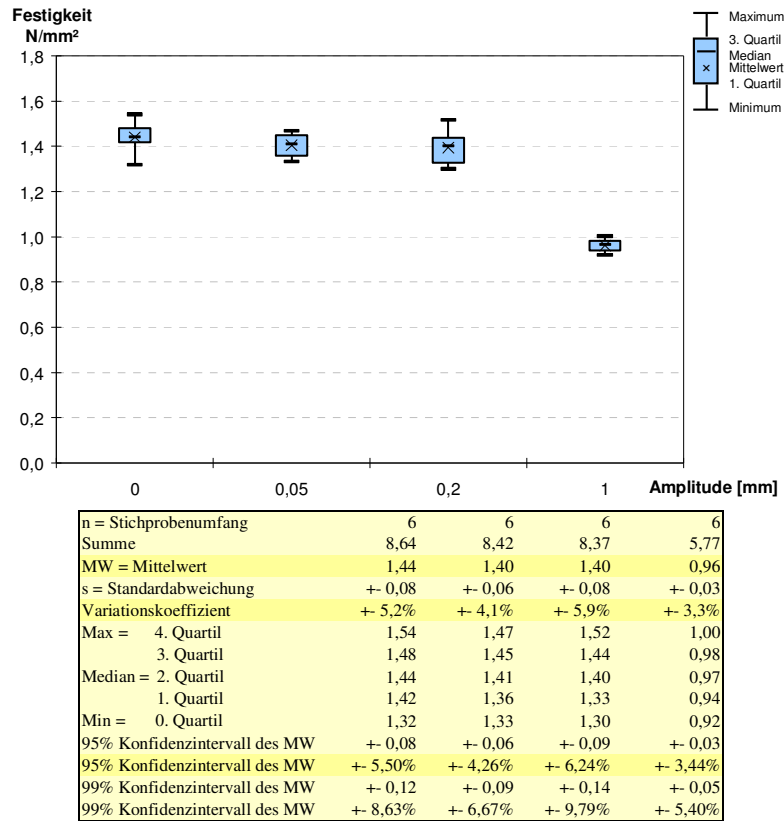


Abbildung 82: 180°C, 0,5 Hz.

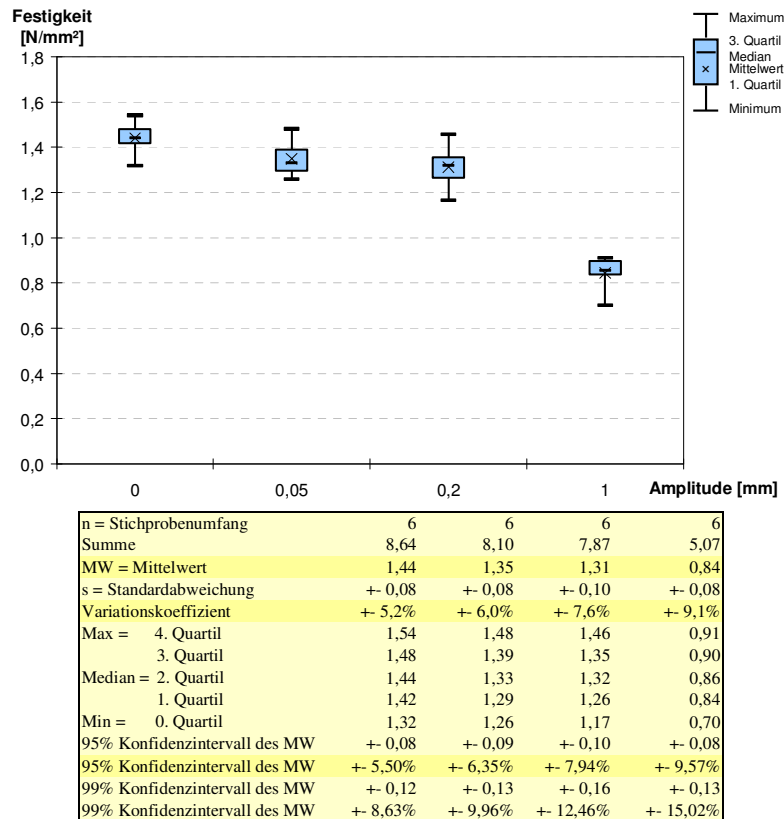


Abbildung 82: 180°C, 1 Hz.

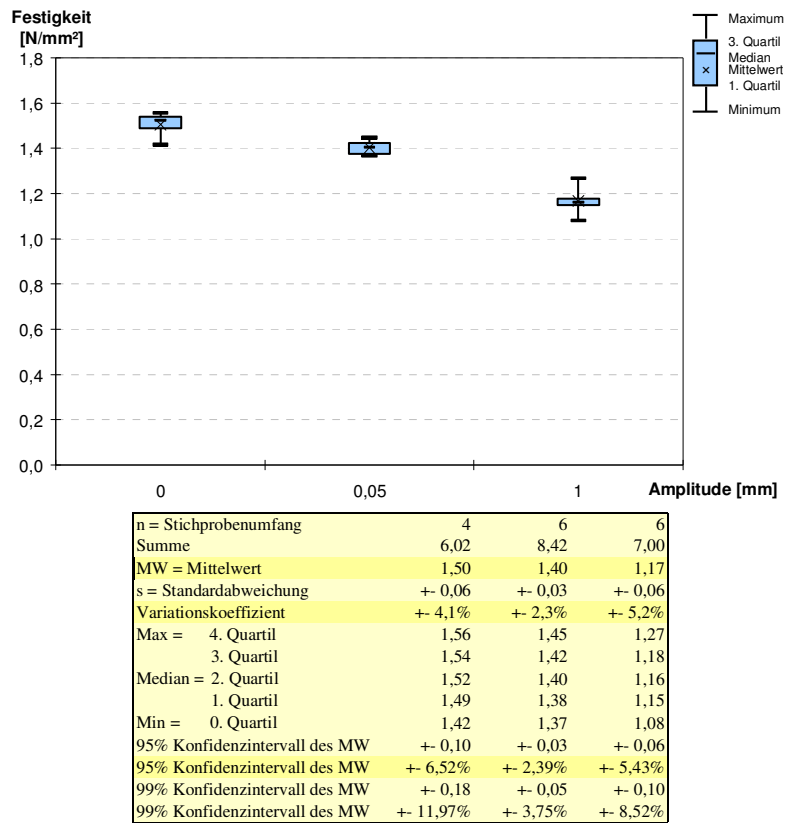


Abbildung 83: 850 kg/m³, 1 Hz, komplett.

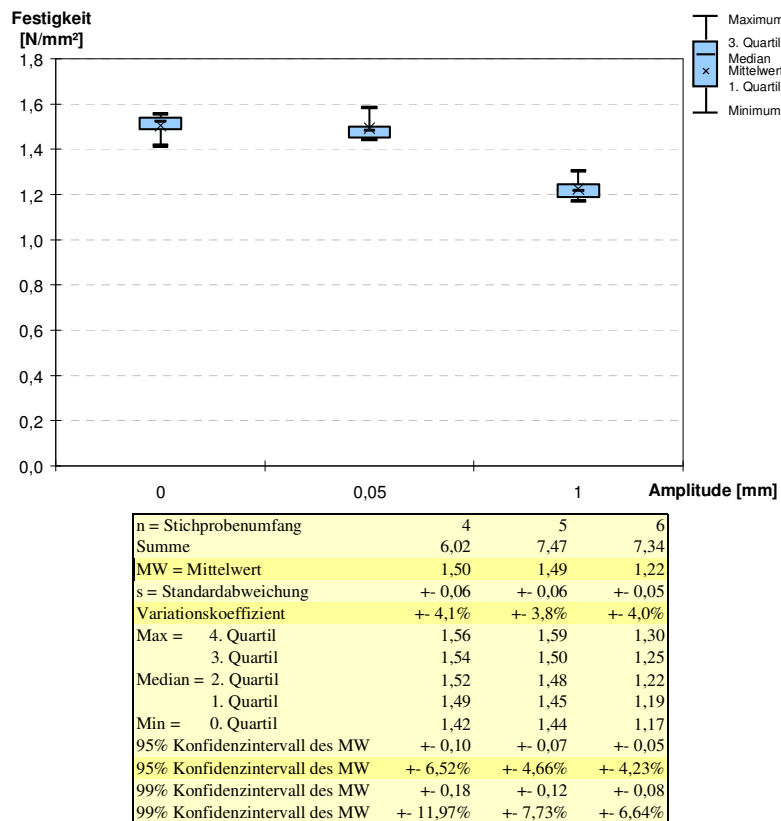


Abbildung 83: 850 kg/m³, 0,5 Hz, komplett.

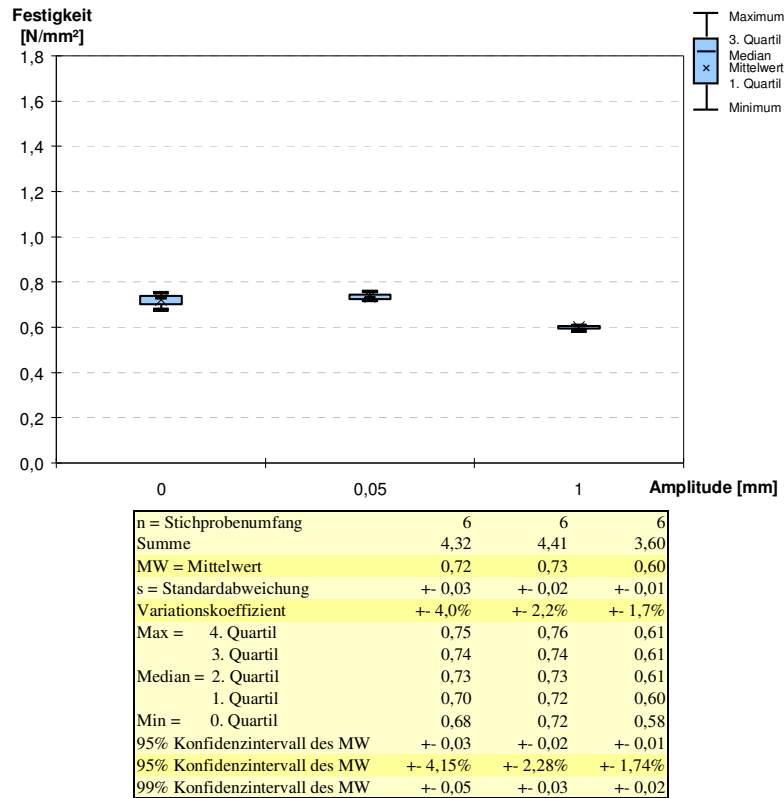


Abbildung 83: 550 kg/m³, 1 Hz, komplett.

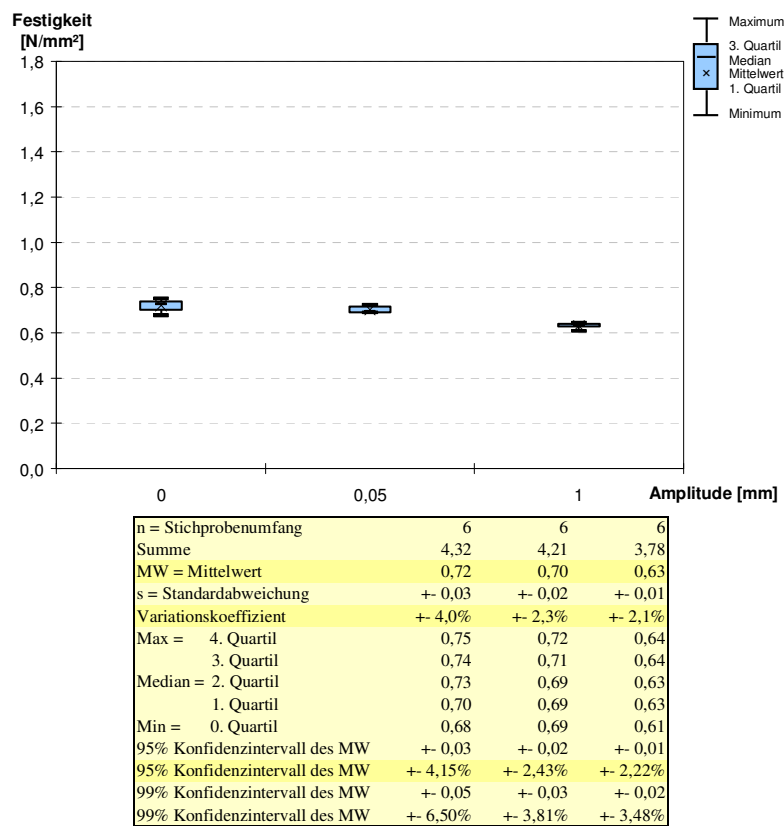


Abbildung 83: 550 kg/m³, 0,5 Hz, komplett.

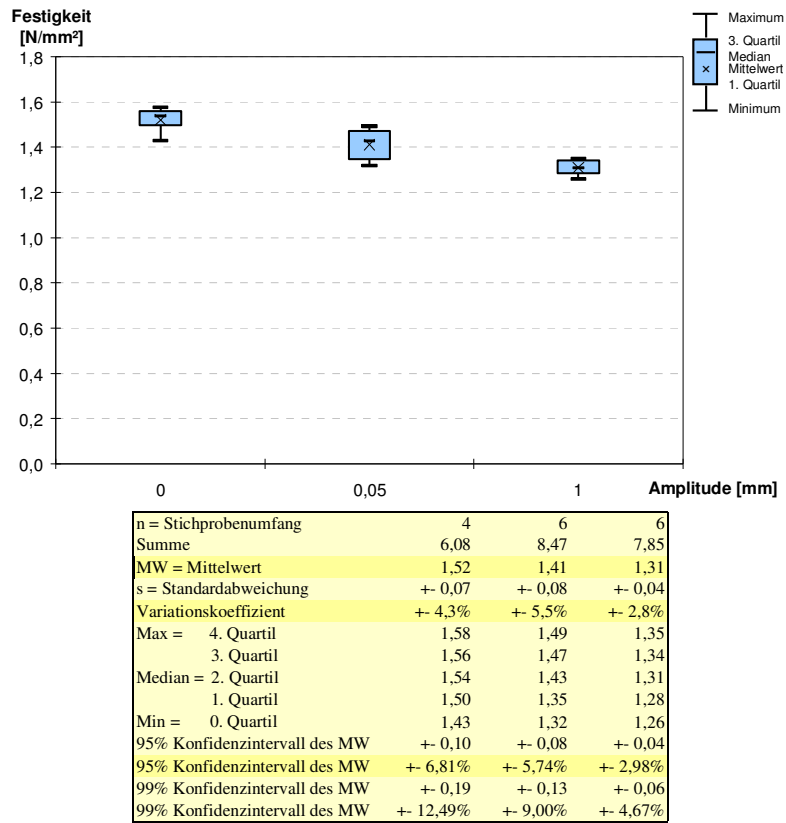


Abbildung 84: 850 kg/m³, 1 Hz, hinten.

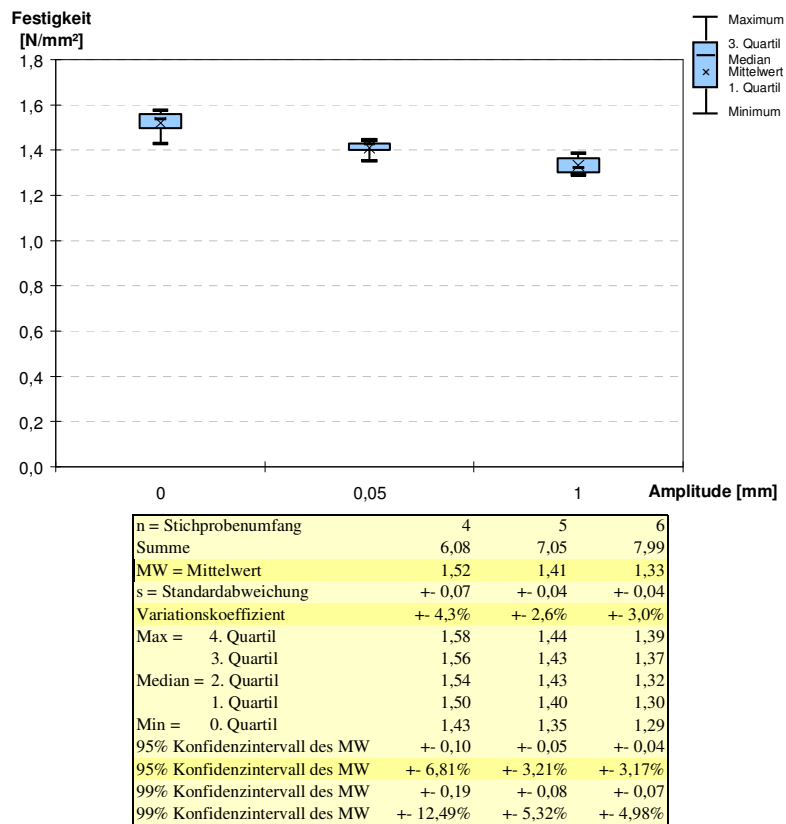


Abbildung 84: 850 kg/m³, 0,5 Hz, hinten.

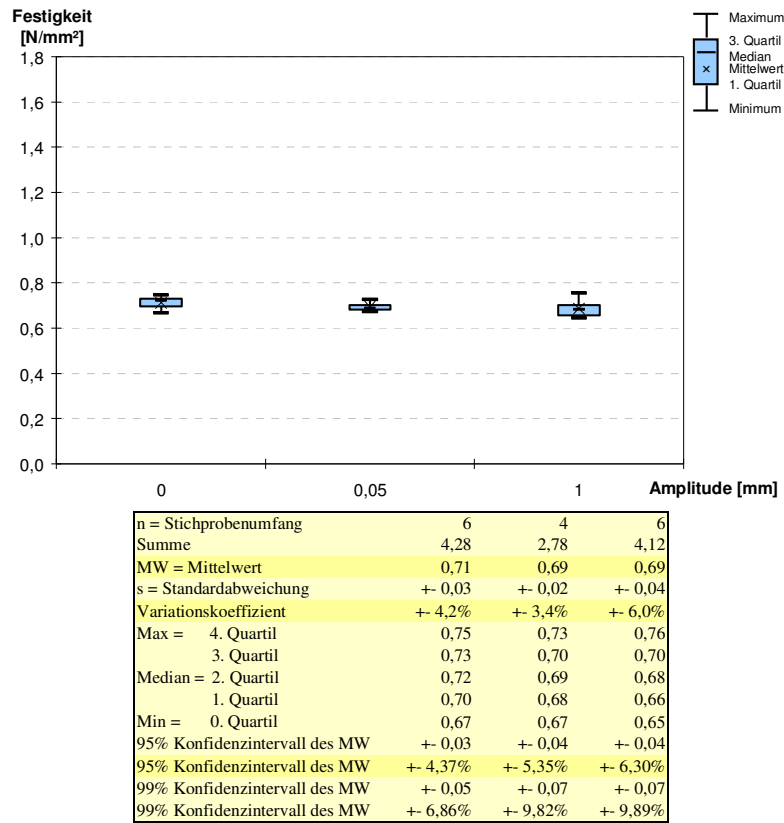


Abbildung 84: 550 kg/m³, 1 Hz, hinten.

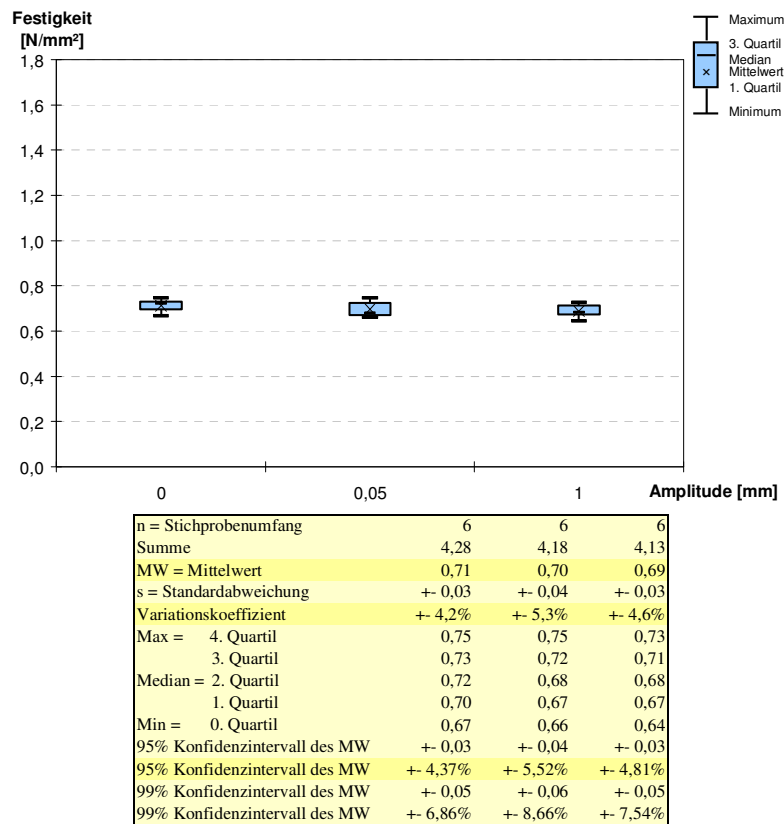


Abbildung 84: 550 kg/m³, 0,5 Hz, hinten.

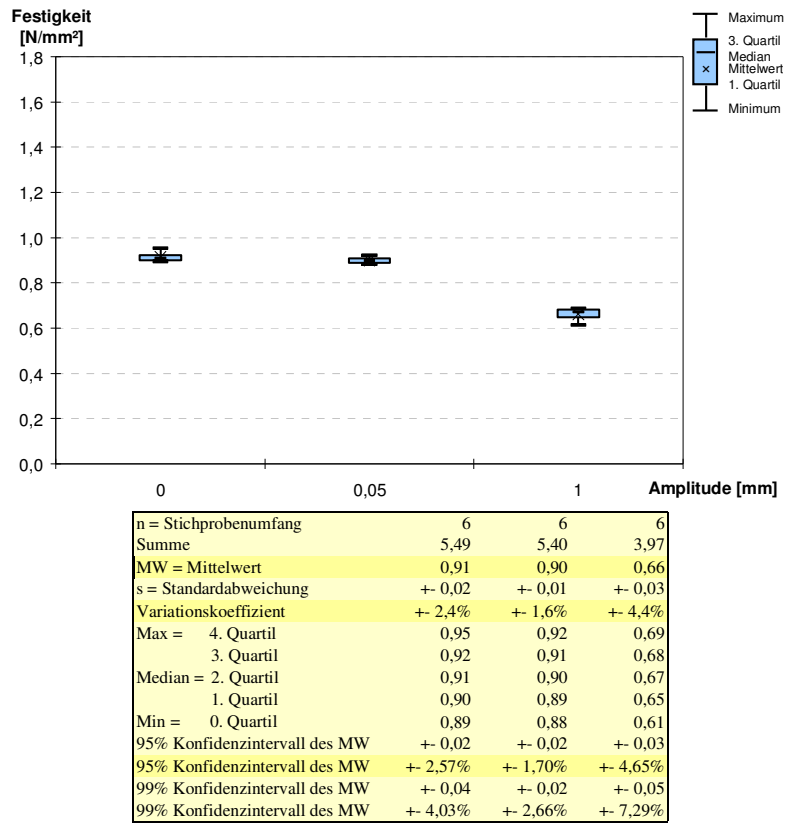


Abbildung 87: Beleimung 3 %.

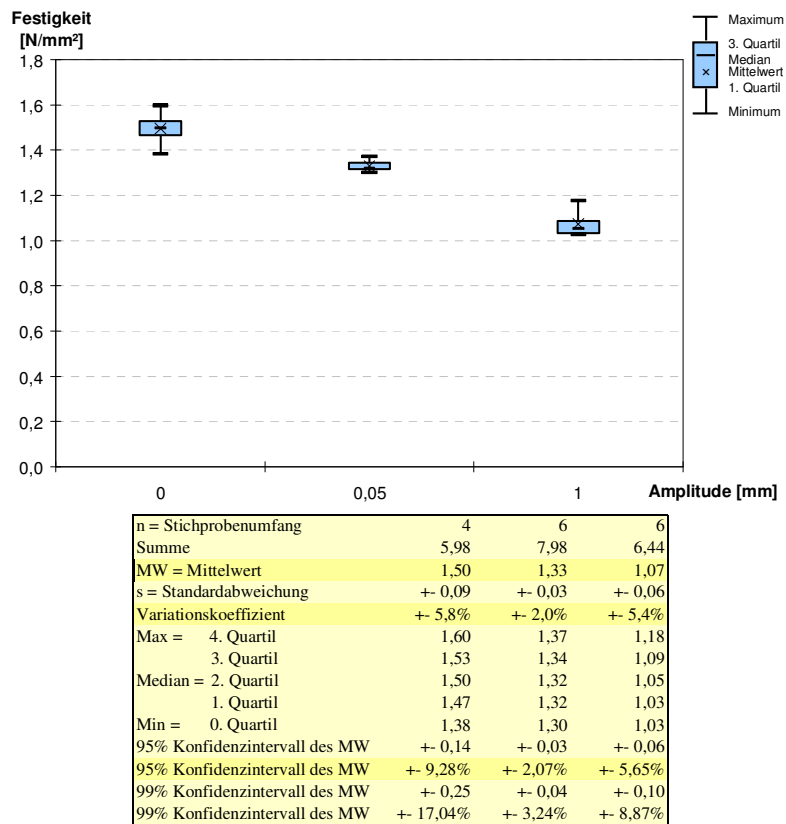


Abbildung 87: Beleimung 10 %.

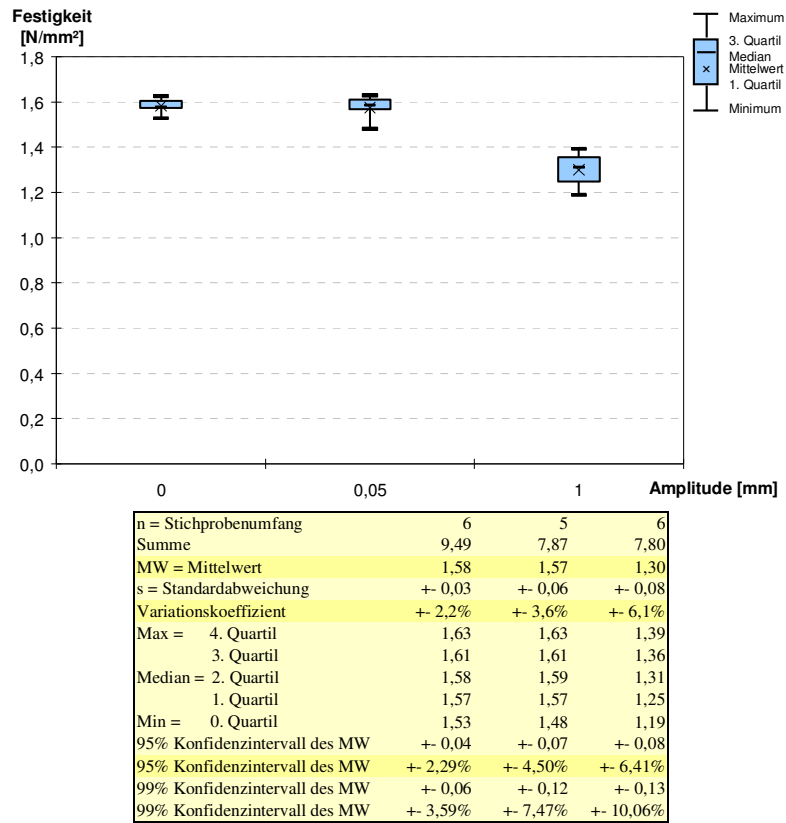


Abbildung 87: Beleimung 17 %.

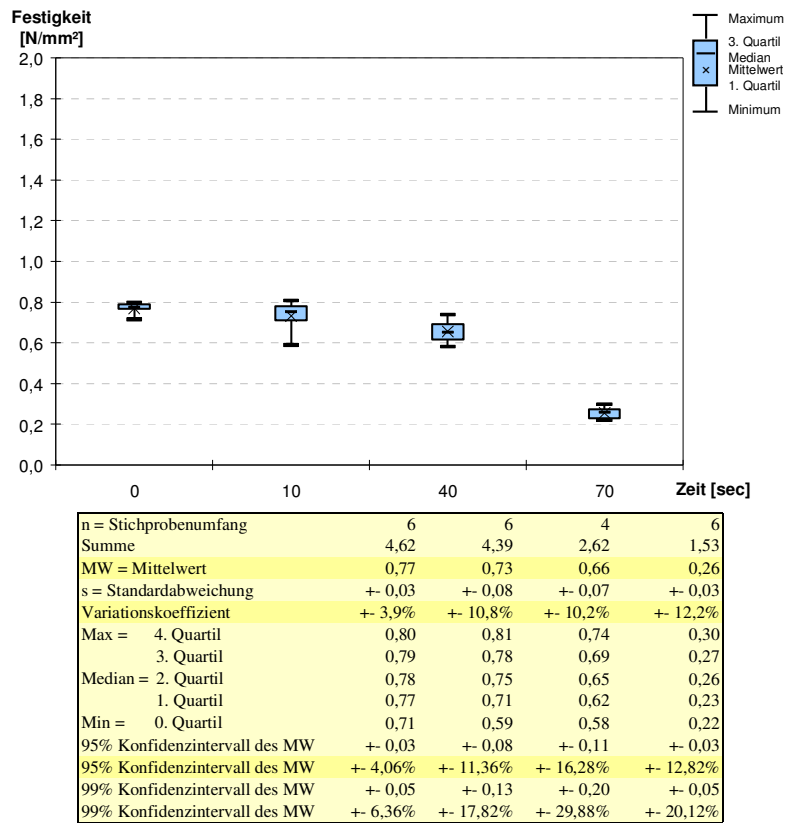


Abbildung 95: Beileimung 7%.

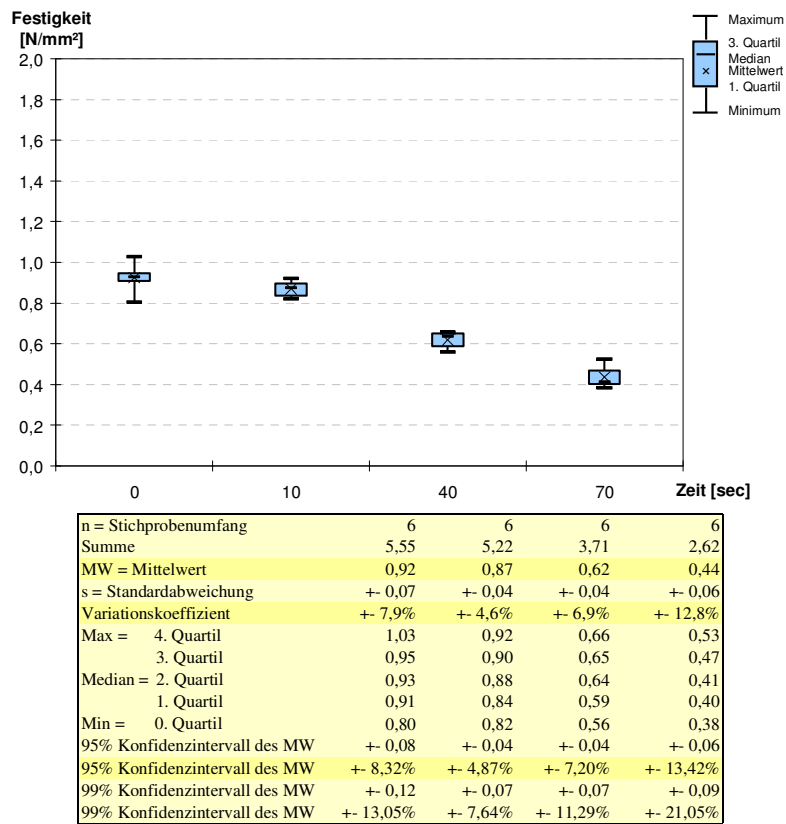


Abbildung 95: Beileimung 13%.

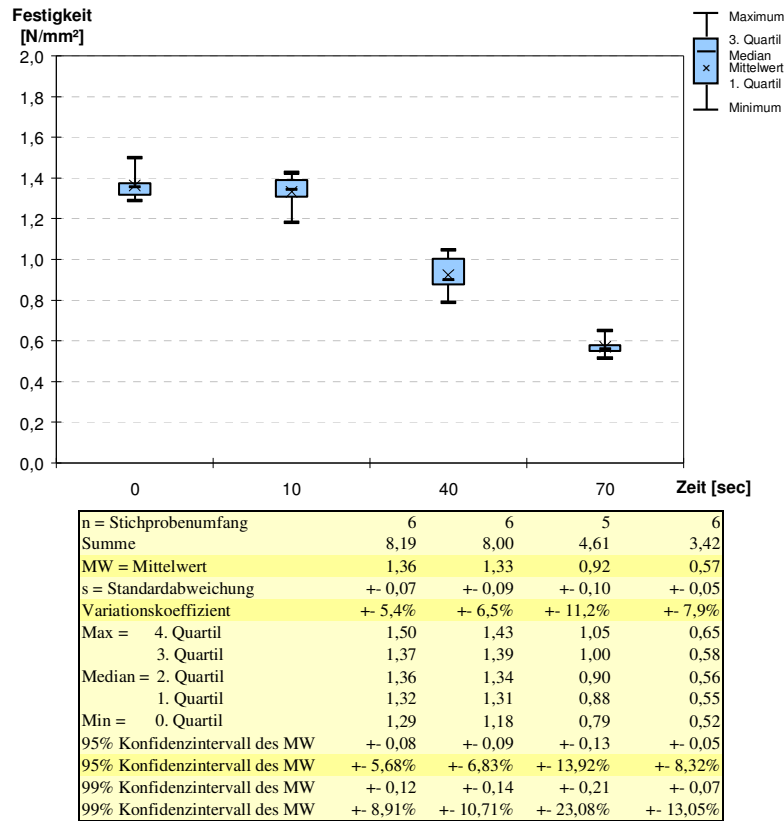


Abbildung 96: Beleimung 7%.

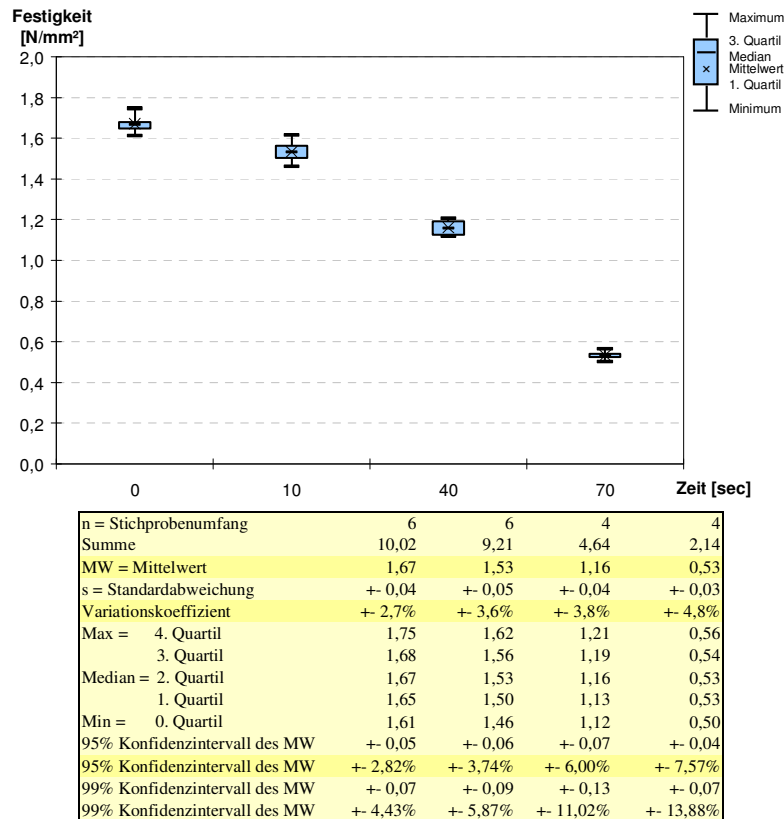


Abbildung 96: Beleimung 13%.

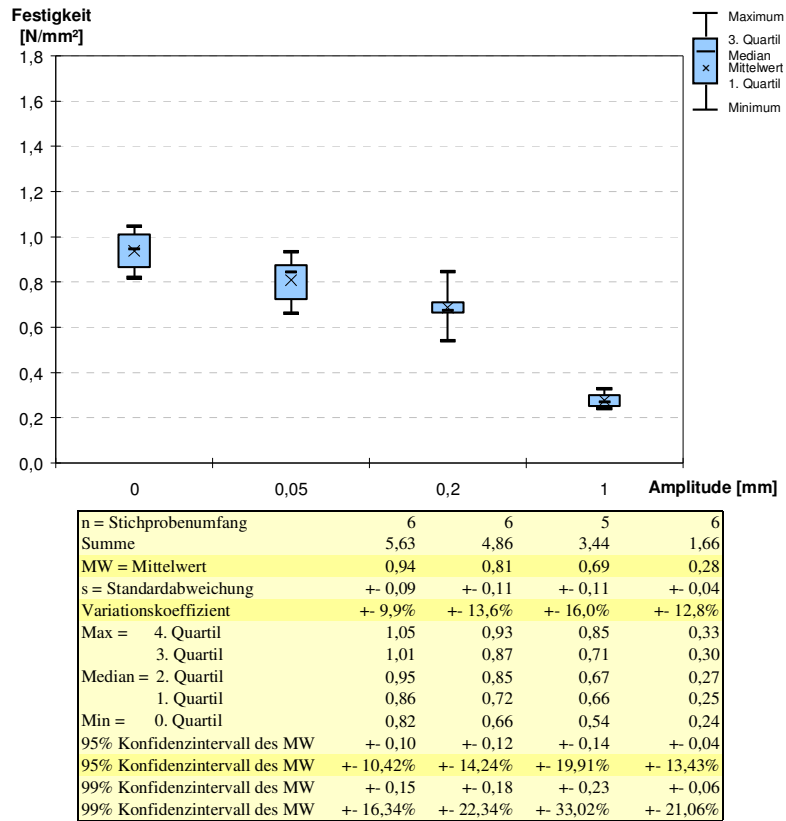


Abbildung 101: Span.

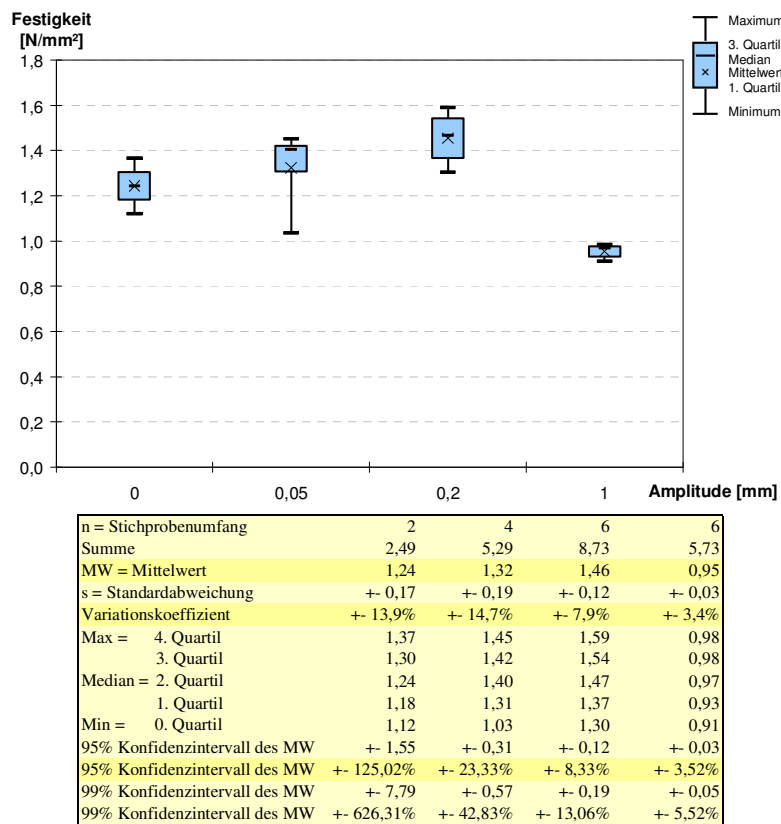


Abbildung 101: Faser.

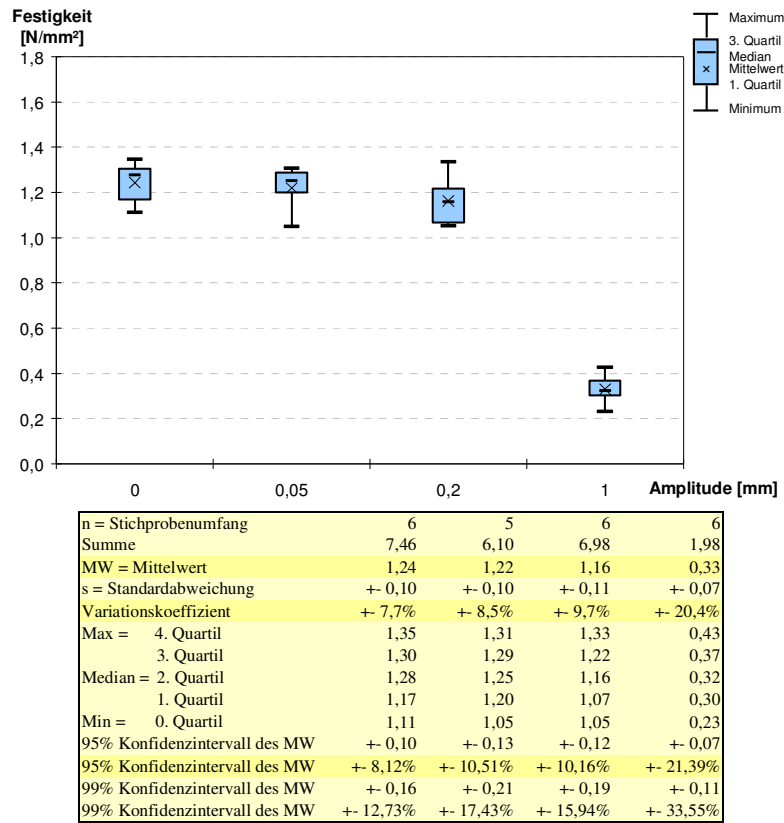


Abbildung 102: Span.

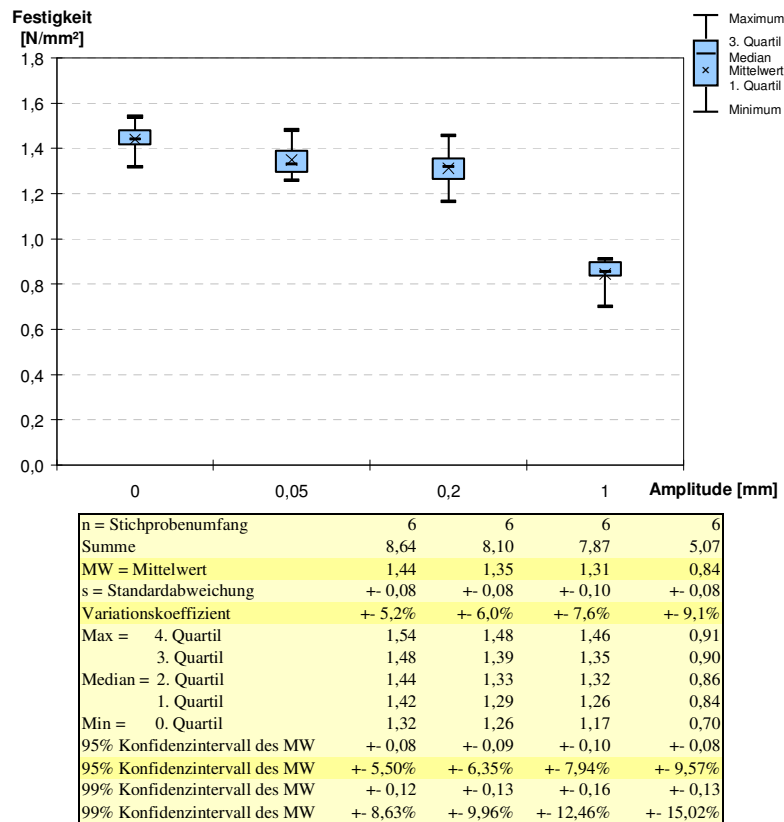


Abbildung 102: Faser.

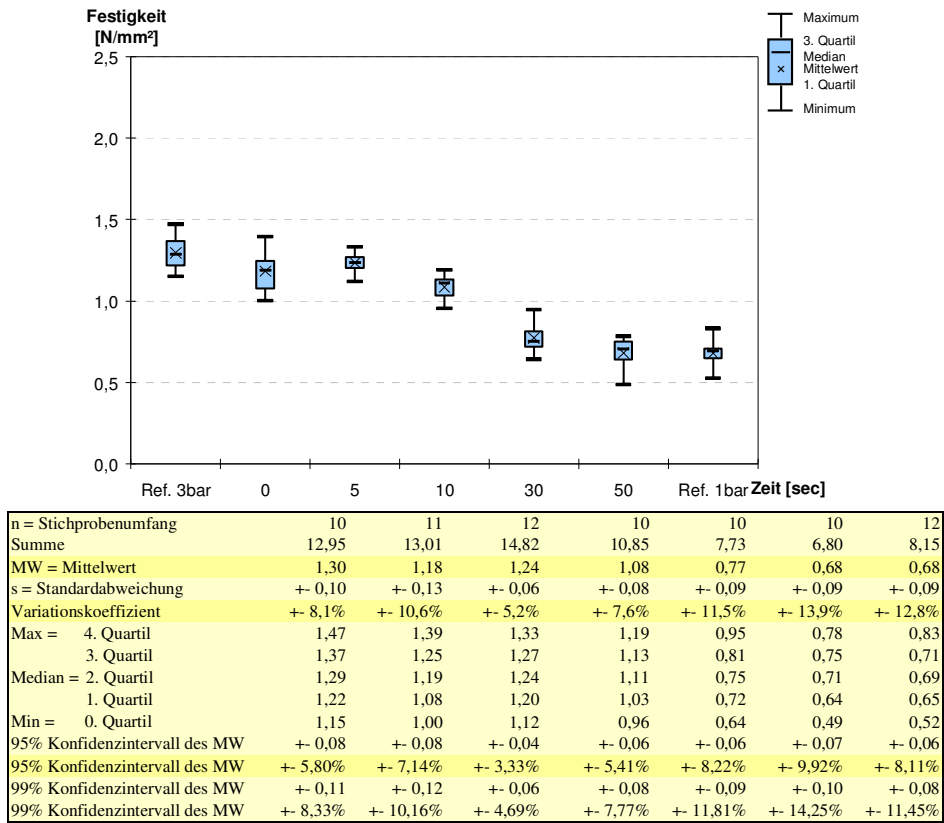


Abbildung 105: Presstemperatur 120°C.

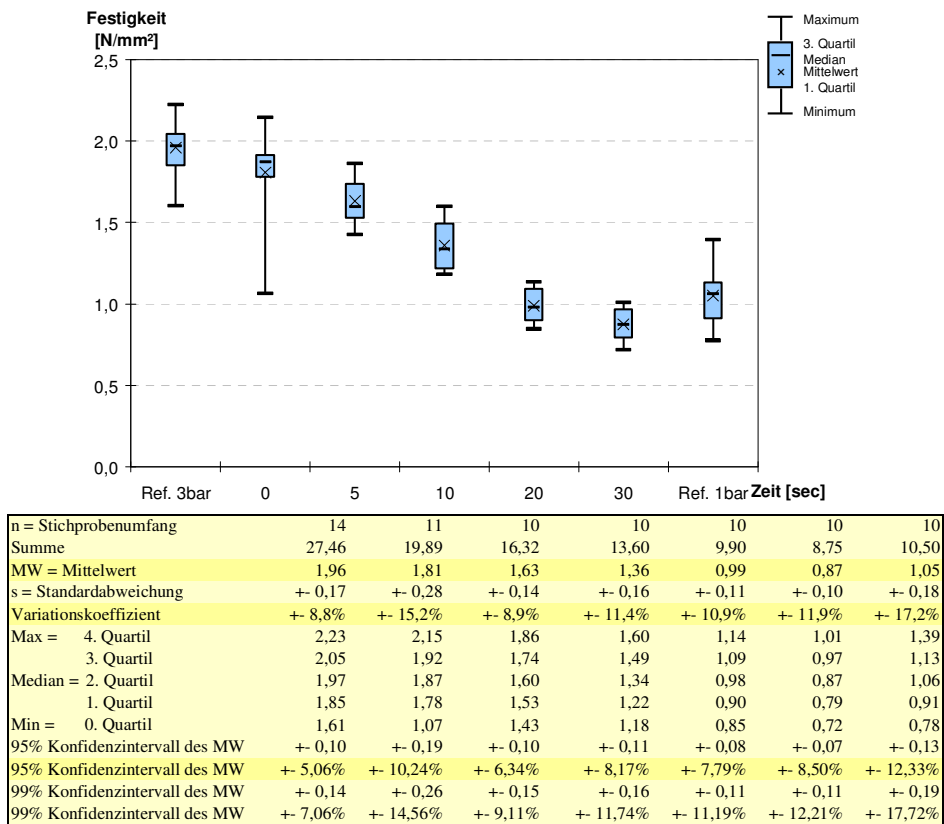
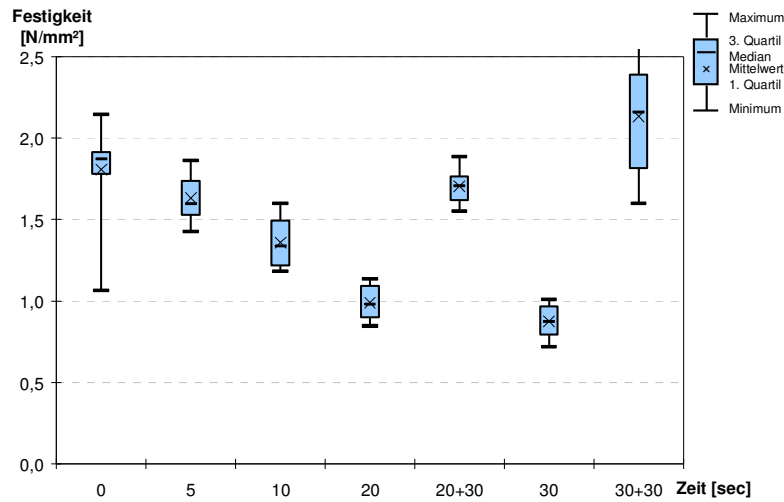
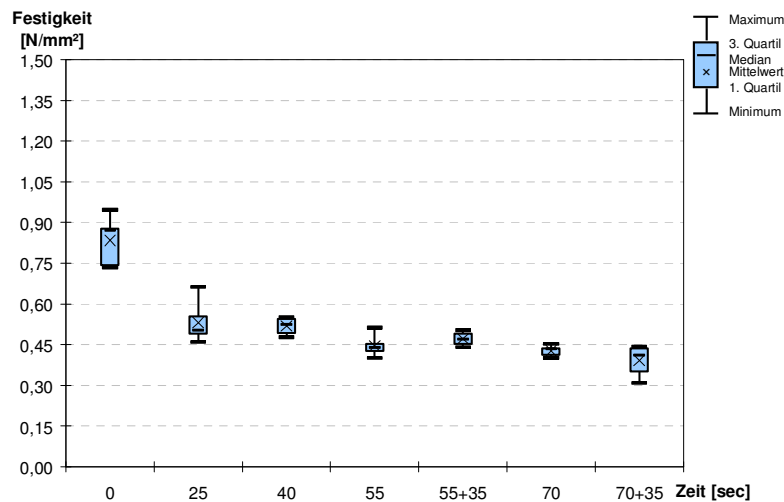


Abbildung 106: Presstemperatur 140°C.



n = Stichprobenumfang	11	10	10	10	12	10	10
Summe	19,89	16,32	13,60	9,90	20,46	8,75	21,33
MW = Mittelwert	1,81	1,63	1,36	0,99	1,71	0,87	2,13
s = Standardabweichung	+ 0,28	+ 0,14	+ 0,16	+ 0,11	+ 0,11	+ 0,10	+ 0,36
Variationskoeffizient	+ 15,2%	+ 8,9%	+ 11,4%	+ 10,9%	+ 6,2%	+ 11,9%	+ 17,1%
Max = 4. Quartil	2,15	1,86	1,60	1,14	1,89	1,01	2,63
3. Quartil	1,92	1,74	1,49	1,09	1,76	0,97	2,39
Median = 2. Quartil	1,87	1,60	1,34	0,98	1,71	0,87	2,16
1. Quartil	1,78	1,53	1,22	0,90	1,62	0,79	1,82
Min = 0. Quartil	1,07	1,43	1,18	0,85	1,55	0,72	1,60
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,19	+ 0,10	+ 0,11	+ 0,08	+ 0,07	+ 0,07	+ 0,26
95% Konfidenzintervall des MW	+ 10,24%	+ 6,34%	+ 8,17%	+ 7,79%	+ 3,93%	+ 8,50%	+ 12,21%
99% Konfidenzintervall des MW	+ 0,26	+ 0,15	+ 0,16	+ 0,11	+ 0,09	+ 0,11	+ 0,37
99% Konfidenzintervall des MW	+ 14,56%	+ 9,11%	+ 11,74%	+ 11,19%	+ 5,55%	+ 12,21%	+ 17,54%

Abbildung 107: ABES.



n = Stichprobenumfang	5	6	6	6	6	6	6
Summe	4,17	3,19	3,11	2,67	2,83	2,56	2,35
MW = Mittelwert	0,83	0,53	0,52	0,45	0,47	0,43	0,39
s = Standardabweichung	+ 0,09	+ 0,07	+ 0,03	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,06
Variationskoeffizient	+ 11,1%	+ 13,9%	+ 6,2%	+ 8,6%	+ 5,4%	+ 4,5%	+ 14,5%
Max = 4. Quartil	0,95	0,66	0,55	0,51	0,50	0,45	0,44
3. Quartil	0,88	0,55	0,54	0,45	0,49	0,44	0,44
Median = 2. Quartil	0,87	0,50	0,52	0,44	0,47	0,43	0,41
1. Quartil	0,74	0,49	0,49	0,43	0,45	0,41	0,35
Min = 0. Quartil	0,73	0,46	0,48	0,40	0,44	0,40	0,31
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,11	+ 0,08	+ 0,03	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,06
95% Konfidenzintervall des MW	+ 13,76%	+ 14,59%	+ 6,53%	+ 9,00%	+ 5,70%	+ 4,75%	+ 15,21%
99% Konfidenzintervall des MW	+ 0,19	+ 0,12	+ 0,05	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,09
99% Konfidenzintervall des MW	+ 22,81%	+ 22,88%	+ 10,24%	+ 14,12%	+ 8,94%	+ 7,46%	+ 23,86%

Abbildung 108: Faser

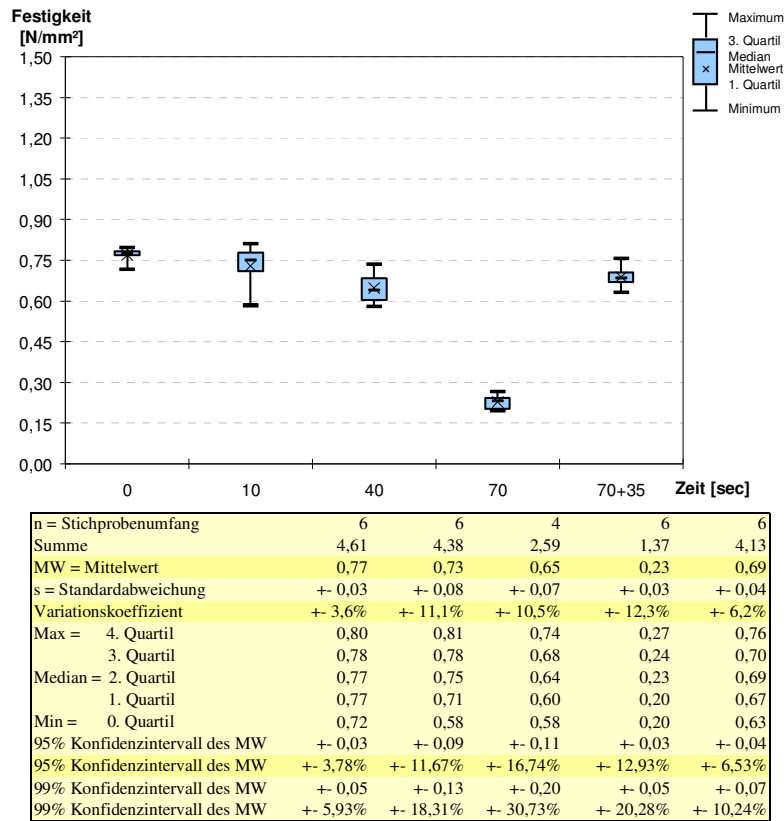


Abbildung 109: Span.

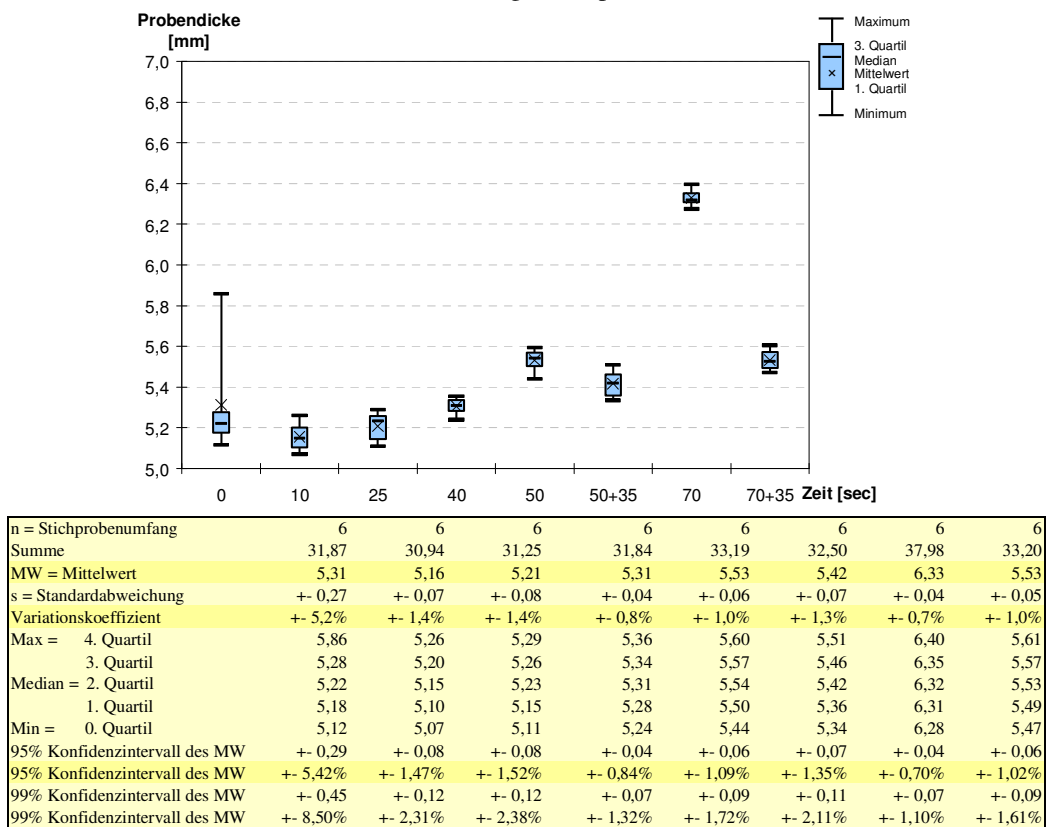
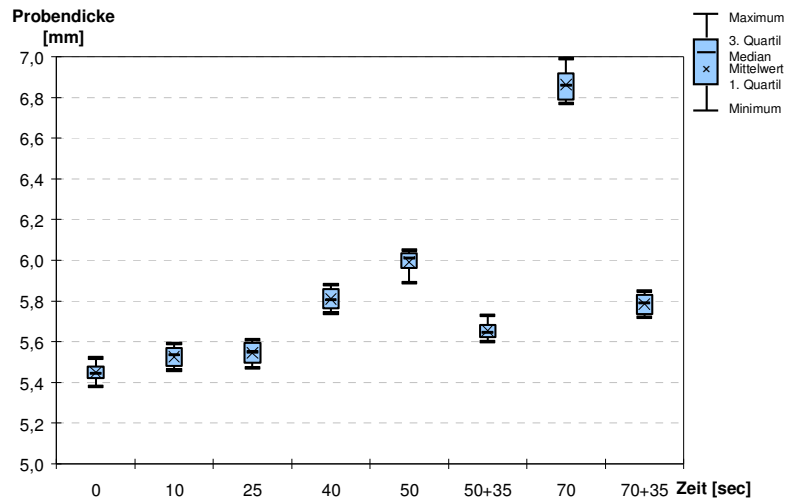


Abbildung 110: Faserdicke.



n = Stichprobenumfang	6	6	6	6	6	6	6	6
Summe	32,69	33,16	33,27	34,86	35,95	33,93	41,18	34,71
MW = Mittelwert	5,45	5,53	5,55	5,81	5,99	5,66	6,86	5,79
s = Standardabweichung	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,05	+ 0,09	+ 0,06
Variationskoeffizient	+ 0,9%	+ 1,0%	+ 1,1%	+ 1,0%	+ 1,0%	+ 0,9%	+ 1,3%	+ 1,0%
Max = 4. Quartil	5,52	5,59	5,61	5,88	6,05	5,73	6,99	5,85
3. Quartil	5,48	5,57	5,60	5,86	6,04	5,68	6,92	5,83
Median = 2. Quartil	5,45	5,54	5,55	5,81	6,01	5,65	6,86	5,79
1. Quartil	5,42	5,48	5,50	5,77	5,96	5,62	6,79	5,74
Min = 0. Quartil	5,38	5,46	5,47	5,74	5,89	5,60	6,77	5,72
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,05	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,05	+ 0,09	+ 0,06
95% Konfidenzintervall des MW	+ 0,98%	+ 1,04%	+ 1,13%	+ 1,06%	+ 1,07%	+ 0,90%	+ 1,37%	+ 1,05%
99% Konfidenzintervall des MW	+ 0,08	+ 0,09	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,08	+ 0,15	+ 0,10
99% Konfidenzintervall des MW	+ 1,53%	+ 1,63%	+ 1,77%	+ 1,66%	+ 1,68%	+ 1,41%	+ 2,14%	+ 1,65%

Abbildung 110: Spandicke.