

Charakterisierung der Aushärtung von
Aminoharzen in einer Holzpartikelmatrix
durch Evaluierung von Festigkeiten und
Reaktionskinetik

Abstract der

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

an der Universität Hamburg

Fachbereich Biologie

vorgelegt von

Christian Heinemann

aus Höxter

Hamburg 2004

Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes, mit dem Ziel der Gewinnmaximierung, basiert in erster Linie Produktionskostenminimierung bzw. Erlösmaximierung durch eine optimale Kapazitätsauslastung. Dieses Ziel wird im Bereich der Holzwerkstoffproduktion dadurch erreicht, indem die Geschwindigkeit des Produktionsprozesses, die im wesentlichen vom Aushärtungsfortschritt des verwendeten Klebstoffes abhängt, maximiert wird. Um den Anforderungen geringer Presszeitfaktoren nachzukommen, ist es durchaus sinnvoll, möglichst reaktive Klebstoffe einzusetzen. Während des Pressens bilden sich ein Temperatur- und ein Rohdichteprofil aus, die wiederum die Grundlage des Festigkeitsprofils bilden. Bedingt durch den verzögerten Temperaturanstieg und eine relativ niedrige Rohdichte weist die Mattenmittelschicht die geringsten Festigkeiten auf.

Derzeit werden unterschiedliche Analysemethoden angewendet, um charakteristische Werte der Klebstoffsysteme herauszustellen, die die Reaktivität des Klebstoffes widerspiegeln sollen. Mit Hilfe physikalisch-thermischer Analysemethoden lassen sich im wesentlichen Aushärtungsgeschwindigkeit bzw. Aushärtungspotential von Klebstoffsystemen charakterisieren. Diese Methoden beruhen jedoch auf einer isolierten Betrachtung der Klebharze unter Bestimmung der Reaktionswärme (DTA, DDK) bzw. der kohäsiven Aushärtungs- und Festigkeitsentwicklung (Gelierzzeit, Torsionsanalyse). Sie lassen jedoch keine Aussagen über die Aushärtungsentwicklung bzw. über die zu erwartenden Festigkeiten in Verbindung mit einer Holzpartikelmatrix zu. Genau dieses ist jedoch für den Heißpressvorgang von Holzwerkstoffen von Interesse, da in einer Holzpartikel-Klebstoffmatrix andere Randbedingungen für den Aushärtungsprozess vorgegeben werden dieses bei unvermischten Klebstoffsystemen der Fall ist.

Während des Heißpressens einer Holzwerkstoffmatte werden die Partikel über ihre originäre Dichte hinaus verdichtet, wodurch innere Spannungen entstehen. Im Moment der Pressenöffnung und gleichzeitigen mechanischen Druckentlastung müssen die Klebpunkte in den Überlappungsbereichen der Holzpartikel die Rückfederungskräfte, die entgegen der Verdichtungsrichtung wirken, aufnehmen. Während die Restspannungen in der Holzpartikel-Klebstoffmatrix mit Zunahme von Temperatur, Feuchte und Presszeit abnehmen, steigt der Dampfdruck im Porensystem gleichzeitig an und sorgt damit für eine weitere Belastung der teilweise ausgehärteten Klebpunkte.

Die Effizienz des Herstellungsprozesses beruht somit nicht ausschließlich auf einer möglichst schnellen Aushärtung des Klebstoffs, sondern einzig in Kombination mit dem Abbau von inneren Spannungen und die Reduzierung des Dampfdrucks durch eine strategische Pressensteuerung führt zu einer optimalen Auslastung bzw. zu einem ressourcenschonenden Prozess.

Ziel dieser Arbeit war es, anhand fünf verschiedener Untersuchungsmethoden den Aushärtungsverlauf bzw. die Festigkeitsentwicklung verschiedenartiger Klebstoffsysteme zu charakterisieren. Die chemische Vernetzung sowie die mechanische Aushärtung zweier Harnstoffharze (UF#2, UF#3), die sich in ihrem Molverhältnis unterscheiden, sowie zweier melaminverstärkter Harnstoffharze (UFm#4 und UFm#5) mit unterschiedlichen Melaminanteilen wurden untersucht und die Ergebnisse miteinander in Relation gesetzt. Als

Standardklebstoff diente ein Harnstoff-Formaldehydklebstoff, an dem die Auswirkungen verschiedener Pressparameter auf den Aushärtungsverlauf anhand verschiedener Untersuchungsmethoden bestimmt wurden.

Mit Hilfe der **Dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK)**, die als geeignetes Instrumentarium gilt, um die Reaktionskinetik und das thermische Verhalten von Klebstoffen zu beschreiben, erfolgte die Charakterisierung von insgesamt vier Aminoharzen. Klebstoffproben von 10 mg wurden in einen Mitteldrucktiegel gefüllt und mit Heizraten von 1 K/min, 2 K/min und 4 K/min, entsprechend der dynamischen Methode, von 20 °C bis 200 °C aufgeheizt. Aus der Wärmestromdifferenz der Klebstoffprobe zu einem unter gleichen Bedingungen aufgeheizten Leertiegel konnten charakteristische Werte der spezifischen Klebstoffproben ermittelt werden.

Im Zuge der Bestimmung der **Reaktionsenthalpie** verschiedener Klebstoffsysteme wurde festgestellt, dass es in Abhängigkeit unterschiedlicher Heizraten nicht zu einer einheitlichen Reihung der Klebstoffsysteme kam. Werden die Mittelwerte aus allen drei Heizraten genommen, weisen die Harnstoffharze geringfügig höhere Reaktionsenthalpien auf als die melaminverstärkten Harnstoff-Formaldehydklebstoffe. Eine Abhängigkeit vom Molverhältnis kann aus den Ergebnissen nicht erkannt werden. Die Betrachtung der reinen Harnstoffharze zeigt, dass der Klebstoff mit höherem Molverhältnis eine niedrigere Reaktionsenthalpie aufweist. Ein Vergleich der melaminharzverstärkten Klebstoffe weist hingegen für ein hohes Molverhältnis höhere Reaktionsenthalpiewerte auf. Durch die Erhöhung des Härteranteils von 0 % bis 3 % steigt die mittlere Reaktionsenthalpie aus drei Heizraten für einen Harnstoff-Formaldehydklebstoff sukzessive von 83 J/mol auf 185 J/mol an.

Unter Verwendung der Arrheniusgleichung und der modellfreien Kinetik nach Kissinger (1957) wurden die **Aktivierungsenergien** verschiedener Klebstoffsysteme bestimmt. Dazu werden die Heizraten-Peaktemperatur-Koeffizienten dem Reziproken der absoluten Peaktemperatur aus den Thermogrammen gegenübergestellt. Die Aktivierungsenergie (E_a) gibt an, in welchem Ausmaß die Reaktionsgeschwindigkeit durch die Temperaturveränderung beeinflusst werden kann.

Im eigentlichen Verständnis deutet eine niedrige Aktivierungsenergie auf ein reaktives System hin. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass ein von vornherein als reaktiv eingestuftes Harnstoffharz (UF#2), mit hohem Molverhältnis (F : NH₂), eine höhere Aktivierungsenergie benötigt als der Klebstoff (UF#3) mit niedrigerem Molverhältnis. Bei Betrachtung der melaminverstärkten Klebstoffsysteme ist für das Klebharz UFm#5 mit niedrigem F : NH₂-Verhältnis und geringem Melaminanteil mit 84,0 kJ/mol eine weitaus geringere Aktivierungsenergie notwendig als für das Klebharz UFm#4 mit höherem Molverhältnis und gleichzeitig hohem Melaminanteil (92,8 kJ/mol).

Die Ergebnisse der Aktivierungsenergien, die in Abhängigkeit unterschiedlicher Härterzugaben zum Klebstoff UF#3 bestimmt wurden, sind nicht stetig. Die Aktivierungsenergie ist mit 110 kJ/mol am höchsten, wenn kein Härter zugegeben wird. Eine Härterzugabe von 0,4 % weist die geringste Aktivierungsenergie von 90 kJ/mol auf. Mit steigendem Härteranteil bis 3 % nimmt die Aktivierungsenergie jedoch wieder zu und erreicht ein durchschnittliches Niveau von 100 kJ/mol. Die beobachtete Variation ist sehr gering, so

dass sich Aktivierungsenergien von 99 kJ/mol bei 2 % und 102 kJ/mol bei Zugabe von 3 % Ammoniumnitrat einstellen.

Die Festigkeitsentwicklung teilweise ausgehärteter Klebfugen wurde mit dem '**Automated Bonding Evaluation System**' ('**ABES**'), in Abhängigkeit von der Presstemperatur (95 °C - 125 °C) und unterschiedlichen Presszeiten für eine Reihe verschiedener Klebstoffsysteme bestimmt. Das zu testende Klebstoffsystem wurde jeweils auf ein Ende zweier Furnierstreifen auftragen und unter annähernd isothermen Bedingungen gepresst. Unmittelbar nach dem Erreichen der vorgewählten Presszeit konnte die Festigkeit im Zugschermodus ermittelt werden. Je nach gewählter Presstemperatur gab es ein Intervall, in dem auf Grund eines zu geringen Aushärtungsniveaus keine Festigkeiten bestimmt werden konnten. Mit Presstemperatur- und Presszeitzunahme steigt das Festigkeitsniveau des jeweiligen Klebstoffes kontinuierlich bis auf ca. 5 N/mm² an. In diesem Bereich befinden sich scheinbar die maximalen Zugscherfestigkeiten. Je höher die Temperatur, desto schneller wird die maximale Festigkeit erreicht.

Aus der Darstellung der **Geschwindigkeit der Festigkeitszunahme** gegenüber dem Reziproken der absoluten Temperatur konnte für den jeweiligen Klebstoff der **Reaktivitätsindex** ermittelt werden, der das Verhalten des Klebstoffsystems gegenüber Wärmeeintrag beschreibt. Für UF#2 und UFm#4, die höhere Formaldehydmengen enthalten, konnten mit $8,43 \cdot 10^3$ K bzw. $8,25 \cdot 10^3$ K höhere Reaktivitätsindizes ermittelt werden als für UF#3 ($7,98 \cdot 10^3$ K) und UFm#5 ($7,23 \cdot 10^3$ K). Auch der geringere Melaminanteil von UFm#5 im Vergleich zu UFm#4 kann den niedrigen Reaktivitätsindex nicht ausgleichen. Die **Aktivierungsenergien** können dann durch Multiplikation mit der universellen Gaskonstante berechnet werden.

Weiterhin wurde der Einfluss von Furnierfeuchte, Klebstoffvoraushärtung bzw. -nachhärtung und Härterzugabe auf die Zugscherfestigkeiten mit Hilfe des 'ABES' untersucht. Ein Anstieg der **Furnierfeuchte** von 6,6 %, 10,7 % auf 14,5 % hatte eine verzögerte Aushärtung des Klebstoffes zur Folge. Die Ursache hierfür war durch die Energieverluste gegeben, die durch das Verdampfen des gebundenen Wassers in den Furnierstreifen auftreten und damit den Temperaturanstieg in der Leimfuge verzögern. Zudem kann durch das herabgesetzte Feuchtigkeitsgefälle Klebstoffuge-Furnierstreifen das Wasser länger in der Fuge verweilen, und damit für Fehlstellen (Lunker) im Klebstoff führen.

Mit höherem **Härteranteil** steigt die Geschwindigkeit der Festigkeitszunahme an. Bei niedrigerer Presstemperatur von 105 °C und 50 s Presszeit kann mit Verlängerung der '**Offenen Zeit**' ein Festigkeitsanstieg beobachtet werden. Die Zugscherfestigkeit nimmt von 1 N/mm², bei sofortiger Pressung nach dem Leimauftrag, um 250 % auf ca. 2,5 N/mm² nach 20 min zu. Durch eine weitere Verlängerung der '**Offenen Zeit**' bis zu 120 min kann lediglich noch eine weitere Zugscherfestigkeitserhöhung von 1 N/mm² erreicht werden. Der Grund für die Entwicklung der Zugscherfestigkeit flächig beleimter Furniere in Abhängigkeit von der 'Offenen Zeit' ist auf die Voraushärtung des Klebstoffes zurückzuführen. Der Festigkeitsanstieg durch '**Nachhärtung**' ist bei 125 °C Presstemperatur und 50 s Presszeit determiniert worden. Im Zeitintervall '*ohne Nachhärtung*' bis zum Zeitpunkt '45 min' steigt die Zugscherfestigkeit degressiv von 3 N/mm² auf 4 N/mm² an. Mit weiterer Verlängerung des Nachhärtungszeitraums ist keine wesentliche Veränderung der Zugscherfestigkeit zu

beobachten. Die Ursache liegt in einer zunehmenden 'Aushärtung' des Klebharzes, da dieses im direkten Anschluss an das Pressen noch recht elastische Eigenschaften aufweist.

Im Rahmen der Entwicklung einer neuen Untersuchungsmethode zur mechanischen Charakterisierung von Klebstoffen in Verbindung mit Holzpartikeln wurde in das vorher beschriebene 'ABES', ein neu entwickeltes Modul integriert. Mit diesem Modul ist es möglich, beleimte Miniaturfaserproben mit 17,5 mm Durchmesser und variabler Dicke, hier 3 mm, im Zugschermodus auf Festigkeit zu testen.

Ein Versuch mit dem **Composite Testing System ('ComTeS')** bestand aus einer Parallelmessung zweier beleimter Faserproben, die nach der Formung in das Pressmodul geschoben wurden. Anschließend konnte der Pressvorgang gestartet werden. Während des Pressens umgibt ein Teflonzylinder die Probe, der definierte Probenrohdichten garantiert und kurz vor dem Erreichen der gewählten Presszeit pneumatisch zurückgeschoben wird. Damit ist die Probe für den nachfolgenden Zugscherversuch freigegeben. Die Proben wurden während des Pressens durch einen Cyanacrylat-Klebstoff mit den Pressblechen, durch die später die Zugscherkraft in die Proben eingeleitet wurde, kraftschlüssig verbunden.

Zur korrekten Versuchsauswertung, musste jedoch in einer Vorversuchsreihe die Zugscherfestigkeit unbeleimter Faserproben unter den gleichen Bedingungen ermittelt werden. Als Einflussgrößen konnten Presstemperatur und Rohdichte bestimmt werden, während hingegen die Presszeit im Untersuchungsintervall keinen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit unbeleimter Faserproben zu haben scheint. Diese ermittelten Funktionen werden mit '**Nullhypothese**' bezeichnet.

Die im weiteren Verlauf ermittelten Zugscherfestigkeiten der beleimten Proben werden mit den Werten der unbeleimten Proben berichtigt, um das Aushärtungsniveau des Klebstoffes zu erhalten. Wie erwartet steigt die Zugscherfestigkeit mit Presstemperaturerhöhung und Presszeitzunahme an. Der Festigkeitsanstieg erfolgt im beobachteten Intervall bis 1 N/mm^2 linear mit der Presszeit. Oberhalb dieses Bereiches können, wegen des Versagens des Cyanacrylat-Klebstoffs, keine Festigkeiten mehr ermittelt werden.

Mit einem **Rohdichteanstieg** von 500 kg/m^3 auf 600 kg/m^3 nehmen die Zugscherfestigkeiten, gleiche Presszeit vorausgesetzt, erwartungsgemäß zu. Dieses ist auf die größere Anzahl an Klebpunkten zwischen den Holzpartikeln auf Grund der höheren Packungsdichte in der Probe zurückzuführen. Bei einer niedrigen Rohdichte von 400 kg/m^3 hingegen müssen die Fasern nur unwesentlich verdichtet werden und die Faser-Klebharzmatrix weist dementsprechend eine geringere spezifische Kontaktfläche auf, wodurch die angreifende Scherkraft auf eine geringere Anzahl an Klebpunkten wirkt.

Ein höherer **Beleimungsgrad** resultiert in einem Anstieg des Zugscherfestigkeitsniveaus. In einem Zeitintervall von 50 s bis 150 s werden für einen Beleimungsgrad von 7 % Zugscherkräfte von $0,1 \text{ N/mm}^2$ bis $0,4 \text{ N/mm}^2$ der teilweise ausgehärteten Klebstoffe erreicht. Eine Steigerung der Klebstoffzugaben auf 10 % bzw. 13 % resultieren bei einer Presszeit von 50 s in Zugscherfestigkeiten von $0,15 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,2 \text{ N/mm}^2$. Durch längere Presszeit von 150 s steigen die Festigkeiten jeweils auf $0,6 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,8 \text{ N/mm}^2$ an. Die Geschwindigkeit der Zugscherfestigkeitsentwicklung ist vom Beleimungsgrad unabhängig.

Das Kernstück dieser Arbeit beruht auf der Anteiligen Entwicklung und Verwendung einer neuen Methode zur Identifizierung des mechanischen Aushärtungsverlaufes von beleimten Faserproben. Mit Hilfe des **'Integrierten Heißpress- und Querzugsystems' ('ipates')** ist es erstmalig möglich, die Festigkeitsentwicklung einer Holzpartikel-Klebharzmatrix, in Abhängigkeit relevanter Pressparameter, im direkten Anschluss an den Pressvorgang durch Querzugtest zu bestimmen. Dazu werden die vorgeformten, beleimten Faserproben, mit 100 mm Durchmesser und variabler Zieldicke, hier 5 mm, in einen Zylinder geschoben und dieser, samt der vorgeheizten Pressbleche, in die Pressvorrichtung eingehängt. Kurz vor dem Erreichen der vorgewählten Presszeit wird der Presszylinder durch ein pneumatisch arbeitendes System zurückgezogen. Dadurch wird die Probe für den anschließenden Querzugtest freigegeben. Ein umfangreicher Versuchsplan wurde ausgearbeitet, um den Einfluss verschiedener Pressparameter auf den Aushärtungsverlauf eines Harnstoff-Formaldehydklebstoffs bestimmen zu können.

Die Festigkeitsentwicklungen über die Presszeit bis 370 s beschreiben für jede der fünf **Presstemperaturen** von 80 °C bis 160 °C logarithmische Verläufe. Es wird nachgewiesen, dass verschiedene Presstemperaturen in scheinbar unterschiedlichen ultimativen Festigkeitsniveaus einer Holzpartikel-Klebharzmatrix resultieren. Je höher die Presstemperatur, desto größer das erreichte Querzugfestigkeitsniveau. Während bei 120 °C Presstemperatur nach 370 s ein Festigkeitsniveau von ca. 1,3 N/mm² erreicht wird, bilden sich bei 100 °C lediglich Querzugfestigkeiten von ca. 1,1 N/mm² aus.

Mit steigender **Rohdichte** von 500 kg/m³ auf 650 kg/m³ bzw. auf 800 kg/m³ können bei einem Standardbeleimungsgrad von 10 % höhere Querzugfestigkeitswerte erzielt werden. Dieses ist auf die erhöhte Anzahl an Kontaktpunkten zwischen den einzelnen Fasern und auf den höheren Verdichtungsgrad zurückzuführen. Erst mit einer Reduzierung des **Beleimungsgrades** auf 7 % wirken sich die Restspannungen in den Partikeln festigkeitsmindernd aus, da die Klebpunkte zwischen den Einzelpartikeln im Moment der Druckentlastung einer Vorspannung unterliegen. Somit reduzieren sich scheinbar die Querzugkräfte. Mit Erhöhung des Beleimungsgrades steigen die Querzugfestigkeitswerte unter gleichbleibenden Bedingungen an. Je länger die gewählte Presszeit, desto deutlicher ist der Querzugfestigkeitsunterschied.

Um das erzielte Querzugfestigkeitsniveau der sofort geprüften Proben einordnen zu können, wurden in einer weiteren Versuchsserie Proben unter analogen Pressbedingungen hergestellt und die **Rückfederung** im direkten Anschluss an den Pressvorgang bestimmt. Nach dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte durch Klimatisierung im Normalklima 20 °C / 65 % rF wird die Querzugfestigkeit dieser **klimatisierten Proben** ermittelt. Die Proben weisen mit steigender Presstemperatur und Presszeitzunahme eine Reduzierung der Rückfederung auf und zeigen damit eine sehr gute Korrelation mit den Querzugfestigkeiten der Proben, die unter analogen Bedingungen gepresst und unmittelbar geprüft wurden. Somit kann die Bestimmung der Dicke im unmittelbaren Anschluss an das Heißpressen ein erster Hinweis auf die zu diesem Zeitpunkt bestehende Querzugfestigkeit sein.

Auch ein Vergleich der **Querzugfestigkeit** bei sofortiger Prüfung und nach Klimatisierung zeigten entsprechende Verläufe der Festigkeitsentwicklung mit zunehmender Presszeit. In Analogie zu den Querzugfestigkeiten sofort geprüfter Proben weisen auch die zunächst

klimatisierten Proben in Abhängigkeit von der Presstemperatur unterschiedliche Festigkeitsniveaus auf. Bei 100 °C Presstemperatur erhöht sich mit zunehmender Presszeit der **Aushärtungsgrad** sowohl der sofort geprüften Querzugproben als auch der klimatisierten Proben von ca. 20 % nach 50 s auf ca. 80 % nach 370 s für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Probenrohdichten von 500 kg/m³, 650 kg/m³ und 800 kg/m³.

Ein **Methodenvergleich** von 'ABES', 'ComTeS' und 'ipates' konnte anhand der ermittelten Reaktivitätswerte aus den Geschwindigkeiten der Zugscher- bzw. Querzugfestigkeitsentwicklungen durchgeführt werden. Die Zugscherprüfung flächiger Verklebungen ('ABES') weist die größte Steigung und damit den größten Reaktivitätsindex von $7,56 \cdot 10^3$ K auf. Die nicht isothermen Temperaturbedingungen in der Mattenmatrix können als Begründung für die Abstufung zu den anderen beiden Methoden, die **Reaktivitätsindizes** von $5,06 \cdot 10^3$ K für 'ComTeS' bzw. $5,48 \cdot 10^3$ K für 'ipates' aufweisen, angeführt werden. Durch Multiplikation mit der universellen Gaskonstante ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ergeben sich Aktivierungsenergien für 'ComTeS' und 'ipates' von 42,1 kJ/mol bzw. 45,6 kJ/mol und für 'ABES' 62,9 kJ/mol. Auf Grund der Tatsache, dass eine niedrige **Aktivierungsenergie** ein reaktives System beschreibt, kann von einer beschleunigten Aushärtung des Aminoharzes in einer Holzpartikelmatrix ausgegangen werden. Als mögliche Ursache kann der niedrigere pH-Wert des Fasermaterials aus Kiefer gegenüber dem der Ahorn-Furnierstreifen gelten.

Die **Niveaudifferenzen** zwischen Zugscherfestigkeit von Miniaturfaserproben ('ComTeS') und Querzugfestigkeit von Faserproben ('ipates'), die bei der Bestimmung des Reaktivitätsindex detektiert werden, können auf die Vorspannungen in der Holzpartikel-Klebstoffmatrix zurückgeführt werden. Diese Vorspannungen werden im wesentlichen bei einer Querzugprüfung induziert.

Die **Kinetik**, mit der das chemische Potenzial eines reaktiven Systems beschrieben werden kann, sollte auch in dieser Arbeit einen Ansatz bieten, um verschiedene Klebstoffe mit unterschiedlichen Methoden zu charakterisieren. Als Ergebnis konnten typische Abfolgen der Aktivierungsenergien beschrieben werden. Für die Klebstoffe mit hohem Molverhältnis konnten die höchsten Aktivierungsenergien nachgewiesen werden.

Auf Basis der Querzugfestigkeitsergebnisse lassen sich anhand eines physikalisch-analytischen Modells erstmalig die zu erwartenden Querzugfestigkeiten in einer Holzpartikel-Klebstoffmatrix simulieren. Das ursprüngliche **Modell** liefert während der **Simulation** die errechneten lokalen Temperatur- und Dichtedaten an das neue Modul, das wiederum, auf Grundlage einer empirisch ermittelten Gleichung, die lokalen Querzugfestigkeitswerte für die unterschiedlichen Positionen in der Matte berechnet. Auf diese Weise ist es möglich, die Ausbildung eines Festigkeitsprofils während des Heißpressvorgangs Schritt für Schritt zu verfolgen. Die Berechnungen der Querzugfestigkeiten beruhen weiterhin auf der Grundlage des **Superpositionsprinzips**, bei dem angenommen wird, dass die Klebstoffaushärtung von den vorhergegangenen Temperaturbedingungen unabhängig ist. Dieser Ansatz ist zum jetzigen Stand der Simulation der Festigkeitsentwicklung durchaus vertretbar.

Die Berechnung der Querzugfestigkeit in einer MDF-Matte zeigt, dass bis zu einer Presszeit von 20 s über die gesamte Plattendicke keine Festigkeiten erzielt werden. Mit Presszeitzunahme weisen die DS-Bereiche der Matte kontinuierlich ansteigende Festigkeiten

auf, bis nach 170 s Presszeit Querkzugfestigkeiten von ca. 2,4 N/mm² vorhergesagt werden. Der Festigkeitsverlauf ist zuerst schnell ansteigend, bevor mit zunehmender Presszeit die Festigkeitszunahme pro Zeitintervall wieder abnimmt und scheinbar ein maximales Niveau erreicht wird. In der Mattenmittelschicht werden die ersten Festigkeitswerte nach ca. 60 s erreicht. Nach 170 s Presszeit besteht ein Festigkeitsniveau von ca. 0,8 N/mm². Auffällig an dem simulierten Festigkeitsprofil ist der große MS-Bereich, ca. 2/3 der Plattendicke, in dem keine wesentliche Erhöhung des Querkzugfestigkeitsniveaus zu erkennen ist. Dieses Festigkeitsprofil konnte jedoch durch Messungen an Laborspanplatten, die für unterschiedliche Zeitintervalle gepresst wurden, bestätigt werden.

Um die mit den hier entwickelten Methoden erzielten Festigkeitsergebnisse einordnen zu können, wurden im Vorfeld Spanplatten im Labormaßstab hergestellt und unterschiedliche Eigenschaften bestimmt, die auf die mechanischen Festigkeiten und somit den Aushärtungsfortschritt schließen lassen. Anhand der im unmittelbaren Anschluss an den Pressvorgang gemessenen **Rückfederung** sowie der weiteren **Dickenentwicklung** von ein- und dreischichtigen **Laborspanplatten** sollte der Einfluss verschiedener praxisrelevanter Pressparameter auf den Aushärtungszustand eines Klebstoffes evaluiert werden. Eine Zunahme der Plattendicke konnte, je nach Pressparameter, im Zeitintervall 30 s bis 120 s nach mechanischer Druckentlastung beobachtet werden.

Nach 120 s nahm die Plattendicke ab, bevor durch Klimatisierung und damit verbundener Feuchtaufnahme ein erneuter Anstieg erfolgte. Mit Erhöhung des Klebstoffanteils der MS von 4 % auf 8 % konnte eine Reduzierung der spontanen Rückfederung der Platten beobachtet werden. Auf Grund der komplexen Zusammenhänge während des Pressens einer Holzwerkstoffmatte (durch die Variation von Presstemperatur, Presszeit und Feuchtegehalt nach dem Beileimen) können keine eindeutigen Aussagen zur Verklebungsgüte anhand der spontanen Rückfederung gemacht werden.

Plausiblere Ergebnisse hinsichtlich der Verklebungsgüte konnten durch Bestimmung ausgewählter Festigkeitseigenschaften zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten anhand dieser Laborspanplatten erzielt werden. Zu den Zeitpunkten '15min', '45min' und '150min' nach Pressenöffnung wurde jeweils die **Scherfestigkeit** und nach Klimatisierung im Normklima 20 °C / 65 % rF zusätzlich **Querkzugfestigkeit** sowie **24 h-Quellung**, bestimmt. Mit einer Zunahme des Presszeitfaktors von 8,25 s/mm auf 10 s/mm und einem Rohdichteanstieg von 500 kg/m³ auf 650 kg/m³ ließ sich eine Erhöhung der Scherfestigkeit zu jedem Prüfzeitpunkt detektieren. Querkzugfestigkeit und 24 h-Quellwerte wiesen nach Klimatisierung eine gute Korrelation mit der Scherfestigkeit in Abhängigkeit des entsprechenden Pressparameters auf.