

# Ressourcenschonende Herstellung hochwertiger Faserplatten aus Hanfsilage, Optimierung der Bindemittelapplikation

Von der Fakultät der Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen  
Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-  
Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Ljubomir Radosavljević

aus Novi Sad

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Christan Fürll

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ay

Tag der mündlichen Prüfung: 23.07.2009

# Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Finanziell wurde die Dissertation durch ein Stipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt von Juli 2005 bis Juni 2008 gefördert.

Wissenschaftlich angeregt und betreut wurde die Arbeit durch Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Fürll und Prof. Dr.-Ing. habil. P. Ay.

Wertvolle Unterstützung bekam ich von Dr.-Ing. R. Pecenka bei ingenieurtechnischen Angelegenheiten, Herrn J. Eisner durch den Bau der Versuchseinrichtung, Herrn G. Weber durch seine geduldige Mithilfe bei den Versuchen und Herrn R. Becher bei der deutschen Sprache.

Die Zusammenarbeit mit allen Kolleginnen und Kollegen die zur Erlangung dieser Dissertation beigetragen haben, hat große Freude gemacht.

Novi Sad, den 15. Mai 2010

Ljubomir Radosavljević

# 1. Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	1
1. Inhaltsverzeichnis .....	2
2. Einleitung .....	4
3. Stand der Forschung .....	11
3.1 Eigenschaften der Naturfasern für Faserplatten .....	11
3.2 Faserplatten, ihre Herstellung und Eigenschaften .....	14
3.3 Bindemittel für Faserplatten .....	20
3.4 Natürliche Bindemittel .....	21
3.5 Bindungsmechanismen .....	25
3.6 Zerstäubung des Bindemittels .....	27
3.7 Methoden der Bindemittelapplikation .....	31
3.7.1 Das Walzen-Beleimungsverfahren .....	32
3.7.2 Belemmischen nach dem Sprüh-Umwälz-Verfahren .....	33
3.7.3 Blow-line Verfahren .....	34
3.7.4 Beleimung in dem Sprüh-Mischurm .....	35
3.8 Bindemittelverteilung .....	35
3.8.1 Modell der Bindemittelverteilung nach /Meinecke 62/ .....	36
3.8.2 Bindemittelverteilung nach /Walther 06/ .....	40
3.9 Heißpressen .....	41
3.10 Schlussfolgerungen .....	45
4. Präzisierte Aufgabenstellung .....	46
5. Material und Methoden .....	47
5.1 Rohstoffe für die Fasergewinnung, Fasermorphologie .....	47
5.2 Erzeugung unterschiedlicher Fasermorphologien .....	50
5.3 Bindemittelauswahl .....	51
5.4 Versuchsaufbau der Bindemittelapplikation .....	52
5.5 Bindemittelzerstäubung, Tröpfchengrößen .....	54
5.6 Bindemittelverteilung .....	57

## 1. Inhaltsverzeichnis

---

5.7 Heißpressen.....	58
5.8 Biegefestigkeit der Platten.....	58
5.9 Theoretische Modellierung der Bindemittelapplikation.....	59
5.9.1 Fasermorphologie, Bindemittelauftragsmenge .....	59
5.9.2 Tröpfchen im Strahlkegel des Bindemittels .....	62
5.9.3 Fasern im Strahlkegel .....	63
5.9.4 Ein Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone.....	65
5.9.5 Mehrere Durchgänge durch die Sprühzone.....	71
5.10 Rückblick auf Ökologie.....	73
5.10.1 Diskussion.....	76
5.11 Rückblick auf Ökonomie.....	79
5.11.1. Diskussion.....	80
6. Versuchsprogramm .....	81
6.1 Einfluss unterschiedlicher Morphologien des Faserstoffs.....	81
6.2 Bindemittelverteilung .....	82
6.3 Unterschiedliche Bindemittel und Fasern .....	83
7. Ergebnisse .....	84
7.1 Morphologie des Faserstoffs .....	84
7.1.1 Diskussion.....	85
7.2 Bindemittelverteilung .....	85
7.2.1 Diskussion.....	88
7.3 Unterschiedliche Bindemittel und Fasern .....	90
7.3.1 Diskussion.....	93
8. Schlußfolgerungen.....	94
9. Zusammenfassung.....	96
10. Abbildungsverzeichnis .....	97
11. Tabellenverzeichnis .....	101
12. Symbole.....	103
13. Literaturverzeichnis .....	105

## 2. Einleitung

In der Patentanmeldung /ATB 97/ des Leibnitz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem vorrangig Naturfaserpflanzen unter geringem Energie- und Ressourcenverbrauch zu hochwertigen Endprodukten für die Bau- und Kunststoffindustrie verarbeitet werden können (Konservatlinie). Gemeinsame Untersuchungen mit dem Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden haben gezeigt, dass mit dem im Patent beschriebenen Verarbeitungsprozess ebenso Holzrohstoffe oder auch cellulosehaltige Nebenprodukte der Landwirtschaft verarbeitet werden können. In Laborversuchen ist es darüber hinaus gelungen, übliche organisch-synthetische Bindemittel auf Basis von Harnstoff, Melanin und Phenol durch organisch-native wie insbesondere Stärke zu ersetzen. Hierdurch können sowohl gesundheitliche Risiken in Produktion und Gebrauch der Produkte reduziert, als auch die Umweltverträglichkeit und Recyclingfähigkeit der Endprodukte erheblich gesteigert werden.

Mit den Forschungsarbeiten am Institut für Agrartechnik, der Brandenburgischen Technischen Universität und der Technischen Universität Dresden konnten wesentliche Grundlagen für die Überführung der Laborergebnisse in die Praxis geschaffen werden. Der erste Schritt zu einer Praxisanlage wurde mit dem Aufbau einer Pilotanlage am ATB getan. Das ist eine alternative Verfahrenslinie zur Aufbereitung und Verarbeitung von feuchtkonserviertem Naturfaserstroh, und anderer faserhaltiger Roh- und Reststoffe aus der Landwirtschaft, die sich gegenüber der klassischen einheimischen Naturfaserverarbeitung für Dämm- und Verbundwerkstoffe auszeichnet durch: Reduzierung der Emissionen in der Rohstoffbereitstellung und Diversifizierung der Fruchtarten in der Landwirtschaft, Verminderung der Verfahrenskosten um 50%, Verminderung der Anlageninvestitionen für Faseraufschluss und Faserstoffverarbeitung um mehr als 50%, Einfachheit der Anlagen bei zuverlässiger Betriebsweise und Sicherung der Produktqualität.

Darüber hinaus sollen durch die kombinierte Verarbeitung unterschiedlicher landwirtschaftlicher (Faser-)Rohstoffe unter Einsatz von organisch-nativen Bindemitteln wie vorzugsweise Stärke folgende Zielstellungen erreicht werden: Reduzierung des Energiebedarfs für die Herstellung von Dämmstoffen und Formpressteilen auf Naturfaserbasis und mehr als 50 %, Herstellung vollständig recyclebarer, CO<sub>2</sub>-neutraler Halbzeuge und Endprodukte, Reduzierung gesundheitlicher Risiken in Produktion und Produktgebrauch durch ausschließlichen Einsatz von natürlichem Bindemittel, Abfallfreier

## 2. Einleitung

---

Herstellungsprozess durch Verwertung des gesamten Pflanzenrohstoffs im Endprodukt, Ausnutzung der hohen Festigkeit der Fasern und konkurrenzfähiger Preis für die hiermit hergestellten Produkte.

Die Praxiserfahrungen im Faserpflanzenanbau der letzten Jahre haben gezeigt, dass Hanf als Hauptrohstofflieferant für das geplante Verarbeitungsverfahren am besten geeignet ist. Bei geringem Düngemittleinsatz und ohne Einsatz von Pestiziden und Herbiziden kann auch in Deutschland ein guter Ertrag bei vertretbarem landtechnischen Aufwand für Anbau und Ernte erzielt werden /Gusovius 01/. Während bei dem traditionellen Verfahren der Hanf und ähnliche Naturfaserpflanzen zum Erntezeitpunkt gemäht, auf dem Feld getrocknet und evtl. auch geröstet werden, erfolgt bei der hier verfolgten Konservatlinie das Häckseln der Faserpflanzen aus dem Bestand. Anschließend wird das Häckselgut, ähnlich wie z.B. Mais, in Horizontalsilos konserviert. Danach wird durch das neue Verfahren aus dem Konservat direkt, unter Verwendung der gesamten Pflanzenmasse, das gewünschte Endprodukt hergestellt. Die Vorteile dieser Verfahrenslinie bestehen in der Verminderung des Wetterrisikos zum Erntezeitpunkt September und in der Verarbeitung der gesamten Pflanzenmasse zu einem Endprodukt ohne Verluste. Derzeit kommt es in bestimmten Regionen Deutschlands, vor allem in Norddeutschland, etwa alle 5 Jahre zu einem Totalverlust der Hanfernte, weil der im September gemähte und zum Trocknen bzw. Rösten auf der Feldoberfläche liegende Hanf durch ungünstige Witterungsbedingungen nicht geborgen werden kann. Dieser wesentliche Nachteil ist in der Konservatlinie behoben.

Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren soll jedoch nicht ausschließlich Hanf als Faserrohstoff verwendet werden. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass auch andere Faserrohstoffe verarbeitet bzw. zugemischt werden können, wodurch die Fertigungs- und Gebrauchseigenschaften der Endprodukte verbessert werden können /Müller 97/.

Die hohen Rohstoffkosten bei der Herstellung von MDF Platten machen es interessant, die neuen Techniken zur Beleimung einzusetzen, um den Leimverbrauch zu reduzieren /Michanickl 05/. Eine zentrale Problemstellung für die Umsetzung des Verfahrens liegt in der Verwendung von natürlichen Bindemitteln. Mit deren herausragenden ökologischen Vorteilen sind gegenwärtig jedoch technologische Nachteile verbunden. Für die Herstellung hochwertiger Formpressteile mit konkurrenzfähigen Festigkeitseigenschaften ist eine gleichmäßige Beleimung der Faserpartikel notwendig. Üblicherweise muss in den herkömmlichen Beleimeinrichtungen dafür das natürliche Bindemittel bzw. Stärke in einer verhältnismäßig hohen Menge Wasser aufgelöst werden, um eine feine Verteilung im Faserstoff zu erzielen. In der sich anschließenden Pressteilformung in einer Heißpresse muss

## 2. Einleitung

dieser Wasseranteil wieder verdampft werden. Hiermit sind einerseits ein hoher Energieaufwand und andererseits unökonomisch lange Taktzeiten für die Presse verbunden. Diese Probleme wurden durch eine Optimierung des Beileimvorganges behoben. Hierzu waren u. a. detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Fasermorphologie, der Partikelverteilung im Beileimmischer, der Leimverteilung und der Tropfengrößen in Abhängigkeit von der verwendeten Sprühtechnologie notwendig.

Die Anwendung dieses Verfahrens wird in der Herstellung von Dämmplatten, Halbzeugen, Verpackungstoffen und Verkleidungen gesehen (siehe Abb. 1).

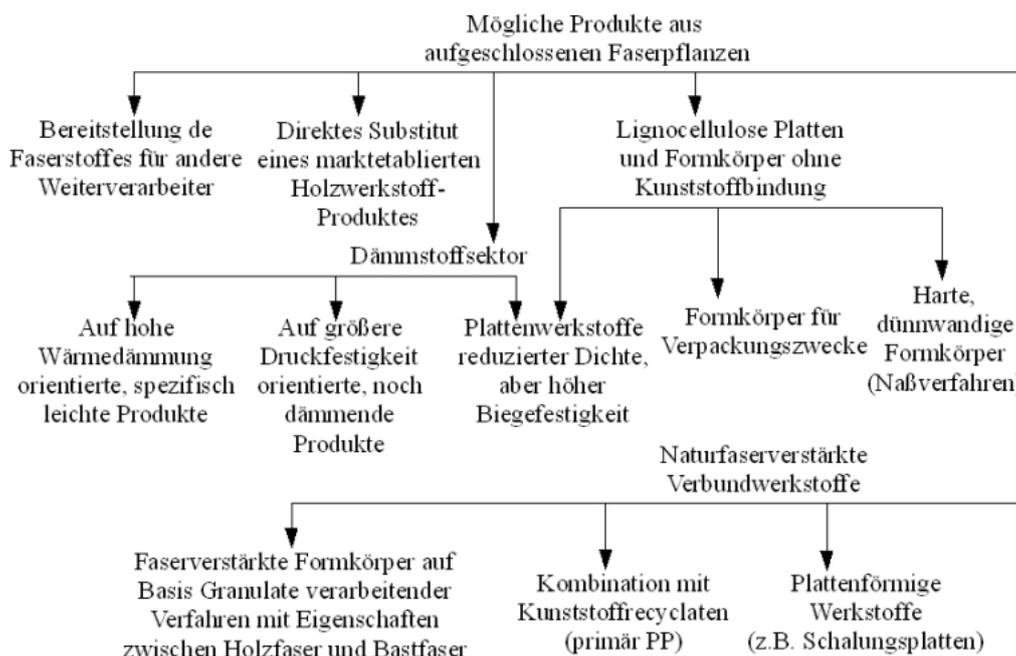


Abb. 1: Mögliche Endprodukte und Halbzeuge aus der Konservatlinie, /Müller 97/ angepasst

Derzeit finden weltweit jährlich ca. 2,3 Mio. t Fasern im Bereich der Verkehrstechnik und ca. 1,2 Mio. t in der Bauindustrie als Dämm- und Verstärkungsfaser ihren Einsatz /NOVA 03/. Allein in der deutschen Automobilindustrie werden jährlich ca. 25.000 t Naturfasern wie Hanf und Flachs eingesetzt. Mit dem Inkrafttreten der neuen EU-Altautorichtlinie wird für diesen Bereich eine Bedarfsteigerung auf ca. 70.000 t für die nächsten Jahre prognostiziert, die gegenwärtig aus einheimischer Produktion nicht gedeckt werden kann. In Gesprächen mit Herstellern von Verkleidungs- und Konstruktionselementen für den Innenfahrzeugbereich wurde von Seiten der Industrie daher ein starkes Interesse an den Produkten der hier vorgeschlagenen alternativen Verfahrenslinie bekräftigt.

Der Praxiseinsatz von Naturfasern in Verbundwerkstoffen in den letzten Jahren hat gezeigt, dass diese Bauteile gegenüber herkömmlichen glasfaserverstärkten Bauteilen ein ca. 20% geringeres Gewicht bei vergleichbaren Eigenschaften haben. Ursache hierfür ist die hohe

## 2. Einleitung

---

Festigkeit der Naturfasern bei gegenüber den Glasfasern geringerem spezifischem Gewicht /Zimmer 99, Mühlmeier 99, Drzal 05/. Nach Untersuchungen im Automobilbau führt eine Gewichtseinsparung von je 100 kg (z.B. durch Naturfasern in Verbundwerkstoffen) zu einer Kraftstoffeinsparung von etwa 1 Liter/100 km /Paul 99/. Ziel des Projektes ist es u. a., diesen Vorteil auch unter Verwendung der gesamten Pflanzenmasse zu nutzen.

Für die einheimische Landwirtschaft stellt diese alternative Verfahrenslinie nicht nur eine interessante Einkommensalternative dar, der Anbauwechsel von klassischen Feldfrüchten zu den für dieses Verfahren benötigten nachwachsenden Rohstoffen trägt auch zu einer erheblichen Reduzierung der durch die Landwirtschaft verursachten Emissionen und zu einer Bereicherung der Fruchtfolge bei.

Diese Vorteile werden mit der am ATB entwickelten Konservatlinie genutzt. Die Kosten der Rohstoffbereitstellung können in der Konservatlinie gegenüber den Kosten der Trockenlinie um ca. 30 % gesenkt werden /Brüning 01, Ackermann 96/. Die für die verfahrenstechnische Umsetzung des Verfahrens in einer Pilotanlage notwendigen Maschinen und Anlagen sind in der Landwirtschaft und der Spanplattenindustrie bekannt und müssen entsprechend der abweichenden Rohstoffeigenschaften des Naturfaserkonservats und der sonstigen für die Verarbeitung geeigneten landwirtschaftlichen Nebenprodukte angepasst werden. Eine effiziente Erntetechnik für Faserpflanzen steht in Form von Feldhäckslern zur Verfügung.

Zur Herstellung konkurrenzfähiger Produkte müssen jedoch die technischen Parameter etablierter ähnlicher Materialien erreicht werden. Dies gelingt nur, wenn die Verfahrensstufen Zerkleinerung, Trocknung, Beileimung und Pressformung optimal aufeinander, auf den jeweiligen Rohstoff und auf das Bindemittel abgestimmt werden können /Müller 97/.

Die Herstellungsschritte sind in zwei Phasen unterteilt: Materialaufbereitung und Plattenherstellung, so wie in Abb. 3 dargestellt ist. Die Materialaufbereitung wurde durch zwei Mahlwerke durchgeführt: Extruder, um Material zu zermahlen und Scheibenmühle, um Material zu zerfasern. Schließlich wurde das faserige Material getrocknet. Weitere Schritte sind: Bindemittelapplikation, Vlieslegung und Heißpressen. Das Verfahren ist schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Am ATB wurde eine Pilotanlage zur Verarbeitung von Naturfaserstoffen zu Formpressteilen errichtet. Die Anlage wurde unter praxisnahen Bedingungen mit einer Verarbeitungskapazität von 1 t/h Naturfaserkonservat errichtet und ist ab September 2005 einsatzbereit. Die Anlage ist zur Verarbeitung verschiedenster Faserrohstoffe geeignet. Der Aufstellungsplan der Pilotanlage ist in Abb. 3 wiedergegeben. Mit dieser Pilotanlage besteht die in Deutschland

## 2. Einleitung

einmalige Möglichkeit der Produktentwicklung im Bereich der Faserstoffverarbeitung im praxisnahen Maßstab.

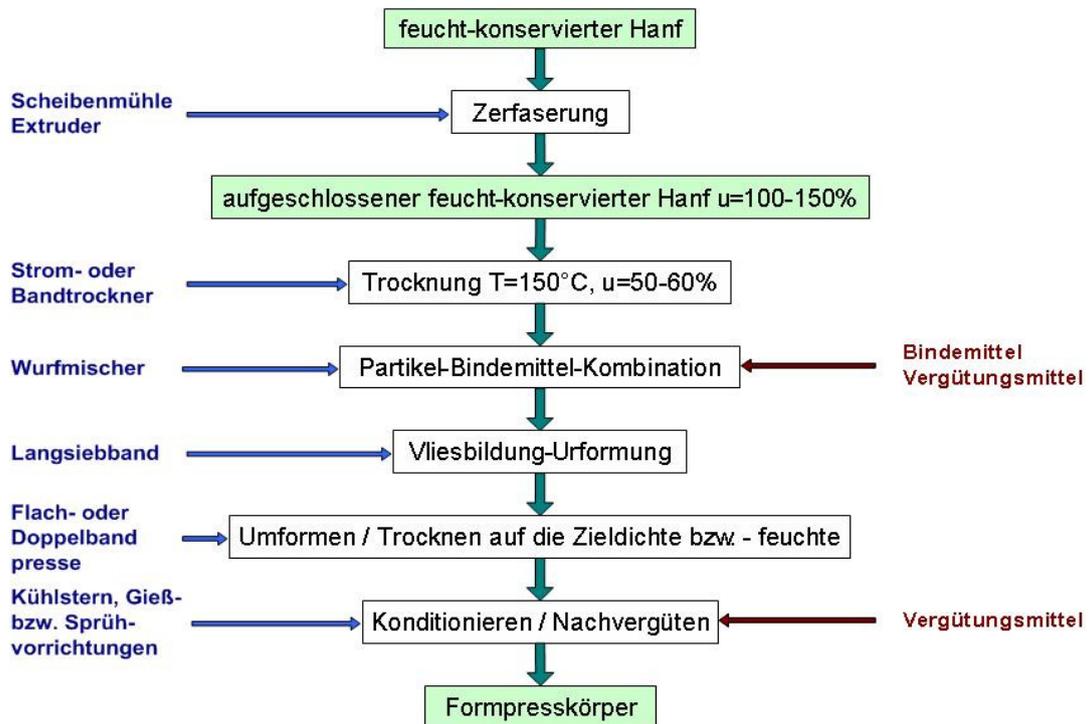


Abb. 2: Verfahrensschema der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) /Pecenka 07 a/

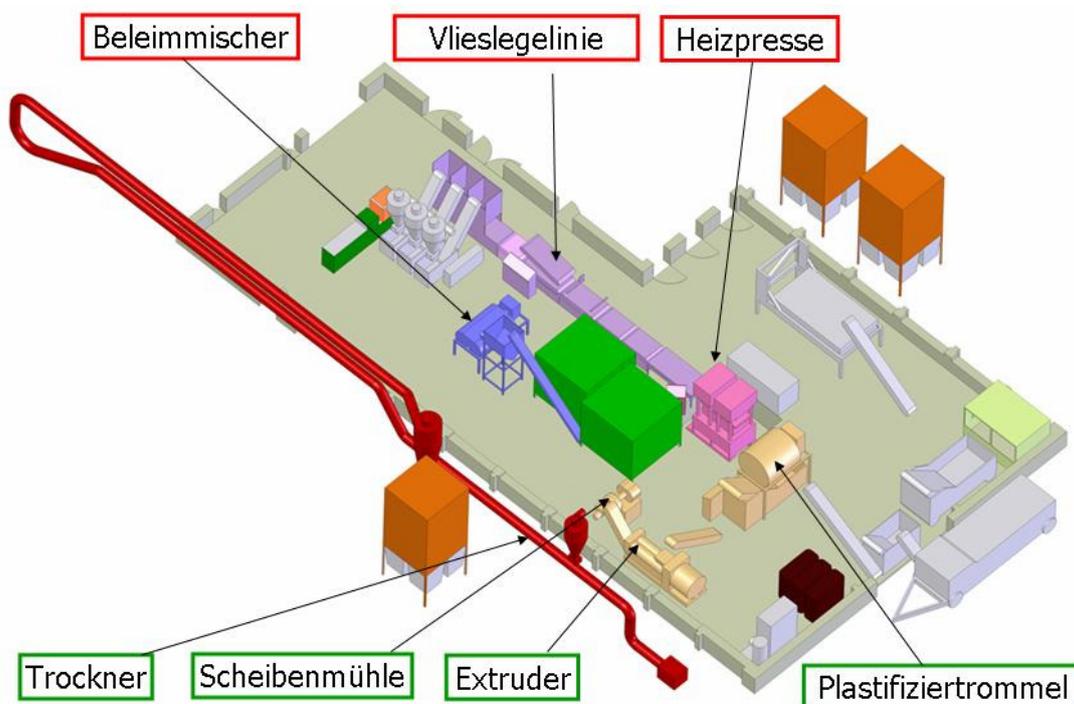


Abb. 3: Dreidimensionale Darstellung der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)

## 2. Einleitung

---

In Abb. 4 ist das Eingangsmaterial dargestellt (feuchtkonservierter Hanf – Hanfsilage).



*Abb. 4: Eingangsmaterial (Hanfsilage) für die Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)*

In Abb. 5 und Abb. 6 sind Produktbeispiele gegeben.



*Abb. 5: Faserplatte (Prüfkörper) aus Hanfsilage in der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) hergestellt*



*Abb. 6: Innentürverkleidung aus beleimter Holzfasern in der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Mitarbeit mit Industriepartner*

## 2. Einleitung

---

In Abb. 7 ist das Beispiel eines Produktes dargestellt, wonach mit dem neuen Verfahren gestrebt wird.



*Abb. 7: Türverkleidung für Autos /Flake 03/*

Die oben beschriebene Anlage ist in Abb. 8 dargestellt. Die Anlage stand uneingeschränkt für die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Versuche zur Verfügung.



*Abb. 8: Versuchsanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)*

## 3. Stand der Forschung

### 3.1 Eigenschaften der Naturfasern für Faserplatten

Die pflanzlichen Naturfasern können aus verschiedenen Teilen der Pflanze stammen /Bismarck 05/: Samen, Frucht, Bast, Laub, Holz und Stängel. Die Herkunft und Struktur der Bastfasern ist in Abb. 9 dargestellt. Diese Arbeit befasst sich mit den dort genannten „technischen Fasern“.

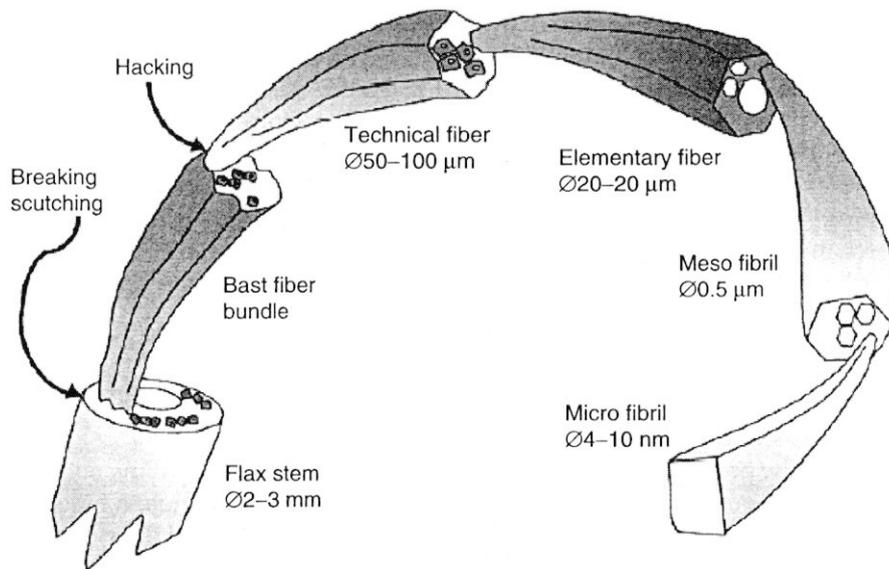


Abb. 9: Schema der Flachsstängel und Faserstruktur /Bismarck 05/

Der Aufbau einer Faserzelle aus Cellulosemolekülen ist in Abb. 10 dargestellt.

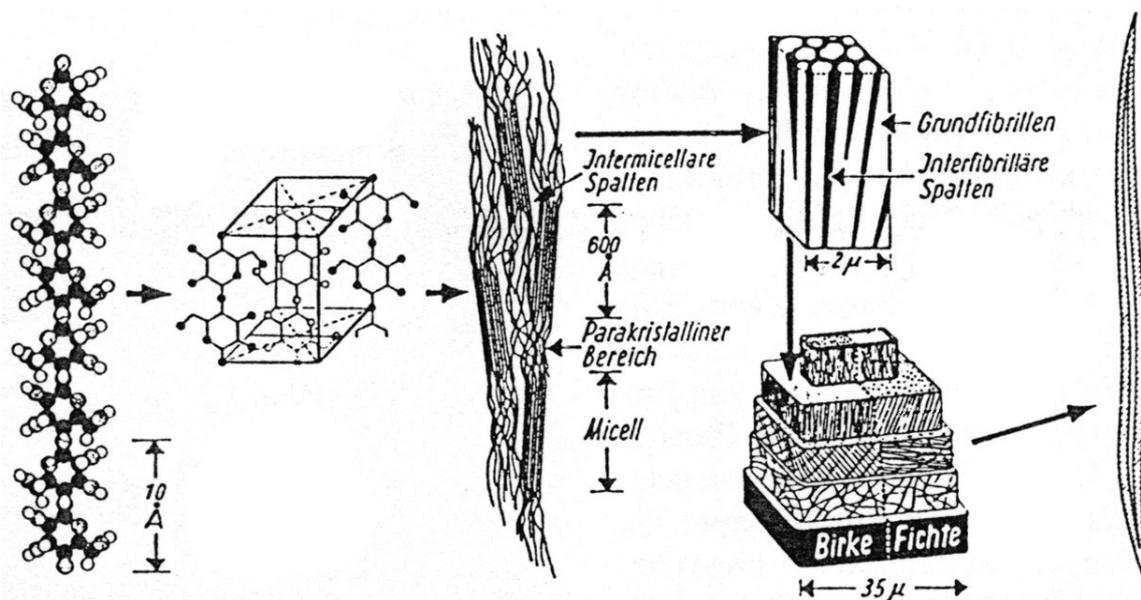


Abb. 10: Verbindung der Cellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand /Deppe 96/

### 3. Stand der Forschung

Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften von einigen technischen Fasern ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: *Charakteristische Werte für Dichte, Durchmesser, und mechanische Eigenschaften von Pflanzen- und synthetischen Fasern /Bismarck 05/ (angepasst)*

Faser	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Durchmesser [µm]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Flachs	1,5	40-600	345-1500
Hanf	1,47	25-500	690
Glas	2,55	>17	3400
Kevlar	1,44	-	3000
Karbon	1,78	5-7	3400-4800

Die Anwendung der Naturfasern anstatt Glasfasern für Verbundwerkstoffe erfuhr in den letzten Jahrzehnten besonders in der Automobilindustrie einen starken Aufschwung. Nach /Sudell 05/ sind die Vorteile der Naturfaser im Vergleich zu den Glasfasern: niedriger Preis (25 bis 50 %), niedrigere Dichte – Gewichtseinsparung, sichereres Bruchverhalten, schonende Schal- und Thermoeigenschaften, schonend zu Press- und Gießwerkzeugen, vergleichbare Festigkeiten, gesünder, überall verfügbar, ökologisch nachhaltig, niedrigerer Energieaufwand bei der Herstellung, kompostierbar, verbrennbar und CO<sub>2</sub> neutral. Dabei sind auch die Nachteile zu erwähnen: etwa niedrigere Festigkeit, hydrophile Natur, manchmal nicht die höchste Adhäsion zur Matrix, variable Qualität und kleinere Schlagzähigkeit.

Im Vergleich zu den Holzfasern haben die Pflanzenfasern eine ökologisch vorteilhafte Nachhaltigkeit auf Einjahresbasis, wobei ein typisches Holz 20 bis 25 Jahre für das Wachstum braucht /Sudell 05/.

Die Qualität der Produkte aus Naturfasern (Faserplatten, Formkörper, Verbundwerkstoffe, usw.) wird durch Fasereigenschaften wie z.B. Dicke, Länge, Dichte, Inhaltstoffe, Oberflächenzustand usw. beeinflusst.

Weiterhin wurde in /Klauditz 52/ darauf hingewiesen, dass die Eigenschaften der Platten direkt im Zusammenhang mit der Partikelmorphologie stehen, beispielsweise wird die Platte um so fester, je größer der Schlankheitsgrad (Verhältnis Länge/Dicke) der Partikel ist. Nach /Scheibert 58/ steigt die Festigkeit der Platten bis der Schlankheitsgrad einen Wert von 200 bis 300 erreicht.

In der Arbeit des /Walther 06/ ist die Fasermorphologie der Holzfaser für die Herstellung der

### 3. Stand der Forschung

Faserplatten mit einem bildanalytischen System gemessen worden. Dabei beträgt die mittlere Faserlänge 0,97 mm und die mittlere Faserdicke 0,31 mm. Diese Werte bewirken einen Schlankheitsgrad von 3,13.

In /Bätge 02/ werden bei der Formkörperherstellung für den Automobilinnenbau aus Holzfasern Faserlängen von 2 mm genannt.

In /Blümelhuber 02/ handelte es sich bei Faserplatten aus Birtreber, Fichtenholz oder Hanfschäben um Partikellängen von ca. 1,4 mm einfach durch manuelle Zählung unter Mikroskop in einer Zählkammer gemessen.

In /Berthold 90/ wird bei Feinspan – und Faserstoff für die Plattenherstellung von Partikellängen von 3 bis 10 mm, Partikeldicken von 0,1 bis 0,3 mm und einem Schlankheitsgrad von 15 bis 80 gesprochen.

In /Eisner 65/ wurde veröffentlicht, dass bei den MDF Platten der Mahlgrad (Feinheit) des Faserstoffes (mit einem Optimalwert von etwa 45 °SR) einen bemerkenswerten Einfluss hat, wobei auf die Fasermorphologie selbst nicht weiter eingegangen wird.

In /Madlin 75/ wurde untersucht wie die Partikelmorphologie die Platteneigenschaften beeinflusst werden kann (siehe Abb. 11)

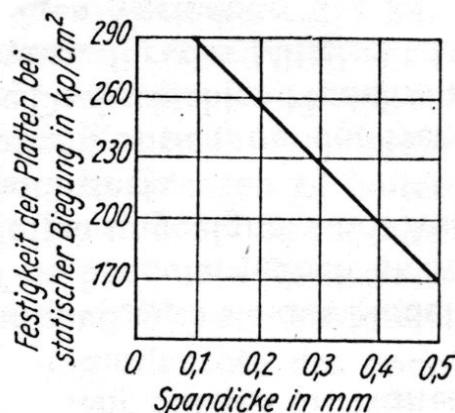


Abb. 11: Biegefestigkeit der Platten in Abhängigkeit von der Spandicke (Dichte 700 kg/m<sup>3</sup>, 10 kp/cm<sup>2</sup> = 1 N/mm<sup>2</sup>) /Madlin 75/

Bei den Partikelplatten ist der Staubanteil zu beachten und möglichst zu minimieren /Göhre 54/. Nach /Deppe 64/ bindet der Staub bis zum Vierfachen der Bindemittelmenge der groben Späne. Nach /Michanickl 05/ muss das Material vom Staub gereinigt werden um den Leimverbrauch zu vermindern.

In /Madlin 75/ wird der Einfluss des Staubgehaltes genauer untersucht. So wie in Abb. 12 dargestellt ist, gibt es immer den optimalen Staubgehaltswert, wenn die Festigkeit am höchsten ist, in dem Beispiel gegen 15 %.

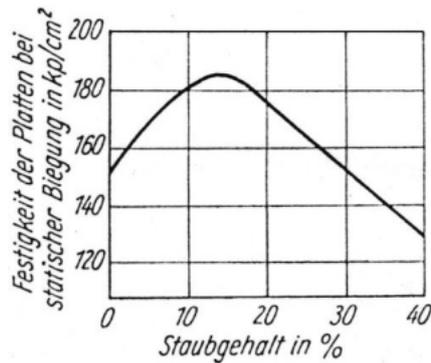


Abb. 12: Biegefestigkeit der Platten in Abhängigkeit vom Staubgehalt in den Spänen (Dichte  $700 \text{ kg/m}^3$ ,  $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ ) /Madlin 75/

Aus früheren Arbeiten /Schubert 03, Wartenberg 87/ ist bekannt, dass bei technischen Vorgängen wie z.B. Häckseln der verschiedenen Güter und Zerstäubung der Flüssigkeiten, die Verteilung von so entstandenen Größen Log-Normalverteilung haben.

In Abb. 13 ist ein Beispiel gegeben, wie die Materialmorphologie dargestellt wird. Auf der Y-Achse ist in gaußscher Teilung der prozentuelle Mengenanteil aller gesiebten Materialfraktionen gegeben und auf der X-Achse sind in logarithmischer Teilung die gemessenen Größen in mm gegeben. Die Summenkurven geben auch Auskunft über den Zentralwert (geometrisches Mittel), über Streubreite und die Mengenanteile die oberhalb oder unterhalb bestimmter Grenzen liegen.

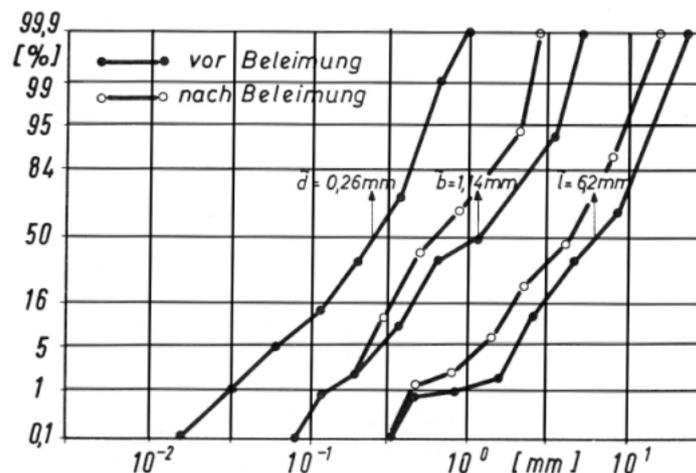


Abb. 13: Summenbilder aus einer Spananalyse an industriell hergestellten Kiefer-Schneidspänen /May 73/

### 3.2 Faserplatten, ihre Herstellung und Eigenschaften

Die Faserplatte ist ein trocken geformter Holz- oder Pflanzenwerkstoff, hergestellt aus Lignocellulose-Fasermaterial, kombiniert mit synthetischem Klebstoff oder anderen geeigneten Bindemitteln. Die Platten werden durch Heißverpressung erzeugt, wobei die

### 3. Stand der Forschung

---

Faserbindung durch die zugesetzten Bindemittel erfolgt. Weitere Zuschlagstoffe zur Eigenschaftsverbesserung können verwendet werden. Unter Zuschlagsstoffen nach /Deppe 96, Deppe 64, Schwarz 04/ versteht man Härter, Hydrophobierungsmittel, Feuerschutzmittel, Fungizide, Streckmittel, Trennmittel, Vernetzter, Katalysatoren, Weichmacher, Füllstoffe, Haftvermittler, Entschäumungsmittel, Emulgatoren, Stabilisatoren, Konservierungsmittel, Alterungsschutzmittel, Lichtschutzmittel, Frostschutzmittel und Farbstoffe.

Nach ihrer Dichte werden Faserplatten in poröse Platten (Dichte  $< 350 \text{ kg/m}^3$ ), Mitteldichtefaserplatten (MDF Platten, Dichte  $350 \text{ bis } 800 \text{ kg/m}^3$ ), und harte Faserplatten (Dichte  $> 800 \text{ kg/m}^3$ ) unterteilt.

Die Dichte einer Faserplatte kann nicht den Grenzwert von etwa  $1500 \text{ kg/m}^3$  übersteigen /Walther 06, Bät ge 02/, sonst würde das Material so stark gepresst dass es keine Hohlräume in der Plattenstruktur gäbe.

Heutzutage ist verständlich, dass Partikelplatten müssen nicht nur aus Holz gewonnen werden können sondern auch und aus verschiedenen Pflanzen /Dix 07/, wie z.B. Hanf.

In /Deppe 00/ wurden mögliche Materialien außer Holz aufgelistet, woraus die Fasern gewonnen werden können, z.B. aus Rückständen von Einjahrespflanzen sowie Stauden- und Strauchmaterialien. Dabei wurde als allgemeines Problem der stoßweise Anfall zur Erntezeit bezeichnet, was eine trockene Lagerung des Materials erfordert.

Üblicher Bindemittelanteil bei Faserplatten ist 8-12 % Festharz pro atro Holz /Lampert 67/, wobei in einigen Fällen wie z.B. bei der Herstellung von hochwertigen Formpressteilen /Klabunde 98/ der Wert von 25 % erreicht werden kann.

Herstellung von Faserformteilen ist seit mehreren Jahrhunderten bekannt. So wurden z.B. Spielzeuge aus Papiermaché ab etwa 1725 in Sonneberg (Deutschland) hergestellt /Deppe 96/. Die erste moderne Faserplattenanlage wurde erst im Jahr 1965 von der Firma Allied Chemical Deposit NY gebaut /Deppe 96/.

Nach /Kossatz 93/ teilen sich im Grunde genommen die Verfahren für Faserplattenherstellung in:

- Nassverfahren, wobei der Faserstoff mit hohem Wasseranteil (über 90%) hergestellt wird, danach wird solch eine Fasersuspension auf Entzugsiebe gegossen, wodurch der große Teil des Wassers entzogen wird und die so gewonnene Faserplatte bereit für die weitere Verarbeitung ist, und
- Trockenverfahren, wobei der Faserstoff von der Feuchtigkeit bis 10% mit Bindemittel gemischt und heiß gepresst wird.

### 3. Stand der Forschung

Die allgemeinen Anforderungen für Faserplatten sind nach /Kühne 97/ ähnlich wie bei Holzwerkstoffen: mechanisch belastbar (statisch und dynamisch), hohe Festigkeit, gutes Dämmverhalten (Wärme und Schall), gutes Zeitverhalten, Beständigkeit (chemisch, biologisch, physikalisch, Klima, Schädlinge, Temperaturen, Feuchte) und ökologisch unbedenklich bei der Herstellung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung.

Nach /Eisner 65/ wurden bei Faserplatten (MDF) für weitere Verarbeitung und Anwendung folgende Eigenschaften als günstig bezeichnet: Dimensionsstabilität, Gleichmäßigkeit der Struktur, Geschlossenheit und Glätte der Oberfläche.

In Tabelle 2, sind Eigenschaftswerte von Platten aus Literaturquellen aufgelistet worden.

Tabelle 2: *Eigenschaften von Faser- und Partikelplatten aus verschiedenen Literaturangaben*

Quelle	Plattenart	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
/Eisner 65/	MDF Holzfaserplatten	420 - 800	10,5 - 28
/Neusser 63/	MDF Platten aus Holzabfällen nach dem Mixolit Verfahren	350 - 650	1,2 - 12
/Topan 88/	MDF Holzfaserplatten	600 - 900	30
/Kehr 98/	Spanplatten aus Holzspänen mit Pflanzenproteinen als Bindemittel	ca. 700	6 - 20
/Blümelhuber 02/	Faserplatten aus Birtreber, Fichtenholz, oder Hanfschäben, mit 10% Epoxydharz	800	6,4 – 29,9
/Lehnen 06/	MDF Holzfaserplatte mit UF, PF und PMDI als Bindemittel	Ca. 650	21, 24 und 30
/Dix 01/	MDF Holzfaserplatten mit Stärkezusatz von 10 bis 20 %	770 - 860	12,6 – 22,4
/Dix 07/	Spanplatten aus Hanf-, Kenaf-, Sonnenblumenstängeln mit 6 % PMDI	400	2,4 – 6,3
/Müller 97/	MDF Holzfaserplatten, bindemittelfrei nach dem Nassverfahren	550	2,24
/Müller 97/	MDF Holzfaserplatten mit 10 % Stärkezusatz nach dem Nassverfahren	170	2,16
/Döring 06/	MDF Holzfaserplatte aus dem Baumarkt	700	21

### 3. Stand der Forschung

---

In /Klabunde 98/ wurden die Eigenschaften von selbst hergestellten Faserplatten, als auch industriell gefertigten Gepäckraumabdeckungen untersucht und dargestellt. Es handelt sich um HDF Naturfaserplatten (Soll-Dichte von 900 kg/m<sup>3</sup>, Dicke etwa 3 mm, Bindemittelsatz ca. 20 %, Presstemperatur 190 °C). Die Platten wurden aus Flachs-, Textil- und Ölleinfasern hergestellt, mit PF Harz oder Stärke gebunden. Wegen der besseren Übersicht über Eigenschaften gängiger Platten, sind die Ergebnisse von /Klabunde 98/ in Tabelle 3, Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt.

Die Ergebnisse ähnlich laufender Untersuchungen im Fall von Spanplatten die mit Weizenprotein verleimt wurden, sind in Abb. 16 dargestellt. Die Festigkeit der Platten steigt mit der Materialfeuchtigkeit vor dem Pressen. Viele natürliche Bindemittel brauchen erhöhte Feuchtigkeit um „verkleistert“ zu werden und ihre Bindekräfte bis zum Maximum zu bringen.

Nach /Klauditz 52/ sind im Aufbau der Holzspanplatten morphologisch betrachtet zu unterscheiden: Hohlräume, Holzanteile normaler Beschaffenheit sowie Holzanteile mit Verdichtung ihres Gefüges im Bereich der ausgebildeten Kontakt-, Verleimungs- und Überlappungsflächen zwischen den Holzspänen. In Abhängigkeit von der Dichte bzw. in mittelbarer Abhängigkeit vom aufgewendeten Pressdruck bei der Plattenherstellung ändern sich die morphologisch bestimmenden Anteile der Holzspanplatte in gegenseitiger Beeinflussung.

Nach /Deppe 64/ sind die Leimfugen sicherlich immer die schwächsten Stellen in der Spanplatte und bei mechanischer oder klimatischer Belastung der Spanplatten greift die Zerstörung zuerst an den Leimfugen an. Im Gegensatz dazu hat /Walther 06/ durch Raster Aufnahmen nachgewiesen, dass die Risse in der Platte fast ausschließlich an den Fasern erscheinen und nicht an den Bindemittelfugen.

Die Strukturmerkmale einer Faserplatte sind in Abb. 17 gegeben.

Tabelle 3: *Biegefestigkeit und Rohdichte von Gepäckraumabdeckungen /Klabunde 98/*

Gepäckraum- abdeckung aus ...	Mittlerer Harzgehalt [%]	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Textilfasern (Serienproduktion)	25	35,1	941
Flachswerg	22	48,5	946
Ölleinfasern	25	45,6	946

### 3. Stand der Forschung

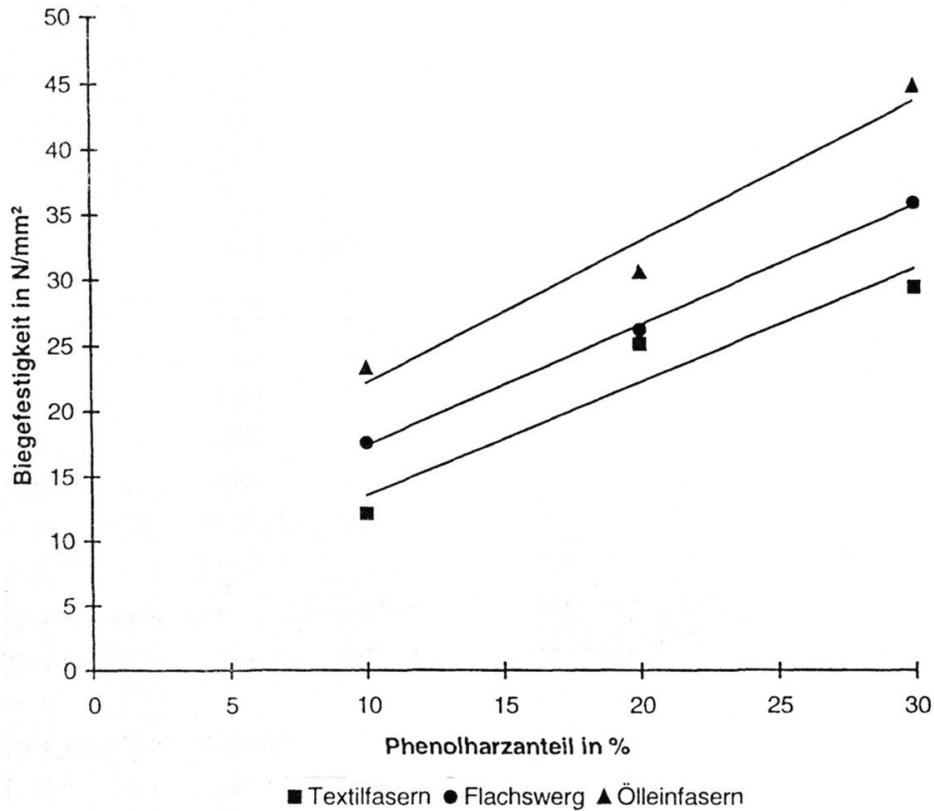


Abb. 14: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Faserplatten vom Phenolharzanteil (Platten aus Eigenherstellung, Soll-Dichte 900 kg/m<sup>3</sup>, Dicke etwa 3 mm) /Klabunde 98/

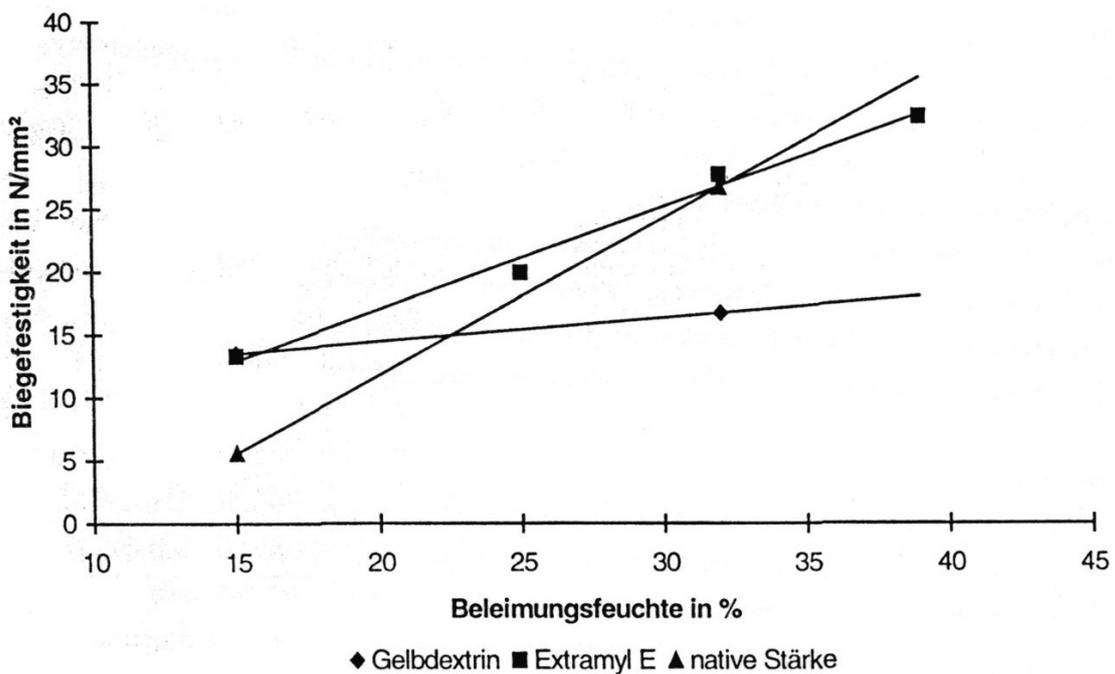


Abb. 15: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Jutfaserplatten von der Beleimungsfeuchte bei Stärken verschiedenen Molekulargewichts, Stärkeanteil 14,2 %, Presszeit 180s (Platten aus Eigenherstellung, Soll-Dichte 900 kg/m<sup>3</sup>, Dicke etwa 3 mm) /Klabunde 98/

### 3. Stand der Forschung

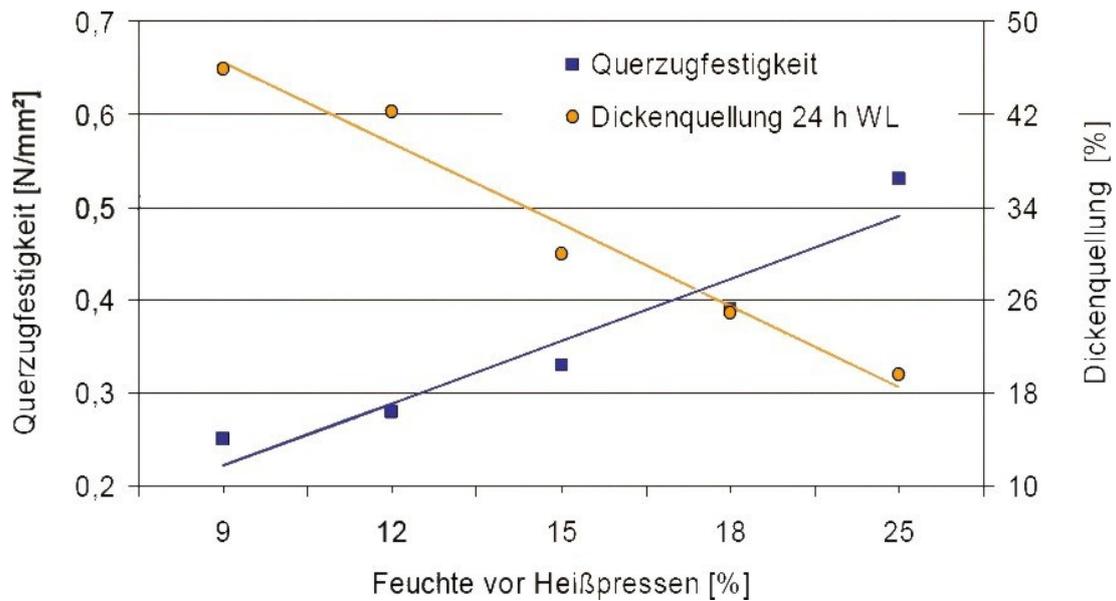


Abb. 16: Abhängigkeit der Querzugfestigkeit und Dickenquellung der Spanplatten mit Weizenprotein verleimt von der Feuchtigkeit vor Heißpressen /Krug 06/

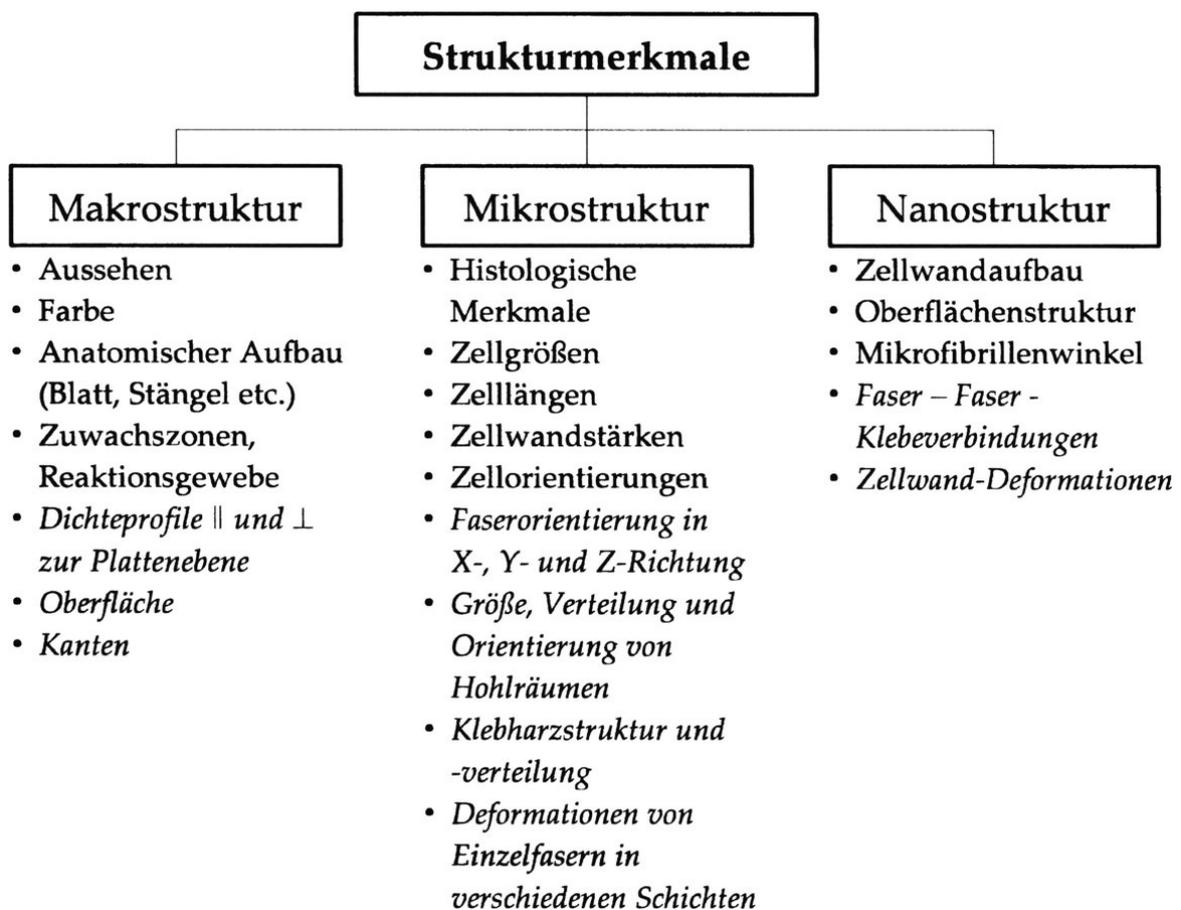


Abb. 17: Ausgewählte Strukturmerkmale von Holz, Faserplatten und Faserwerkstoffen /Walther 06/

### 3.3 Bindemittel für Faserplatten

Bindemittel sind (nach DIN EN 16921) nichtmetallische, plastische, flüssige oder feste Werkstoffe, die feste Füge­teile durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbinden können, ohne das sich von den zu verbindenden Materialien die Eigenschaften und das Gefüge wesentlich verändern.

Bei der Partikelplattenherstellung hat das Bindemittel die Funktion Partikel bzw. Fasern miteinander fest zu binden, damit die Platten eine stabile dauernde Form und die erforderliche Eigenschaften aufweisen.

Die Bindemittel für Faserplatten können nach chemischer Zusammenfassung wie folgend unterteilt werden /Deppe 00/:

- Anorganische Bindemittel: Zement, Gips, Wasserglasbindung usw.
- Organische Klebstoffe:
  - Duroplaste: Harnstoff-Formaldehydharze (UF), Melamin-Formaldehydharze (MF), Phenol-Formaldehydharze (PF), Isocyanate wie z.B. Diphenylmethan-Isocyanat (MDI, wasser- und lösungsmittelfreie organische Lösung), Sulfitablauge (Verfahren ist ungünstig)
  - Thermoplaste: PVA, PVC (unter Hitze verformbar und nicht hitzebeständig)
  - Tierische Leime: Blutalbumin- und Gluteinleime (werden nicht mehr oder kaum angewendet)
  - Pflanzliche Leime: Stärke, Lignine, Tannine, Proteine, usw.

Heutzutage werden bei der Faserplattenherstellung meistens synthetische Bindemittel verwendet. Nach /Deppe 96/ werden mehr als 90% der MDF Platten mit Harnstoffharzen hergestellt.

Die synthetischen Bindemittel können nach der Art ihrer Abbindung wie in Abb. 18 unterteilt werden.

Heutzutage werden Bindemittel intensiv erforscht aus unterschiedlichen Gründen: Senkung der Produktionskosten, Verbesserung der Qualität der Platten, Schonung der Umwelt und Senkung des Gesundheitsrisikos.

Es wird versucht die konventionellen Bindemittel chemisch zu modifizieren und natürliche Bindemittel anzuwenden.

In Abb. 18 ist eine Systematik synthetischer Klebstoffe angegeben /Schwarz 04/

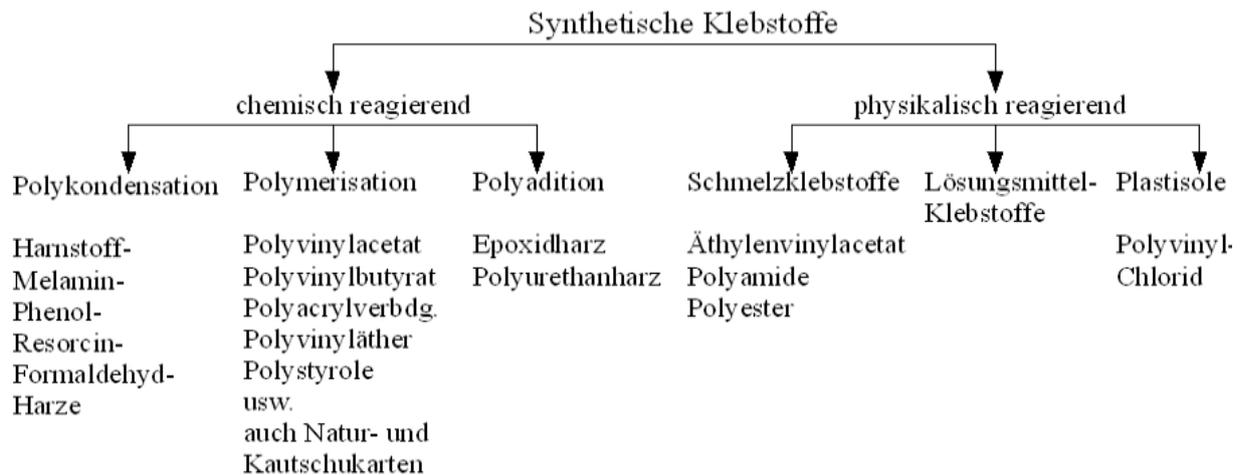


Abb. 18: Systematik synthetischer Klebstoffe /Schwarz 04/

### 3.4 Natürliche Bindemittel

Nach /Schwarz 04/ stellt die moderne Holzindustrie strenge Anforderungen an die technischen Eigenschaften der Klebstoffe u. a. Wasserbeständigkeit, die von natürlichen Bindemitteln bisher nicht erfüllt wurden, weiterhin: ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis, eine hohe Reaktivität, die eine rationelle Produktion mit modernen und schnellen Pressanlagen erlaubt, eine einfache Handhabung beim Einsatz und geringe Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung.

Eine Einteilung der meist verwendeten natürlichen Bindemittel nach chemischer Zusammenfassung ist in Abb. 19 gegeben.

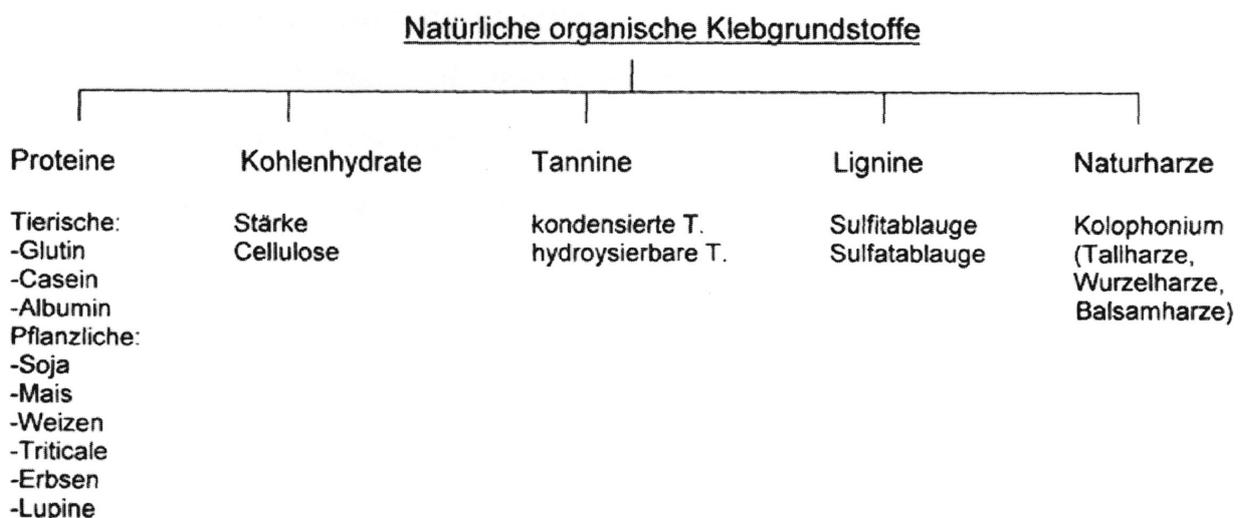


Abb. 19: Systematik natürlicher organischer Klebgrundstoffe /Schwarz 04/

Das natürliche Bindemittel, das heutzutage wegen seiner Zugänglichkeit am meisten

### 3. Stand der Forschung

untersucht wird ist Stärke. Die Stärke besteht aus langkettigen Molekülen, enzymatisch polymerisiert aus D-Glucose /Bergh 91/. Die Stärke wird in allen chlorophyllhaltigen Pflanzen gebildet aus Kohlendioxid, Wasser und Lichtenergie. Sie ist Wasserlöslich und kann in zwei Gruppen geteilt werden: Amylose, bestehend aus 600 bis 3000 Glucoseeinheiten nur in einer Reihe angeordnet und Amylopektin das aus 6200 bis 62000 Glucoseeinheiten besteht und verzweigt ist wie in Abb. 20 dargestellt.

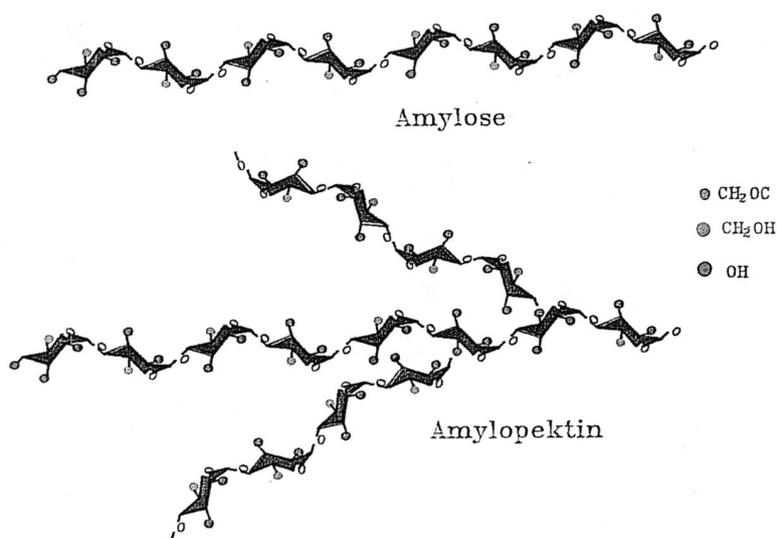


Abb. 20: Polymerfraktionen der Stärke /Bergh 91/

Die Stärke ist in ihrer Ursprungsform in kleinen Körnern der Größen von 2 bis 175  $\mu\text{m}$  zusammengewachsen /Tegge 04/. Durch chemische und physikalische Modifizierung der Stärke lassen sich die Eigenschaften der Stärke ändern /Bergh 91/. So kann Stärke mit verschiedensten Eigenschaften entstehen wie z.B. kaltlösliche Stärke, die keine Hitze braucht um in Wasser gelöst zu werden als auch Stärke die weniger Wasser braucht um verkleistert zu werden. Durch die Modifizierung der Stärke steigt auch ihr Preis.

Obwohl jedoch auf den Labormaßstab beschränkt geblieben, stellen die insbesondere in der Dissertation von Müller 97/ geleisteten Vorarbeiten zur Herstellung stärkegebundener Formpresskörper eine wichtige Grundlage für diese Arbeit dar.

Die ersten grundlegenden Untersuchungen von Klabunde 98/ zeigten, dass die Verwendung stärkegebundener Faserplatten bzw. Faserformteile zumindest in wenig feuchtesensiblen Bereichen wie (Kfz-)Innenräumen denkbar erscheint. Eine direkte Verarbeitung auf bestehenden Anlagen ist zwar noch problematisch, jedoch besteht zur weiteren Verbesserung der Verarbeitungsbedingungen und Produkteigenschaften in der Optimierung von Rezepturen und verfahrenstechnischen Parametern noch umfangreicher Spielraum für vertiefende Untersuchungen.

Nach /Tegge 04/ können „feuchtigkeitsbeständige“ Klebstoffe aus Stärke gewonnen werden durch Modifizierung mit Ätzalkalien. Es wird aber nicht weiter erklärt wie genau und in welchem Sinne „feuchtbeständig“. Ansonsten wird die Stärke in allen Variationen als nicht wasserbeständig angenommen.

Die Cellulose ist der Hauptbestandteil aller Pflanzen (siehe Abb. 10, Kapitel 3.1). Sie hat ähnliche chemische und Molekülstruktur wie die Stärke und ähnliche Bindungsmechanismen (siehe Abb. 20, Kapitel 3.4, Abb. 22 und Abb. 23 Kapitel 3.5), ist jedoch nicht so effektiv wie Stärke. Cellulose ist heutzutage zugänglich in Form von z.B. Tapetenkleister.

Die heutzutage zugänglichen Proteine auf Pflanzenbasis stammen aus der Stärkeproduktion /Metzger 05/. Nach der Abtrennung der Stärke bleiben sie im Abwasserstrom zurück mit einem Rest unterschiedlicher Kohlenhydrate. Nach der Trocknung liegen die jeweiligen Gemische als Feststoffe vor und stellen die Ausgangsprodukte für Klebstoffe dar. Als Abfallprodukt sind sie kostengünstig, können aber nicht für eine hohe Verklebungsqualität genutzt werden.

Lignine sind amorphe, polyfunktionelle, hochmolekulare Verbindungen aromatischer Natur, die aus verschiedenen, in vielfältiger Weise verknüpften Phenylpropan-Struktureinheiten aufgebaut sind /Berthold 90/. Die Einheiten sind vielgestaltig verknüpft, ohne dass ein festes Baumuster zu erkennen ist. Neben der Cellulose sind die Lignine Hauptholzbestandteile. Als technische Lignine werden die bei der Celluloseherstellung anfallenden Lignine bezeichnet /Schwarz 04/. Die Klebstoffe auf Ligninbasis haben nicht den industriellen Standards der Holzindustrie genügt, was sich besonderes auf die Wassertoleranz bezieht. Doch sind sie für die Anwendung im Innenbereich geeignet.

Tannine sind reaktive polyphenolische Holzinhaltsstoffe, die durch Extrusion aus Baumrinde aber auch aus verschiedenen Hölzern gewonnen werden /Fabo 04/. Aufgrund ihrer chemischen Struktur lassen sich Tannine mit Formaldehyd, ähnlich wie Phenolharze, zu hochmolekularen Kondensationsprodukten umsetzen.

Außer den in Abb. 19 genannten natürlichen Bindemitteln, gibt es solche die nicht so zugänglich sind, aber neuzeitlich immer mehr untersucht werden wie z.B. PLA (Polylactic acid - Polymer der Milchsäure), PHB (Polyhydroxybuttersäure - Copolymere fermentierter Zucker), Pullulan und Xanthan (enzymatischer Behandlung der Stärke) und Bindemittel auf Pflanzenölbasis.

Polymilchsäure (PLA) ist einer der seltenen natürlichen Kunststoffe die hochwertig und gleichzeitig bioabbaubar sind. Nach /Brune 90/ ist die PLA zurzeit nur in medizinischen

### 3. Stand der Forschung

---

Bereich anwendbar als extrudierbarer Kunststoff. Gegen die Verwendung als Verpackungsmaterial spricht der zurzeit hohe Preis (>500€/kg). Um Milchsäure zur Polymerisation (bis 95 %) zu bringen, sind die folgende Bedingungen erforderlich: Hitze von 180 – 200 °C, 2,5 h Dauer und Einsatz von Katalysatoren wie z.B. verschiedenen chemischen Bindungen von Metallen wie Zink, Aluminium, Titan oder Lanthaniden /Henton 05/.

Zu einer weiteren Gruppe der natürlichen Polymere gehören Polyhydroxybuttersäure (PHB), Hydroxybuttersäure und Hydroxyvaleinsäure die alle Copolymere fermentierter Zucker sind /Brune 90/. Diese sind vom Preis her (20€/kg) für die Folien- und Verpackungsherstellung etwas günstiger als PLA.

Weitere ganz spezielle natürliche Bindemittel die nicht so verbreitet sind, können durch enzymatische Behandlung von Stärke entstehen wie z.B. Pullulan (durch Pilze) und Xanthan (durch Bakterien) /Wöckinger 03/

Pflanzenöle können auch für die Herstellung der Bindemittel oder Kunststoffen verwendet werden /Drzal 05/. Es gibt neue Verfahren /Korn 93/ um starre polymerisierte Kunststoffstrukturen aus Pflanzenölen zu erzeugen die sogar nassfest sein können. Darauf bezogen wurden in dieser Arbeit auch Versuche mit pflanzenöhlhaltigen Materialien als Bindemittel, die auch als Hydrophobierungsmittel wirken, durchgeführt.

Nach /Brune 90/ sind Vorprodukte aus biologisch abbaubaren Kunststoffen zurzeit wesentlich teurer als Produkte aus anderen Materialien. Selbst bei industrieller Großherstellung wird mit ungefähr dreifachen Kosten gerechnet.

Am Markt gibt es Firmen, die ganz spezielle Bindemittel als Mischung verschiedenster natürlicher Stoffe anbieten. Ein Beispiel dafür ist die Firma WTB Bio Tech GmbH, deren Bindemittel zurzeit den zehnfachen Wert von synthetischen Bindemitteln erreicht.

Die Naturfaserplatten lassen sich auch ohne zusätzliche Bindemittel herstellen. Durch enzymatische Behandlung des Materials können die Faseroberfläche und die eigenen Bindemittel in Fähigkeit gebracht werden eine stabile Faserplattenstruktur ohne Bindemittelsatz zu bilden /Kharazipour 97/. Die stoffeigenen Bindemittel von Naturfasern können auch und mit verschiedenen chemischen Verfahren aktiviert werden z. B. durch Behandlung mit Wasserstoffperoxid /Deppe 00/. Beim Heißpressen kann es durch Umwandlung von Zellinhaltsstoffen in Lignin zur Lignifizierung bzw. Verholzung der pflanzlichen Zellwand kommen. Dies führt zu einer Verhärtung und Erhöhung der Druckfestigkeit der Faserplatten /Berthold 90/. Eigene Bindemittel des Faserstoffs werden unter die Hitze und Druck beim Pressen aktiviert.

### 3.5 Bindungsmechanismen

Die Bindungsmechanismen die eine Faserplatte in stabiler Form zusammenhalten sind zahlreich. Eine Klebfuge wird durch Adhäsion und Kohäsion bezeichnet. Die Adhäsion ist die Wirkung aller Anziehungskräfte die sich zwischen zwei in Kontakt tretenden festen Phasen ausbildet (z.B. zwischen einer Faser und einem Bindemitteltröpfchen). Die Kohäsion bezeichnet die Zusammenhangskräfte in demselben Stoff (z.B. zwischen den Molekülen in einer Klebfuge die sie zusammen halten). Es sind theoretische Erklärungen vorhanden, um natürliche Prinzipien zu erklären die für Bindungen aller Art verantwortlich sind.

In Abb. 21 sind einige Bindungsmechanismen beleuchtet, die in einer Faserplatte wirken können.

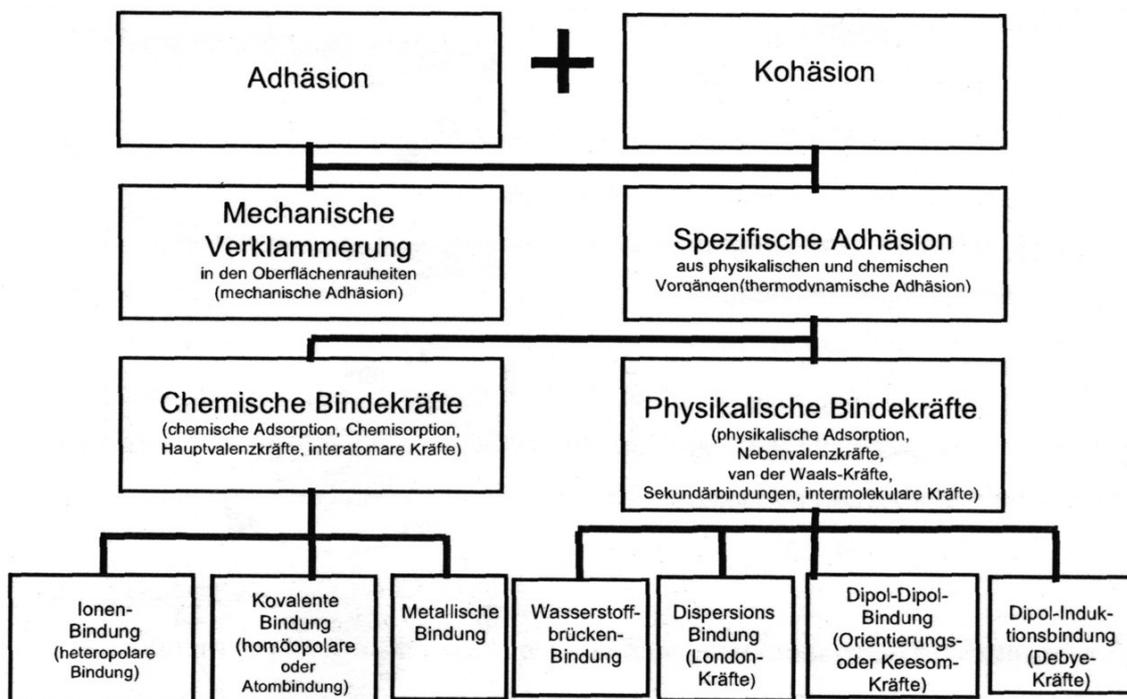


Abb. 21: Schema der Haftmechanismen des Klebens /Blümelhuber 02/

In /Schubert 03/ sind noch weitere mögliche Bindemechanismen genannt wie z.B. durch elektrostatische Coulomb Kräfte, magnetische Kräfte, Kapillardruck, Sinterprozesse (Atomaustausch), usw.

Eine besondere Art der Bindung stellt die Wasserstoffbrückenbindung dar, wodurch die Naturfasern an einander gebunden werden. Bei Trocknung einer feuchten Fasermatte werden die Wassermoleküle die an die Hydroxylgruppen der Cellulose gebunden waren ausgedampft, an deren Stelle werden die Cellulosemoleküle der Faser miteinander durch Wasserstoffbrücken fest gebunden. Dieser Bindemechanismus spielt die Hauptrolle bei der

### 3. Stand der Forschung

Verklebung von Faserplatten die nach dem Nassverfahren hergestellt werden /Eisner 65/. In Abb. 22 sind die Wirkprinzipien der Wasserstoffbrücken dargestellt.

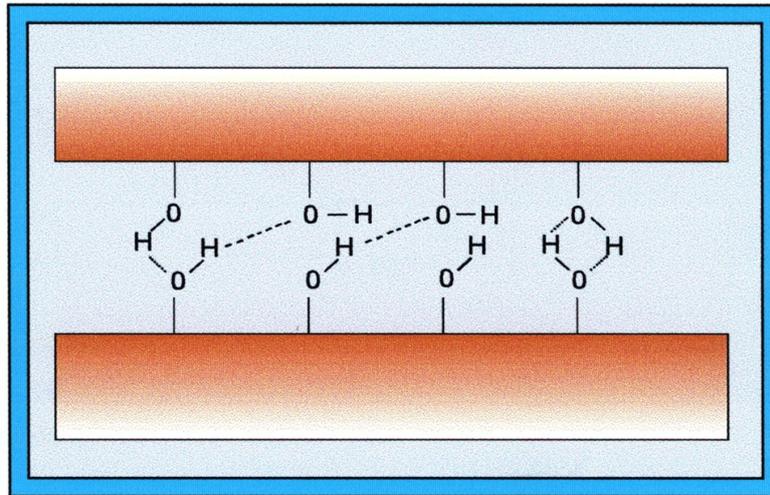


Abb. 22: Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen benachbarten Fasern  
/Müller 97/

Bei den Faserplatten die mit natürlichen Bindemitteln bzw. Stärke gebunden sind, kommt dieser Effekt ausdrücklich vor (siehe Abb. 23).

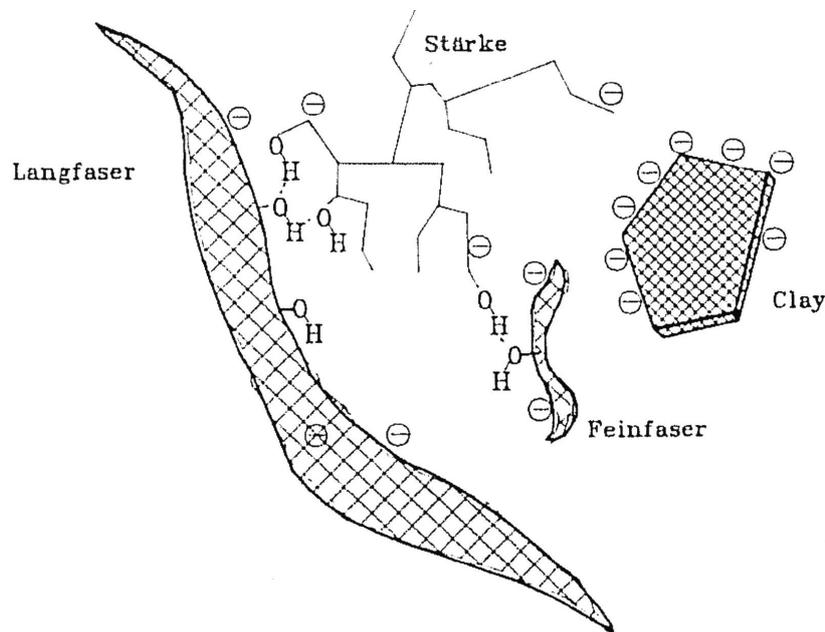


Abb. 23: Stärkefixierung durch Wasserstoffbrücken /Hemmes 91/

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Bindemechanismen zweier synthetischer Bindemittel (MDI und PF Harz) ist in Abb. 24 dargestellt. An diesem Beispiel ist zu merken, dass der MDI höhere Bindekräfte entwickelt, wodurch der dabei üblicher Leimverbrauch bei MDI von 4 % im Gegensatz zum Leimverbrauch des PF Harzes von 10 % deutlich niedriger ist.

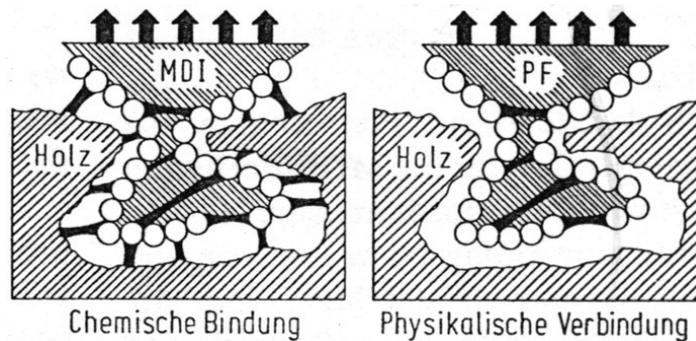


Abb. 24: Mechanismus der Verklebung mit MDI und Phenolharz im Vergleich /Deppe 96/

### 3.6 Zerstäubung des Bindemittels

In /Schubert 03/ werden die Wirkprinzipien von Zerstäubern der Flüssigkeiten betrachtet. Im Grunde genommen teilen sich die Zerstäuber für Flüssigkeiten in Einstoffzerstäuber und Zweistoffzerstäuber auf. Beim Einstoffzerstäuber wird die notwendige Energie zur Desintegration der Flüssigkeit über den Vordruck aufgebracht. Zweistoffdüsen nutzen die kinetische Energie eines zweiten Hilfsstoffstroms (in der Regel Luft).

Die Einstoffdüsen (siehe Abb. 25) brauchen hohen Druck von 300 bar um die Flüssigkeit fein zu zerstäuben, wobei die Probleme wie Pumpenverschleiß und Düsenverstopfung öfter auftreten können /Meinecke 62/.

Bei heutigen Plattenherstellern sind Zweistoffdüsen etabliert, wie in Abb. 26 dargestellt.



Abb. 25: Einstoffdüse mit Drallkörper  
/Lechler 04/

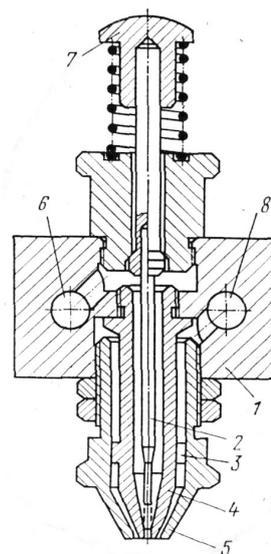


Abb. 26: Zweistoffdüse, 1. Gehäuse, 2. Nadel, 3. Rille, 4. Düse, 5. Aufsatz, 6. Öffnung, 7. Kopf, 8. Öffnung für den Luftdurchgang /Madlin 75/

### 3. Stand der Forschung

Außer dieser Grundeinteilung können je nach ihrer Konstruktion und Besonderheit weiter unterteilt werden, z.B. Düsen mit innerer oder äußerer Zerstäubung, mit oder ohne Drallkörper, Rotationszerstäuber, Prefilmingzerstäuber usw. /Schubert 03/.

Ein Beispiel für besondere Zweistoffdüsenausführung für pastöse Flüssigkeiten stellt eine Lösung der Firma Kraus-Maffei dar, in Abb. 27 dargestellt. Dabei wird die Flüssigkeit über eine Kante der zusätzlichen Scherkraft ausgesetzt und damit feiner zerstäubt.

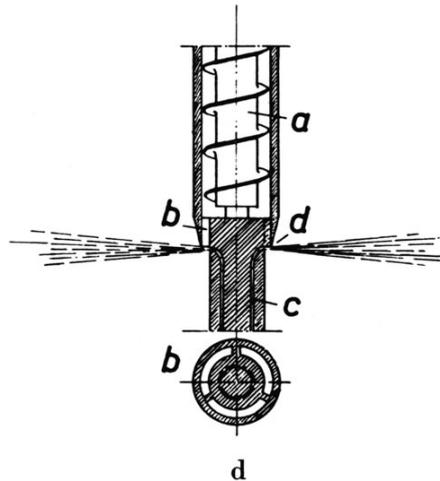


Abb. 27: Pastenzerstäuber nach Krauß-Maffei-Imperial GmbH & Co., a) Schnecke, b) Rundschlitzdüse, c) Ringkanal /Kneule 59/

Nach /Schubert 03/ wirken sich nur etwa 3 % der insgesamt für das Zerstäuben aufgewendeten Energie auf die Vergrößerung der Fluidoberfläche aus, der weitaus größte Anteil erschöpft sich im Transport der dispersen Phase zusammen mit dem der umgebenden Gasphase. Konstruktive Besonderheiten die den Wirkungsgrad einer Düse verbessern können, verursachen öfter andere Schwierigkeiten wie z.B. Formen der Anbackungen im Düsenkörper /Schubert 03/, oder eine komplizierte Reinigung nach dem Verstopfen oder bei Wartungsarbeiten.

Nach /Schubert 03, Wartenberg 87/ ist die bei der Zerstäubung entstehende Tröpfchengrößenverteilung meist normal(Gauß)- oder log-normal verteilt. Nach /Gefahrt 67/ kann Bindemittel feiner zerstäubt werden, wenn die Düse an Hochfrequenz Wechselspannung angeschlossen ist. Die dadurch oszillierenden Wasser- und Leimmoleküle erhöhen die Zerstäubungsenergie.

Es gibt Anbieter von Sprüheinrichtungen, die die Düse unter Ultraschall gesetzt haben, um besseres Versprühen zu erreichen /Lechler 04/. Doch der Hersteller selbst rät von der Anwendung für Bindemittel ab, weil es zur Erhärtung und Verstopfung der Düse kommen kann.

### 3. Stand der Forschung

In /Meinecke 62/ wurde die Bedeutung des Zerteilungsgrades bei der Beleimung der Späne untersucht. Dabei wurde als Maß des Zerteilungsgrades der einfache Tröpfchenfleckendurchmesser betrachtet, wenn das Tröpfchen schon auf die feste Fläche aufgetroffen ist und ein Rotationsellipsoid formt. Für 50 % Harnstoff-Formaldehyd-Harz beträgt die Höhe der Tröpfchenflecken das 0,15-fache des Durchmessers. Dementsprechend beträgt der Tröpfchendurchmesser das 0,67-fache des Fleckendurchmessers. Dabei hängt dieses Verhältnis nicht von der Tröpfchengröße ab. Weiter ist für verschiedene Spandicken, Holzarten und Bindemittelanteile berechnet worden, wie groß der Durchmesser der Tröpfchenflecke sein sollte, damit alle Späne ganz mit dem Bindemittel bedeckt und umhüllt werden. Dabei wurde angenommen, dass alle Tröpfchen gleich groß sind. Die so berechnete Tröpfchengröße (Tröpfchendurchmesser  $\delta$ ) liegt im Intervall von 3,6 bis 37,4  $\mu\text{m}$ .

In /Vartenberg 87/ wird der Tröpfchendurchmesser ebenfalls nach der Größe des Tröpfchenflecks berechnet, wenn das Tröpfchen auf eine Fläche aufgetroffen ist. Dabei wird der Tröpfchenfleck als Kugelsektor angenommen.

In /Meinecke 62/ wurde der Einfluss der Tröpfchengrößen des Bindemittels auf die Spanplattenfestigkeit untersucht. Die Platten wurden aus Fichtenspänen unter 8% Bindemittelanteil und einer Dichte von  $600 \text{ kg/m}^3$  hergestellt. Die Tröpfchen sind im Bereich 8 bis 100  $\mu\text{m}$  variiert worden. Es ist aber nicht genannt worden, wie genau solche kleinen Tröpfchen mit einem mittleren Durchmesser von 8  $\mu\text{m}$  hergestellt und gemessen werden können. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abb. 28 dargestellt.

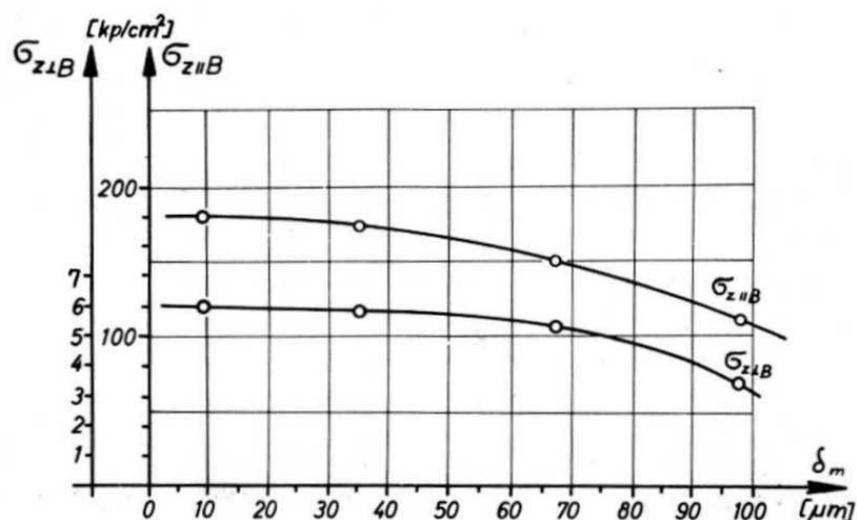


Abb. 28: Einfluss der Bindemittelzerteilung auf die Zug- ( $\sigma_{z||B}$ ) und Querkzugfestigkeit ( $\sigma_{z\perp B}$ ) von Holzspanplatten ( $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ ) /Meinecke 62/

### 3. Stand der Forschung

---

Der Einfluss der Bindemittelzerteilung auf die Festigkeit von Spanplatten ist eindeutig bewiesen worden. Bereits beim Tröpfchendurchmesser  $\delta = 35 \mu\text{m}$  ist nahezu ein Maximum der Plattenfestigkeit erreicht, so dass durch eine weitere Erhöhung des Zerteilungsgrades keine weitere wesentliche Festigkeitszunahme erreicht werden kann.

In einer Firmenangabe /Binos 05/ wurde von Tröpfchengrößen von  $18 \mu\text{m}$  gesprochen, die mit Einstoffdüsen erreicht wurden, jedoch mit verdünntem Bindemittel mit einer Feststoffkonzentration von 40 %.

Bei der Zerteilung von viskosen Flüssigkeiten mit Zweistoffdüsen wird die erreichbare Tröpfchengröße von mehreren Faktoren beeinflusst: den konstruktiven Merkmalen der Düse, der Viskosität der Bindemittellösung, der aufgewendeten Luftmenge pro Gewichtseinheit der Leimlösung und dem Spritzüberdruck /Meinecke 62/.

In /Meinecke 62/ werden zwei Wege erklärt wie die Bindemitteltröpfchen verkleinert werden können. Beide haben Vorteile und Nachteile. Man kann den Luftdruck erhöhen, wobei die verbrauchte Luftmenge sehr schnell steigt, was einen größeren energetischen Aufwand darstellt, außerdem ist nicht leicht eine so große Luftmenge aus der Maschine abzuführen. Andererseits kann die Viskosität der Bindemittel herabgesetzt werden durch z.B. Verminderung der Konzentration was mit erhöhter Feuchtigkeit der Matten vor dem Pressen verbunden ist. Eventuell ist das Material vor dem Sprühen auf 40 bis 50 °C kurz zu erwärmen.

Nach /May 73/ sollte das Bindemittel nicht zu fein zerteilt werden, da in diesem Fall die Tröpfchen trocknen, ihre Haftfähigkeit an den Spänen verlieren, und die Verteilung des Bindemittels infolge Entmischungserscheinungen wieder verschlechtert wird. Darüber hinaus kann ein Zerfließen des Bindemittels beim Pressen der Spanplatte nicht mehr stattfinden.

Bei /Wartenberg 87/ ist die Fläche von aufgetroffenen Tröpfchen als ein Abschnitt des Kugelsektors angenommen und das Verhalten der Tröpfchen noch detaillierter modelliert durch Oberflächenspannung und andere mikrophysikalische Größen. Es wurde, ähnlich wie bei /May 73/, der Effekt erwähnt, wenn die Tröpfchen mit höherer Geschwindigkeit auf die Partikel prallen, so dass diese nicht mehr anhaften sondern weiter zerkleinert werden.

Eine Art und Weise das Bindemittel besser (kleiner) zu zerstäuben ist die Verwendung von aufgeschäumten Bindemittel /Marutzky 05/. Seit Jahrzehnten wird darüber hinaus im Labor versucht, durch Aufschäumung der Klebstoffe wirtschaftliche Vorteile und technologische Verbesserungen bei Holzwerkstoffen zu erreichen. In einigen Bereichen der Anwendung wurde es als vorteilhaft bezeichnet, doch bei den meisten Anwendungen konnte das Problem der unzureichenden kohäsiven Festigkeit des porösen Klebstoffs nicht gelöst werden.

## 3.7 Methoden der Bindemittelapplikation

Unter Bindemittelapplikation bei der Faserplattenherstellung werden alle Handlungen verstanden, die bewirken, dass das Bindemittel mit dem Faserstoff zu einer Faserplatte verarbeitet werden kann. Z.B. Auswahl der Bindemittel, Zerstäuben, Mischen, Verteilen, Dosieren, Erhärtung, usw.

Die Aspekte der Bindemittelapplikation aus der Praxis die noch optimiert werden können sind:

- Höhere Bindemittelmengen, im Zusammenhang damit höhere Produktionskosten
- Bindemittelverteilung und -Zerteilung, Umwälzverfahren, Verfilzung, Verklumpung
- Einsatz der synthetischer, schädlicher Bindemittel
- Bei natürlichem Bindemittelleinsatz: Wasserverhältnis und Feuchtigkeitsbeständigkeit

Die Wirkungsparameter die die Bindemittelapplikation beeinflussen, können ähnlich wie bei /Wartenberg 87/ wie folgend unterteilt werden:

Stoffparameter:

- Flüssigkeit (Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte, Temperatur)
- Material (Feuchtigkeit, Schüttdichte, Oberfläche, Längen, Art, Lagerbedingung)

Betriebsparameter:

- Flüssigkeit (Druck, Tröpfchengröße, Strahlwinkel, Massenstrom)
- Maschine (Geschwindigkeit, Mischwerkzeuge, Befüllungsgrad, usw.)

Konstruktionsparameter:

- bei Düsen (Düsengröße, Düsenzahl, Düsenabstand)
- bei der Maschine (Arbeitsbreite, Anzahl der Mischwerkzeuge, usw.)

Die Beleimungssysteme in der Plattenindustrie haben die Aufgabe, den Leim mit wirtschaftlich tragbarem Aufwand möglichst gleichmäßig auf die Partikel zu verteilen. Die starken Preissteigerungen bei Leimharzen in den letzten Jahren fordern für die Beleimung die größtmögliche Effizienz. Vergleiche zwischen Labor- und Betriebsbeleimung zeigen, dass bei der Betriebsbeleimung oft nur 60 bis 70 % der theoretisch möglichen Verleimungsfestigkeiten ausgeschöpft werden. Da der Leim nach dem Holz der bedeutendste Kostenfaktor in der Plattenfertigung ist, muss das Beleimungssystem möglichst effektiv gestaltet werden /Deppe 00, angepasst/.

Nach verschiedenen Autoren beträgt der Klebstoffanteil im gesamten Kostenwert der Platten 20...50% /Madlin 75, Schubert 58, Kühne 97, Müller 05 und Fabo 05/.

Die Maschinen für die Bindemittelapplikation bestehen größtenteils aus einem geschlossenen Raum in dem die Partikel vereinzelt bewegt und gemischt werden und Einrichtungen für Bindemittelverteilung und -Auftrag auf die Partikel (z.B. Sprühdüsen).

Bei allen Verfahren für die Bindemittelapplikation gibt es das allgemeine Problem der Bindemittelansetzung in und an den Maschinen, Rührorganen usw. Die Wege diese Bindemittelansätze zu vermeiden, wären nach /May 73/ die Rührorgane der Maschine die ganze Zeit mit dem Mischgut bedeckt zu behalten, Oberflächen der Maschinenteile mit Antihafmitteln (z.B. PTFE) zu behandeln (Anstriche, Beschichtungen), Kühlung der Maschine und Maschinenteile und Dampfzufuhr /Deppe 00/ in die Maschine damit das Bindemittel nicht gleich bei der Berührung der Maschinenteile abtrocknet. Die Bindemittelansätze können Leimflecken an der Plattenoberfläche bilden wenn sie von Maschinenteilen durch Reibung abgewischt werden.

In weiteren Kapiteln sind einige Beispiele gegeben für verschiedene Arten der Beleimung.

#### 3.7.1 Das Walzen-Beleimungsverfahren

Die prinzipielle Wirkungsweise des Walzen-Beleimungsverfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass in Umwälzung befindliche Späne auf sich drehende Walzen, auf die Bindemittel aufgetragen wird, auftreten und dabei das Bindemittel auf die Oberfläche der Späne übertragen wird (siehe Abb. 29). Diese Art der Beleimung ist veraltet und wird nicht mehr in der deutschen Holzspanplattenindustrie angewendet /Meinecke 62/.

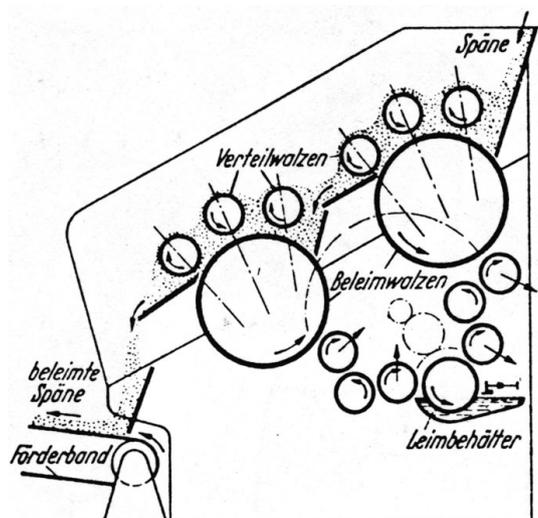


Abb. 29: Schematische Darstellung einer Walzen-Beleimungsmaschine nach FAHRNI /Meinecke 62/

#### 3.7.2 Beilemmischen nach dem Sprüh-Umwälz-Verfahren

Bei der Beilemmung der Späne nach dem Sprüh-Umwälz-Beilemmungsverfahren wird das Bindemittel mit Hilfe von Druckluftdüsen in feine Tröpfchen zerteilt und auf die Späne, die durch geeignete Vorrichtungen umgewälzt werden, aufgesprüht /Meinecke 62/. Durch günstige Ausbildung der Sprühdüsen und des Umwälzvorganges kann eine weitgehende Zerteilung und eine gute Verteilung des Bindemittels erreicht werden, Abb. 30.

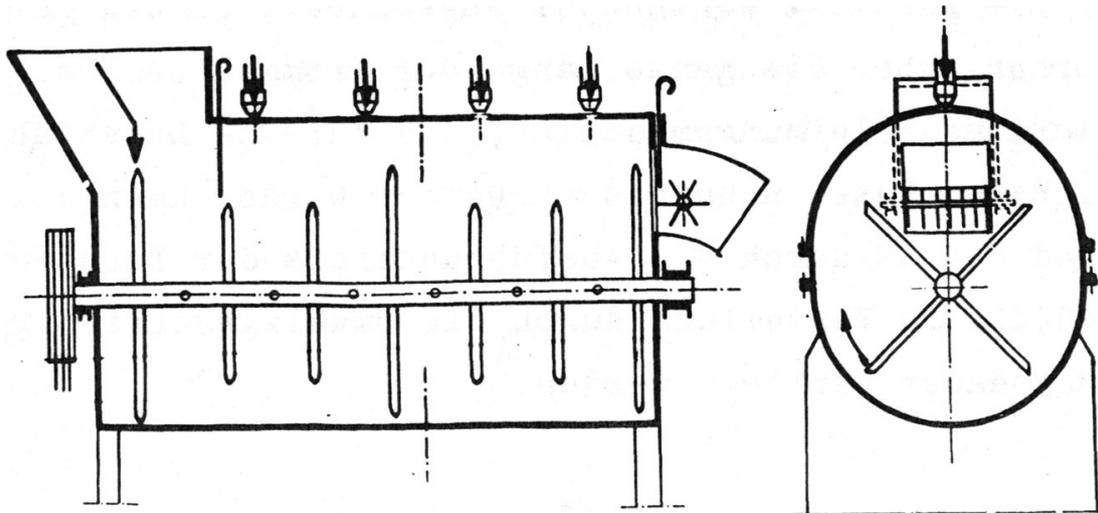


Abb. 30: Schematische Darstellung einer Sprüh-Umwälz-Beilemmungsmaschine (Bauart Drais) /Meinecke 62/

Die Wirkprinzipien wie die Partikel bei dieser Art der Beilemmung bewegt werden, kann man in drei Gruppen unterteilen, wie in Abb. 31 dargestellt /Deppe 00/. Die langsamste Gruppe sind die Beilemmischer, die das Material nur schieben. Es folgen die Mischer die das Material mit höherer kinetischer Energie werfen, und die dritte Gruppe stellen die Mischer (einwellige) dar, die das Material so schnell drehen, dass es durch die Fliehkraft immer einen Ring um die Mischertrommel formt.

Nach /Michanickl 05/ ist ein Nachteil bei diesen Mixern die Nachzerkleinerung der Partikel durch die Mischwerkzeuge. Außerdem haben alle bisher entwickelten Trockenbeilemmungssysteme (nach Sprüh-Umwälz-Verfahren) eine höhere Störanfälligkeit. Die Trommeln neigen abhängig vom Leimsystem und den eingestellten Parametern sehr stark zum Verschmutzen. Die Faser- und Bindemittelklumpen stellen hier die größte mechanische Belastung dar. Damit der Leimverbrauch geringer wird, sollte das Material vom Staub gereinigt werden. Bei dieser Art der Beilemmung gibt es noch große Möglichkeiten für weitere Entwicklungen.

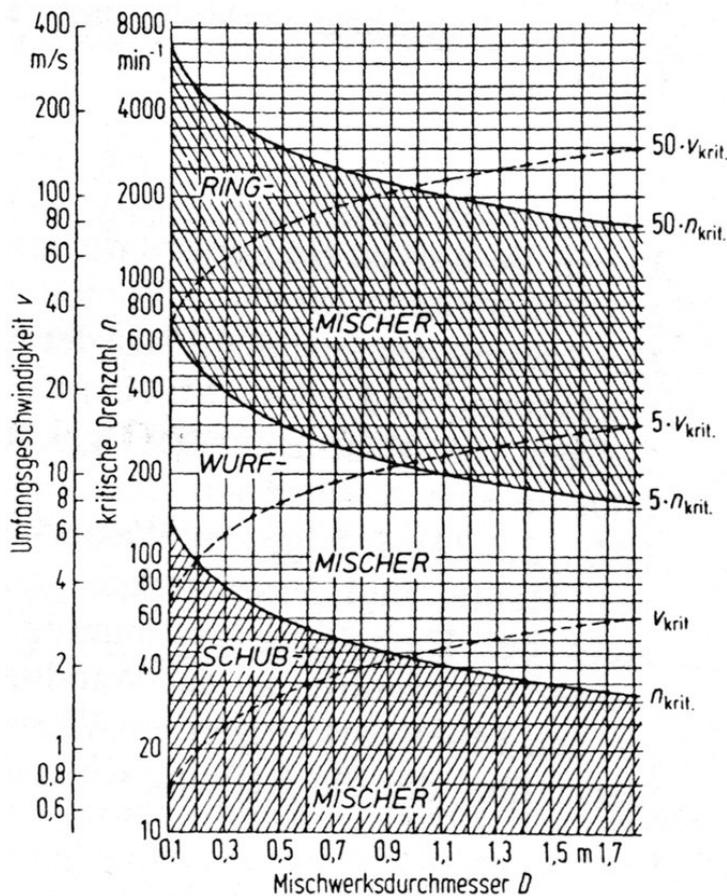


Abb. 31: Bereiche der kritischen Drehzahl in Abhängigkeit vom Mischwerkzeugdurchmesser  
/Deppe 00/

### 3.7.3 Blow-line Verfahren

Beim Blow-line Verfahren wird das Material gleich nach dem Refiner (Scheibenmühle) in einer Rohrleitung, die weiter zum Trockner führt, mit Bindemittel besprüht.

Nach /Müller 05/ hat dieses Verfahren den Nachteil, dass ca. 20 % mehr Leim eingesetzt werden muss als bei trockener Beleimung im Trommelmischer. Das Bindemittel wird nämlich durch Trocknen teilweise erhärtet, wodurch sein Haftvermögen noch vor dem Heißpressen geringer wird.

Nach /Michanickl 05/ liegen die Vorteile der Blow-line Beleimung vor allem in einer sehr guten Verteilung des Leimes auf den Fasern, technisch ist sie einfacher mit geringerer Störanfälligkeit und Energieverbrauch. Trotzdem kommt es zu einer Voraushärtung des Leimes mit Klebkraftverlusten bis zu ca. 30 %, und Formaldehydemissionen in der Trocknerabluft. Die Trockenbeleimung nach Sprüh-Umwalz-Verfahren erlaubt gegenüber der Blow-Line Beleimung je nach eingesetzter Technik und Plattentyp eine Leimeinsparung bis zu ca. 30 %.

### 3.7.4 Beleimung in dem Sprüh-Mischturm

Bei diesem System wird das Material in einem Turm im freien Fall gewirbelt, durch Düsen besprüht und dadurch gemischt und beleimt, wie in Abb. 32 gezeigt.

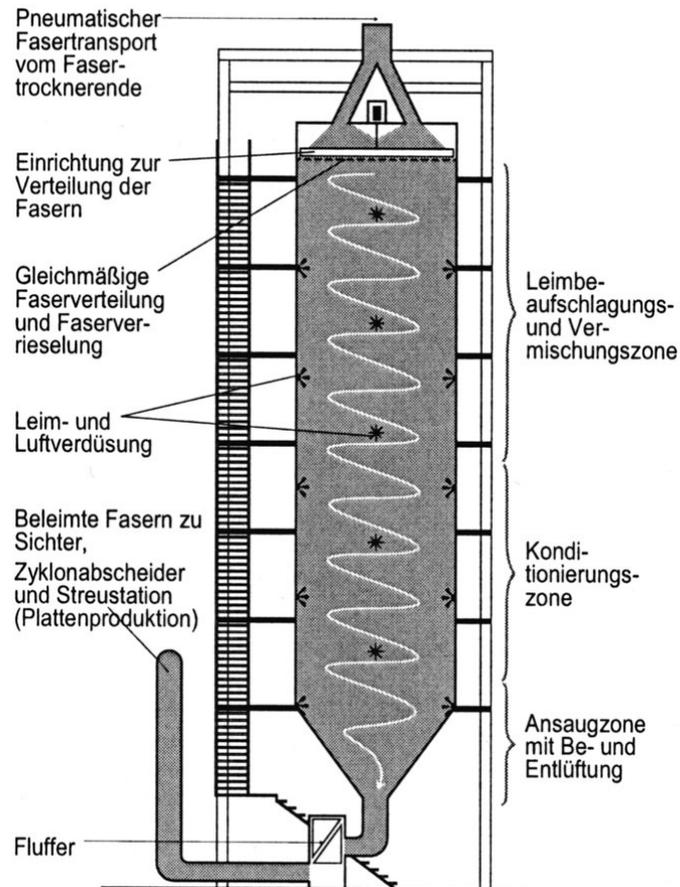


Abb. 32: Schema eines Sprüh-Mischturmes /Mechanickl 05/

### 3.8 Bindemittelverteilung

Die Verteilung des Bindemittels an der Faseroberfläche erfolgt in der Beleimungsmaschine durch Umwälz- und Sprühvorgänge. Das Fasermaterial wird im Arbeitsraum der Maschine aufgewirbelt und umgewälzt, gleichzeitig mit dem Bindemittel besprüht und gemischt. Das Bindemittel trifft auf die Oberfläche und haftet in Form von Tröpfchen an den Fasern. Die Art des Bindemittelauftrags an der Faseroberfläche wird betrachtet und statistisch als Bindemittelverteilung bezeichnet. Die Eigenschaften von Faserplatten wie z.B. Festigkeit stehen in direktem Zusammenhang mit der Qualität der Bindemittelverteilung.

Die Gleichmäßigkeit des Klebstoffauftrages auf der Spanoberfläche bei der Spanbeleimung ist insbesondere von Arbeitsweise und Einstellung der Beleimmaschine abhängig /Meinecke 62/.

Schon in /Klauditz 52/ ist die Bindemittelauftragsmenge als die Menge des Festharzes in g je  $m^2$  Spanoberfläche definiert. Dabei ist die gesamte Spanoberfläche in  $m^2$  pro 100g Holz als Summe der Gesamtoberflächen aller einzelnen Späne in der Holzmasse berechnet und für verschiedene Spandicken und Holzarten angegeben. Diese spezifische Spanoberfläche ist direkt abhängig von der Morphologie des Materials (Länge, Breite, Dicke, Schlankheitsgrad).

In /Wartenberg 87/ wurde bei Untersuchungen zur Applikation von Flüssigkeitströpfchen auf Strohoberflächen der Flächenbedeckungsgrad als Maß für die Verteilung der bedeckten Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche eingeführt. Bei dieser Applikation handelte es sich um Tröpfchen der Größe 200-500  $\mu m$ , welche 10-mal größer sind als bei Faserplattenproduktion.

In /Deppe 00/ ist die spektroskopische Methode dargestellt worden, mit der man die Bindemittelverteilung „Online“ messen kann. Es wird dabei das Ausgangsmaterial vom Beleimmischer aufgenommen und der Bindemittelanteil anhand des für das Bindemittel charakteristischen Spektrums ermittelt. Bei dieser Methode kann man nur den durchschnittlichen Anteil des Bindemittels bestimmen, nicht aber wie genau die Bindemitteltröpfchen verteilt sind.

#### 3.8.1 Modell der Bindemittelverteilung nach /Meinecke 62/

In /Meinecke 62/ wurde der Einfluss der Konstruktion und der Arbeitsweise von Beleimmaschinen nach dem Sprüh-Umwälz-Verfahren auf die Festigkeitseigenschaften von Holzspanplatten untersucht. Dabei hat er eine eigene Methode (mit Hilfe eines fotometrischen Verfahrens) eingeführt, um die Bindemittelverteilung zu bewerten. Die Bindemittelauftragsmenge  $B_F$  [g Festharz /  $m^2$  atro Spänen] ist gleich wie in /Klauditz 52/ berechnet durch den vorgegebenen Anteil der Bindemittel  $B_G$  [g Festharz / 0,1 kg atro Spänen] und die spezifische Oberfläche der Späne  $F$  [ $m^2$  / 0,1 kg atro Spänen]. Bei /Meinecke 62/ handelt es sich um Späne mit einer Länge von 15 bis 30 mm, Breite 4 bis 8 mm, und Dicke 0,2 bis 0,5 mm. Um die spezifische Oberfläche von Spänen zu errechnen, wurden Kantenflächen bei so dünnen Spänen vernachlässigt. Die Autoren haben mit der Einstellung verschiedener Arbeitsparameter (Zerteilung, Verteilung) dazu gestrebt, die gesamten Oberflächen von allen Spänen mit dünnem Leimfilm zu versehen. Die Dicke des Bindemittelfilms beeinflusst die Festigkeit der Fuge nur unwesentlich. Die Bindemittelauftragsmenge  $B_F$  auf den einzelnen Deckflächen schwankt im Allgemeinen um den rechnerischen Mittelwert, so dass sie statistisch verteilt ist. Diese statistische Verteilung der Bindemittelauftragsmenge wird als Bindemittelverteilung definiert, wobei die Streuung der Verteilung ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Bindemittelverteilung ist.

In /Meinecke 62/ wurde darauf hingewiesen, dass bei Spänen (im Gegensatz zur Vollholzverleimung) es zumindest in der Praxis mit herkömmlichen Maschinen nicht möglich ist, die gesamte Oberfläche der Späne mit einem zusammenhängenden Leimfilm zu versehen. Das Bindemittel wird punktförmig aufgetragen.

Obwohl in /Meinecke 62/ die Bindemittelverteilung auf dünne Späne modelliert ist, wurde darauf hingewiesen, dass wenn Material eine große spezifische Oberfläche hat, das Bindemittel fein zerteilt werden muss, um eine gute Ausnutzung des Bindemittels und damit eine hohe Plattenfestigkeit zu erreichen.

Um die Bindemittelverteilung bei /Meinecke 62/ experimentell zu erfassen, wurden bei der Beleimung der Späne weiße Kartonstreifen beigegeben, die in ihrer Größe den Spänen entsprachen, so dass die Streifen in der Laborbeleimungsmaschine gleichzeitig mit den Spänen, mit blau abgefärbtem Bindemittel beleimt wurden. Nach der Beleimung konnte an Hand der Farbintensität der Kartonstreifen auf fotometrischem Wege die Bindemittelauftragsmenge gemessen werden. Unter verschiedenen Arbeitsparameter der Beleimung (Befüllungsgrad, spezifische Oberfläche des Materials, Umwälzgeschwindigkeit, Beleimungszeit, usw.) sind von den Kartonstreifen verschiedene Bindemittelverteilungen gemessen und dargestellt worden, als charakteristische Funktion (Dichtefunktion)  $\varphi(\mathbf{B}_F)$  (0 bis 1 als Anzahl der Kartonstreifen) der Bindemittelauftragsmenge  $\mathbf{B}_F$  (0 bis 14 g/m<sup>2</sup>). Es wurde angenommen und später bewiesen, dass die Funktion dem poissonischen Verteilungsgesetz der seltenen Ereignisse (als Grenzübergang der Bernoullis Verteilung) entspricht. Die Verteilung (Dichtefunktion) ist folgender Maßen definiert:

$$\varphi(x) = \frac{\lambda^x \cdot e^{-\lambda}}{x!} \quad (1)$$

mit  $\lambda = n \cdot p$

wobei sind:

n – Anzahl der Schübe (Entnahmen) der Maschine

x – Anzahl der Besprühungen derselben Span

p – Wahrscheinlichkeit dass ein Span in einem Schub im Beleimmischer besprüht wird. Von einer große Menge Späne wird eine kleinere rein zufällig schubweise entnommen und besprüht.

Die Wahrscheinlichkeit **p** dass ein Span in einem Schub im Beleimmischer besprüht wird (Erscheinen eines Spanes in der Sprühzone), wurde durch das Verhältnis der Anzahl der Späne, die sich im Sprühbereich befinden, zur Gesamtanzahl definiert.

### 3. Stand der Forschung

Weiter sind im Model die Parameter der Verteilung ( $n$ ,  $p$  wodurch  $\lambda$ ) an verschiedene Arbeitsparameter der Beleimung angepasst und berechnet, als auch und für verschiedene Konstruktionen des Belemischers.

Der Parameter  $\lambda$  ist als ein Maß für die Güte der Beleimung angenommen, wobei erwünscht ist, dass  $\lambda$  möglichst groß wird.

Es wurden die Querkzugfestigkeiten von den mit verschiedenen  $\lambda$  hergestellten Platten gemessen, mit dem Ergebnis dass die Festigkeit schon ab  $\lambda=14$  nicht oder kaum mehr steigt, obwohl bei diesem Wert die Bindemittelauftragsmenge  $B_F$  noch merkliche Schwankungen um den Mittelwert hat (es ist nicht erforderlich jeden Span gerade optimal zu beleimen). Bei z.B.  $\lambda=1,8$  beträgt die Plattenfestigkeit nur 50% vom Maximum. Es wurde nachgewiesen, dass die Bindemittelverteilung die mechanischen Eigenschaften der Platten wesentlich beeinflusst, wobei die optimalen Parameter von Zerteilung  $\delta = 35 \mu\text{m}$  (siehe Abb. 28) und von Verteilung  $\lambda=14$  bestimmt wurden.

Bei der Modellierung der verschiedenen Beleimungsvorgänge in /Meinecke 62/, wurde angenommen, dass sich die Späne wie auf einem Förderband, als eine starre Schicht durch die Sprühzone bewegen (siehe Abb. 33).

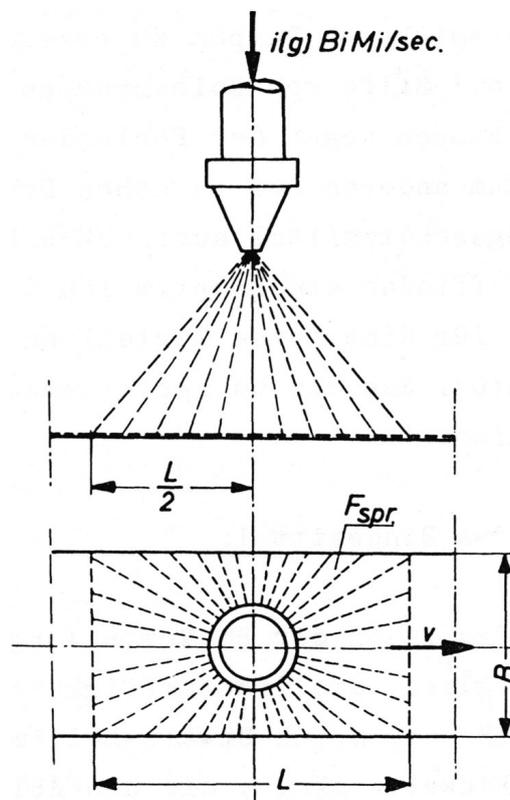


Abb. 33: Schematisierte und idealisierte Darstellung der Beleimung von Holzspänen bei einem Durchgang der Späne durch die Sprühzone /Meinecke 62/

### 3. Stand der Forschung

Es wurde aber schon da darauf hingewiesen (mit der Filmkamera aufgenommen) dass dies in Realität anders ist. Die Späne schieben sich übereinander, so dass ein Span bei einem Durchgang durch die Sprühzone nur auf einem Teil seiner Oberfläche beleimt wird oder er nur auf einem Teil der Länge der Sprühzone Bindemittel erhält. Im Modell dieser Arbeit wird auch diese Tatsache berücksichtigt mitgenommen und berechnet (siehe Kapitel 5.9).

Die Ergebnisse des nach /Meinecke 62/ eingeführten Modells sind in Abb. 34 dargestellt, und mit den Ergebnissen der Praxis verglichen, als ein Beispiel für gute Bindemittelverteilung und ein Beispiel für mangelhafte Bindemittelverteilung. Bei guter Bindemittelverteilung hat jedes Partikel die größte Wahrscheinlichkeit um 2-mal besprüht zu werden, bei mangelhafter Bindemittelverteilung noch nicht einmal 1-mal.

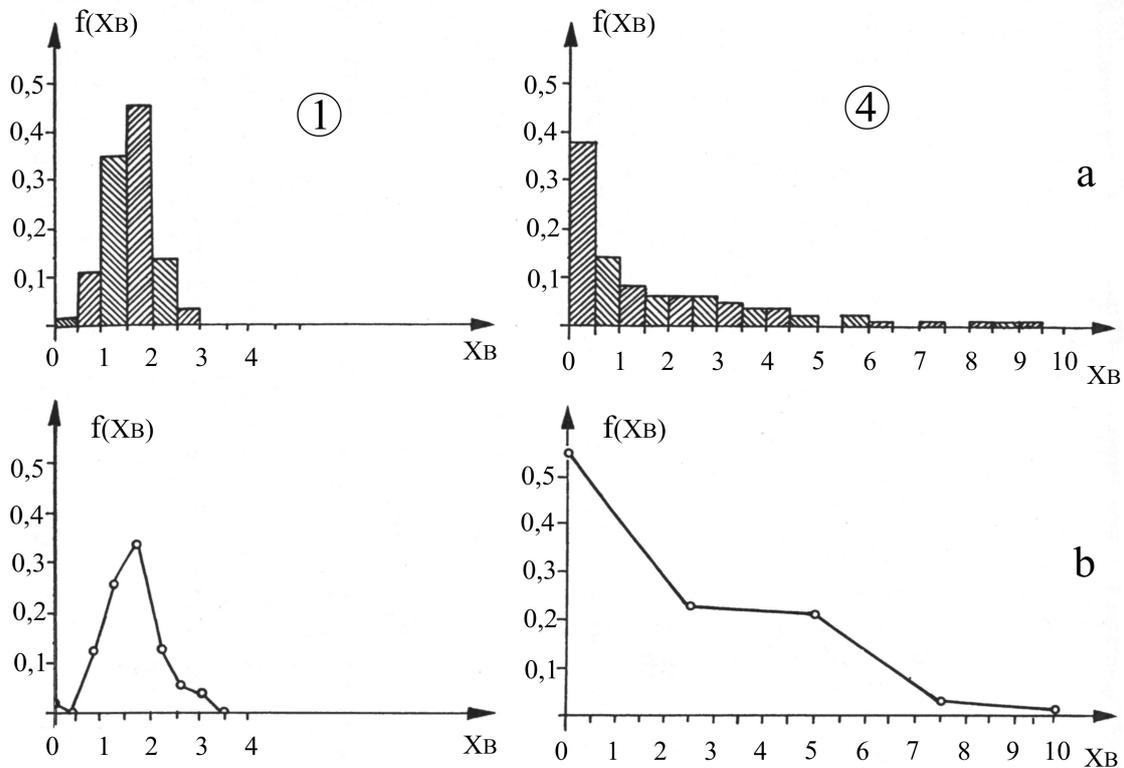


Abb. 34: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Bindemittelverteilung – a-gemessen, b-modelliert; 1 gute und 4 mangelhafte Bindemittelverteilung;  $X_B$ -Anzahl der Durchgänge der Partikel durch die Sprühzone,  $f(X_B)$ -Wahrscheinlichkeit /Meinecke 62/

Nach /Meinecke 62/ wird der Wirkungsgrad einer Beleimungsmaschine vor allem nach den Parametern Bindemittelzerteilungsgrad und Bindemittelverteilung geschätzt. Dabei gibt die eingeführte Größe  $\lambda$  eine gute Übersicht wie bei einer Beleimungsmaschine eine bessere Beleimung erzielt werden kann: durch Verringerung des eingesetzten Spangewichtes und Verlängerung der Beleimungszeit (wobei die Leistung und damit auch die Wirtschaftlichkeit der Maschine herabgesetzt wird) und durch die Vergrößerung der Geschwindigkeit der Späne und der Sprühfläche.

Die Verbesserung der Bindemittelverteilung durch eine höhere Umwälzgeschwindigkeit hätte nach /May 73/ zur Folge, dass die Späne sehr stark in den Bereich der Sprühkegel geschleudert werden. Damit würde die Zerteilung des Bindemittels behindert.

Die Optimierung der Arbeitsparameter eines Beileimungsvorganges nach den in /Meinecke 62/ durchgeführten Untersuchungen kann sich in der Wirtschaftlichkeit widerspiegeln in dem die Festigkeit der Platten um 50% erhöht wird, 20% des eingesetzten Bindemittels gespart werden kann und der Preis um 3 % vermindert wird.

#### 3.8.2 Bindemittelverteilung nach /Walther 06/

In /Walther 06/ sind mehrere vertiefte und verfeinerte Methoden zur Betrachtung der Bindemittelverteilung an der Faseroberfläche dargestellt, bei denen die physikalischen Erscheinungen im Nano- und Mikrobereich beobachtet werden können. Durch Jodmarkierung der Bindemittel ist es am besten gelungen die Bindemittelverteilung an der Faser mit dem Umweltrasterelektronmikroskopie (ESEM) sichtbar zu machen, wie in Abb. 35 dargestellt.

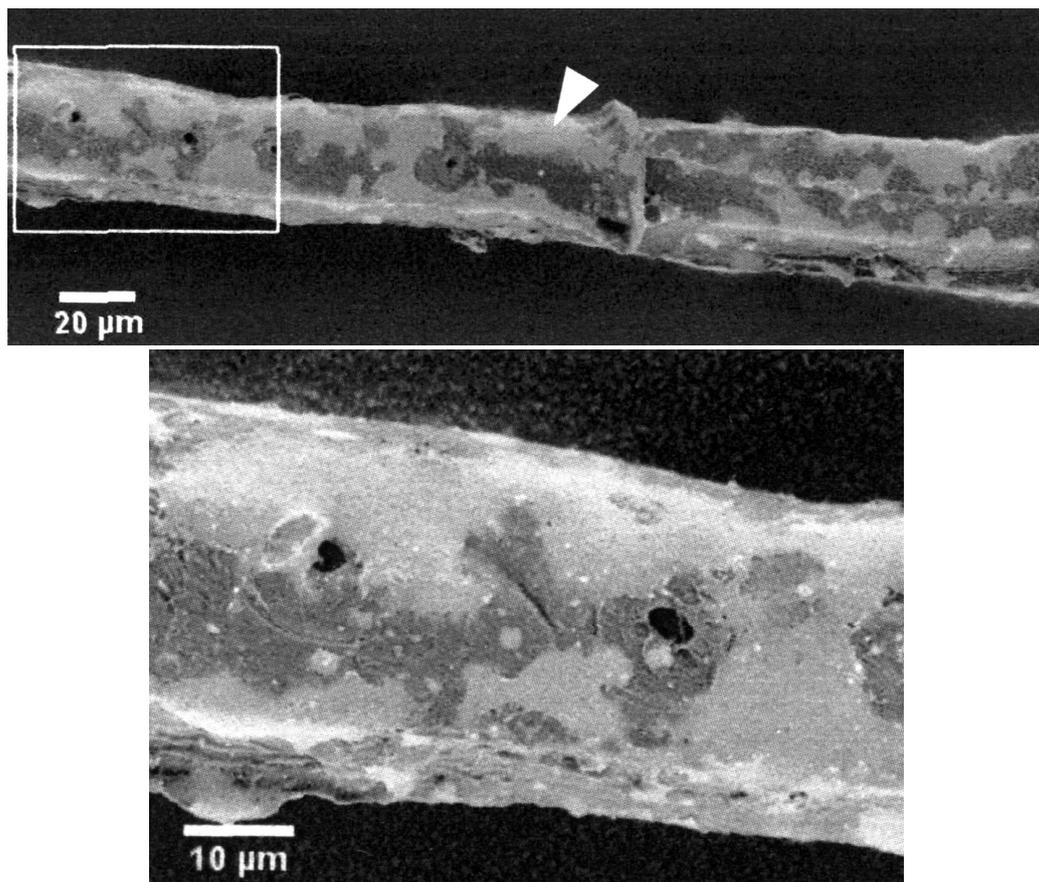


Abb. 35: ESEM Aufnahmen mit Detektierung der Rückstreuelektronen des mit Jod markierten Klebharzes. Oben: eine beileimte Holzfaser (1000x), Unten: Detail (4000x). Die hellen Bereiche auf der Faser (Pfeil) zeigen die Klebharzverteilung /Walther 06/

In /Walther 06/ wurden die Hintergründe für die Bindemittelverteilung jedoch nicht untersucht. Beispielsweise wie sie bewertet oder verbessert werden kann. Es wurden aber verallgemeinerte Aussagen getroffen, wie z.B. dass die Faseroberfläche während des Beleimungsvorgangs nur bis zu 50 % punktförmig mit Bindemittel bedeckt ist, was die Plattenfestigkeit negativ beeinflusst. Die Dicke des an den Fasern aufgetragenen Klebfilms liegt im Bereich von 50 bis 200 nm.

Im Vergleich dazu handelt es sich nach Firmenangaben /Binos 05/ bei der industriellen Anwendung des Spike-Roll Beleimungssystems um einen Klebfilm der Dicke von 1470 nm auf der gesamten Faserstromoberfläche (Fasermattenoberfläche).

## 3.9 Heißpressen

Beim Heißpressen wird geformter Faservlies (Matten) unter Hitze gepresst und dadurch die Faserplatten in ihre Endform gebracht. Bei diesem Vorgang wird vor allem das Bindemittel durch Polymerisation erhärtet, die Platten zu ihren vorgegebenen Dicken gepresst und ein Teil der Feuchtigkeit aus dem Material herausgedampft. Je nach Art des Bindemittels, der Plattenart und dem Feuchtigkeitsgehalt hat der Pressvorgang einen dementsprechenden Ablauf. Viele Variationen der Einstellungsparameter des Pressprozesses ergeben die Möglichkeiten, um die gewünschten und optimalen Eigenschaften der Platten zu erzielen. Deswegen sind einige Aspekte und Erscheinungen bei diesem Vorgang zu erwähnen und zu beachten. Ein Beispiel des Pressvorganges ist in Abb. 36 dargestellt. Dort werden alle charakteristischen Phasen und Parameter angedeutet. Was an diesem Beispiel von /Thole 97/ besonders interessant ist, ist dass es für stärkegebundene Platten entwickelt wurde /Lörcks 94/.

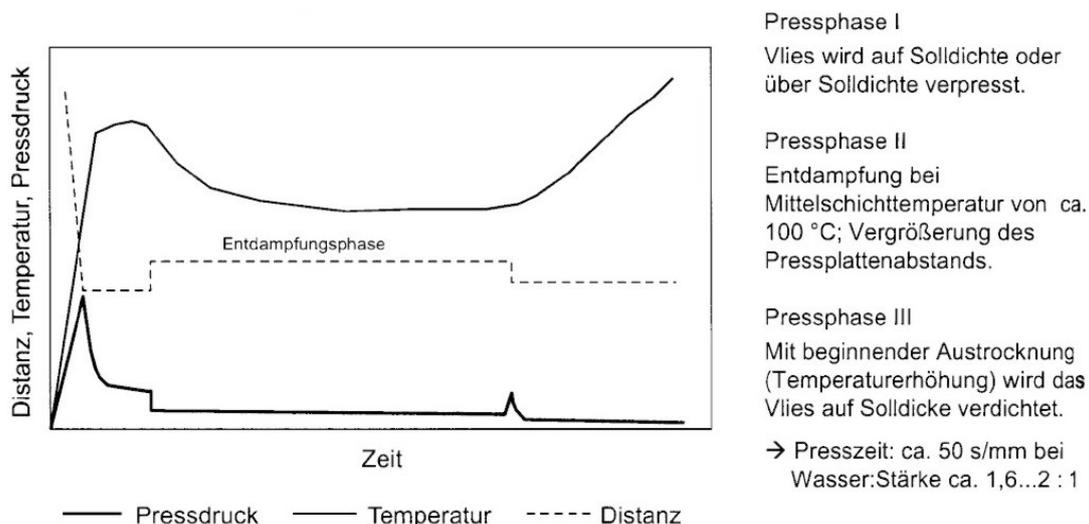


Abb. 36: Heißpressung von mit nativer Stärke gebundenen Spanplatten mit hohen Spanfeuchten /Thole 97, Lörcks 94/

### 3. Stand der Forschung

---

In der ersten Pressphase wird die Vliesmatte auf Soll- oder Überdichte gepresst und erhitzt, damit das Material erwärmt wird, überflüssige Feuchtigkeit verdampft und eine Plattenstruktur mit teilweise erhärtetem Bindemittel bereits vorgeformt wird.

In der zweiten Pressphase wird die Presse leicht geöffnet, damit der Überfluss von Wasserdampf entweichen kann. Dabei wird die schon in der ersten Pressphase vorgeformte Plattenstruktur etwas zerstört, da sich der Wasserdampf Wege durchbricht. Hätte die zweite Phase bei Platten mit höherer Dichte nicht stattgefunden, würde der Wasserdampf in der Platte festgehalten und nach der Pressung die Endstruktur der Platte durch von Dampfblasen verursachte Risse deformiert. Bei Platten mit niedrigen Dichten muss die zweite Phase nicht stattfinden, da die Struktur so porös ist, dass der Wasserdampf immer seinen Weg nach außen finden kann.

In der dritten Pressphase wird die Platte zu ihrer Enddicke (Enddichte) gepresst. Dabei erhärtet das Bindemittel vollkommen und die Plattenstruktur wird endgültig geformt.

Durch den gesamten Pressvorgang werden die Leimfugen geändert. Das Bindemittel einer Leimfuge kann zwischen den Partikeln fließen, womit der Bedeckungsgrad vergrößert wird und unter Hitze teilweise erstarrt. Nach /Meinecke 62/ werden bei der üblichen Verleimung von Holzspänen zu Holzspanplatten die Spanmatten verdichtet und dabei die Holzspäne in den Überlappungszonen gegeneinander gepresst. Durch diesen Vorgang werden die viskoplastischen Bindemitteltröpfchen bzw. -Zonen flächig verbreitet und somit der Anteil der mit Bindemittel versehenen Oberfläche der Späne vergrößert. Dabei wurde durch die Laborversuche bewiesen, dass bei feiner Tröpfchengrößenverteilung  $\delta=8 \mu\text{m}$ , und den Pressbedingungen von  $0,8 \text{ N/mm}^2$  und  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  Presstemperatur die beleimte Fläche zwischen den Partikeln fast lückenlos bedeckt ist (Flächenbedeckung nach dem Pressen  $90 \%$ , zuvor  $60 \%$ ). Schon bei etwas größeren Bindemitteltröpfchengrößen von  $\delta=35 \mu\text{m}$  wurde die Bedeckung der Späne verschlechtert (Flächenbedeckung nach dem Pressen  $55 \%$ , zuvor  $35 \%$ ). Damit ist deutlich bewiesen, dass beim Heißpressen der dort angewendeten Plattendichten von  $500$  bis  $700 \text{ kg/m}^3$  (Pressdruck  $0,8$  bis  $2,5 \text{ N/mm}^2$ ) die Überdeckung der Partikel mit Bindemittel um etwa  $30 \%$  durch den Pressvorgang vergrößert wird.

Bei niedrigeren Dichten tritt dieser Effekt des Bindemittelfließens und -Nachverteilung nicht ein. Nach /Walther 06/ ist durch vertiefte, moderne Untersuchungen bewiesen worden, dass unter einer Plattendichte von  $700 \text{ kg/m}^3$  die Bindemittelfugen nicht optimal genutzt werden – sie sind zwar auf Fasern gebracht worden, füllen aber die Hohlräume in der Platte ohne Kontakt zu weiteren Fasern. Die Bindemittelfugen zwischen zusammen geklebten Fasern in der Plattenstruktur betragen bei den Platten der Dichten  $300 \text{ kg/m}^3$  etwa  $186 \text{ nm}$ , bei den

### 3. Stand der Forschung

Platten der Dichten  $800 \text{ kg/m}^3$  werden die Leimfugen auf etwa  $50 \text{ }\mu\text{m}$  zusammengequetscht und damit weiter zwischen den Fasern verteilt.

Nach /Meinecke 62/ wird schon beim Beleimen ein Teil des Wassers dem Bindemittel von den Pflanzenzellen entzogen, was das Bindemittel viskoser macht und die Klebewirkung vermindert. Daraus folgt, dass das Pressen sofort und ohne Zwischenlagerung nach dem Beleimen erfolgen sollte.

Beim Pressvorgang gibt es noch die zusätzliche Erscheinung, dass durch die Hitze die Naturfasern teilweise beschädigt bzw. abgebaut und verbrannt werden.

In /Bismarck 05/ ist die Zugfestigkeit der Naturfasern (Flachs) in Abhängigkeit von der Dauertemperatur gegeben (siehe Abb. 37). Die angegebenen Temperaturen entsprechen den Presstemperaturen bei der Faserplattenherstellung. Folglich spielen die Presszeiten eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung der Plattenfestigkeit. Das betrifft insbesondere Faserplatten mit natürlichem Bindemittel, die wegen höherer Feuchtigkeiten etwas länger gepresst werden.

Nach /Vorreiter 58/ entlässt das Holz den letzten Rest an chemisch gebundenem Wasser aus seiner Bindung erst bei Temperaturen um  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ . Von da ab beginnt der dauernde thermische Zerfall des Holzes. Trotzdem ist es nach /Deppe 00/ möglich z.B. die Formpressteile aus Spänen auch durch Temperaturen von bis  $290 \text{ }^\circ\text{C}$  und Drücke von  $300 \text{ bar}$  zu pressen. Dabei entstehen besonders gute Bedingungen um holzeigene Reaktionsstoffe frei zu setzen und damit Bindungen zwischen einzelnen Partikeln zu erzielen.

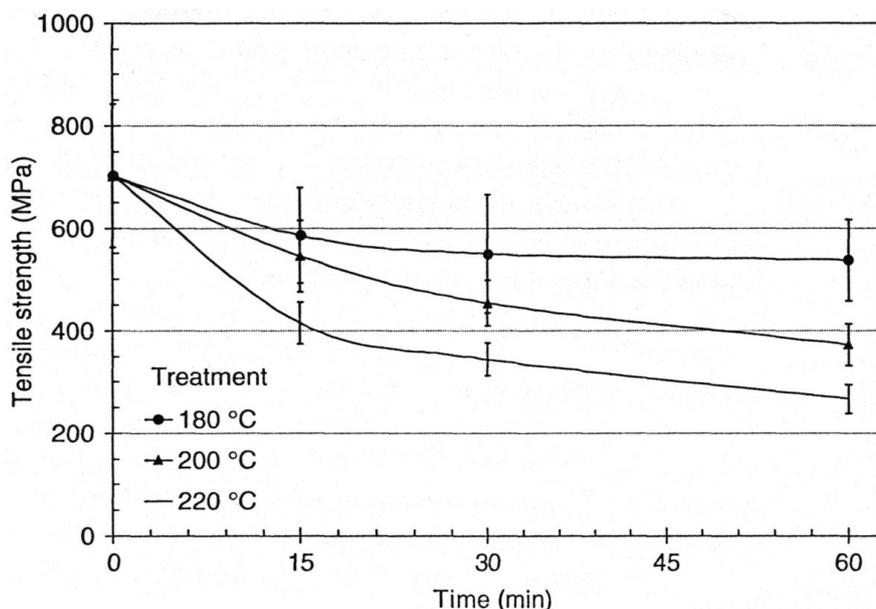


Abb. 37: Thermischer Einfluss zu mechanischen Eigenschaften der Flachsfasern  
/Bismarck 05/

### 3. Stand der Forschung

---

Noch eine weitere Erscheinung beim Heißpressen die besonders die Anwendung natürlicher Bindemittel betrifft ist der Entzug der Restfeuchte. Da diese Bindemittel meistens als minderprozentige wässrige Lösungen angewendet werden, bedeutet das, dass die Vliesmatten vor dem Heißpressen einen hohen Feuchtigkeitswert aufweisen.

Beim Heißpressen von mit synthetischen Bindemitteln gebundenen Platten, sind die üblichen Presszeiten von 4 bis 10 s pro mm Plattendicke (evt. 25 mm/s) /Lampert 67/. In Praxisfällen von Vliesmatten mit hohen Feuchtigkeitswerten können die Presszeiten bis auf 25 min ausgedehnt werden, wobei die Herstellung noch immer wirtschaftlich folgen kann /Eisner 65/. Bei /Müller 97/ werden bei stärkegebundenen Platten nach dem Trockenverfahren Presszeiten von 10 bis 35 min. angewendet. Der Autor nennt dabei für industriell hergestellte Platten nach dem Nassverfahren Presszeiten von ca. 80 min.

Nach /Müller 97/ sollte bei der Verwendung der meisten natürlichen Bindemittel (insbesondere Stärke) der Feuchteentzug und damit die Verklebung innerhalb des gewünschten Endformungszustandes erfolgen. Eine zu starke Trocknung vor der endgültigen Formgebung führt zur Eliminierung der Klebewirksamkeit der Stärke, diese kann dann maximal als Fasercoating oder Füllstoff betrachtet werden. Demzufolge ist das Nassverfahren hinsichtlich der Bildung eines homogenen, in sich verfilzten Faservlieses und der Nutzung stoffeigener lignocelluloser Bindungskräfte unbestritten unübertroffen. Untersuchungen zur Relation zwischen Feuchtereduktion und Klebkraftverlust sollten Zielstellung weiterer Forschungen sein.

Bei /Kehr 98/ handelte es sich um proteinhaltige Bindemittel als ca. 20 % Wasserlösung für Spanplatten, die durch Sprühbeimung auf das Material verteilt wurden. Dabei lag die Feuchtigkeit des Materials vor dem Pressen bei ca. 20 %, weswegen für die Plattendicken von 17,5 mm die Presszeiten auf 6 bis 15 min verlängert wurden.

Bei einigen neu entwickelten Pressvorgängen können die Presszeiten von feuchtem Material mit genau abgestimmten Entlüftungsphasen auf 50 s pro mm Plattendicke gekürzt werden / Lörcks 94, Thole 97/.

Ähnliche Untersuchungen wurden in /Klabunde 98/ gemacht mit der Feststellung, dass durch die Modifizierung des Pressprogramms stärkegebundene Faserplatten hergestellt werden können, deren mechanische Eigenschaften dem Niveau von PF Harz gebundenen Platten entsprechen. Zur Verarbeitung von reiner Stärke als Bindemittel für Faserplatten bzw. – Formteilen ist das konventionelle Pressprogramm ungeeignet. Die notwendige Presszeit kann durch Einführung von Überverdichtungs- und Lüftungsphasen deutlich reduziert werden.

## 3.10 Schlussfolgerungen

Zur Partikel- bzw. Faserplattenherstellung wurden viele Verfahren entwickelt. Die Bindemittelapplikation ist als der zentrale Schritt des Prozesses anerkannt. Die Bindemittelzugabe ist technologisch zu verbessern und zu vermindern. Der Grund dafür ist die damit verbundene Senkung der Produktionskosten. Der Prozess der Bindemittelapplikation ist durch eine verbesserte Bindemittelzerteilung und -verteilung auf die Fasern zu optimieren. Insofern ist eine grundlegende Entwicklung eines dafür geeigneten mathematisch-physikalischen Modell als eine wissenschaftliche Erläuterung dieses Prozesses nicht erfolgt.

Die Senkung der Bindemittelmenge stellt auch eine ökologische Verbesserung der Plattenherstellung dar. Zu diesem Zweck ist die Verwendung von natürlichen Bindemitteln der von synthetischen vorzuziehen. Die natürlichen Bindemittel finden zur Zeit aber nur begrenzt Einsatz, da sie nicht wasserbeständig sind.

In der heutigen Zeit der allgemeinen Rohstoffknappheit besteht die Tendenz die herkömmlichen Holzfasern durch billigere und nebenbei auch ökologischere Pflanzenfasern zu ersetzen. Die Qualität der Faserplatten darf dabei aber nicht negativ beeinflusst werden. Das heißt, diese alternativen Fasern müssen entsprechende Eigenschaften und insbesondere die erforderliche Morphologie besitzen. Mit dem Erreichen der guten Parameter für die Morphologie wie die Faserlänge, Faserdicke und Schlankheitsgrad, kann die Festigkeit der Faserplatten erhöht und/oder die Plattendichte verringert werden.

Durch die Optimierung der Bindemittelapplikation und der Fasermorphologie, können die Produktionskosten gesenkt werden. Dabei können Faserplatten höherer Qualität bei Einsparung von Rohstoffen und Energie hergestellt werden.

## 4. Präzisierte Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus wissenschaftlicher Sicht die folgenden konkreten Aufgaben gestellt:

1. Das neue Verfahren ist auf Machbarkeit zu prüfen. Die Annahme ist, dass die Anlage effektiv arbeitet und richtig konzipiert wurde. Das verwendete Material ist neuartig. Die Bearbeitungslinie ist dem herkömmlichen Verfahren der Holzindustrie ähnlich. Es sind alle Prozessschritte für das neue Material anzupassen und zu optimieren. In einzelnen Fällen ist es notwendig, die theoretischen Grundlagen zu verschiedenen Prozessstufen, vorrangig bei der Bindemittelapplikation und der Zerfaserung zu entwickeln, um gezielt optimale Arbeitspunkte zu finden.
2. Bei der Herstellung der fasergebundenen Werkstoffe ist die Bindemittelmenge zu minimieren. Es ist Annahme, dass durch Optimierung der Bindemittelapplikation geringere Bindemittelmengen erreicht werden können. Bei Konkurrenzprodukten der Holzindustrie ist es üblich ca. 10% synthetische Bindemittel anzuwenden. Durch Verringern dieser Menge kann der Preis des Endproduktes gesenkt werden. Gleichzeitig können ökologische und gesundheitliche Probleme die mit der Herstellung und Anwendung verbunden sind, behoben werden. Die Festigkeit der Fasern aus Faserpflanzen ist jedoch höher als die von Holzfasern. Diese Tatsache wird betrachtet. Zu dem Zweck der Prozessoptimierung im Sinne dieser Aufgaben ist eine Versuchseinrichtung für die Bindemittelapplikation zu konstruieren und zu bauen und ein spezielles mathematisch-physikalisches Modell für die Beschreibung der Bindemittelapplikation komplett neu zu entwickeln.
3. Bei der Herstellung der fasergebundenen Werkstoffe ist der Einsatz organisch-nativer Bindemittel ökonomisch zu ermöglichen. Probleme dabei sind die bisher hohen Wassermengen und das Versprühen größerer Mengen hochviskoser Flüssigkeiten. Bei bisherigen Arbeiten zu diesem Thema wurde gezeigt, dass beim Einsatz nativer Bindemittel wie z.B. Stärke es möglich ist, Platten mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften zu denen mit synthetischen Bindemitteln herzustellen. Es ist bisher jedoch noch nicht gelungen solche Platten wirtschaftlich zu etablieren und die erforderliche Feuchtigkeitsbeständigkeit zu erreichen.

## 5. Material und Methoden

### 5.1 Rohstoffe für die Fasergewinnung, Fasermorphologie

Das verwendete Material für die Faserstoffgewinnung war Hanfsilage aus der ganzen Pflanze (feuchtkonserviert in Folienschläuchen ohne Zusätze /ATB 00/) gemischt mit Holzhackschnitzeln (Kiefernholz) im Massenverhältnis 60:40 atro (Trockensubstanz). Diese Mischung hat sich von der Plattenfestigkeit her gut bewährt, und auch aus der Sicht der optimalen Eingangsfeuchtigkeit im Prozess (ca. 50 % absoluter Feuchte). Diese Fasern werden im Weiteren Hanfsilagefasern genannt (siehe Abb. 41). Reine Hanfsilage ist so feucht, dass das Material die Scheibenmühle und die Transportluftleitungen bis zum Trockner verklebt und verstopft. Die reinen Holzhackschnitzel sind so trocken, dass sie durch den Partikelauflösung mehr zu Staub als zu Fasern werden.

Zum Vergleich wurden reine Holzfasern als Rohstoff für Faserplatten hergestellt. Diese Fasern wurden aus Kiefernholzhackschnitzeln gewonnen, die vor der Zerfaserung auf 50 % absoluter Feuchte angefeuchtet wurden.

Um die Morphologie der im ATB hergestellten Hanfsilage- und Holzfasern mit den industriellen Holzfasern zu vergleichen, wurden hier die durch Dampfexplosion (an der TU Dresden) in einem „Refiner“ hergestellten Kiefernfasern vermessen. Dadurch wird bewiesen, dass die im ATB hergestellten Holzfasern keine deutliche Unterschiede zu den industriellen Holzfasern aufweisen. Ein Extruder und eine Scheibenmühle reichen voll aus, um einen Holzfaserstoff mit guten Eigenschaften herzustellen.

Die optimalen Arbeitsparameter der Komponenten für den Partikelauflösung wurden durch die Diplomarbeit /Grewatsch 07/ ermittelt. Unter Einhaltung dieser Parameter wurde der Faserstoff hergestellt, um die optimale Morphologie des Materials zu erreichen.

Die Faserlängen und -Dicken (und damit der Schlankheitsgrad) wurden mit dem rechnerischen Bildanalyse-System „Fibreshape“ der Firma Ist AG, Schweiz gemessen /Schmid 01/. Für jeden Faserstoff wurden zuerst erstmal 7 Bilder gescannt (8-bit Graustufen, Auflösung 600 dpi, Bildgröße 15,5 x 27 cm, durchsichtig), die mehrere Tausend Partikel umfassen. Danach wurden die Bilder mit dem Programm analysiert und für jedes Partikel die Dicke, Länge, Volumen, Schlankheitsgrad und verschiedenste geometrische Größen bestimmt, als auch Verteilung und Mittelwerte.

Die Verteilungen geometrischer Parameter unterschiedlicher Faserstoffe sind in Abb. 38, Abb. 39 und Abb. 40 gezeigt. Die Verteilungen sind immer als volumengewichtete Summenhäufigkeiten dargestellt. Bei der Länge wurde die Stichprobe auf Klassen von je 100  $\mu\text{m}$  geteilt, für die Dicke auf 10  $\mu\text{m}$  und für den Schlankheitsgrad 0,1. In Tabelle 4 sind die Median- und Mittelwerte für die abgebildeten Verteilungen aufgelistet. Die errechneten Medianwerte des Schlankheitsgrades der durch Dampfexplosion zerfaserten Holzfasern und der aus ATB-Herstellung unterscheiden sich deutlich. Die alleinige Betrachtung dieser statistischen Kennziffer täuscht allerdings. Stellt man die Verläufe der Faserlängenverteilungen grafisch dar (siehe Abb. 40), ist erkennbar, dass sie sehr wenig von einander abweichen. Unmittelbar bei dem 50 % Wert (Medianwert) überlagern sich sogar die Kurven der beiden Holzfasertypen, was den geringen Unterschied veranschaulicht.

Tabelle 4: *Volumengewichtete Median- und Mittelwerte morphologischer Parameter für unterschiedliche Faserstoffe*

Morphologischer Parameter		Hanfsilagefaser im ATB hergestellt	Kiefernholz im ATB zerfasert	Kiefernholz durch Dampfexplosion zerfasert
Medianwert	Länge [ $\mu\text{m}$ ]	940	3556	3971
	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	389	819	853
	Schlankheitsgrad [-]	2,01	2,88	6,28
Mittelwert	Länge [ $\mu\text{m}$ ]	1293	4730	4703
	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	532	685	774
	Schlankheitsgrad [-]	3,12	7,58	8,27

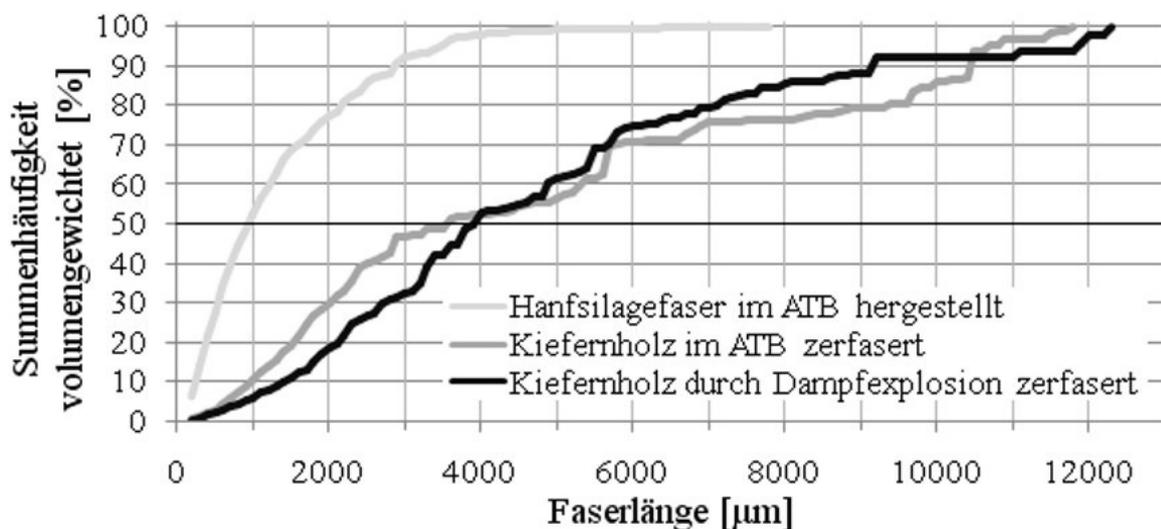


Abb. 38: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung der Faserlängen*

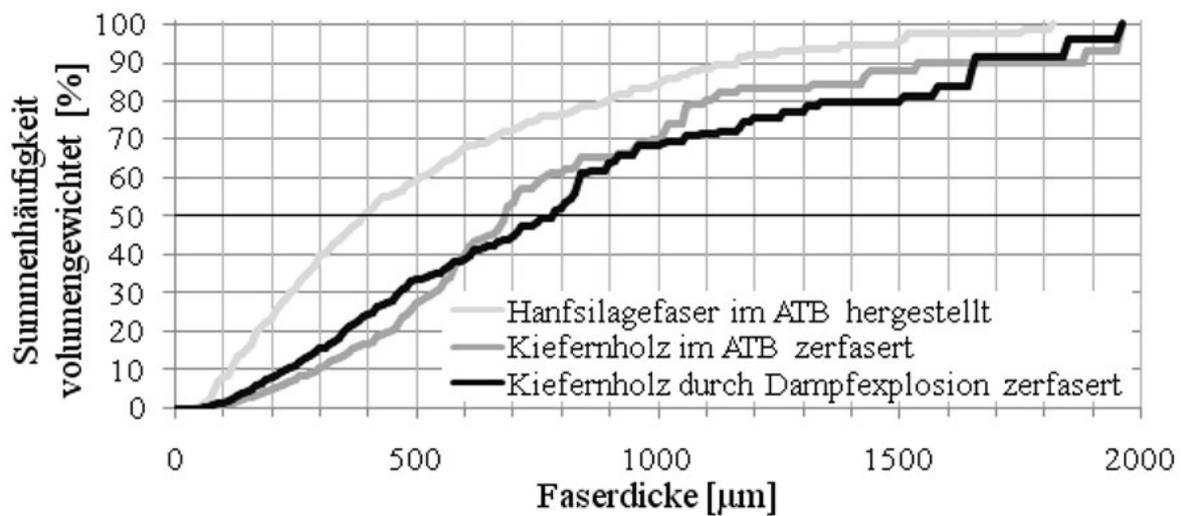


Abb. 39: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung der Faserdicken*

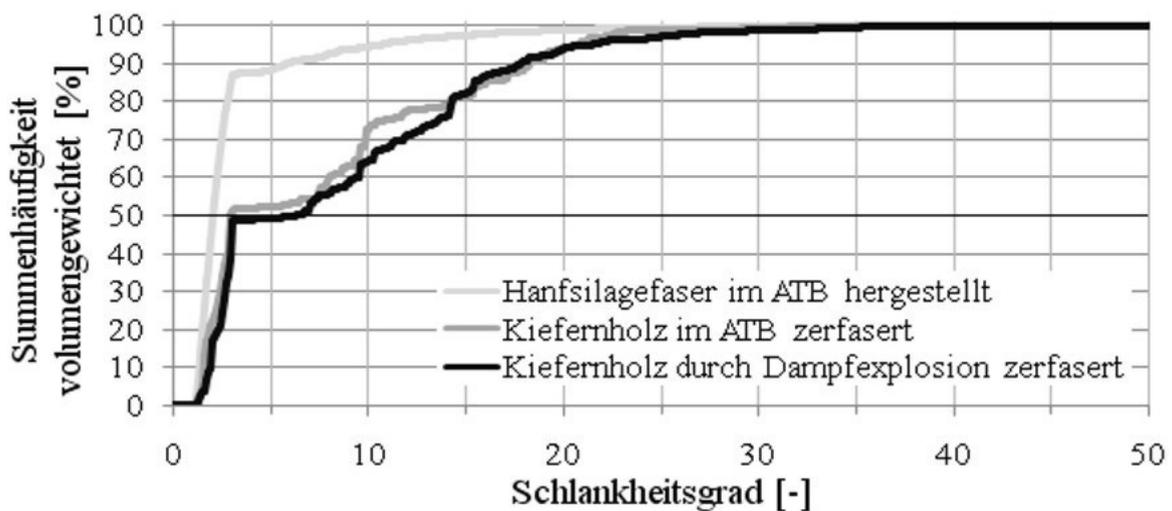


Abb. 40: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung des Schlankheitsgrades*

Die Zugehörigkeit der morphologischen Parameter dieser drei Faserstoffe zu den unterschiedlichen theoretischen Verteilungen wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov Test geprüft. Die Ergebnisse der statistischen Tests für die Faserlängen sind in der Tabelle 5 und die für die Faserdicken in der Tabelle 6 angegeben. Das höhere Signifikanzniveau weist auf eine größere Wahrscheinlichkeit hin, dass die empirische Verteilung an die theoretische angepasst werden kann. Die Verteilungen für die Schlankheitsgrade aller drei Faserstoffe konnten durch den Anpassungstest keiner bekannten theoretischen Verteilung zugeordnet werden. Sie scheinen am ehesten der exponentiellen oder Cauchy Verteilung ähnlich, jedoch befinden sich die Signifikanzniveaus dabei unter 0,01.

Tabelle 5: *Signifikanzniveaus für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Faserlängen nach dem Kolmogorov-Smirnov Test*

Theoretische Verteilung	Hanfsilagefaser im ATB hergestellt	Kiefernholz im ATB zerfasert	Kiefernholz durch Dampfexplosion zerfasert
Log-Normalverteilung	über 0,2	0,1	über 0,2
Normalverteilung	0,02	unter 0,01	0,02
Stetige Gleichverteilung	unter 0,01	0,02	0,02

Tabelle 6: *Signifikanzniveaus für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Faserdicken nach dem Kolmogorov-Smirnov Test*

Theoretische Verteilung	Hanfsilagefaser im ATB hergestellt	Kiefernholz im ATB zerfasert	Kiefernholz durch Dampfexplosion zerfasert
Log-Normalverteilung	über 0,2	über 0,2	0,05
Normalverteilung	unter 0,01	unter 0,01	unter 0,01
Stetige Gleichverteilung	unter 0,01	unter 0,01	unter 0,01

## 5.2 Erzeugung unterschiedlicher Fasermorphologien

Um Material unterschiedlicher Größen zu erhalten, wurden die Hanfsilage- und Holzfasern auf verschiedene Fraktionen gesiebt (Plansiebmaschine mit 0,5 mm, 1 mm und 2 mm Maschen, 2 min. Rüttelzeit). In Tabelle 7 sind die volumengewichteten Medianwerte morphologischer Parameter der gesiebten Fraktionen dieser zwei Faserstoffe angegeben.

Tabelle 7: *Volumengewichtete Medianwerte morphologischer Parameter gesiebter Hanfsilage- und Holzfasern*

Material		Länge [ $\mu\text{m}$ ]	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	Schlankheitsgrad
Hanfsilagefaser im ATB hergestellt	Nicht gesiebt	940	389	2,01
	Über 2 mm Siebmasche	3156	1432	2,13
	Über 1 mm Siebmasche	2353	970	2,35
	Über 0,5 mm Siebmasche	1203	548	2,00
	Unter 0,5 mm Siebmasche	483	240	1,84
Holzfasern im ATB zerfasert	Nicht gesiebt	3556	819	2,88
	Über 2 mm Siebmasche	4908	706	3,25
	Über 1 mm Siebmasche	2869	787	2,69
	Über 0,5 mm Siebmasche	1506	601	2,15
	Unter 0,5 mm Siebmasche	680	296	2,00

### 5.3 Bindemittelauswahl

Das synthetische Bindemittel, das hier verwendet wurde, ist 65 % wässrige Lösung des Phenolformaldehydharzes (PF). Damit konnten die hergestellten Platten aus Hanfsilagefasern mit herkömmlichen Platten aus Holzfasern sowie auch mit natürlichen Bindemitteln gebundene Platten aus Hanfsilagefasern verglichen werden.

Bei der Auswahl der natürlichen Bindemittel wurde beachtet, dass die Bindemittel zugänglich und kostengünstig sind, oder ob Abfälle mit Klebeeigenschaften die sonst entsorgt werden müssten, hier von Wert sein können.

Die natürlichen Bindemittel, die hier verwendet wurden, sind: kaltlösliche Weizenstärke, Rapspresskuchen als Abfall der Rapsölherstellung, ein Zwischenprodukt aus der Milchsäureherstellung (wässrige Lösung von 40 g/l Milchsäure, 30 g/l Glucose, 8 g/l Disacharose und 10 g/l verschiedenen organischen Rückständen) und fermentierte (verzuckerte) Roggenkörner (gemahlene Reste als Abfall aus Glukoseherstellung in Form einer teigähnlichen Masse mit 32 % Trockensubstanzgehalt). Diese oben genannten Bindemittel sowie zur Beileimung aufbereitete Hanfsilagefasern sind in Abb. 41 dargestellt.

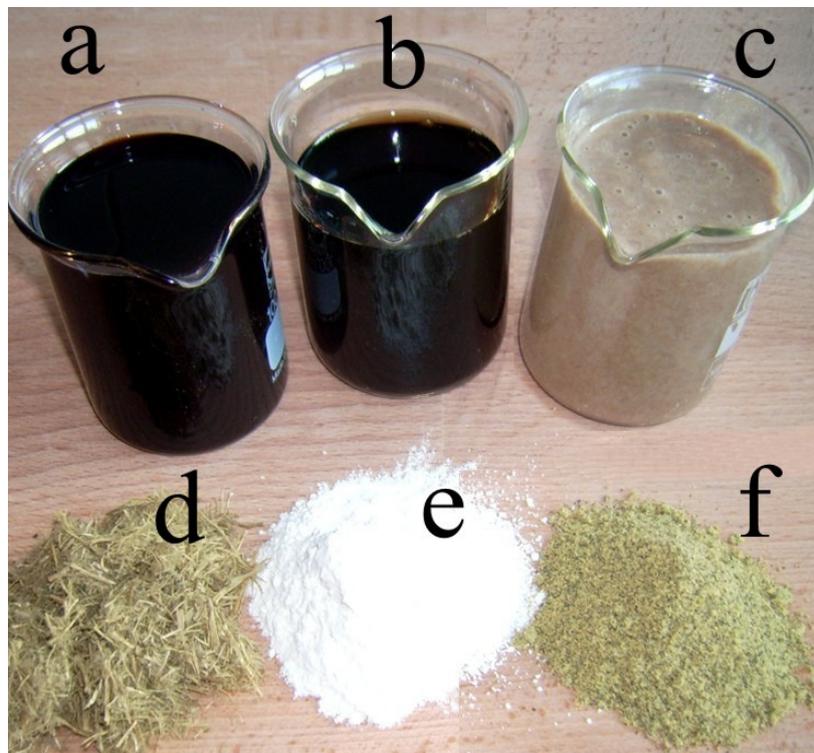


Abb. 41: Die verwendeten Materialien: **a)** Phenolformaldehydharz, **b)** Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung, **c)** fermentierte Roggenkörnerreste, **d)** Hanfsilagefasern, **e)** Stärke, **f)** Rapspresskuchen

Die Weizenstärke und der Rapspresskuchen wurden in pulveriger Form mit dem Material gemischt und so als Bindemittel benutzt. Alle anderen Bindemittel wurden als wässrige Lösungen auf das Material gesprüht und gemischt.

Zum Vergleich wurden auch Platten ohne Bindemittel hergestellt. Bei diesem im ATB entwickelten Verfahren wird das Fasermaterial feucht aufbereitet und verarbeitet. Der Saft dieses Materials enthält unterschiedliche Substanzen wie z.B. Buttersäure, usw. /Pecenka 07b/. In solchem Material sind auch verschiedene chemisch nicht definierte Lignine und schleimige klebrige Substanzen enthalten, deren genaue Zusammensetzung nicht leicht zu definieren ist.

### 5.4 Versuchsaufbau der Bindemittelapplikation

In dieser Arbeit wird die Bindemittelapplikation als Schwerpunkt betrachtet. Diese Prozessstufe wird am Belemischer durchgeführt (siehe Abb. 42). Es ist eine Versuchseinrichtung in der das Material mit dem Bindemittel in Flüssigform durch Zweistoffdüsen besprüht und gemischt wird. Das Ziel ist dabei eine gute Bedeckung des fasrigen Materials mit dem Bindemittel, d.h. eine gute Bindemittelverteilung zu erreichen. Die Maschine wurde so konstruiert und ausgeführt, dass viele Arbeitsparameter variiert werden können. Es sind dies: Mischwellendrehzahl und –Drehrichtungen, Mischwerkzeuge, Befüllungsgrad, Düsengeometrie, Düsenanordnung, Zerstäubungsluftdurchsatz und Bindemittelmassenstrom.



Abb. 42: Belemischer, Pilotanlage des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Seitenansicht (links), Mischraum mit dem Faserstoff befüllt (rechts)

In /Deppe 00/ wurde darauf hingewiesen, dass eine bessere Bindemittelverteilung sich erreichen lässt, wenn man nicht den Leim in den Spänering gibt, wie bei dem Ringmischer

(siehe Kapitel 3.7.2), sondern in eine locker verwirbelte Spänemischung. Auf diese Weise wird das Material bei der in dieser Arbeit dargestellten Konstruktion nicht eng an der Düse vorbeigeführt sondern im Mischraum aufgewirbelt. So erreicht der Bindemittelstrahl deutlich mehr Partikel, die dann gleichmäßiger und nicht zu stark mit dem Bindemittel besprüht werden.

Nach der Einteilung der Belemischer /Deppe 00/ (siehe Abb. 31), gehört von der eingesetzten kinetischen Energie her der Belemischer dieser Arbeit gerade an die Grenze zwischen Wurf- und Ringmischer. Es ist in /Deppe 00/ zu dieser eine ähnliche Konstruktion mit zwei Wellen dargestellt, wobei hier ein Vorteil ist, dass die Wellen gegenseitig in ihre Bereiche aufschlagen und eindringen, womit die Verwirbelung und Mischung vom Material verbessert wurde, und die Verklumpung des Materials während des Mischprozesses bei dieser Konstruktion vermieden wurde.

In /Müller 97/ sind beim Belemischer nach Sprüh-Umwälz-Verfahren Schwierigkeiten erwähnt, wenn die verkleisterte Stärke auf das Material gesprüht wurde (Einsatz von viel Wasser). Das Verfahren war in diesem Fall technologisch dadurch limitiert, dass ab einem bestimmten Feuchteintrag der Faserstoff zur Verklumpung neigt, dementsprechend eine homogene Vliesbildung nicht mehr möglich war. In /Schubert 03/ ist theoretisch begründet wie eine Flocke durch Kapillarkräfte in Flüssigkeitsbrücken bei benetzten Partikeln gebildet und verdichtet wird. Bei der Konstruktion des Belemischer aus dieser Arbeit ist dieses Problem vermieden worden. Auch bei hohen Feuchtigkeiten des Materials in der Mischtrommel (ca. 67 % der absoluten Feuchtigkeit), bleibt das Material locker und ohne Klumpen, was die weitere Vliesbildung begünstigt.

In /Meinecke 62/ wurden die Schwierigkeiten genannt, um die großen Luftmengen der Sprühdüsen aus der Belemungsmaschine abzuführen. Bei diesem Belemischer wurde ein Drahtgewebefilter als Teil der Deckelwand eingesetzt ohne die Wandgeometrie von innen zu verändern. Durch diesen Filter wird der Luftüberschuss abgeführt. Während des Belemungsvorgangs wird diese Filterfläche von einer Faserschicht bedeckt aber nicht zugesetzt. Durch diese Faserschicht kann die Luft abgeführt werden, Faser und Kleinstpartikel aber nicht. Durch ständiges Abwischen dieser Filterfläche mit den Mischwerkzeugen, wird immer eine Faserschicht optimaler Dicke an der Filteroberfläche behalten, die gerade ausreicht um keine Faser durch zu lassen und trotzdem keinen großen Strömungswiderstand für die abgeführte Luft darstellt. Damit wird der für die Ausformung von Bindemitteltröpfchen optimaler Größe notwendige Durchsatz von Zerstäubungsluft gewährleistet.

### 5.5 Bindemittelzerstäubung, Tröpfchengrößen

Um die Bindemittel in Flüssigform bei diesem Belemischer zu zerstäuben, werden die vier Zweistoffdüsen Modell 940-43/0 (Düsenöffnung 1,2 und 2,8 mm) der Firma Düsen-Schlick GmbH verwendet. Diese vier Düsen sind gleichmäßig entlang des oberen Bereichs der Trommeln des Belemischers angeordnet (siehe Abb. 42) und sprühen mit Sprühkegeln (Sprühwinkel ca. 50°) nach unten in das aufgewirbelte Material.

Die Tröpfchen des Bindemittels aus dem Düsenstrahl wurden aus einer Distanz von 0,5 m auf einer 10 x 10 cm großen transparenten Folie in 6 Gängen durch den Düsenstrahl aufgenommen und gescannt (8-bit Graustufen, Auflösung 600 dpi, durchsichtig). Die Tröpfchengrößen wurden mit dem rechnerischen Bildanalysesystem „Fibreshape“ der Firma Ist AG, Schweiz ermittelt /Schmid 01/. Bei der oben genannten Einstellung konnten Tröpfchenflecken ab dem Durchmesser von 33 µm gemessen werden, d.h. umgerechnet 16 µm Durchmesser im Flug. Bei der Umrechnung des Durchmessers der Tröpfchenflecken zu dem der Tröpfchen im Flug wurde von den Annahmen des /Meinicke 62/ ausgegangen, dass der Tröpfchenfleck die Form einer Kugelkalotte hat, deren Höhe dem 0,15-fachen ihres Durchmessers entspricht. Es wurde ebenfalls davon ausgegangen, dass das Volumen der aufgeprallten Tröpfchenflecken und kugelförmigen Tröpfchen im Flug gleich ist. Durch das Gleichen mathematischer Ausdrücke für diese zwei Geometrien, kann das Verhältnis zwischen diesen errechnet werden. Der Tröpfchendurchmesser im Flug ist 2,0512 mal kleiner als der Fleckdurchmesser des aufgeprallten Tröpfchens unabhängig von der Tröpfchengröße.

In Abb. 44 ist die Tröpfchenaufnahme auf einem Flächenausschnitt von 1 x 1 mm dargestellt. Mit den üblichen Sprühparametern (statischer Luftdruck 6 bar, Bindemittelmassenstrom 2,5 g/s, Düsenöffnung 1,2 mm) und 65 % wässriger Phenolformaldehydharzlösung als Bindemittel wurden Tropfendurchmesser im Flug mit einem anzahlgewichteten Medianwert von 20 - 40 µm erreicht. Bei natürlichen Bindemitteln als z.B. 10 % wässrigen Lösungen mussten größere Durchsätze von ca. 25 g/s angewendet werden bei ansonsten gleichen Bedingungen, was zu Tropfendurchmessern im Flug mit einem anzahlgewichteten Medianwert von 70 - 100 µm führte.

Der Zusammenhang zwischen den Tröpfchengrößen und den Einstellungsparameter der Düse ist in Tabelle 8 dargestellt. Das Bindemittel, dessen Tröpfchengrößen hier gemessen wurden, ist zusammengesetzt aus Phenolformaldehydharz (65% wässrige Lösung) und Abtönfarbe Hornbach im Verhältnis 3 kg zu 750 ml. Diese Mischung wurde für die Versuche für die Bestimmung der Bindemittelverteilung genutzt (siehe Kapitel 5.6).

Tabelle 8: Tröpfchengrößen (Durchmesser der Tröpfchen im Flug) im Zusammenhang der Sprühparameter der Düse (Düsenöffnung 2,8 mm)

Luftverbrauch [m <sup>3</sup> /h]	Bindemittel-massenstrom auf einer Düse [g/s]	Medianwert des Durchmessers volumengewichtet [μm]	Medianwert des Durchmessers anzahlgewichtet [μm]
15	1,25	228	45
10	2,5	671	39
6,5	2,5	932	37
6,5	5	1018	49

In [Schubert 03/] findet man verschiedene theoretische Berechnungen, um die Tröpfchengrößen zu errechnen, was aber über den Rahmen dieser Arbeit hinausgeht. Es wird hier mit verschiedensten Bindemitteln gearbeitet, wozu es sehr aufwändig wäre jedes Mal z.B. die Oberflächenspannung des Bindemittels zu messen. In dieser Arbeit ist aber von Bedeutung, dass die Ergebnisse der Zerstäubung gemessen wurden, d.h. die Tröpfchengrößenverteilung so wie sie in der Realität an der Partikeloberfläche vorliegt.

Die volumengewichtete Summenhäufigkeit der Tröpfchengrößen bei verschiedenen Düseneinstellungen (siehe Tabelle 8) ist in Abb. 43 dargestellt. Jede Stichprobe der Tröpfchen enthielt ca. 15000 Stück und wurde in 50 μm Klassen aufgeteilt.

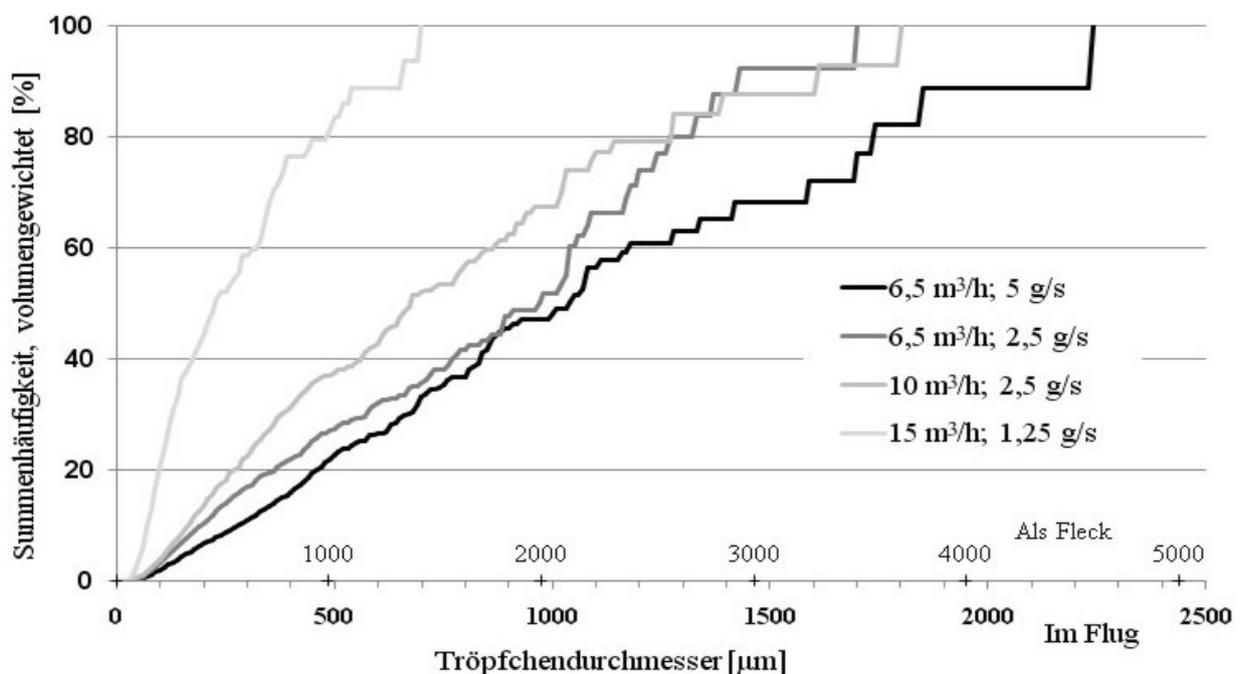


Abb. 43: Volumengewichtete Summenhäufigkeiten der Tröpfchendurchmesser im Flug und als Fleck bei verschiedenen Düseneinstellungen (Luftverbrauch [m<sup>3</sup>/h], Bindemittelmassenstrom [g/s], auf Distanz von 0,5 m)

In der Abb. 43 sind keine bekannte Verteilungen zu erkennen. Damit ist in diesem Fall die Behauptung von /Schubert 03, Wartenberg 87/, dass die bei der Zerstäubung entstehenden Tröpfchengrößenverteilung meist normal oder log-normal verteilt sind (siehe Kapitel 3.6), nicht bestätigt.

Die Zugehörigkeit zu der Log-Normal-, Normal- und stetigen Gleichverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov Test geprüft. Die Ergebnisse der statistischen Tests werden in der Tabelle 9 gezeigt. Das höhere Signifikanzniveau weist auf eine größere Wahrscheinlichkeit hin, dass die empirische Verteilung an die theoretische angepasst werden kann.

Tabelle 9: *Signifikanzniveaus nach dem Kolmogorov-Smirnov Test für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Tröpfchengrößen*

Theoretische Verteilung	Düseneinstellungen			
	Luftverbrauch [m <sup>3</sup> /h], Bindemittelmassenstrom auf der Düse [g/s]			
	15 m <sup>3</sup> /h, 1,25 g/s	10 m <sup>3</sup> /h, 2,5 g/s	6,5 m <sup>3</sup> /h, 2,5 g/s	6,5 m <sup>3</sup> /h, 5 g/s
Log-Normalverteilung	0,01	0,01	unter 0,01	unter 0,01
Normalverteilung	0,1	0,02	0,02	0,01
Stetige Gleichverteilung	0,1	0,02	über 0,2	unter 0,01

Zum Zweck der Modellierung der Bindemittelverteilung, wurde die durchschnittliche Tröpfchengröße wie folgt berechnet. Es wurde das Gesamtvolumen der Tröpfchen durch die Tröpfchenanzahl dividiert. Daraus ergaben sich die durchschnittlichen Tröpfchengrößen mit den Durchmessern wie in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: *Durchschnittliche Tröpfchengrößen für das mathematische Modell im Zusammenhang der Sprühparameter der Düse*

Luftverbrauch [m <sup>3</sup> /h]	Bindemittel-massenstrom [g/s]	Tröpfchen-durchmesser im Flug [µm]	Tröpfchenfleck-durchmesser (aufgeprallt) [µm]
15	1,25	90	185
10	2,5	142	291
6,5	2,5	151	310
6,5	5	190	390

## 5.6 Bindemittelverteilung

Unter Bindemittelverteilung wurde hier die Tröpfchenflächenanordnung (Verteilung) an der Partikeloberfläche definiert. Um dies zu bestimmen, wurde das Phenolformaldehydharz (65% wässrige Lösung) benutzt und mit Abtönfarbe Hornbach im Verhältnis 3 kg zu 750 ml gemischt. Mit dieser Bindemittelzusammensetzung wurden die Hanfsilagefasern besprüht, zu den aber vorher weiße Schäben ca. 1 cm groß in Massenverhältnis von 15:1 dazugegeben wurden. Nach der Beleimung wurden diese weißen Schäben von dem beleimten Material entnommen und untersucht (immer ca. 100 Stück). An den Schäben sind die Tröpfchenflecken des gefärbten Bindemittels weit deutlicher zu sehen, als an den grünen Hanfsilagefasern. Danach wurden die weiße Schäben einzeln gescannt (siehe Abb. 45). Aus der gescannten Fläche wurden die roten Bindemittelflecken mit dem Corel Programm rechnerisch getrennt (siehe Abb. 46), und deren prozentualer Oberflächenanteil mit dem bildanalytischen Programm Fibreshape ermittelt.

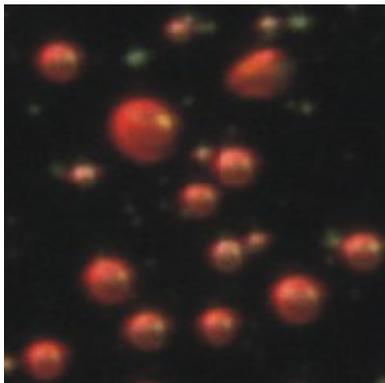


Abb. 44: *Tröpfchen aus dem Düsenstrahl (Ausschnitt 1 x 1 mm)*

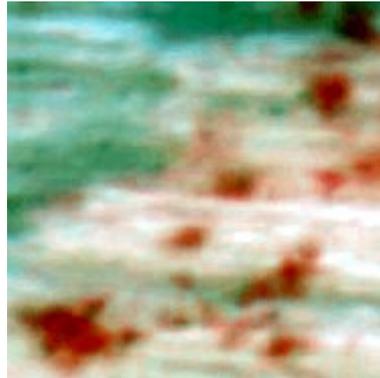


Abb. 45: *Verteilung der Tröpfchen auf einer Schäbe (Ausschnitt 1 x 1 mm)*



Abb. 46: *Die Tröpfchen für Bildanalyse bereitet (Ausschnitt 1 x 1 mm)*

Um die Bindemittelverteilung optimal einzustellen, wurden die Arbeitsparameter der Beleimungsmaschine variiert. Die von der Bedeutung wichtigsten Beleimungsparameter hier sind die Drehzahl der Wellen und die Tröpfchengröße. Diese Parameter haben den größten Einfluss auf die Qualität der Beleimung /Meinecke 62/. Alle anderen Variationsparameter der Beleimungsmaschine wurden empirisch ermittelt und konstant gehalten. Einige haben nicht so großen Einfluss (z.B. Drehwinkel der Mischwerkzeuge), und einige wurden durch Versuche auf einen optimalen Wert eingestellt (z.B. Befüllungsgrad der Mischtrommel von ca. 30 %, um Materialverklumpung zu vermeiden und um die mechanische Belastung für die Maschine einzugrenzen).

## 5.7 Heißpressen

Es wurden ebene Platten verschiedener Dichten und einer Dicke von 10 mm hergestellt. Für die Herstellung von Platten verschiedener Dichten wurden unterschiedliche Pressenregimes angewendet. Die üblichen Pressendiagramme für drei unterschiedliche Plattendichten sind in Abb. 47 dargestellt.

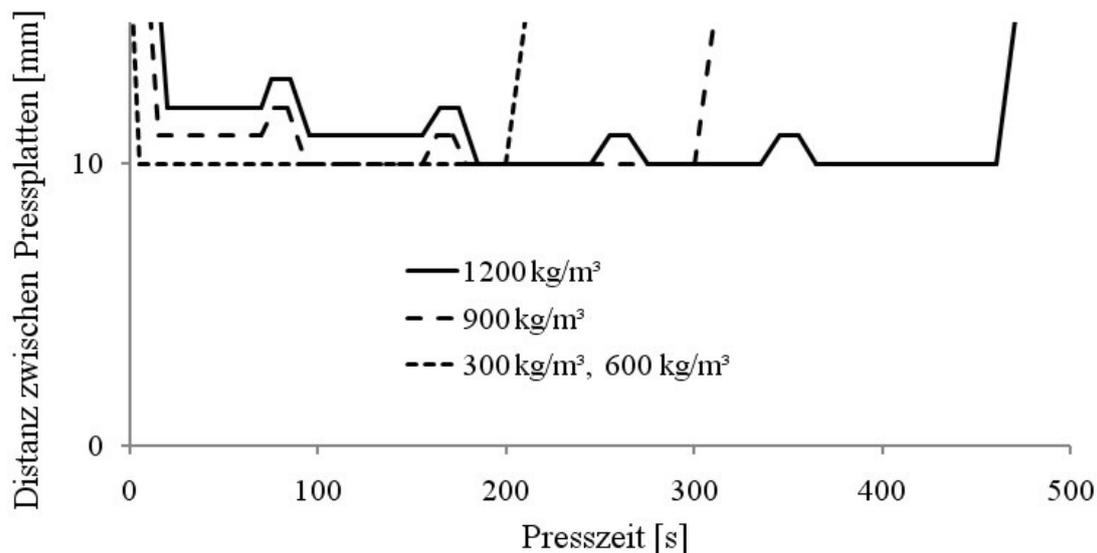


Abb. 47: Pressdiagramme für Platten verschiedener Dichten

Für Platten aus dem mit natürlichen Bindemitteln beleimten Material (höhere absolute Feuchtigkeiten von etwa 15 bis 30 %), waren etwas längeren Presszeiten von etwa 5 bis 10 min nötig. Alle Platten wurden auf ca. 200 °C gepresst. Die Matten für das Pressen wurden wie folgt vorbereitet: gleich nach der Beleimung wird das Material in einer Holzkastenrechteckform 50 x 50 cm gleichmäßig verteilt, und mit einem Spachtel vorverdichtet. Um solche Vliesmatten vorzubereiten, wurde eine Kastenrechteckform 30 x 30 cm teilweise benutzt, wenn eine schnellere und leichtere Einmann-Handhabung notwendig war.

## 5.8 Biegefestigkeit der Platten

Die Biegefestigkeit der hergestellten Platten wurde durch die Prüfung nach /DIN EN 310/ mit einer Zugprüfmaschine von 10 kN, Z010 ProLine der Firma Zwick Roel AG ermittelt. Der Ausschnittsplan der Presslinge für die Prüfungen ist in Abb. 48 dargestellt. Zur Bestimmung der Biegefestigkeit der 10 mm dicken Platten wurden rechteckige Prüfkörper 250 x 50 mm benötigt. Für eine Plattenart wurden immer Prüfungen an 6 bis 16 Prüfkörpern durchgeführt.

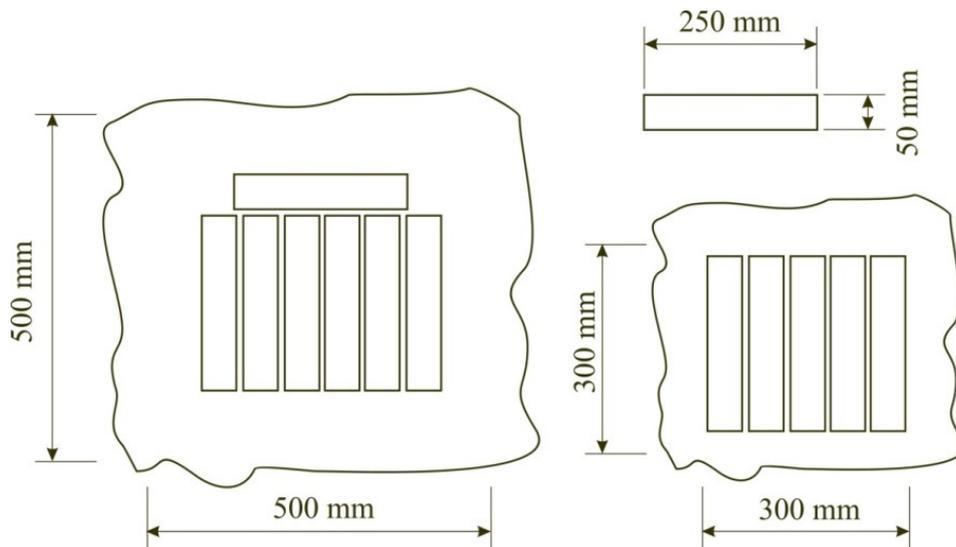


Abb. 48: Sägeausschnitte der Presslinge für Prüfung der Biegefestigkeit

## 5.9 Theoretische Modellierung der Bindemittelapplikation

### 5.9.1 Fasermorphologie, Bindemittelauftragsmenge

Im Gegensatz zu Holzspänen, die als flächige Schuppen angenommen werden können deren Höhe vernachlässigt werden kann /Meinecke 62/, sind die Fasern anders. Fasern sind feiner zermahlene Partikel, eher zylinderförmig und mit größerer spezifischer Oberfläche als Späne. In Tabelle 11 sind Beispiele aus verschiedenen Quellen gegeben für spezifische Materialoberfläche und Bindemittelauftragsmenge unterschiedlicher Materialien zur Plattenherstellung.

Tabelle 11: Beispiele spezifischer Materialoberflächen und Bindemittelauftragsmengen

Werkstoff	Spezifische Materialoberfläche [m <sup>2</sup> /kg]	Spezifische Bindemittelauftragsmenge [g/m <sup>2</sup> ]
Vollholz /Meinecke 62/	nicht angegeben	100
Halmstrohgut /Wartenberg 87/	11	nicht angegeben
Späne 1 mm dick von Bongossi, Rohwichte 1000 kg/m <sup>3</sup> /Klauditz 52/	2	40
Späne 0.05 mm dick von Schirmbaum, Rohwichte 200 kg/m <sup>3</sup> /Klauditz 52/	200	0.4
Fichtenspäne /Meinecke 62/	18,6	4,3
Späne /Berthold 90/	nicht angegeben	3,4...20,4
Hanfschäben /Blümelhuber 02/	289	nicht angegeben
Hanfsilagefasern in diesem Modell	249	0,6

Bei Spanplatten ist in Frage gestellt /Klauditz 52, Meinecke 62/, ob und wie beim Bindemittelauftrag die Späne mit dem Bindemittel als einem dünnem zusammenhängendem gleichmäßigen Film bedeckt werden können. Die dünnen Fasern (im Gegensatz zu Spänen) haben eine weitaus größere spezifische Oberfläche [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]. Dadurch wird das Bindemittel auf der Faser einen punktförmigen Auftrag haben.

Wenn es in /Meinecke 62/ bei 100 g Holzspänen um 11600 Einzelstücke geht, im Modell dieser Arbeit sind es zum Vergleich  $200 \cdot 10^6$  Stück Einzelfasern pro 100 g. Die benötigte Tröpfchengröße um alle Späne ganz mit dem Bindemittel zu bedecken ist nach /Meinecke 62/ 3,6 bis 37,4  $\mu\text{m}$ , wie im Kapitel 3.8.1 beschrieben und nach dem Modell dieser Arbeit ca. **0,5  $\mu\text{m}$**  wegen der größeren Oberfläche der Fasern im Gegensatz zu Spänen.

Was bei der Naturfaser noch anders ist als bei den Holzspänen, ist dass die Oberfläche von Spänen nicht glatt (eben) ist /Meinecke 62/. Dadurch können die Bindemitteltröpfchen beim Sprühen in ein „Tal“ an der Oberfläche von Spänen auftreffen, wodurch ihre Wirkung vermindert wird. Von diesem Ansichtspunkt können die Fasern in diesem Modell als ebene Zylinder betrachtet werden. Die Oberfläche hat sicherlich auch eine eigene mikrofibrierte Struktur, was aber den Tröpfchenauftrag nicht beeinflusst. Bei Spänen gibt es auch die Möglichkeit /Meinecke 62/, dass das Bindemittel in die Kapillare der Späne eingesaugt wird, was bei Naturfasern nicht der Fall ist.

Im Rahmen dieses Modells ist nicht betrachtet worden, wie die Tröpfchen im Flug aussehen sondern der Endeffekt, d.h. es wird an belemtem Material gemessen wie die Tröpfchen zerteilt und verteilt sind.

Hier wurde die spezifische Oberfläche von Faserstoff wie folgt berechnet. Mit dem Programm Fibreshape für eine bestimmte Menge von Fasern (0,023 g) wurde für jede Faser (insgesamt ca. 17647 Stück) Länge und Dicke gemessen. Die Fasern werden als zylinderförmig angenommen. Für jede Faser wurde ihre Oberfläche als Summe der Mantelfläche und der zwei Grundflächen des Zylinders berechnet. Die Summe aller einzelnen Faseroberflächen ergibt die Gesamtoberfläche der gemessenen Menge Fasern. Die so berechnete Gesamtoberfläche wurde dann durch das Gewicht dieser Menge (0,023 g) dividiert. Der errechnete Wert für die spezifische Oberfläche der Fasern beträgt somit  **$A_s = 249 \text{ m}^2/\text{kg}$** .

Die Masse einer Charge im Belemmischer beträgt  **$M_c = 15 \text{ kg}$** .

Daraus ergibt sich für die Gesamtoberfläche einer Charge dann  **$A_c = M_c \cdot A_s = 3735 \text{ m}^2$** .

Das benötigte Bindemittelgewicht für einen 10-prozentigen Anteil (atro bezogen) war  **$M_b = 2,25 \text{ kg}$** .

Die spezifische Bindemittelauftragsmenge beträgt dann  $B_F = M_b/A_c = 0,6 \text{ g/m}^2$  beträgt. So ist es wenn das Bindemittel frisch besprüht ist und noch nicht getrocknet und gehärtet ist.

Um diese Bindemittelmenge als dünnen Film zu erzeugen, der alle Fasern gleichmäßig bedeckt, müsste der Film  $548 \text{ nm}$  dünn sein. Das ist nicht möglich, da der gemessene mittlere Tröpfchendurchmesser von PF Harz  $d_T = 34 \text{ }\mu\text{m}$  beträgt. Es folgt daraus, dass das Bindemittel tröpfchenförmig aufgetragen ist.

Wenn die angenommenen Bindemitteltröpfchen mit dem Durchmesser  $d_T = 34 \text{ }\mu\text{m}$  alle gleichmäßig an der Faseroberfläche verteilt sind, es folgt daraus, dass es **27 Tröpfchen/mm<sup>2</sup>** auf der Faseroberfläche gibt. Wenn diese Tröpfchen auf den Fasern aufgetroffen sind, besitzen sie einen Durchmesser von **55  $\mu\text{m}$** . Das heißt, dass das **10,5 %** der Faseroberfläche, mit dem Bindemittel bedeckt sind.

In dieser o.g. Messung wurden noch folgende geometrische Charakteristiken der Faser ermittelt.

Das durchschnittlicher Faservolumen  $V_F$  wurde wie folgt berechnet. Für alle gemessene Längen und Dicken der Einzelpartikel wurde die Faserform als zylinderförmig angenommen und berechnet. Die Summe aller Partikelvolumina wurde durch die Partikelanzahl dividiert. Dadurch ergab sich das durchschnittlicher Faservolumen von  $V_F=27685394 \text{ }\mu\text{m}^3$ .

Anhand des durchschnittlichen Faservolumens kann die Projektionsfläche einer in beliebiger Richtung und Position fliegenden Faser errechnet werden. Das Faservolumen kann hier als kugelförmig angenommen und berechnet werden. Die Projektionsoberfläche eines Kügelchens  $A_F$  mit dem Volumen von  $V_F=27685394 \text{ }\mu\text{m}^3$  entspricht der Oberfläche des Halbkugelkreises und beträgt  $A_F=110625 \text{ }\mu\text{m}^2$ .

Die durchschnittliche Faseroberfläche  $O_F$  wurde wie folgt berechnet. Für alle gemessenen Längen und Dicken der Einzelpartikel wurde die Oberfläche als zylinderförmig angenommen und berechnet. Die Summe aller Partikeloberflächen wurde durch die Partikelanzahl dividiert. Daraus ergab sich eine durchschnittliche Faseroberfläche von  $O_F=325046 \text{ }\mu\text{m}^2$ .

Die durchschnittliche Fasermasse  $m_F$  wurde wie folgt berechnet. Die Masse der o.g. Probe von  $0,023\text{g}$  wurde durch die Faseranzahl von  $17647$  dividiert. Das ergibt eine durchschnittliche Fasermasse von  $m_F=1,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ .

Wenn eine Charge der Fasern von  $M_c=15 \text{ kg}$  im Raum des Belemmischers  $V_{BM} = 2\text{m}^3$  aufgewirbelt und gleichmäßig verteilt ist, lässt es sich der Raumbesatz für jede Faser nach der Formel  $V_R=m_F \cdot V_{BM}/M_c$  berechnen und beträgt  $V_R = 0,174 \text{ mm}^3/\text{Faser}$ .

### 5.9.2 Tröpfchen im Strahlkegel des Bindemittels

Es wurde hier modelliert, wie sich die Fasern im Mischerraum und Tröpfchen im Düsenstrahl bewegen und aufeinander treffen. Die Einstellungen des Beileimmischers wurden hier angenommen wie sie für die Versuchsnummern 1, 3, 5, 14 und 16 für reale durchgeführte Messungen aus dem Kapitel 6.2 eingestellt waren.

Es wird geklärt, wie die alle Parameter des Modells berechnet oder angenommen wurden, und für jede der o.g. Versuchsreihen tabellarisch dargestellt.

Es wurden die Begriffe Durchschnittlicher Tröpfchendurchmesser  $d_r$ , Tröpfchenmasse  $m_T$ , Tröpfchenvolumen  $V_T$ , Luftverbrauch auf einer Düse  $L_D$  und Bindemittelmassenstrom auf einer Düse  $D_D$  eingeführt. Diese Parameter des Strahlkegels wurden schon teilweise im Kapitel 5.5 erläutert.

Die Tröpfchenanzahl in der Bindemittelmasse  $n_T$  lässt sich berechnen wie  $n_T = l/m_T$ .

Der Tröpfchendurchsatz auf einer Düse  $D_T$  (Tröpfchenanzahl pro Zeit) lässt sich berechnen wie  $D_T = n_T \cdot D_D$ .

Die Höhe des Strahlkegels  $H_s$  und der Durchmesser des Strahlkegels  $D_s$  in dem die Fasern besprüht (aufgetroffen) werden, wurden an der Maschine gemessen.

Der Querschnitt des Strahlkegels (Fläche von Basis)  $A_{SK}$  beträgt  $A_{SK} = D_s^2 \cdot \pi / 4$ .

Die Geschwindigkeit der Tröpfchen im Strahlkegel  $v_s$  wurde von den Angaben des Herstellers (Schlick) übernommen.

Der Strahlvolumendurchsatz  $S_{VD}$  beträgt  $S_{VD} = A_{SK} \cdot v_s$ .

Die Dichte (Anzahl) der Tröpfchen im Strahlvolumen  $\rho_{TS}$  beträgt  $\rho_{TS} = D_T / S_{VD}$ .

Die in diesem Kapitel erklärten Parameter des Modells sind in der Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Parameter des Modells die sich auf Düsenstrahl und Tröpfchen beziehen

Name	Symbol	Einheit	Versuchs- Nummer 1	Versuchs- Nummer 3	Versuchs- Nummer 5	Versuchs- Nummer 14	Versuchs- Nummer 16
Tröpfchen- durchmesser	$d_r$	$\mu\text{m}$	116	116	181	243	243
Tröpfchen- masse	$m_T$	kg	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$
Tröpfchen- volumen	$V_T$	$\mu\text{m}^3$	807647	807647	3116088	7536000	7536000

Tabelle 12 (Fortsetzung): *Parameter des Modells die sich auf Düsenstrahl und Tröpfchen beziehen*

Name	Symbol	Einheit	Versuchs- Nummer 1	Versuchs- Nummer 3	Versuchs- Nummer 5	Versuchs- Nummer 14	Versuchs- Nummer 16
Tröpfchen- anzahl in Bindemittel- masse	<b>n<sub>T</sub></b>	Stück/kg	$1,13 \cdot 10^9$	$1,13 \cdot 10^9$	$2,92 \cdot 10^8$	$1,21 \cdot 10^8$	$1,21 \cdot 10^8$
Bindemittel- massenstrom auf einer Düse	<b>D<sub>D</sub></b>	g/s	1,25	1,25	2,5	5	5
Tröpfchen- durchsatz auf einer Düse	<b>D<sub>T</sub></b>	Stück/s	1407005	1407005	792353	603165	603165
Luftverbrauch auf einer Düse	<b>L<sub>D</sub></b>	m <sup>3</sup> /h	15	15	10	6,5	6,5
Höhe des Strahlkegels	<b>H<sub>s</sub></b>	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Durchmesser des Strahlkegels	<b>D<sub>s</sub></b>	m	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3
Querschnitt des Strahlkegels	<b>A<sub>SK</sub></b>	m <sup>2</sup>	0,196	0,196	0,126	0,707	0,707
Tröpfchenge- schwindigkeit	<b>v<sub>s</sub></b>	m/s	20	20	15	10	10
Strahlvolumen- durchsatz	<b>S<sub>VD</sub></b>	m <sup>3</sup> /s	3,925	3,925	1,844	0,707	0,707
Tröpfchen- dichte im Strahlvolumen	<b>ρ<sub>TS</sub></b>	Stück/m <sup>3</sup>	358473	358473	387130	853737	853737

### 5.9.3 Fasern im Strahlkegel

Eine Faser fliegt durch den Düsenstrahl und trifft auf ihrer Flugstrecke mit mehreren Tröpfchen aufeinander. Die durchschnittliche Projektionsfläche einer Faser  $A_F$  auf die Tröpfchen auftreffen werden, wurde im Kapitel 5.9.1 berechnet.

Wenn die Faser durch den Düsenstrahl fliegt, entspricht ihre Flugstrecke einem Zylinder mit der Basis der Projektionsfläche einer Faser  $A_F$  und Länge die etwa dem Durchmesser des Kegelbasis  $D_s$ , wie in Abb. 49 dargestellt.

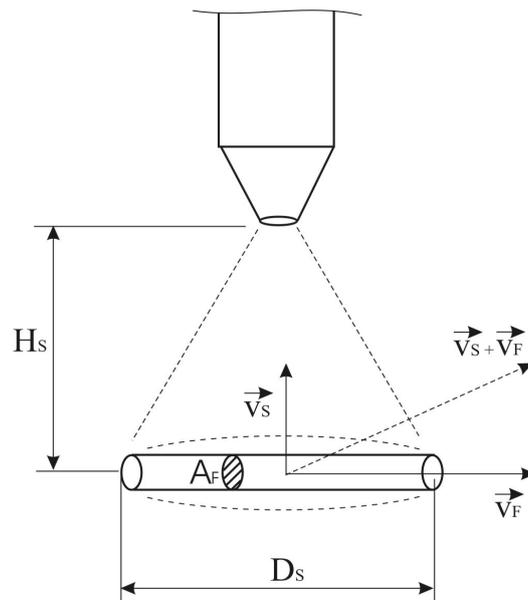


Abb. 49: Die Flugstrecke der Faser durch den Düsenstrahl

Die Geschwindigkeit einer Faser die durch den Düsenstrahl fliegt  $\mathbf{v}_F$ , wurde als Umfangsgeschwindigkeit der Rührorgane (Finger) des Beleimmischers angenommen. Die Werte hierfür wurden von real durchgeführten Messungen übernommen (siehe Kapitel 6.2).

Die Zeit  $\mathbf{T}_{FS}$ , die eine Faser während ihres Fluges durch den Düsenstrahl verbringt wird als Verhältnis von doppeltem Durchmesser des Strahlkegels  $\mathbf{D}_S$  (als Flugstrecke) und Fasergeschwindigkeit  $\mathbf{v}_F$  berechnet. Also,  $\mathbf{T}_{FS} = 2 \cdot \mathbf{D}_S / \mathbf{v}_F$ . Der Durchmesser wurde auf etwa das Doppelte geschätzt, weil die Fasern nicht gerade horizontal durch den Strahlkegel fliegen.

Da die Geschwindigkeiten der Faser  $\mathbf{v}_F$  und die der Tröpfchen  $\mathbf{v}_T$  sich zusammensetzen, wird das Volumen, welches die Faser in ihrem Flug durch den Strahl  $\mathbf{V}_{FS}$  zurücklegt wie folgt berechnet:

$$V_{FS} = A_F \cdot \sqrt{v_S^2 + v_F^2} \cdot T_{FS}$$

Die Anzahl der Tröpfchen die eine Faser in ihrem Flug durch den Düsenstrahl trifft  $\mathbf{T}$ , lässt sich berechnen als Produkt der Tröpfchendichte im Strahlvolumen  $\rho_{TS}$  und dem Volumen des Faserfluges durch den Sprühstrahl  $\mathbf{V}_{FS}$ . Also,  $\mathbf{T} = \rho_{TS} \cdot \mathbf{V}_{FS}$ .

Wenn also eine Faser mit einer durchschnittlichen Oberfläche  $\mathbf{O}_F$  auf die Anzahl  $\mathbf{T}$  Tröpfchen mit einer Masse von  $\mathbf{m}_T$  trifft, beträgt die Bindemittelauftragsmenge auf dieser Einzelfaser  $\mathbf{B}_1 = \mathbf{T} \cdot \mathbf{m}_T / \mathbf{O}_F$ .

Die Bindemittelauftragsmenge  $\mathbf{B}_1$  ist somit die Menge an Bindemittel, die die Fasern beim direkten Besprühen unter dem Düsenstrahl abbekommen.

Die in diesem Kapitel erklärten Parameter des Modells sind in der Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Parameter des Modells die sich auf die Fasern im Düsenstrahl beziehen

Name	Symbol	Einheit	Versuchs- Nummer 1	Versuchs- Nummer 3	Versuchs- Nummer 5	Versuchs- Nummer 14	Versuchs- Nummer 16
Faserge- schwindigkeit	<b>v<sub>F</sub></b>	m/s	9,22	4,19	9,22	6,70	1,68
Zeit der Faser im Düsenstrahl	<b>T<sub>FS</sub></b>	s	0,054	0,119	0,043	0,045	0,179
Volumen des Faserfluges durch Strahl	<b>V<sub>FS</sub></b>	mm <sup>3</sup>	132	270	85	60	201
Tröpfchen- anzahl die auf eine Faser auftreffen	<b>T</b>	Stück	0,047	0,097	0,033	0,051	0,171
Direkte Bindemittel- auftragsmenge	<b>B<sub>1</sub></b>	g/m <sup>2</sup>	1,25	1,25	2,5	5	5

#### 5.9.4 Ein Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone

Die Düse sprüht das Bindemittel auf die in die Luft gewirbelte Faser wie in Abb. 50 dargestellt. Da die Fasern in einem Moment übereinander angeordnet sind, können nicht alle gleichmäßig und gleichzeitig besprüht werden. Die Fasern die direkt dem Düsenstrahl ausgesetzt sind, bekommen das meiste Bindemittel ab. Die Fasern der unteren Schichten bekommen weniger Bindemittel ab, weil sie sich im Schatten der oberen Fasern befinden.

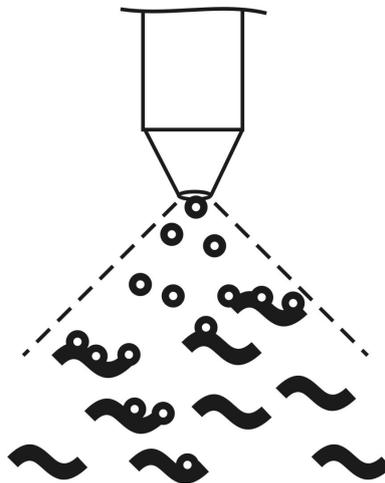


Abb. 50: Die Düse sprüht auf die in der Luft aufgewirbelten Fasern

Von den Fasern, die in der Luft gleichmäßig aufgewirbelt sind, besitzt jede einen gewissen Raum in der Luft bzw. Maschine. Wenn das Maschinenvolumen durch die gesamte Anzahl der Fasern in der Maschine dividiert wird, erhält man das zugehörige Volumen für jede Faser. In diesem Modell beträgt der Raumbesatz für eine Faser im Belemischer  $V_R=0,174$  mm<sup>3</sup>/Faser.

Wie schon in Kapitel 5.9.1 erläutert, beträgt das Volumen einer Faser  $V_F=0,028 \text{ mm}^3$ .

Demzufolge gehört zu jeder Faser ein 6,3-fach größeres Raumvolumen (Verhältnis  $V_R/V_F$ ), in dem die Faser im Raum des Beleimmischers fliegt. Vom Volumen auf die Fläche bezogen wird dieser Wert mit  $2/3$  potenziert. Der so berechnete Wert des Flächenverhältnisses  $\xi=\sqrt[3]{6,3^2} = 3,4$  entspricht der zu einer Faser gehörigen freien Fläche um sie herum. Wenn die Fasern vereinzelt von einander aufgewirbelt im Beleimmischer fliegen und von den Düsen besprüht werden, hat jede Faser um sich eine freie Fläche  $\xi=3,4$  mal größer als sie selbst (Projektionsfläche von der Düse betrachtet).

Wenn die Wolke von aufgewirbelten Fasern von der Düse aus betrachtet wird, sieht man erst die Fasern der ersten Schicht aus dieser Faserwolke. Diese Fasern werden „voll“ besprüht weil sich keine anderen Fasern zwischen ihnen und der Düse befinden. Die Fasern aus der zweiten Schicht dieser Faserwolke befinden sich im Schatten der Fasern aus der ersten Schicht. Durchschnittlich wird  $1/\xi$  der Oberfläche der Fasern aus der zweiten Schicht von den Fasern aus der ersten Schicht bedeckt (beschattet). Jede weitere Schicht wird mit Fasern der vorigen Schichten beschattet.

Wie die Fasern in verschiedenen Schichten von einander beschattet werden und die Verhältnisse zwischen freien und beschatteten Flächen für verschiedene Schichten sind, ist in Abb. 51 dargestellt. Die zu jeder Faser gehörige freie Fläche (weiß) ist als 1 angenommen. Damit ist die Fläche einer Faser (grün) um  $\xi$  Mal kleiner, d.h. sie hat den Wert von  $1/\xi$ . Wenn diese zu einer Faser gehörige freie Fläche betrachtet ist, wird sie mit immer mehr Fasern beschattet, je tiefer die Faserschicht liegt ( $n$  – Schichtennummer).

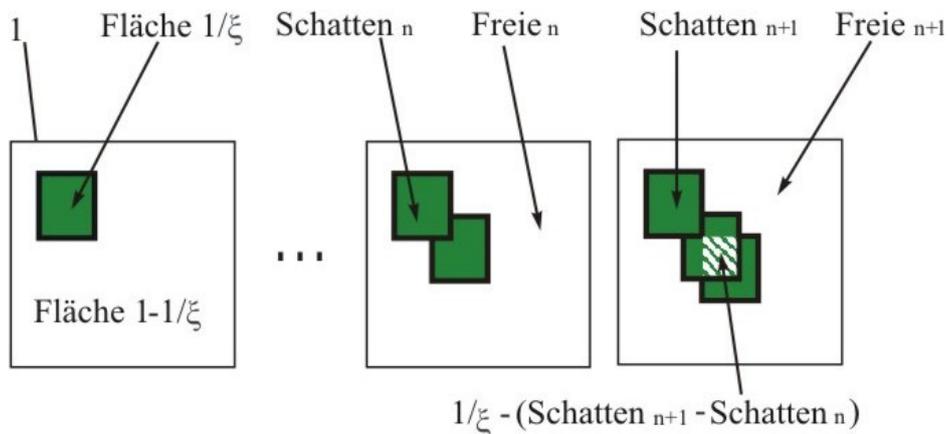


Abb. 51: Die Faser (grüne Flächen) von der Düse aus betrachtet, verschiedenen Schichten überlappen (beschatten) einander

Jede Faser einer Schicht wird proportional bedeckt (beschattet), d.h. so viel beschattet, wie die Fasern von darüber liegenden Schichten die freie zugehörige Fläche beschatten.

Solch eine Annahme lässt sich in folgender Gleichung ausdrücken:

$$\frac{Freie_n}{Schatten_n} = \frac{Schatten_{n+1} - Schatten_n}{1/\xi - (Schatten_{n+1} - Schatten_n)} \quad (2)$$

Hierbei gilt auch:

$$Freie_n + Schatten_n = 1 \quad (3)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (3) in (2) folgt:

$$Schatten_{n+1} = \frac{1 + (\xi - 1) \cdot Schatten_n}{\xi} \quad (4)$$

Wobei die Beschattung der ersten Faserschicht  $Schatten_0 = 0$  ist.

Diese Abhängigkeit (4) der Beschattung der Faserschichten (Schatten) von der Schichtentiefe in der aufgewirbelten Faserwolke (Schichtenzahl n) ist in Abb. 52 dargestellt.

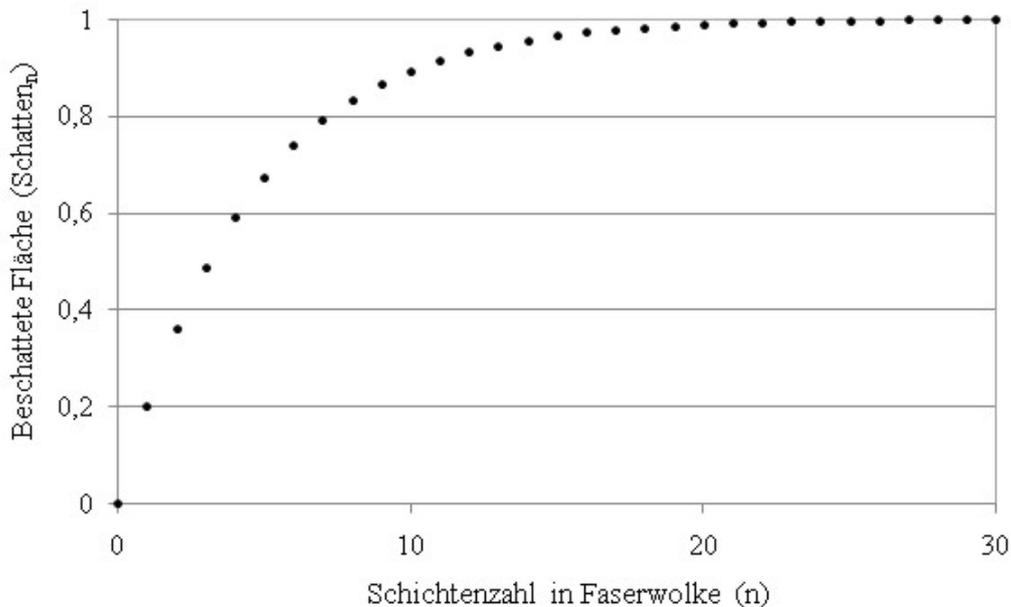


Abb. 52: Beschattete Fläche für Faserschichten in Abhängigkeit von Schichtenzahl, diskontinuierlich

In Abb. 52 ist zu sehen, dass bei der 15-ten Schicht in der Faserwolke, fast die ganze freie Fläche (von dem Wert 1) beschattet ist. Das heißt, dass die Faser die in der Faserwolke tiefer als in der 15-ten Schicht liegen, nicht oder kaum besprüht werden können.

Um diese Abhängigkeit in kontinuierliche Form zu bringen werden die folgenden Variablen definiert:

$y_1$  – beschattete Fläche

$x$  – Zahl der Schichten in der Faserwolke

Die Gleichung (4) lässt sich auf die kontinuierliche Variable  $y$  wie folgend übersetzen:

$$y_1 + dy_1 = \frac{1 + (\xi - 1)y_1}{\xi} \quad (5)$$

Und weiter:

$$dy_1 = \frac{1}{\xi} (1 - y_1) \quad (6)$$

Aus dieser Gleichung (6) und der Tatsache, dass die Steigerung  $dx$  der Schichtenzahl  $x$  eine Konstante ( $const$ ) ist, lässt sich folgende differentielle Gleichung aufstellen:

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{1}{\xi \cdot const} (1 - y_1) \quad (7)$$

Wenn diese differentielle Gleichung (7) mit den Randbedingungen  $y_1 = 1/\xi$  wenn  $x = 1$

integriert wird ( $\int_0^x dx = \xi \cdot const \int_0^{y_1} \frac{dy_1}{(1 - y_1)}$ ), ergibt sich die Abhängigkeit:

$$y_1 = 1 - e^{-\ln\left|\frac{\xi-1}{\xi}\right| x} = \dots = 1 - \left(\frac{\xi-1}{\xi}\right)^x \quad (8)$$

Diese kontinuierliche Funktion der Beschattung in Abhängigkeit von der Schichtentiefe (Faserschichtzahl) ist in Abb. 53 dargestellt.

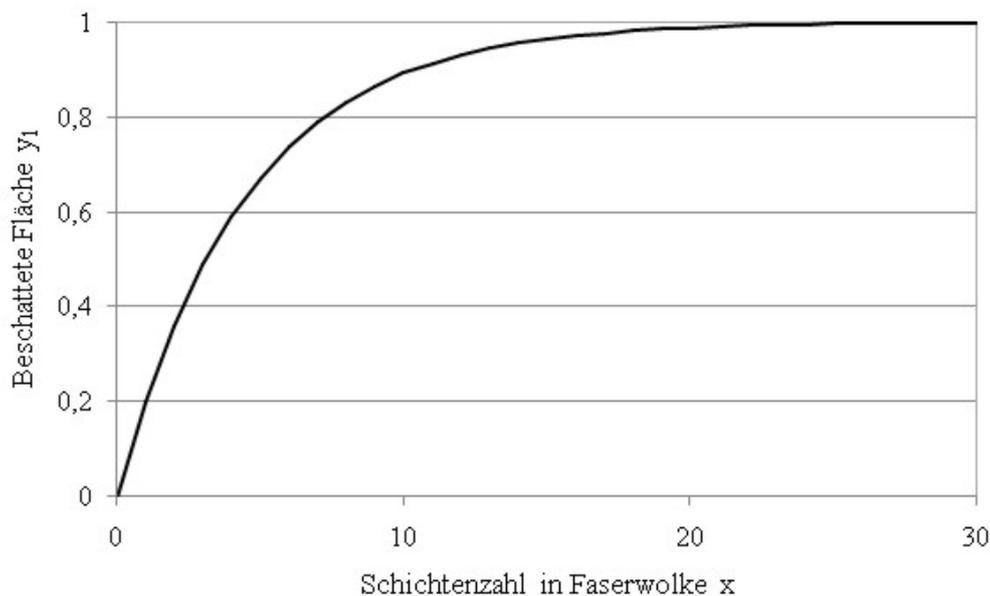


Abb. 53: *Beschattete Fläche für Faserschichten in Abhängigkeit von der Schichtenzahl, kontinuierlich*

Es kann die Beziehung zwischen Beschattung  $y_1$  und der Bindemittelmenge die die Faserschicht erhält durch folgende Betrachtung beleuchtet werden. Wenn eine Faserschicht

um den Wert von  $y_1$  beschattet ist, bedeutet das, dass sie die  $1-y_1$  von der Bindemittelmenge empfängt. Wenn diese Bindemittelmenge als  $y_2$  bezeichnet wird, sieht die Funktion (8) wie folgend aus:

$$y_2 = \left(\frac{\xi - 1}{\xi}\right)^x \quad (9)$$

Die Funktion  $y_2$  ist in Abb. 54 dargestellt. Die erste Schicht von Fasern wird voll besprüht und die tieferen Faserschichten bekommen mit exponentiellem Ablauf immer weniger Bindemittel ab. Das kann als einheitslose Funktion der Bindemittelauftragsmenge bezeichnet werden.

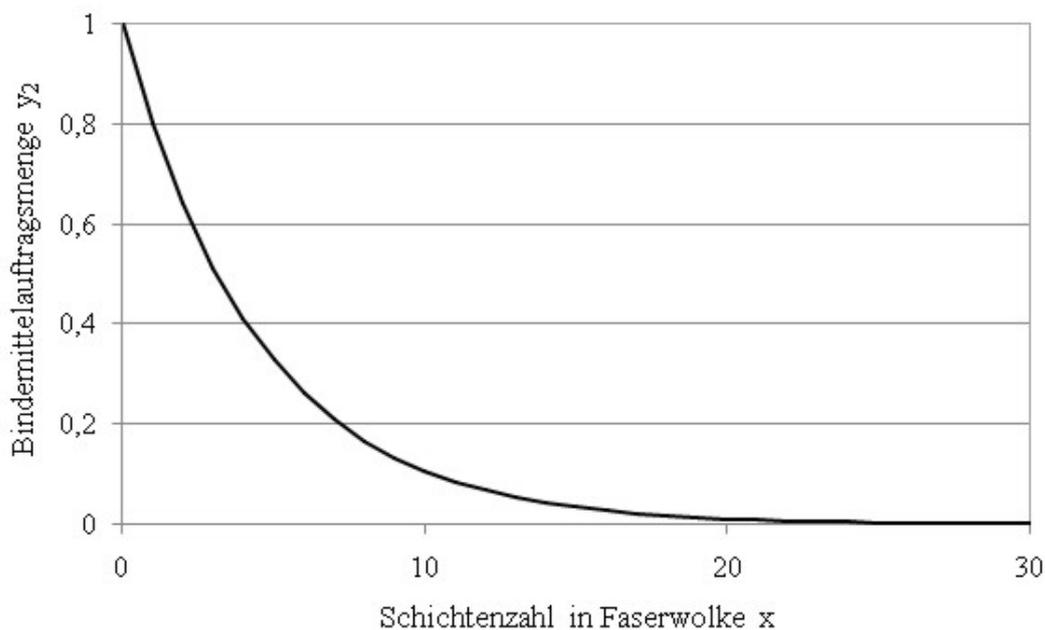


Abb. 54: Bindemittelauftragsmenge in Abhängigkeit von der Schichtenzahl, kontinuierlich

Die Funktion  $y_2$  bezieht sich auf die maximale Bindemittelauftragsmenge von 1 (einheitslos). Die Zahl 1 stellt hier die maximale Bindemittelauftragsmenge dar, welche die Fasern der ersten Faserschicht, die direkt besprüht wird, abbekommt. Um diese Funktion  $y_2$  den realen Bedingungen anzupassen, wird sie immer mit der direkten Bindemittelauftragsmenge  $B_1$  (in Kapitel 5.9.3 erläutert) multipliziert. So bekommt die Funktion der Bindemittelauftragsmenge weitere Aufbauform:

$$y_3 = B_1 \cdot \left(\frac{\xi - 1}{\xi}\right)^x \quad (10)$$

Bei einem Durchgang der Fasermatte durch den Düsenstrahl (wie z.B. auf einem Förderband) wird die Bindemittelauftragsmenge wie es die Funktion  $y_3$  beschreibt, in den Faserschichten verteilt.

Diese Funktion ist kontinuierlich und infinit. Sie zeigt, wie viel Bindemittel die Fasern von der ersten Schicht bis zu der Schicht in endloser Tiefe abbekommen. Da aber die Bindemitteltröpfchen nicht bis zur unendliche Tiefe in die Faserwolke eindringen können, stellt sich die Frage, welche Faserschicht erreichen die Bindemitteltröpfchen?

Im Fall dieses Modells ist schon bei der 15. Faserschicht die freie Fläche (Zwischenraum unten überlappenden Fasern) halb so groß wie die durchschnittliche Tröpfchengröße. Es ist also die Annahme, dass die Tröpfchen nicht tiefer als bis zur 15. Faserschicht durchdringen.

Wenn es zu jeder Faser ein Raumvolumen wie ein Würfel von  $V_R=0,174 \text{ mm}^3/\text{Faser}$  gehört, bedeutet das, dass in  $1 \text{ mm}^3$  gerade  $1/V_R=5,75$  Faser gibt. Und weiter, heißt es dass in einer Fasermatte der Dicke  $D_{FM} = 15 \cdot (1/V_R) = 2,61 \text{ mm}$  gerade 15 Faserschichten gibt.

Es ist vorteilhaft die Funktion der Bindemittelauftragsmenge in einer weiteren Form aufzubauen. Die Fasermenge kann nämlich bis zu der 15. Faserschicht prozentual als 100 % umgerechnet werden. So kann bei weiteren Berechnungen die beliebige gesamte Fasermenge in % ausgedrückt werden.

Auf diese Weise bekommt die Funktion der Bindemittelauftragsmenge bei einem Durchgang der Fasermatte durch den Düsenstrahl ihre endgültige Form:

$$y = B_1 \cdot \left( \frac{\xi - 1}{\xi} \right)^{\frac{15}{100} \cdot x} \quad (11)$$

Die Bindemittelauftragsmenge  $y$  (11) nach einem Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone sieht aus wie in Abb. 55 dargestellt.

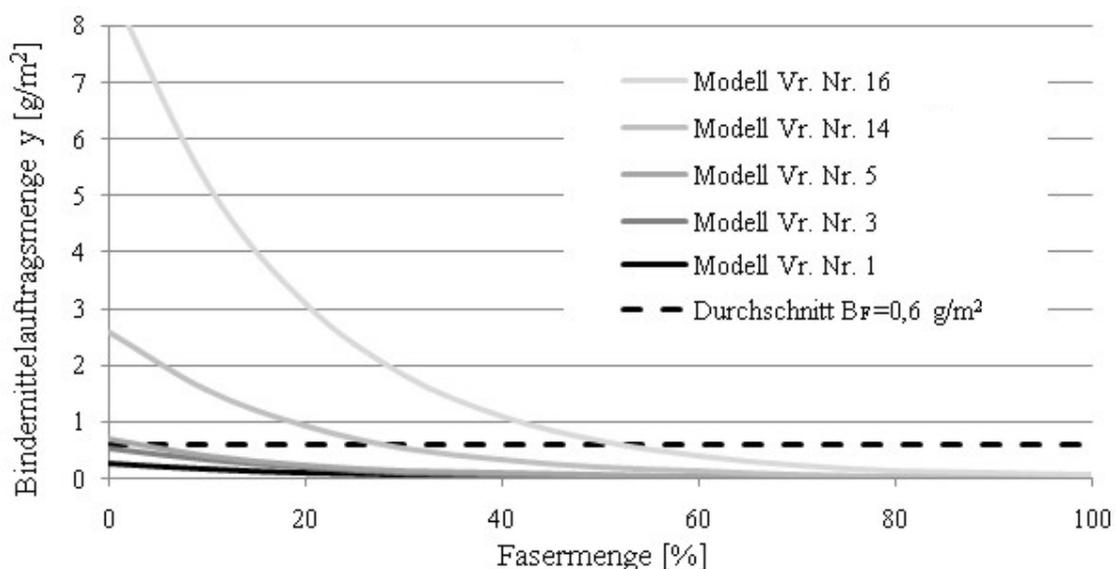


Abb. 55: Bindemittelauftragsmenge nach einem Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone, für verschiedene Einstellungen der Maschine (Versuchsnummer) modelliert

### 5.9.5 Mehrere Durchgänge durch die Sprühzone

Die Beleimungszeit  $T_B$  der ganzen Charge von  $M_B = 15 \text{ kg}$  hängt zusammen mit der Tröpfchengrößen  $d_r$  und dem Bindemittelmassenstrom auf einer Düse  $D_D$ . Um die Tröpfchengrößen klein einzustellen, musste der Bindemittelmassenstrom  $D_D$  vermindert werden. Um die Gesamtbindemittelmenge von  $M_B = 2,25 \text{ kg}$  durch 4 Düsen zu besprühen wovon jede Düse den Durchsatz  $D_D$  hat, wird für kleinere hergestellte Tröpfchen die längere Beleimungszeit  $T_B$  benötigt.

Durch den gesamten Beleimungsvorgang wird von dem ganzen Material mit der Schaufeln eine kleine Menge von dem Material entnommen und in Sprühzone geworfen.

Ähnlich wie in Abb. 33 von /Meinecke 62/ kann angenommen werden, dass die Faserplatte wie ein Förderband von der Höhe  $D_{FM} = 2,61 \text{ mm}$  (15 Faserschichten), und der Breite von  $D_S$  (wie der Durchmesser des Düsenstrahles) ständig unter der Düse mit der Geschwindigkeit von  $v_F$  (Kapitel 5.9.3) transportiert und besprüht wird.

Das Volumen des o.g. „Förderband“ d.h. Faserplatte welche innerhalb der Beleimungszeit  $T_B$  unter 4 Düsen besprüht wird, lässt sich wie folgt berechnen  $V_{BFM} = D_{FM} \cdot D_S \cdot v_F \cdot T_B \cdot 4$ . Diese Größe wird Volumen beleimter Faserplatte  $V_{BFM}$  genannt.

Da der Belemischer ein Volumen von  $V_{BM} = 2 \text{ m}^3$  hat, in dem die aufgewirbelten Fasern gleichmäßig verteilt sind, heißt es dass die gesamte Fasermenge  $Z_G = V_{BFM} / V_{BM}$  mal durch die Sprühzone durchgegangen ist.

In so fern geklärte Parameter des Modells sind in der Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: *Parameter des Modells die sich auf mehrere Durchgänge der Faserplatten durch die Sprühzone beziehen*

Name	Symbol	Einheit	Versuchs- Nummer 1	Versuchs- Nummer 3	Versuchs- Nummer 5	Versuchs- Nummer 14	Versuchs- Nummer 16
Beleimungs- zeit	$T_B$	s	450	450	225	112,5	112,5
Volumen beleimter Faserplatte	$V_{BFM}$	$\text{m}^3$	21,62	9,83	8,65	2,36	0,59
Durchgänge durch die Sprühzone	$Z_G$	mal	132	270	85	60	201

Obwohl die gesamte Fasermenge  $Z_G$  mal durch die Sprühzone gegangen ist, gibt es immer die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Faser bei jedem Durchgang in verschiedener Höhe in der Fasermatte befindet und damit eine unterschiedliche Bindemittelauftragsmenge erhält.

Um die Bindemittelauftragsmenge für mehrere Durchgänge von Fasern durch die Sprühzone auf verschiedenen Höhen in der Fasermatte zu modellieren, wurde das Programm Excel und seine Funktion zur zufälligen Auswahl zwischen zwei Nummern benutzt.

Für verschiedene reale Versuchsnummern (Einstellungen der Maschine) wurde mit Excel immer für 1000 Partikel die Bindemittelauftragsmenge modelliert.

Für jede Einstellung der Maschine (Versuchsnummer) wurde jedem Partikel die zufällige Bindemittelauftragsmenge von der Funktion  $y$ , (Gleichung (11), Abb. 55, Kapitel 5.9.4) für jeden Durchgang durch die Sprühzone zugeordnet.

Nach den für jede Einstellung (Versuchsnummer) entsprechenden Durchgängen, wurde die Bindemittelauftragsmenge für jeden Partikel summiert, und nach der Größe geordnet.

Also, für mehrere Durchgänge durch die Sprühzone  $Z_G$  wurde für jeder Faser (Partikel) von eingegebenen 1000 Fasern die Bindemittelauftragsmenge modelliert und bestimmt. Und zwar nicht rein logisch-mathematisch, sonder rechnerisch durch die Funktion der Zufallsvariable.

Es wurde nur die Bindemittelauftragsmenge für einen Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone rein mathematisch modelliert. Für mehrere Durchgänge wurde die Bindemittelauftragsmenge rechnerisch relativ genau bestimmt, da eine große Zahl von Partikeln (1000) benutzt wurde. Die Bindemittelauftragsmenge für die ganze Charge der Maschine nach der Beleimung sieht aus wie in Abb. 56 dargestellt.

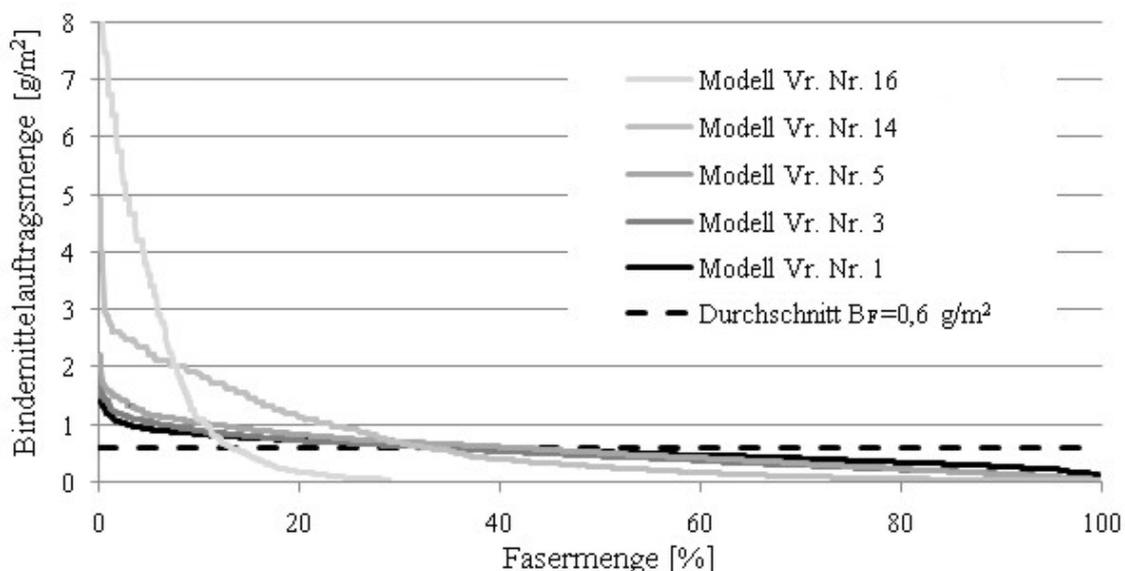


Abb. 56: Bindemittelauftragsmenge nach der Beleimung ganzer Charge, für verschiedene Einstellungen der Maschine (Versuchsnummer) modelliert

Es ist zu bemerken, dass bei verschiedenen Versuchsnummern die Kurven der Bindemittelauftragsmenge verschiedene Neigung haben. Die Bindemittelverteilung ist um so besser, je mehr sich die Kurve der durchschnittlichen Bindemittelauftragsmenge von  $B_f=0,6 \text{ g/m}^2$  annähert. Die Versuchsnummer 1 ergibt theoretisch die beste Verteilung und Versuchsnummer 16 die schlechteste Verteilung in diesem Beispiel. Bei Versuchsnummer 16 wurden nicht einmal alle Fasern beleimt, sondern nur 29% der Gesamtfasermenge.

Für jede Versuchsnummer (Einstellung der Maschine) wurden die Festigkeiten der Platten geprüft. Das wird in Kapitel 6.2 erläutert, ebenso der Vergleich des Modells mit realen durchgeführten Versuchen in Kapitel 7.2.

Die Diagramme in Abb. 55 und Abb. 56 sowie die später in Abb. 70 und Abb. 71 gezeigten sind im logischen Sinne als Überlebensfunktionen zu verstehen (komplementäre Funktionen zur Summenhäufigkeiten). Jede Faser aus einer ausgewählten Fasermenge in % ist mindestens mit der entsprechenden Bindemittelauftragsmenge in  $\text{g/m}^2$  bedeckt.

### 5.10 Rückblick auf Ökologie

Um die nach dem neuen Verfahren gewonnenen Produkte von ökologischer Seite zu bewerten, wurde eine Ökobilanz des Lebensweges des Produktes durchgeführt. Die sogenannte Life Cycle Assessment (LCA) Analyse wurde überwiegend nach der Norm /ISO 14040/ durchgeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Ökobilanz ist auf den aggregierten Energieaufwand und die Luftemissionen ( $\text{CO}_2$  Äquivalent) bezogen.

Die Ökobilanz eines Produktes sollte durch die Untersuchung eines möglichst vollständigen Lebensweges erstellt werden. Durch diese Vollständigkeit /Brune 90/ wird vermieden, dass die Produkte bevorzugt werden, die in einem Abschnitt des Prozessnetzes mit geringen Umweltauswirkungen verbunden sind, in anderen Abschnitten jedoch große Umweltauswirkung erzeugen. Die Umweltauswirkungen der einzelnen Prozesse im Lebensweg werden kumuliert und ergeben das so genannte Umweltprofil des Produktes. Die Informationen im Umweltprofil sind also von den Entstehungsorten der Umweltauswirkungen losgelöst, zu dem die Möglichkeit einer Gesamtsicht als Gewinn gegenüber steht.

Die Systemgrenzen sind in Abb. 57 dargestellt. Von allen Umweltauswirkungen welche eine detaillierte LCA Analyse umfassen (Ressourcenverbrauch, Naturraumbeanspruchung, Abbau der Ozonschicht, Treibhauseffekt, Versauerung, Sommersmog, Human- und Ökotoxizität, Lärm) wurden hier nur der Energieverbrauch und der Treibhauseffekt ( $\text{CO}_2$  Äquivalent) betrachtet.

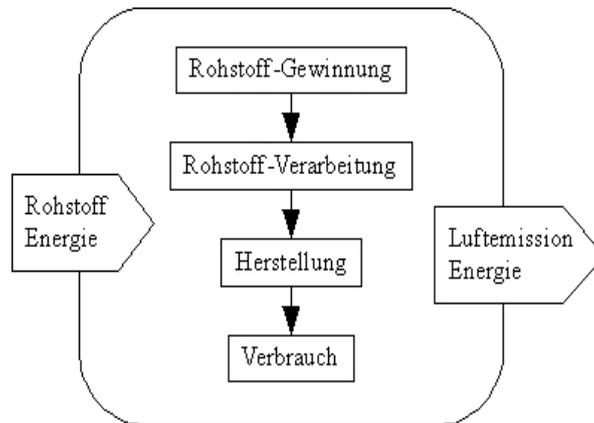


Abb. 57: Systemgrenzen für die Ökobilanz

Das nach dem neuen Verfahren hergestellte Produkt wird mit einigen herkömmlichen Produkten verglichen. Die folgenden Varianten werden betrachtet: Faserplatte aus Hanfsilage mit Stärke als Bindemittel, Faserplatte aus Hanfsilage mit Phenol-Formaldehydharz als Bindemittel, Holzfasерplatte mit Phenol-Formaldehydharz als Bindemittel und Faserplatte aus Hanf nach trockenem Verfahren gewonnen mit Phenol-Formaldehydharz als Bindemittel. Die Hanfsilage wurde hier als Verkürzung für die Mischung von Hanfsilage mit Holzhackschnitzeln im Massenverhältnis 60:40 atro (Kapitel 5.1) benutzt. Als Musterprodukt für die Berechnungen wird ein Kubikmeter MDF Platten mit der Dichte  $800 \text{ kg/m}^3$  und dem Bindemittelanteil von 10% angenommen. Die Parameter der unterschiedlichen Produktvarianten werden alle so berechnet, als ob sie in der Versuchsanlage hergestellt werden. Von verschiedenen Quellen wurden die Faktorenwerte für einige Prozessstufen übernommen oder überrechnet.

Die Prozesse bei denen der größte Unterschied in der Umweltauswirkung, bei den oben genannten Produktvarianten besteht, sind Rohstoffanbau, Transport, Trocknung und Bindemittelherstellung. Alle übrige Prozesse bei allen Produktvarianten wurden einer gemeinsamen Gruppe zugeordnet. Dazu gehören Zerfaserung/Faserreinigung, Bindemittelapplikation, Vlieslegen und Heißpressen. Für diese Prozesse bei allen Produktvarianten wurden der Energieverbrauch und der Treibhauseffekt ( $\text{CO}_2$  Äquivalent) als gleich betrachtet und summiert. Solche Betrachtung führt zu einem geringen Fehler, der im Vergleich zu den Prozessen, die wesentlichere Auswirkung haben, unbedeutend ist. Die Daten für Energieverbrauch und Treibhauseffekt ( $\text{CO}_2$  Äquivalent) für alle übrigen Prozesse sind von /Frühwald 00/ direkt übernommen oder überrechnet worden.

Bei der Trocknung ist die Annahme, dass die absolute Eingangsfeuchte von Holz 40 %, reiner Hanfsilage 67 % und Trockenhanf 15 % ist, und dass das Fasermaterial vor der Beleimung auf 5 % absolute Feuchte getrocknet ist.

## 5. Material und Methoden

In Tabelle 15, sind die Umweltfaktoren (mit Quellen) für unterschiedliche Prozesse bei Plattenherstellung, und unterschiedliche Rohstoffe angegeben.

Tabelle 15: *Umweltfaktoren gegeben (mit Quellen) für unterschiedliche Prozesse und unterschiedliche Rohstoffe bei der Plattenherstellung*

Prozess/Rohstoff	Aggregierter Energieverbrauch [MJ/m <sup>3</sup> MDF]	Luftemissionen CO <sub>2</sub> - Äquivalent [kg/m <sup>3</sup> MDF]	Quelle
Hanfanbau, Ernte, Silierung der Gesamtpflanze	1746	233	/Scholz 97/ /Meyer-Aurich 06/
Hanfanbau, Ernte, Feldtrocknung, nur für Fasernutzung	5900	741	/Scholz 97/ /Meyer-Aurich 06/
Holzianbau, Ernte	184	38	/Richter 01/
Holztransport (200km)	400	18	/Frühwald 00/
Trocknung der Hanfsilage	1584	110	/Frühwald 00/
Trocknung der Hanfsilagefasern	423	29	/Frühwald 00/
Trocknung der Holzfasern	1127	78	/Frühwald 00/
Stärkeherstellung	34	66	/PROBAS 06/
PF Harz-Herstellung	4517	140	/Richter 01/
Alle übrige Prozesse	3842	344	/Frühwald 00/

Nach diesen Angaben lässt sich ein Umweltprofil von den oben genannten Produkten erstellen für den aggregierten Energieaufwand wie in Abb. 58 gezeigt, und Luftemissionen (CO<sub>2</sub> Äquivalent) wie in Abb. 59 dargestellt.

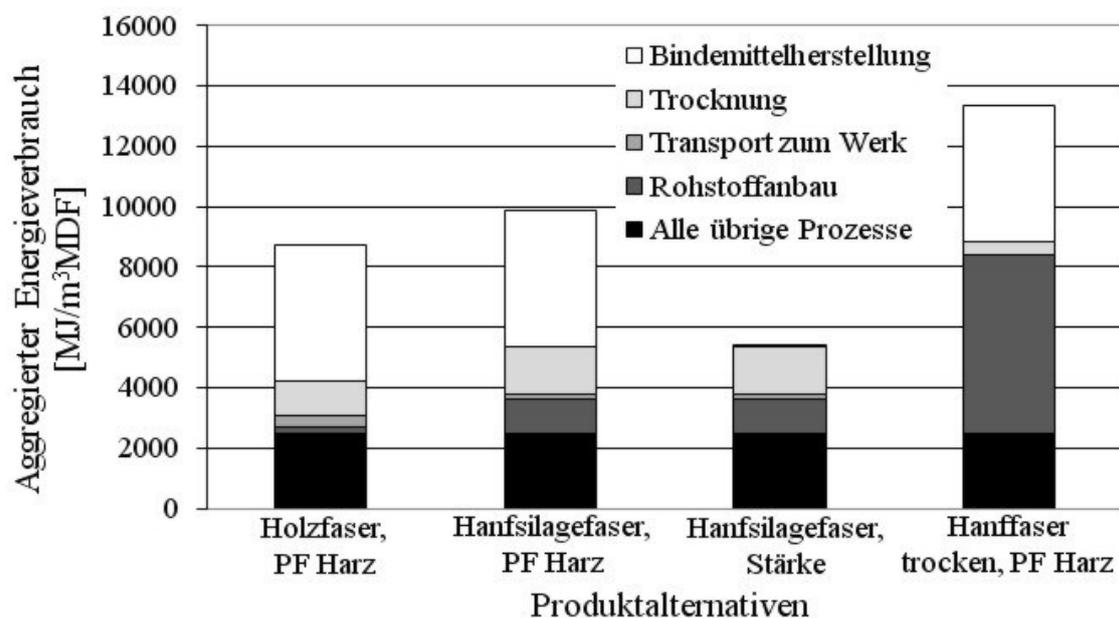


Abb. 58: *Aggregierter Energieaufwand unterschiedlicher Faserplatten*

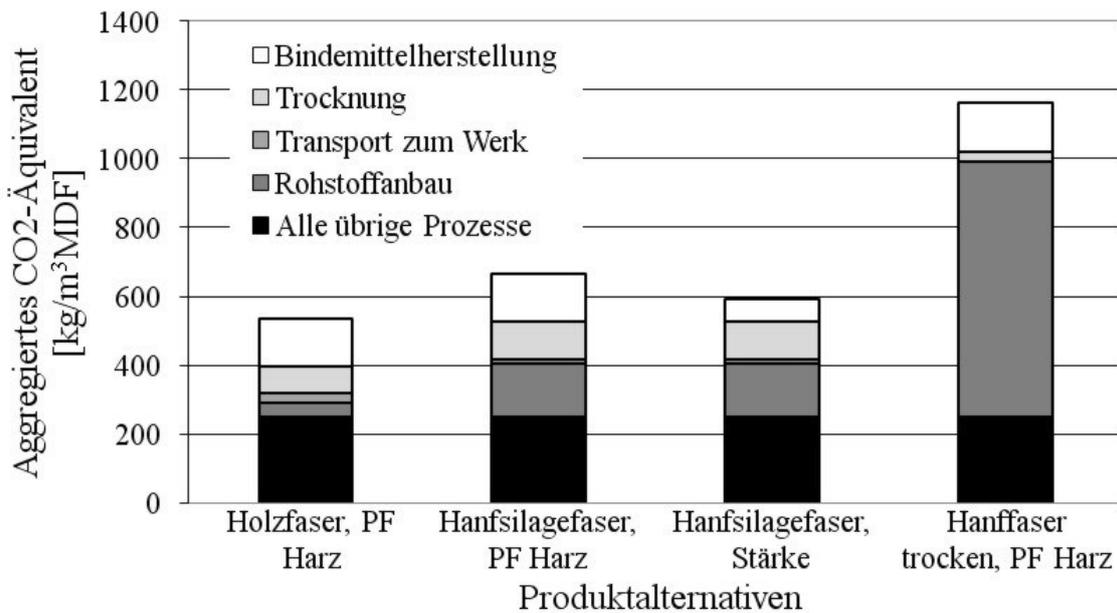


Abb. 59: Luftemissionen (CO<sub>2</sub> Äquivalent) unterschiedlicher Faserplatten

### 5.10.1 Diskussion

Nach diesen Betrachtungen lässt sich nachvollziehen, dass Holzfaserplatten weit ökologischer als Platten aus Hanf sind, obwohl der Hanf öfters in der Öffentlichkeit in den letzten Jahren als eine ökologische Ressourcenalternative genannt wurde. Dabei ist aber eine Tatsache vernachlässigt worden. Und das ist, dass Hanf von der Pflanzenmasse her 4-mal schneller wächst als Holz. Dass heißt, dass der Hanf 4-mal schneller das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre absorbiert, mit der Folge, dass der Treibhauseffekt stärker vermindert wird und die Sonnenwärme dadurch in den Pflanzen gespeichert wird, die ansonsten die Erde erwärmt hätte. Anders gesagt, setzt die Hanfpflanze die Sonnenwärme (Energie) und CO<sub>2</sub> 4-mal schneller um (als Holzgewächse).

Die Hanfpflanze kann also für gleiche Menge der Faserplatten auf 4-mal kleinerer Fläche angebaut werden, wie in Abb. 60 gezeigt. Wenn auf dem Rest der Fläche z.B. Holz gewachsen wäre, kommt dazu noch zusätzliche Energie und CO<sub>2</sub> Speicherung durch den Holzzuwachs.

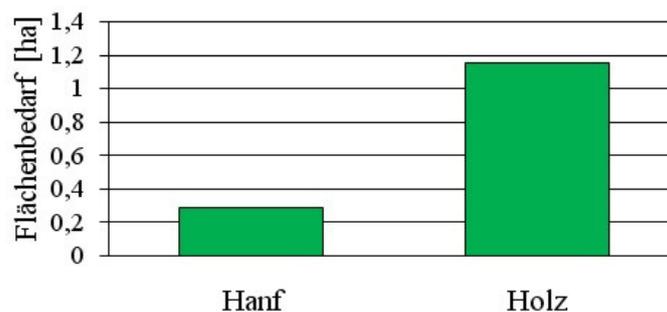


Abb. 60: Bedarf an Anbaufläche für 1 m<sup>3</sup> MDF Platte aus Hanfsilage- und Holzfaser

Strikt nach der Norm /ISO 14040/ berechnet, wird einerseits durch die Platten aus Hanfsilage mehr Energie und CO<sub>2</sub> in der Umwelt als bei Platten aus Holzfasern emittiert. Andererseits wird aber weniger Anbaufläche benötigt. Wie könnten diese unterschiedlichen Sachverhalte verglichen werden? In weiterer Diskussion wird nach eigener Überlegung gezeigt, wie der Vorteil der geringen Anbaufläche zum geringeren CO<sub>2</sub>- und Energieaufwand aufgerechnet werden kann.

In einem Kilogramm Holz wurde durch Cellulosenbildung 18 MJ Energie /Rittershofer 08/ und 1,851 kg CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gespeichert /Wald 08/. Ein Kubikmeter MDF Platte mit 800 kg/m<sup>3</sup> Dichte besteht aus 720 kg Fasern.

Wenn die o. g. CO<sub>2</sub>- und Energiewerte auf 720 kg Fasern bezogen werden (1 kg mit dem Faktor 720 multipliziert, was der Menge für 1 m<sup>3</sup> MDF Platten der Dichte 800 kg/m<sup>3</sup> entspricht) ergibt sich, dass in 1 m<sup>3</sup> der MDF Platten 12960 MJ Energie und 1333 kg CO<sub>2</sub> aus der Umwelt gespeichert werden. Diese Parameter werden noch mit dem Faktor  $\frac{3}{4}$  multipliziert, um der Differenz der Aufwuchszeiten von Hanf und Holz gerecht zu werden. Innerhalb des Wachstums dieser Menge Faser, haben die Sonnenenergie und das CO<sub>2</sub> beim Holzanbau um  $\frac{3}{4}$  mehr Einwirkung auf das Klima als beim Hanfanbau. Für 1 m<sup>3</sup> MDF Platten ergibt sich dann 9720 MJ Energie und 1000 kg CO<sub>2</sub> die im Fall von Holz nachteilhafte Einwirkung auf die Umwelt im Gegensatz zu Hanf haben. Wenn diese Werte dem Umweltprofil von MDF Platten aus Holz zugefügt werden, ergibt sich ein ganz anderes Bild (siehe Abb. 61 und Abb. 62).

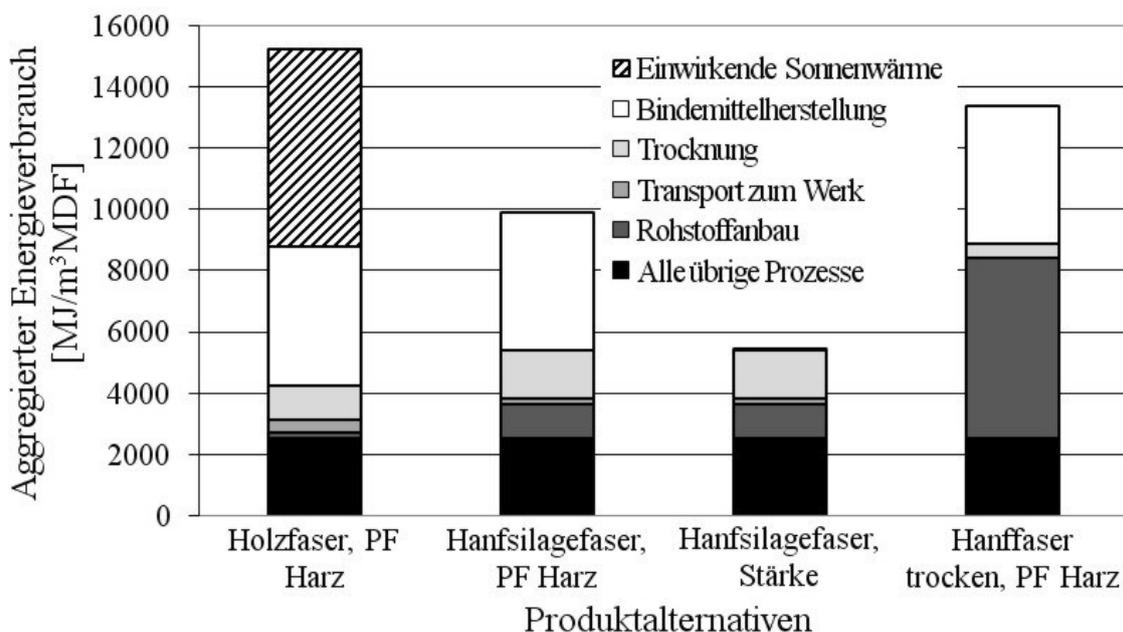


Abb. 61: Aggregierter Energieaufwand unterschiedlicher Faserplatten, wenn das langsamere Wachstum von Holz (im Gegensatz zu Hanf) mit in Betracht genommen ist

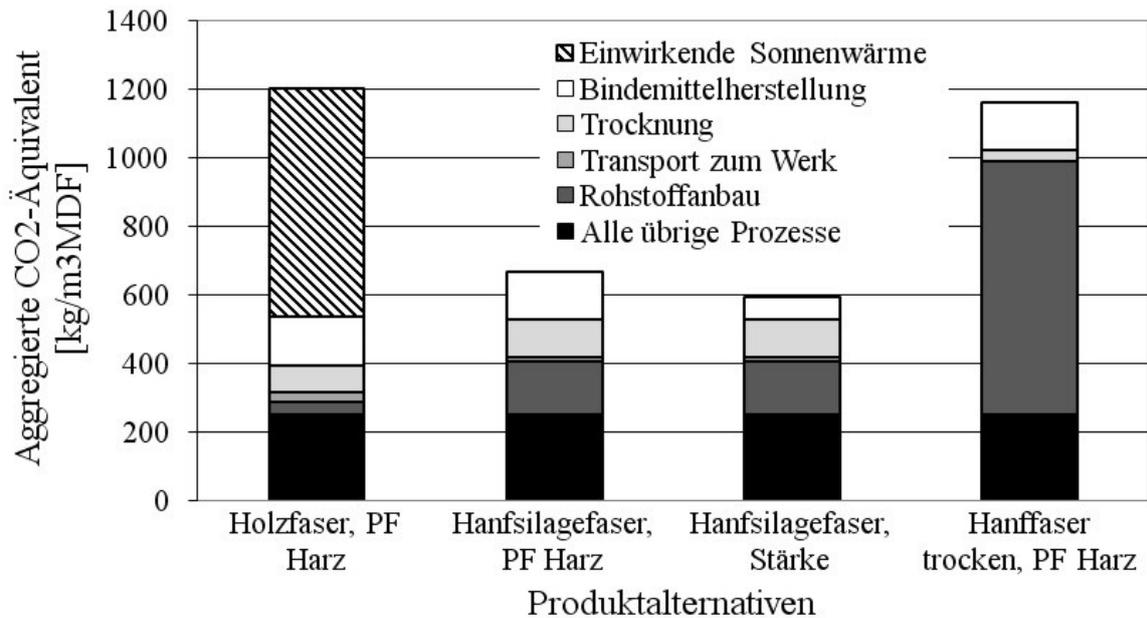


Abb. 62: Luftemissionen (CO<sub>2</sub> Äquivalent) unterschiedlicher Faserplatten, wenn das langsamere Wachstum von Holz im Gegensatz zu Hanf mit in Betracht genommen ist

Diese Überlegung gilt natürlich nur bis zu dem Zeitpunkt, wenn das Produkt noch nicht abgebaut ist und die im Produkt gespeicherte Energie und Kohlenstoff nicht wieder freigesetzt sind.

Außer diesen oben betrachteten Umweltauswirkungen, die zu einer groben Analyse reichen, sind es noch einige ökologische Aspekte bei Plattenherstellung zu erwähnen.

Die Anlagen für die Plattenproduktion belasten die Umwelt durch Staub, Gerüche und Geräusche. Einige Arten von Faserplatten können Formaldehyde und evtl. das Holzschutzmittel Pentachlorphenol nachträglich abgeben /Deppe 00/.

Die Entsorgung der Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen kann durch Recycling, Kompostierung, Pyrolyse, Verbrennung, Deponierung, oder andere Verfahren erfolgen.

Obwohl einige Produkte in der Öffentlichkeit öfter als „natürlich“ und „bioabbaubar“ etikettiert werden, können sie in einigen Prozessstufen die Umwelt genau wie die „ökologisch unerwünschten“ belasten. Einige Beispiele dafür sind in /Brune 90/ gegeben. Bei der Herstellung PHB „bioabbaubarem“ Kunststoff wird allein durch Erzeugung und Fermentation des Zuckers die Energie eingesetzt, die von ihrer Größenordnung mit derjenigen zur Herstellung der konventionellen Kunststoffe übereinstimmt (50-70 MJ/kg). Ein anderes Beispiel ist die Produktion und Weiterverarbeitung der Stärke im Sektor Abwasser. Die spezifische CSB-Fracht (chemische Sauerstoffbedarf) liegt hier mindestens in der Größenordnung der Fracht des konventionellen Polyethylens.

Der Begriff „bioabbaubar“ sollte vorsichtig verwendet werden, da z.B. auf Deponien häufig ungünstige Bedingungen für einen biologischen Abbau vorliegen /Brune 90/. In einigen Untersuchungen (Deponieaufgrabungen) ist festgestellt worden, dass die so genannten „bioabbaubaren“ organischen Produkte nahezu unverändert aufgefunden wurden.

Nach /Brune 90/ gibt es keine verallgemeinerte anerkannte Definition des Begriffes Abbaubarkeit von Kunststoffen. Sie lässt sich aber in Photoabbaubarkeit, biologische Abbaubarkeit und Wasserlöslichkeit einteilen, die in Praxis immer mit einander kombiniert wirken. Es gibt auch eine nicht anerkannte standardisierte Prüfmethode für die Abbaubarkeit. Einige spezielle dementsprechende Methoden sind durch DIN standardisiert worden wie z.B. /DIN EN 13432/ welche sich nur auf Verpackungen bezieht, oder /DIN EN 14995/ für Kunststoffe. Die Bioabbaubarkeit kann nur dann schnell und vollständig sein, wenn sie unter besonders günstigen Bedingungen abläuft (wie z.B. langer Kontakt mit Mikroorganismen), oder wenn sie in bestimmten Umweltbereichen überhaupt erfolgt (Flüsse, Seen, aerobe und anaerobe Behandlungsverfahren, Böden) /Brune 90/.

Für getrennt gesammelte nativ-organische Abfälle bietet sich die Kompostierung als Behandlungs- und Verwertungsverfahren an. Bioabbaubare Kunststoffe könnten mit der Kompostfraktion entsorgt und wieder verwendet werden /Brune 90/. Im Fall der Verbrennung solcher organisch-nativen Abfälle kann die freiwerdende Energie genutzt werden. Dabei ist eine Produktion von Schadstoffen nicht zu erwarten und wurde bisher auch nicht in der Literatur beschrieben.

### 5.11 Rückblick auf Ökonomie

Zur Analyse der Anlage im Rahmen des Projektes wurde ein ökonomisches Modell aufgestellt. Drin sind verschiedene mögliche Einflüsse variiert (Anlagenpreis, Personal, Energieverbrauch, Verbrauchsmittel, Betriebsmittel, Schichtzahl, Materialdurchsatz, Rohstoffpreis, ...), um den Preis des Endproduktes zu berechnen. In Abb. 63 sind nach diesem ökonomischen Modell die Kostenanteile der Plattenproduktion dargestellt.

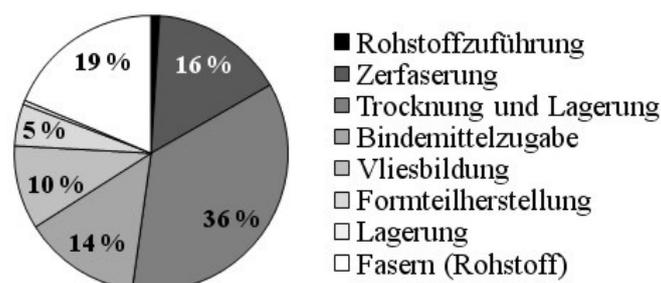


Abb. 63: Betriebsmittelkosten bei Plattenproduktion in der Pilotanlage /Grundmann 06/

In Abb. 64 sind die Preise für eine Platte bei verschiedenen Betriebsparametern der Pilotanlage dargestellt.

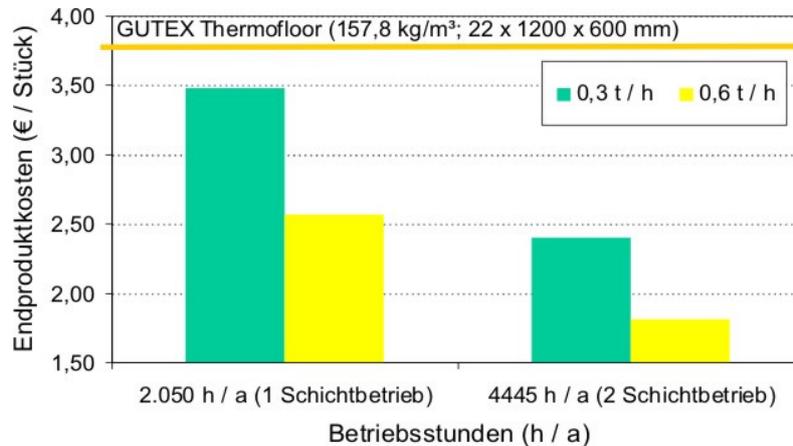


Abb. 64: Preise einer Platte bei verschiedenen Betriebsparametern der Pilotanlage (GUTEX Thermofloor - Marktgängige Trittschalldämmplatte aus Holzfaser) /Grundmann 06/

Zum Vergleich sind die Kostenanteile bei industrieller MDF Herstellung aus Holzfasern in Abb. 65 dargestellt.

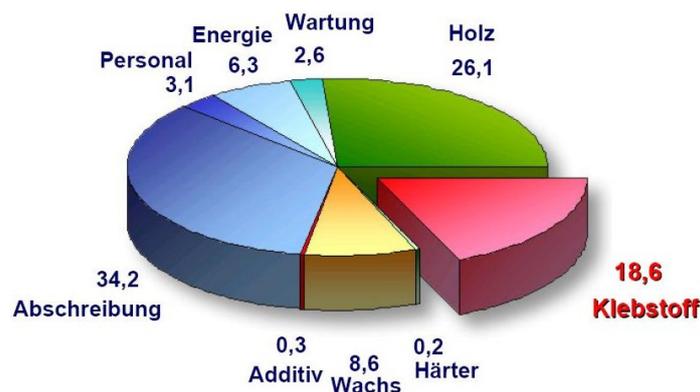


Abb. 65: Kostenanteile bei der Produktion der MDF Holzfaserplatten /Lehnen 06/

### 5.11.1. Diskussion

Obwohl die Pilotanlage im ATB eine Versuchsgröße hat, reicht sie schon aus, um kostengünstigere Faserplatten herzustellen als herkömmliche, bereits am Markt befindliche. Im Zweischichtenbetrieb kann der Preis fast halbiert werden.

Der Rohstoff Hanf ist etwas billiger als Holz, benötigt aber deutlich mehr Energie um verarbeitet zu werden (für z.B. Trocknung).

## 6. Versuchsprogramm

### 6.1 Einfluss unterschiedlicher Morphologien des Faserstoffs

Mit unterschiedlichen Siebfraktionen (siehe Kapitel 5.2) wurden Platten hergestellt, um den Einfluss der Partikelgröße und -Morphologie auf die Plattenfestigkeit zu bestimmen. Im Grunde genommen wurden zwei unterschiedliche Faserstoffe verwendet: Hanfsilage- und Holzfasern. Den Holzfasern wurde 10 % des PF Harzes beigemischt. Die Hanfsilagefasern wurden sowohl ohne Bindemittel untersucht als auch mit einem Anteil von 10 % PF Harz sowie einem 10 %-tigem Anteil Stärke (siehe Kapitel 5.3). Diese 4 Materialien wurden einmal ungesiebt und dazu jeweils noch auf 4 Fraktionen gesiebt verwendet. Dadurch wurden insgesamt 20 unterschiedliche Materialien untersucht. Aus jedem dieser 20 Faserstoffe wurden 4 Faserplatten mit je unterschiedlicher Dichte (300, 600, 900 und 1200 kg/m<sup>3</sup>) hergestellt. Das ergibt eine Anzahl von insgesamt 80 unterschiedlichen Platten. Von diesen Platten wurden je 6 Prüfkörper gesägt um die Biegefestigkeit zu messen. In der Tabelle 16 sind die oben beschriebene Versuchskombinationen aufgelistet.

Tabelle 16: Versuchskombinationen für die Faserplatten bei Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Morphologien des Faserstoffs auf die Biegefestigkeit der Faserplatten

	Material	Faserlänge [mm]	Hergestellte Dichten [kg/m <sup>3</sup> ]
Hanfsilage- fasern ohne Bindemittel	Nicht gesiebt	0,940	300, 600, 900, 1200
	Über 2 mm Siebmasche	3,156	300, 600, 900, 1200
	Über 1 mm Siebmasche	2,353	300, 600, 900, 1200
	Über 0,5 mm Siebmasche	1,203	300, 600, 900, 1200
	Unter 0,5 mm Siebmasche	0,483	300, 600, 900, 1200
Hanfsilage- fasern mit 10 % PF Harz	Nicht gesiebt	0,940	300, 600, 900, 1200
	Über 2 mm Siebmasche	3,156	300, 600, 900, 1200
	Über 1 mm Siebmasche	2,353	300, 600, 900, 1200
	Über 0,5 mm Siebmasche	1,203	300, 600, 900, 1200
	Unter 0,5 mm Siebmasche	0,483	300, 600, 900, 1200
Hanfsilage- fasern mit 10 % Stärke	Nicht gesiebt	0,940	300, 600, 900, 1200
	Über 2 mm Siebmasche	3,156	300, 600, 900, 1200
	Über 1 mm Siebmasche	2,353	300, 600, 900, 1200
	Über 0,5 mm Siebmasche	1,203	300, 600, 900, 1200
	Unter 0,5 mm Siebmasche	0,483	300, 600, 900, 1200
Holzfasern mit 10 % PF Harz	Nicht gesiebt	3,556	300, 600, 900, 1200
	Über 2 mm Siebmasche	4,908	300, 600, 900, 1200
	Über 1 mm Siebmasche	2,869	300, 600, 900, 1200
	Über 0,5 mm Siebmasche	1,506	300, 600, 900, 1200
	Unter 0,5 mm Siebmasche	0,680	300, 600, 900, 1200

## 6.2 Bindemittelverteilung

Um den Einfluss der Arbeitsparameter des Beleimmischers auf die Bindemittelverteilung zu untersuchen, wurden die folgenden Arbeitsparameter des Beleimmischers kombiniert: 4 unterschiedliche Tröpfchengrößen und 4 unterschiedliche Drehzahlen des Mixers. Das ergibt 16 Kombinationen im Rahmen der Möglichkeiten des Beleimmischers. Aus dem Material dieser 16 Kombinationen wurden Platten von je 4 verschiedenen Dichten gepresst. Die dabei variierten Parameter des Beleimmischers sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: *Arbeitsparameter des Beleimmischers bei der Untersuchung deren Einflusses auf die Bindemittelverteilung*

Versuchsnummer	Beleimmischerdrehzahl [U/min]	Tröpfchengröße [ $\mu\text{m}$ ]
1	220	90
2	160	
3	100	
4	40	
5	220	142
6	160	
7	100	
8	40	
9	220	151
10	160	
11	100	
12	40	
13	220	190
14	160	
15	100	
16	40	

Aus diesen 16 Kombinationen der Arbeitsparameter des Beleimmischers, in Tabelle 17 aufgelistet, wurden Platten der Dichten von 300, 500, 700 und 900  $\text{kg/m}^3$  aus Hanfsilagefasern hergestellt. Die so hergestellten Platten wurden auf Biegefestigkeit geprüft.

Um die Güte der Bindemittelverteilung betrachten und bewerten zu können, wurde das farbige Bindemittel (siehe Kapitel 5.6) im Anteil von 10 % zugesetzt. Bei jeder dieser in Tabelle 17 genannten 16 Chargen des Beleimmischers (je 15 kg) wurde vor der Beleimung 1 kg weiße Hanfschäben dazugegeben um das darauf gesprühte gefärbte Bindemittel nach dem Beleimen leicht betrachten zu können. Die Hanfschäben hatten eine Größe von etwa 10 x 5 mm. Aus jeder Charge wurden nach dem Beleimen 100 Schäbenstücke herausgenommen und gescannt. Von den Aufnahmen der gescannten Schäben wurde rechnerisch der prozentuale Anteil der beleimten (gefärbten) Oberfläche bestimmt, wie im Kapitel 5.6 beschrieben.

### 6.3 Unterschiedliche Bindemittel und Fasern

Die angewendeten Kombinationen bei der Faserplattenherstellung aus unterschiedlichen Materialien sind in der Tabelle 18 angegeben. Beim Pressen der Platten wurde der Dichtenbereich von  $250 \text{ kg/m}^3$  bis  $1300 \text{ kg/m}^3$  abgedeckt.

Tabelle 18: *Versuchskombinationen bei der Untersuchung der Biegefestigkeit Faserplatten aus unterschiedlichen Materialien*

Faserstoff, Bindemittel	Anzahl der Prüfkörper
Hanfsilagefaser mit 10 % PF Harz	212
Hanfsilagefaser mit 6 % PF Harz	25
Hanfsilagefaser mit 10 % Stärke	121
Hanfsilagefaser mit 10 % fermentierter Roggenkörnerreste	39
Hanfsilagefaser mit 10 % Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung	45
Hanfsilagefaser mit 10 % Rapspresskuchen	40
Hanfsilagefaser ohne Bindemittel	225
Holzfasern mit 10 % PF Harz	212
Holzfasern ohne Bindemittel	26

## 7. Ergebnisse

### 7.1 Morphologie des Faserstoffs

Versuche mit verschiedener Materialmorphologie (siehe Kapitel 6.1) wurden mit unterschiedlichen Bindemitteln, ohne Bindemittel und verschiedenen Fasern durchgeführt. Alle Ergebnisse dieser Versuche sind im Diagramm in Abb. 66 zusammengefasst. Die höchsten Festigkeiten wurden mit Faserlängen zwischen 1 und 3 mm erreicht. Die Trendlinie zeigt eine allgemeine Tendenz, dass größere Partikel eine niedrigere Festigkeit bewirken. Dieser Festigkeitsabfall beträgt im Rahmen dieser Versuche etwa 50 %, was von größter Bedeutung ist. Ein Einfluß des Schlankheitsgrades auf die Festigkeit war in diesem Beispiel nicht zu erkennen. Der Schlankheitsgrad kann von der Länge nicht als eine unabhängige Variable getrennt werden. Für jede Fraktion hat der Schlankheitsgrad einen entsprechenden zugehörigen Wert, wobei alle Fraktionen desselben Materials einen ähnlichen Schlankheitsgrad von ca. 2 bis 3 haben (siehe Kapitel 5.2).

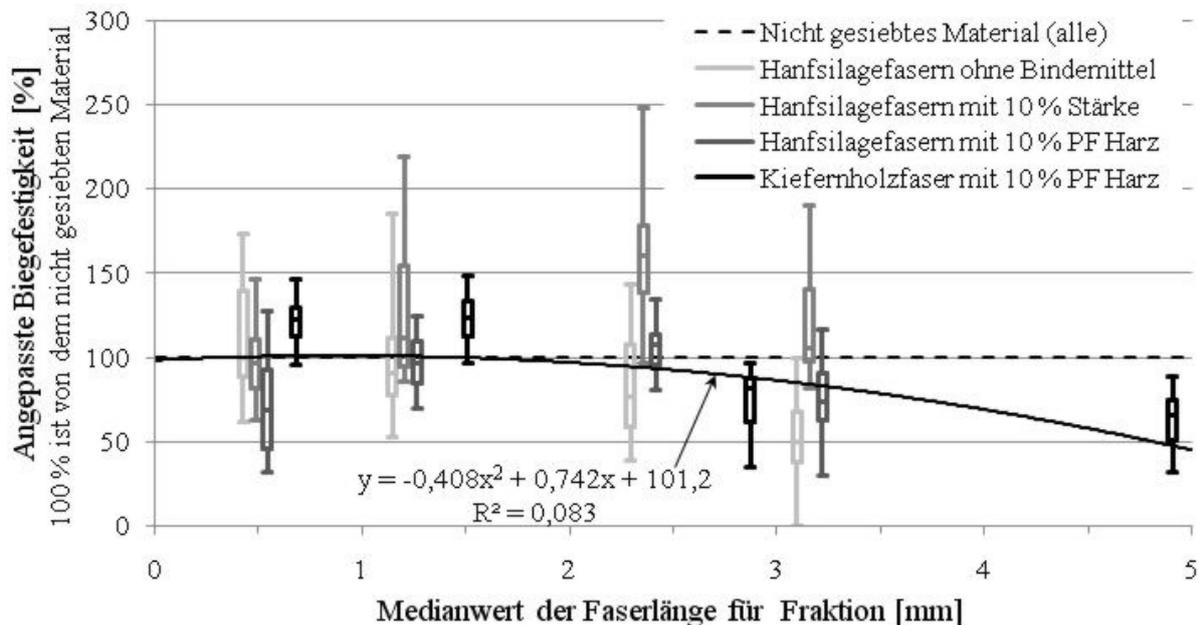


Abb. 66: Biegefestigkeiten von Faserplatten aus unterschiedlichen Fraktionen des Materials

Da die Platten ohne Bindemittel eine ähnliche Tendenz wie die mit dem Bindemittel zeigen (Abb. 66), kann die Schlussfolgerung daraus gezogen werden, dass das Bindemittel gleich an alle Materialfraktionen verteilt ist, im Gegensatz zu den Angaben einiger Autoren /Deppe 64/ und /Michanickl 05/, die behaupten, dass der Staub bis zum Vierfachen der Bindemittelmenge der groben Späne bindet und damit den Bindemittelverbrauch vergrößert (siehe Kapitel 3.1).

### 7.1.1 Diskussion

Die aus Hanfsilage hergestellten Fasern weisen eine deutlich andere Verteilung als Holzfasern auf. Sie enthalten mehr Staubanteile und sind im Durchschnitt ca. 3,5-mal kürzer als Holzfasern (Kapitel 5.1, Tabelle 4). Sie sind auch nicht so schlank wie Holzfasern.

Da die Hanfpflanzen nur 20 bis 30 % Faseranteil an der Pflanze haben und da die Hanfsilagefasern aus ganzen Pflanzen hergestellt werden, besteht der größte Teil des Staubes aus Pflanzenteilen wie Blättern, Blüten und Samen, die während der Aufbereitung zu Staub werden. Vom visuellen Eindruck her scheinen die Fasern aus Hanfsilage kein optimales Fasermaterial zu sein.

Diese Eigenschaften der so gewonnenen Hanfsilagefasern stellen aber überhaupt keinen Nachteil für die Plattenfestigkeiten dar. Die darin enthaltenen Staubanteile besitzen sehr gute Klebeigenschaften bzw. viele eigene Pflanzensäfte, die eine positive Auswirkung auf die Plattenfestigkeit haben. Dieser Vorteil von Staubanteilen kann aber bloß bei höheren Plattendichten zur Geltung gebracht werden. Nur in diesem Fall werden die staubigen Pflanzenanteile so stark gepresst, dass ihre eigenen Klebstoffe aus den Zellen herausgepresst werden und ihre Wirkung ausüben.

Für jedes Fasermaterial haben die kleineren Partikel den Vorteil, dass sie die homogene Struktur im Plattenquerschnitt formen. Aus diesem Grund wird die Festigkeit höher, aber nur insofern der Schlankheitsgrad von solchen kleinen Fasern nicht deutlich absinkt.

## 7.2 Bindemittelverteilung

Um den Einfluss der Arbeitsparameter des Belemmischers auf die Bindemittelverteilung zu untersuchen, wurden die Hanfsilagefasern (siehe Kapitel 5.1) mit 10 % Zugabe von farbigem Bindemittel (siehe Kapitel 5.6) beleimt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 67 dargestellt. Das Diagramm in Abb. 67 dient zur Darstellung der allgemeinen Verhältnisse der Ergebnisse aller Versuche untereinander und nicht der Beschreibung einer empirischen Funktion. Entlang der horizontalen Achse "Einstellungsparameter" sind die Ergebnisse nach den Festigkeitswerten geordnet. Die Festigkeit bei zwei Versuchen kann bei einer Dichte von einem Versuch höher werden und bei anderer Dichte umgekehrt. Deswegen wurden als Kriterien für die Anordnung der Versuche im Diagramm die Summe der Festigkeiten von allen Dichten des Versuchs gewählt. Ganz links ist der Versuch mit der größten Festigkeit der Faserplatten (Summe der Festigkeiten aller Dichten) dargestellt und nach rechts nimmt die

## 7. Ergebnisse

Festigkeit ab. Hier ist es nicht von Bedeutung die Unterschiede zwischen einzelnen Versuchen zu beachten sondern den allgemeinen Trend. Wie im Diagramm in Abb. 67 gezeigt, besteht die Tendenz, dass die Festigkeit der Platten mit der Steigerung der Drehzahl der Wellen und Verringerung der Tröpfchengrößen zunimmt.

Die Festigkeit bei so hergestellten Platten hat einen deutlich geringeren Wert als die der üblichen Faserplatten. Der Grund dafür ist, dass das Bindemittel vorher mit Farbe gemischt wurde, womit seine Bindefähigkeit teilweise verloren ging. Auch wurden zu der Charge Hanfschäben dazugegeben (Im Verhältnis 1:10), um die Bindemittelauftragsmenge zu messen. Die dazugegebenen Schäben hatten eine Größe von etwa 10x5 mm was deutlich größer und größer als die angewendeten Hanfsilagefasern ist, und damit die Struktur der später gepressten Platten stört.

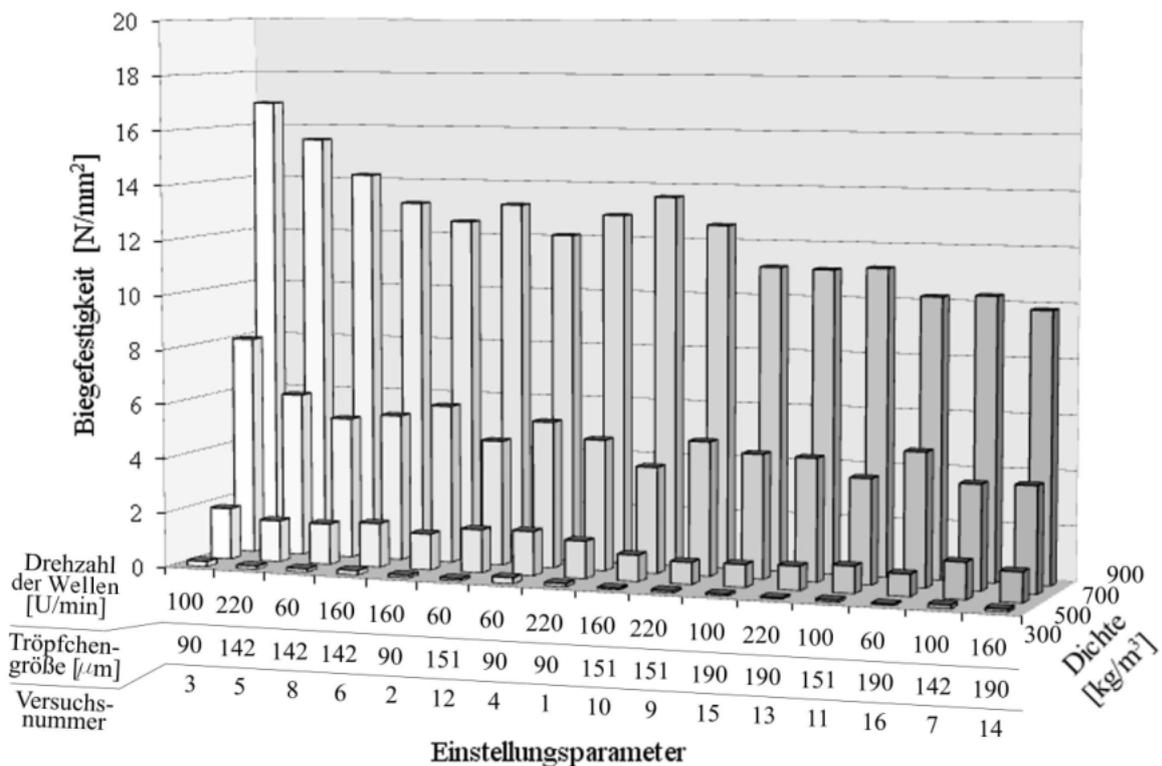


Abb. 67: Biegefestigkeit von Hanfsilagefaserplatten (mit gefärbten Bindemittel beleimt, siehe Kapitel 5.6) bei verschiedenen Plattendichten und Versuchsreihen

Bei diesen Versuchen wurden die Werte für ein optimales Maschinenregime festgestellt, was in diesem Fall bedeutet: die größte Drehzahl des Beleimmischers und die kleinste mögliche Tröpfchengröße. Die Güte der Verteilung kann auch vom visuellen Eindruck her gesehen werden. Im Foto (Abb. 68) werden Faseroberflächen mit guter Bindemittelverteilung (Versuchsnummer 1, ohne Leimflecken), und die mit schlechter Bindemittelverteilung (Versuchsnummer 16, mit vielen großen Leimflecken) gezeigt.



Abb. 68: Platten mit guter Bindemittelverteilung (links aus Versuchsnummer 1 hergestellt),  
und mit schlechter Bindemittelverteilung (rechts, aus Versuchsnummer 16 hergestellt)

Wie im Kapitel 6.2 geschrieben, wurden aus dem Material einiger Versuchen nach der Beleimung ca. 100 Schäben entnommen, um den prozentualen Anteil der beleimten (gefärbten) Oberfläche zu messen. Eine beleimte Schäbe ist in Abb. 69 gezeigt.



Abb. 69: Eine Schäbe der Dimension 12,6 x 3,5mm aus dem Versuchsnummer 1, mit rot gefärbtem Bindemittel besprüht

Auf rechnerischem Weg wurde der prozentuale Anteil der gefärbten Fläche auf den Schäben ermittelt und zu der Bindemittelauftragsmenge in  $\text{g/m}^2$  umgerechnet. Bei einigen Versuchen ist die Bindemittelverteilung unterschiedlich. In Abb. 70 ist Funktion der Bindemittelauftragsmenge für verschiedene Versuche dargestellt. Für diese Darstellung wurden die Versuche 1, 3, 5, 14 und 16 ausgewählt, bei denen der Unterschied der Festigkeit und der Bindemittelverteilung deutlich zu sehen war. Für die Parameter dieser Versuchsnummer wurde auch die Bindemittelauftragsmenge im Kapitel 5.9.5 modelliert.

An dem Bild ist deutlich zu sehen, dass wenige Partikel mit viel Bindemittel besprüht werden und viele Partikel mit weniger Bindemittel besprüht werden. Das Ergebnis sieht ähnlich aus wie in Kapitel 5.9.5 angenommen und beschrieben. Bei den Versuchen (z.B. 1 und 3), bei

denen die Bindemittelverteilung in diesem Kapitel als „gut“ mit dementsprechenden höheren Plattenfestigkeitswerten gekennzeichnet wurde, verläuft die Kurve der Bindemittelauftragsmenge etwas flacher. D. h., dass das Bindemittel gleichmäßiger auf alle Partikel verteilt ist. Bei den Versuchen (z.B. 14 und 16) bei denen die Bindemittelverteilung in diesem Kapitel als „nicht ganz gut“ mit dementsprechenden niedrigeren Plattenfestigkeitswerten gekennzeichnet wurde, verläuft die Kurve der Bindemittelauftragsmenge etwas steiler.

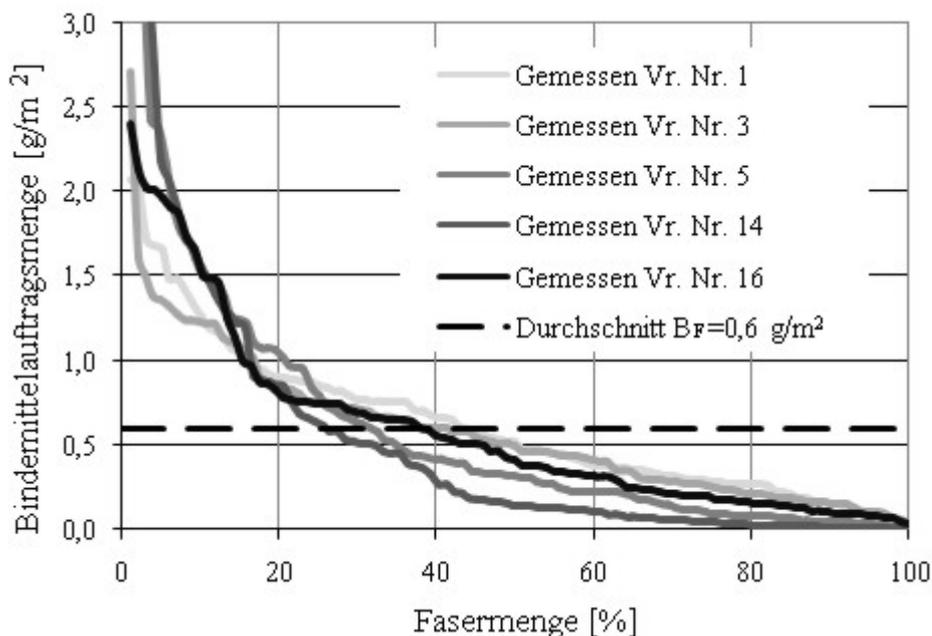


Abb. 70: Bindemittelauftragsmenge für verschiedene Versuchsnummer

### 7.2.1 Diskussion

Mit der richtigen Einstellung der Arbeitsparameter des Belemmischers lässt sich die Festigkeit der Faserplatten beeinflussen und deutlich erhöhen. Bei dieser Ausführung des Belemmischers bedeutet das eine Drehzahl der Wellen im Bereich von 160 bis 220 U/min und die kleinstmögliche Tröpfchengröße. Die kleinsten Tröpfchen mit eingefärbtem Bindemittel (dadurch auch etwas dickflüssig) die hier erzeugt wurden, haben einen Medianwert des Durchmessers von ca. 228  $\mu\text{m}$  volumengewichtet und ca. 45  $\mu\text{m}$  anzahlgewichtet, wie im Kapitel 5.5 erläutert.

Ein Vergleich des Modells mit den durchgeführten Messungen ist in Abb. 71 dargestellt. Die Bindemittelauftragsmenge hat einen Verlauf wie im Modell (Kapitel 5.9.5) angenommen.

Durch Einstimmen der variablen Parameter des Modells auf die gemessene Bindemittelauftragsmenge, wurde das Modell den realen Ergebnissen angepasst. Einmal

## 7. Ergebnisse

eingestimmt, kann das Modell benutzt werden, um die Bindemittelverteilung bei anderen Arbeitseinstellungen des Beleimmischer im Voraus abzuschätzen. Das gilt auch für andere ähnliche oder unterschiedliche Beleimmischer.

Durch die oben beschriebene Optimierung der Bindemittelverteilung werden die Bindemittelmengen vermindert. D.h., dass wenn die geforderte Festigkeit erreicht werden soll, diese mit optimalen Arbeitsparametern des Beleimmischer und dementsprechend niedrigen Bindemittelmengen erreicht werden kann.

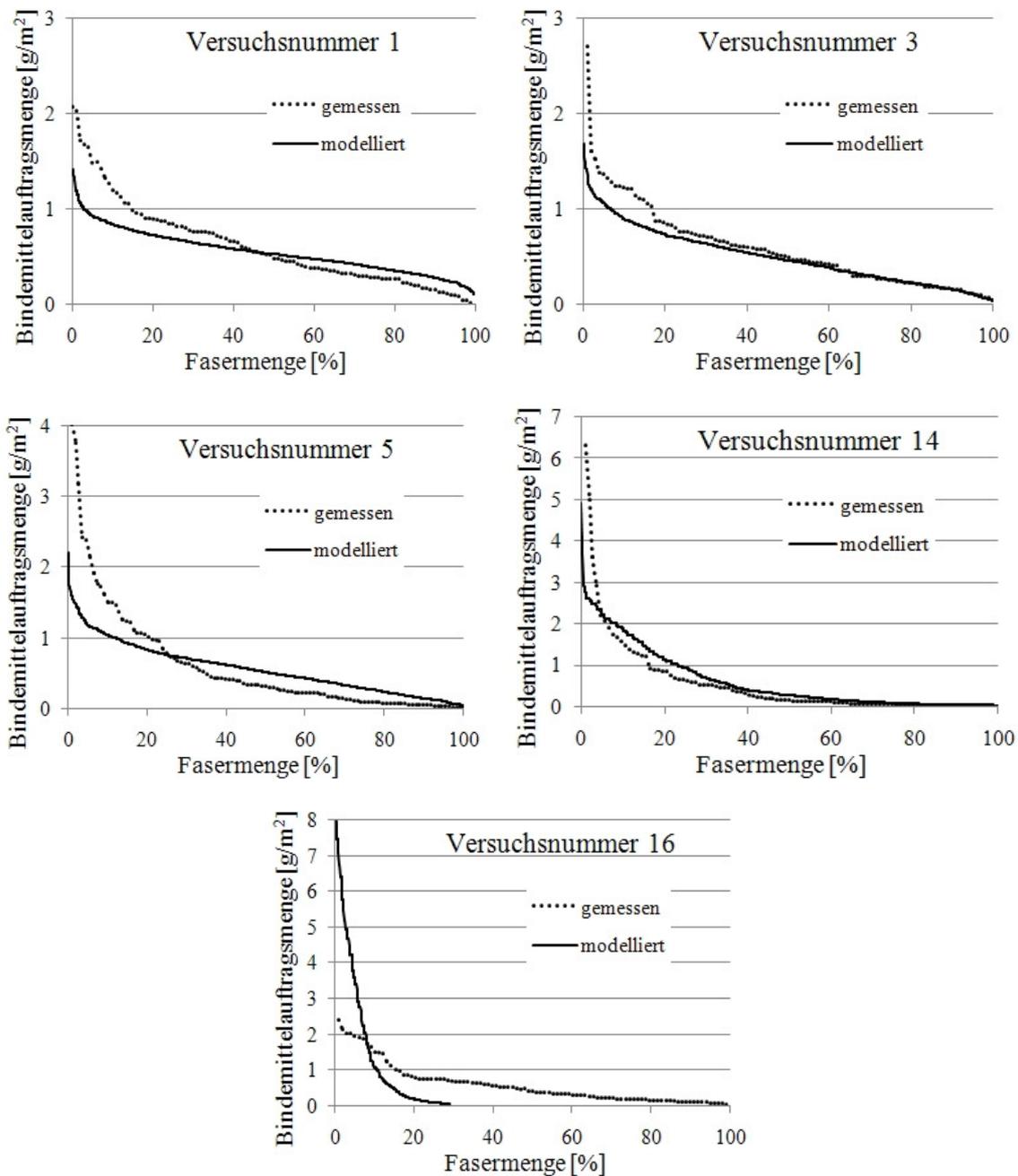


Abb. 71: Funktion der Bindemittelauftragsmenge: Vergleich des Modells und experimentellen Ergebnisse für verschiedene Versuchsnummer

### 7.3 Unterschiedliche Bindemittel und Fasern

Was schließlich die alternativen Bindemittel und Fasern betrifft, wurden die Platten mit vorher bestimmten optimalen Arbeitsparametern des Beleimmischers hergestellt. Die Faserplatten wurden jedoch mit unterschiedlichen Bindemitteln und Fasern erzeugt. Diese Versuche umfassen etwa 1000 Einzelmessungen und sind in Abb. 72 dargestellt.

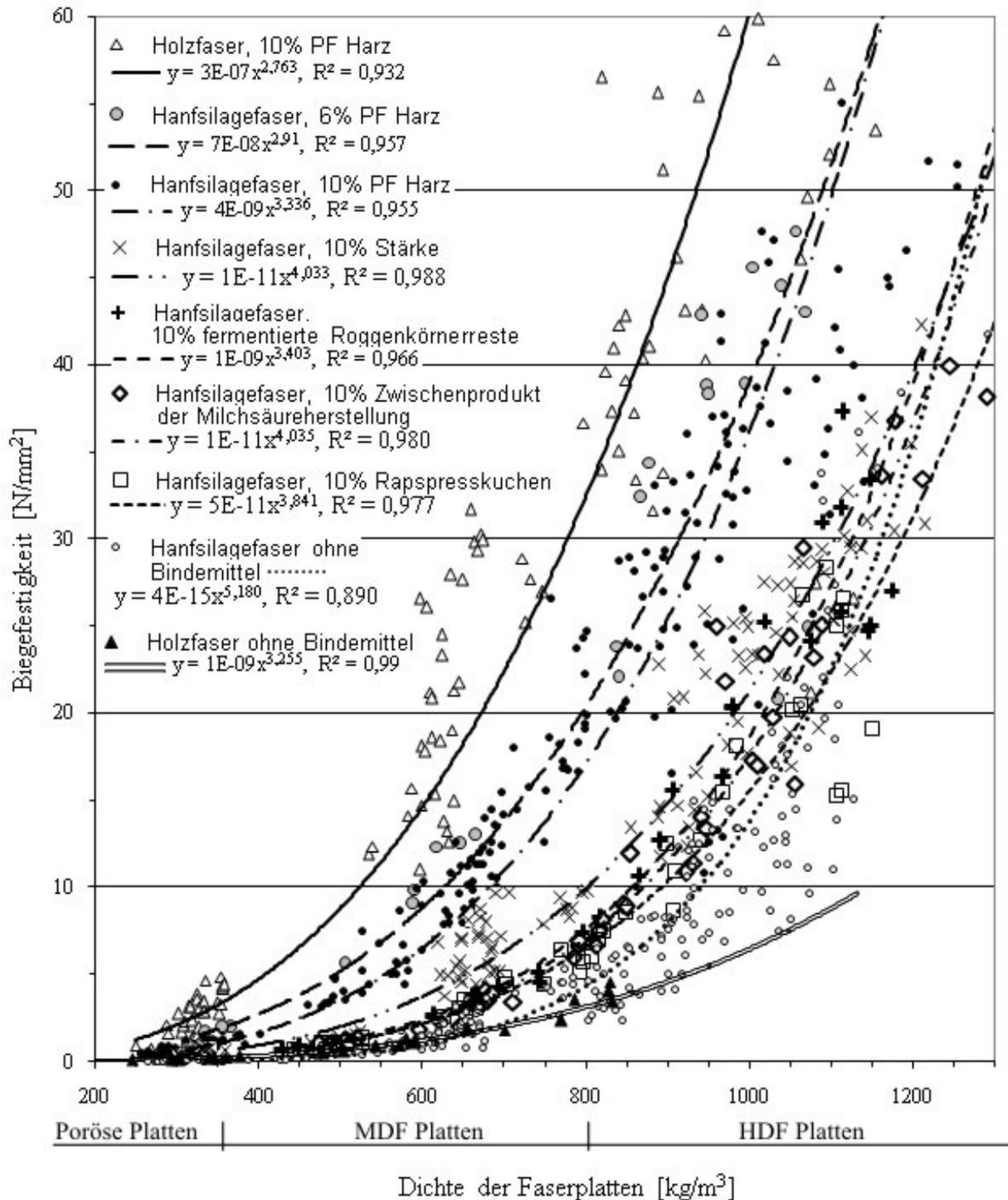


Abb. 72: Biegefestigkeit der Faserplatten aus unterschiedlichen Materialien

## 7. Ergebnisse

Damit die erreichten in Abb. 72 dargestellten Festigkeiten mit den von der /DIN EN 622/ vorgeschriebenen Anforderungen verglichen werden können, ist die Ableitung dieser Norm in der Tabelle 19 angegeben. Die Mindestanforderungen an die Biegefestigkeit der hergestellten Plattenarten je nach der Anwendung sind dort aufgelistet.

Tabelle 19: *Ableitung der /DIN EN 622/, Mindestanforderungen an die Biegefestigkeit für unterschiedliche Plattenarten nach der Anwendung*

Plattenart	Anwendung		Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
	Zwecke	Bereich	
Harte Faserplatten Dicke > 5,5 mm	allgemeine	trocken	25
	allgemeine	feucht	30
	allgemeine	außen	32
	tragende	trocken	30
	tragende	feucht	34
	tragende	außen	38
Mittelharte Faserplatten Dicke ≤ 10 mm	allgemeine	trocken	15
	allgemeine	feucht	18
	allgemeine	außen	18
	tragende	trocken	18
	tragende	feucht	21
	tragende	außen	20
	hoch belastbare tragende	feucht	28
MDF (nach Trockenverfahren) Dicke 9 < 12 mm	allgemeine	trocken	22
	allgemeine	feucht	26
	tragende	trocken	27
	tragende	feucht	32
Poröse Faserplatten Dicke ≤ 10 mm	allgemeine	trocken	0,9
	allgemeine	feucht	1,1
	allgemeine	außen	1,2
	tragende	trocken	1,2
	tragende	feucht	1,3

## 7. Ergebnisse

In der Tabelle 20 sind die /DIN EN 622/ Anforderungen aufgelistet, die die Faserplatten aus diesem Versuch erfüllen. Es sind jeweils die höchsten Anforderungen für die Faserplatten entsprechend der jeweiligen Anwendung und Art angegeben.

Tabelle 20: Erfüllung der jeweils höchsten /DIN EN 622/ Anforderungen der hergestellten Faserplatten

Platten hergestellt aus Faser, Bindemittel	Plattenart			
	Harte Faserplatten Dicke > 5,5 mm	Mittelharte Faserplatten Dicke ≤ 10 mm	MDF (nach Trockenverfahren) Dicke 9 < 12 mm	Poröse Faserplatten Dicke ≤ 10 mm
Holzfaser, 10 % PF Harz	ab 850 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	ab 750 kg/m <sup>3</sup> über 28 N/mm <sup>2</sup> hoch belastbare, tragende Zwecke, Feuchtbereich	ab 780 kg/m <sup>3</sup> über 32 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	ab 200 kg/m <sup>3</sup> über 1,3 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich
Hanfsilagefaser, 6 % PF Harz	ab 1000 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	gegen 800 kg/m <sup>3</sup> über 21 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	ab 300 kg/m <sup>3</sup> über 1,3 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich
Hanfsilagefaser, 10 % PF Harz	ab 1030 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	gegen 800 kg/m <sup>3</sup> über 18 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Trockenbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Hanfsilagefaser, 10 % Stärke	ab 1160 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Hanfsilagefaser, 10 % fermentierte Roggenkörnerreste	ab 1180 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Hanfsilagefaser, 10 % Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung	ab 1220 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Hanfsilagefaser, 10 % Rapspresskuchen	ab 1220 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Hanfsilagefaser ohne Bindemittel	ab 1250 kg/m <sup>3</sup> über 38 N/mm <sup>2</sup> tragende Zwecke, Feuchtbereich	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt
Holzfaser ohne Bindemittel	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt	keine Anforderungen erfüllt

### 7.3.1 Diskussion

Die Platten aus Holzfasern mit 10-prozentigem Anteil des PF Harzes sind hier als herkömmliches Produkt und als Vergleich zu den alternativen Platten aus Hanfsilagefasern angenommen. Letztere haben in allen Dichtebereichen die höchsten Anforderungen an die Biegefestigkeit übertroffen (siehe Tabelle 20). Die Holzfasern, die nach dem beschriebenen Verfahren hergestellt wurden, weisen selbst eine bessere Morphologie auf als die Fasern aus Hanfsilage (siehe Kapitel 5.1). Entgegen der Holzfaser besitzt die Hanfsilagefaser jedoch eigene Klebstoffe (siehe Kapitel 3.4) mit vorteilhafter Auswirkung insbesondere bei höchsten Dichten (über  $1100 \text{ kg/m}^3$ , siehe Tabelle 20).

Die bei herkömmlichem Einsatz von PF Harz hergestellten Platten aus Hanfsilagefasern wiesen im Vergleich zu Holzfaserplatten eine um etwa 30% geringere Festigkeit auf. Dabei darf die Tatsache nicht vernachlässigt werden, dass diese Platten die /DIN EN 622/ Normwerte für die Biegefestigkeit für tragende Zwecke im Feuchtbereich in allen Dichtebereichen (für harte, mittelharte und poröse Faserplatten, respektive über  $38 \text{ N/mm}^2$ ,  $21 \text{ N/mm}^2$  und  $1,3 \text{ N/mm}^2$ ) erfüllen. Die Normwerte für die MDF Platten nach dem Trockenverfahren hergestellt, wurden nicht erreicht (mindestens  $22 \text{ N/mm}^2$  für allgemeine Zwecke im Trockenbereich). Die Platten aus Hanfsilagefasern und mit nur 6-prozentigem Bindemittelanteil weichen im Gegensatz zu den Platten mit 10-prozentigem Bindemittelanteil nur unwesentlich ab. Folglich können diese durch die Einsparung von bis zu 40% des Bindemittels billiger und ökologisch schonender hergestellt werden.

Bei allen Platten, die mit natürlichen Bindemitteln hergestellt sind, liegen die mechanischen Eigenschaften in einem einheitlichen Bereich (siehe Abb. 72). In Dichtebereichen von mittelharten und porösen Platten werden gar keine Normwerte erreicht. Nur bei sehr hohen Dichten (über  $1200 \text{ kg/m}^3$ , siehe Abb. 72, Tabelle 20) erfüllen diese Platten die /DIN EN 622/ Anforderung an Biegefestigkeit für tragende Zwecke im Feuchtbereich (über  $38 \text{ N/mm}^2$ ).

Die Stärke weist etwas bessere Eigenschaften als die anderen natürlichen Bindemittel auf. Der Rapspresskuchen hat am wenigsten als Bindemittel bewirkt. Mit den fermentierten Roggenkörnerresten und dem Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung als Bindemittel wurden beinahe gleiche Festigkeiten erreicht.

Bei dem Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung wurden die Bedingungen für eine komplette Polymerisation nicht ganz erfüllt, doch die Ergebnisse zeigen (Kapitel 7.3), dass die Milchsäurelösung als Bindemittel angewendet werden kann, d.h. teilweise polymerisiert.

Wenn die Platten ganz ohne Bindemittel gepresst sind, ist die Hanfsilagefaser unbestritten vorteilhaft im Vergleich zu der Holzfaser.

# 8. Schlußfolgerungen

Die gesamte Anlage wurde ausgearbeitet, getestet und optimiert mit nur noch wenigen verbliebenen Möglichkeiten für eine Verbesserung. Es sind viele Einflussparameter im Spiel, die alle nicht so leicht im Zusammenhang mit einander zu betrachten sind.

Bei den aus Hanfsilagefasern hergestellten Platten wurde gezeigt, dass die nach dem neuen Verfahren hergestellten Produkte unter Einsatz synthetischen Bindemittels eine annähernde Qualität zu der von herkömmlichen Produkten haben. Die Platten erfüllen die /DIN EN 622/ Anforderung an die Biegefestigkeit für tragende Zwecke im Feuchtbereich in allen Dichtebereichen (für harte, mittelharte und poröse Faserplatten, respektiv über  $38 \text{ N/mm}^2$ ,  $21 \text{ N/mm}^2$  und  $1,3 \text{ N/mm}^2$ ). Die Normwerte für die MDF Platten, nach dem Trockenverfahren hergestellt, wurden nicht erreicht (mindestens  $22 \text{ N/mm}^2$  für allgemeine Zwecke im Trockenbereich).

Unter herkömmlichen 10-prozentigem Einsatz von PF Harz haben die Platten aus Hanfsilagefasern um etwa 30 % niedrigere Festigkeiten als die Holzfaserplatten. Andererseits kann bei den Platten aus Hanfsilagefasern der Bindemittelanteil um ca. 40 % vermindert werden, ohne dabei an Festigkeit zu verlieren, wodurch sich ökologische und ökonomische Vorteile ergeben.

Wenn die Platten ganz ohne Bindemittel gepresst sind, ist die Hanfsilagefaser unbestritten vorteilhaft im Vergleich zu der Holzfaser. Das Fasermaterial aus Hanfsilage stammt von der ganzen Pflanze. Das bedeutet, dass auch der Inhalt von vielerlei organischen Substanzen und Pflanzensäften, der bei der Heißpressung neue undefinierte chemische Verbindungen bilden kann, auch polymerisiert. Bei sehr hohen Dichten (über  $1200 \text{ kg/m}^3$ ) erfüllen die bindemittelfreien Platten aus Hanfsilagefasern sogar die /DIN EN 622/ Anforderung an die Biegefestigkeit für tragende Zwecke im Feuchtbereich (über  $38 \text{ N/mm}^2$ ).

Bei allen Platten, die mit natürlichen Bindemitteln hergestellt werden, liegen die mechanischen Eigenschaften in einem einheitlichen Bereich deutlich niedriger als bei den mit synthetischen Bindemittel hergestellten. Nur bei sehr hohen Dichten (über  $1100 \text{ kg/m}^3$ ) erfüllen diese Platten die /DIN EN 622/ Anforderung an die Biegefestigkeit für tragende Zwecke im Feuchtbereich (über  $38 \text{ N/mm}^2$ ).

Durch die Verarbeitungslinie wird eine solche Materialmorphologie erreicht, die genau in dem Bereich liegt, in dem die höchste Festigkeit erzielt werden kann. Bei den Hanfsilagefasern wurde der höchste Schlankheitsgrad 2,01 und bei Holzfasern 2,88 erreicht

(volumengewichtete Medianwerte). Die Mahlwerke können präzise eingestellt werden, um genau die Partikelgröße im optimalen Bereich zu erzielen.

Bei der Materialmorphologie hat nicht nur der Schlankheitsgrad einen entscheidenden Einfluss auf die Platteneigenschaften sondern auch die Größe der Fasern. Für jedes Material sind die kleineren Partikel vorteilhaft, da sie die homogene Struktur in der Platte formen. Aus diesem Grund wird die Festigkeit höher, aber nur wenn der Schlankheitsgrad von solchen kleinen Fasern nicht deutlich absinkt. Bei den Hanfsilagefasern kommt zusätzlich zum Ausdruck, dass die kleinsten Partikel am meisten pflanzeneigene Klebstoffe enthalten.

Mit der richtigen Einstellung der Arbeitsparameter des Belemmischers lässt sich die Festigkeit der Faserplatten beeinflussen und deutlich erhöhen. Es ergibt sich eine annähernde Übereinstimmung zwischen modellierten und theoretischen Werten für die Bindemittelauftragsmenge. Das komplett neuentwickelte Modell kann benutzt werden, um die Bindemittelverteilung bei anderen Arbeitseinstellungen des Belemmischers im Voraus abzuschätzen. Das gilt auch für andere Typen von Belemmischern. Durch die Optimierung der Bindemittelverteilung wurden die Bindemittelmengen vermindert. Dies bedeutet, wenn die geforderte Festigkeit erreicht werden soll, kann diese mit optimalen Arbeitsparametern des Belemmischers und dementsprechend niedrigen Bindemittelmengen erreicht werden.

Die Faserplatten aus Hanfsilage sind nach einigen Gesichtspunkten der ökologischen Bewertung besser als Holzfaserplatten und nach einigen nicht. Bei mehreren Kriterien, die gegeneinander sprechen, ist es nicht leicht eine verallgemeinerte Beurteilung zu treffen.

Durch eine geeignete ökonomische Bewertungsmethode wurde gezeigt, dass die höherwertigen Produkte der bestehenden Anlage, die sogar Pilotcharakter hat, schon jetzt im Bereich zu den konkurrierenden Massenprodukten liegen, die der Markt derzeit anbietet.

Zukünftig bietet sich noch eine Vielzahl von Möglichkeiten für eine weitere Aufwertung und Optimierung. Die Morphologie der verwendeten Fasern, d.h. ihr Schlankheitsgrad, kann durch die Auswahl der richtigen Kombination von unterschiedlichen Materialien und deren Eingangsfeuchte vor der Zerkleinerung verbessert bzw. erhöht werden. Mit dem hier entwickelten Modell werden die optimalen Arbeitsparameter bei der Bindemittelapplikation teils rechnerisch ermittelt. Das Modell selbst kann im theoretischen Sinne mathematisch weiter verfeinert werden. Was die alternativen Bindemittel betrifft, so wurde bisher nur ein Bruchteil der Rohstoffe in Betracht gezogen, die die Natur zu bieten hat.

## 9. Zusammenfassung

In der Patentanmeldung /ATB 97/ des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem vorrangig Naturfaserpflanzen unter geringem Energie- und Ressourcenverbrauch zu hochwertigen Endprodukten verarbeitet werden können (Dämmplatten, Halbzeuge, Verpackungstoffen, Verkleidungen, usw.).

Für die markttaugliche Herstellung der Platten und Formpressteile in dieser Anlage wurden die Grundlagenuntersuchungen und Optimierungen zu den Prozessstufen d.h. Rohstoffauswahl, Partikelauflösung, Fasertrocknung, Beileimung des Faserstoffes und Pressformen durchgeführt.

Unter besonderer Berücksichtigung der Beileimung des Faserstoffes konnte durch Versuche und Modellierung die Menge des verwendeten Bindemittels gesenkt sowie der übliche Einsatz von Kunststoffharz als Bindemittel durch den Einsatz von natürlichen und bioabbaubaren Materialien pflanzlicher Herkunft ersetzt werden. So wurden gesundheitliche Risiken in Produktion und Gebrauch reduziert und die Umweltverträglichkeit und Recyclingfähigkeit der Endprodukte erheblich gesteigert.

Zur Herstellung konkurrenzfähiger Produkte wurden auch die technischen Parameter etablierter ähnlicher Materialien erreicht.

Diese Arbeit ist im unmittelbaren Zusammenhang mit wirtschaftlichen und ökologischen Analysen durchgeführt. Eine fachdisziplin- und branchenübergreifende Betrachtung der Produktherstellung verknüpft u. a. die Bereiche Landwirtschaft, Ökologie, Betriebswirtschaft, Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Kreislauf- und Abfallwirtschaft.

## 10. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: *Mögliche Endprodukte und Halbzeuge aus der Konservatlinie, /Müller 97/ angepasst*
- Abb. 2: *Verfahrensschema der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) /Pecenka 07a/*
- Abb. 3: *Dreidimensionale Darstellung der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)*
- Abb. 4: *Eingangsmaterial (Hanfsilage) für die Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)*
- Abb. 5: *Faserplatte (Prüfkörper) aus Hanfsilage in der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) hergestellt*
- Abb. 6: *Innentürverkleidung aus beleimter Holzfasern in der Pilotanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Mitarbeit mit Industriepartner*
- Abb. 7: *Türverkleidung für Autos /Flake 2003/*
- Abb. 8: *Versuchsanlage im Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)*
- Abb. 9: *Schema der Flachsstängel und Faserstruktur /Bismarck 05/*
- Abb. 10: *Verbindung der Cellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand /Deppe 96/*
- Abb. 11: *Biegefestigkeit der Platten in Abhängigkeit von der Spandicke (Dichte  $700 \text{ kg/m}^3$ ,  $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ ) /Madlin 75/*
- Abb. 12: *Biegefestigkeit der Platten in Abhängigkeit vom Staubgehalt in den Spänen (Dichte  $700 \text{ kg/m}^3$ ,  $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ ) /Madlin 75/*
- Abb. 13: *Summenbilder aus einer Spananalyse an industriell hergestellten Kiefer-Schneidspänen /May 73/*
- Abb. 14: *Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Faserplatten vom Phenolharzanteil (Platten aus Eigenherstellung, Soll-Dichte  $900 \text{ kg/m}^3$ , Dicke etwa 3 mm) /Klabunde 98/*
- Abb. 15: *Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Jutefaserplatten von der Beleimungsfeuchte bei Stärken verschiedenen Molekulargewichts, Stärkeanteil 14,2 %, Presszeit 180s (Platten aus Eigenherstellung, Soll-Dichte  $900 \text{ kg/m}^3$ , Dicke etwa 3 mm) /Klabunde 98/*
- Abb. 16: *Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit und Dickenquellung der Spanplatten mit Weizenprotein verleimt von der Feuchtigkeit vor Heißpressen /Krug 06/*

- Abb. 17: *Ausgewählte Strukturmerkmale von Holz, Faserplatten und Faserwerkstoffen /Walther 06/*
- Abb. 18: *Systematik synthetischer Klebstoffe /Schwarz 04/*
- Abb. 19: *Systematik natürlicher organischer Klebgrundstoffe /Schwarz 04/*
- Abb. 20: *Polymerfraktionen der Stärke /Bergh 91/*
- Abb. 21: *Schema der Haftmechanismen des Klebens /Blümelhuber 02/*
- Abb. 22: *Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen benachbarten Fasern /Müller 97/*
- Abb. 23: *Stärkefixierung durch Wasserstoffbrücken /Hemmes 91/*
- Abb. 24: *Mechanismus der Verklebung mit MDI und Phenolharz im Vergleich /Deppe 96/*
- Abb. 25: *Einstoffdüse mit Drallkörper /Lechler 04/*
- Abb. 26: *Zweistoffdüse, 1. Gehäuse, 2. Nadel, 3. Rille, 4. Düse, 5. Aufsatz, 6. Öffnung, 7. Kopf, 8. Öffnung für den Luftdurchgang /Madlin 75/*
- Abb. 27: *Pastenzerstäuber nach Krauß-Maffei-Imperial GmbH & Co., a) Schnecke, b) Rundschlitzdüse, c) Ringkanal /Kneule 59/*
- Abb. 28: *Einfluss der Bindemittelverteilung auf die Zug- ( $\sigma_{ZIB}$ ) und Querkzugfestigkeit ( $\sigma_{ZLB}$ ) von Holzspanplatten ( $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ ) /Meinecke 62/*
- Abb. 29: *Schematische Darstellung einer Walzen-Beleimungsmaschine nach FAHRNI /Meinecke 62/*
- Abb. 30: *Schematische Darstellung einer Sprüh-Umwälz-Beleimungsmaschine (Bauart Drais) /Meinecke 62/*
- Abb. 31: *Bereiche der kritischen Drehzahl in Abhängigkeit vom Mischwerkzeughdurchmesser /Deppe 00/*
- Abb. 32: *Schema eines Sprüh-Mischturmes /Michanickl 05/*
- Abb. 33: *Schematisierte und idealisierte Darstellung der Beleimung von Holzspänen bei einem Durchgang der Späne durch die Sprühzone /Meinecke 62/*
- Abb. 34: *Vergleich der gemessenen mit der berechneten Bindemittelverteilung – a-gemessen, b-modelliert; 1 gute und 4 mangelhafte Bindemittelverteilung;  $X_B$ -Anzahl der Durchgänge der Partikel durch die Sprühzone,  $f(X_B)$ -Wahrscheinlichkeit /Meinecke 62/*
- Abb. 35: *ESEM Aufnahmen mit Detektierung der Rückstreuelektronen des mit Jod markierten Klebharzes. Oben: eine beleimten Holzfaser (1000x), Unten: Detail (4000x). Die hellen Bereiche auf der Faser (Pfeil) zeigen die Klebharzverteilung /Walther 06/*

- Abb. 36: *Heißpressung von mit nativer Stärke gebundenen Spanplatten mit hohen Spanfeuchten /Thole 97, Lörcks 94/)*
- Abb. 37: *Thermischer Einfluss zu mechanischen Eigenschaften der Flachsfasern /Bismarck 05/*
- Abb. 38: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung der Faserlängen*
- Abb. 39: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung der Faserdicken*
- Abb. 40: *Eigenschaften des Faserstoffs: volumengewichtete Verteilung des Schlankheitsgrades*
- Abb. 41: *Die verwendeten Materialien: a) Phenolformaldehydharz, b) Zwischenprodukt der Milchsäureherstellung, c) fermentierte Roggenkörnerreste, d) Hanfsilagefasern, e) Stärke, f) Rapspresskuchen*
- Abb. 42: *Beleimmischer, Pilotanlage des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Seitenansicht (links), Mischraum mit dem Faserstoff befüllt (rechts)*
- Abb. 43: *Volumengewichtete Summenhäufigkeiten der Tröpfchendurchmesser im Flug und als Fleck bei verschiedenen Düseneinstellungen (Luftverbrauch [ $m^3/h$ ], Bindemittelmassenstrom [ $g/s$ ], auf Distanz von 0,5 m)*
- Abb. 44: *Tröpfchen aus dem Düsenstrahl (Ausschnitt 1 x 1 mm)*
- Abb. 45: *Verteilung der Tröpfchen auf einer Schabe (Ausschnitt 1 x 1 mm)*
- Abb. 46: *Die Tröpfchen für Bildanalyse bereitet (Ausschnitt 1 x 1 mm)*
- Abb. 47: *Pressdiagramme für Platten verschiedener Dichten*
- Abb. 48: *Sägeausschnitte der Presslinge für Prüfung der Biegefestigkeit*
- Abb. 49: *Die Flugstrecke der Faser durch den Düsenstrahl*
- Abb. 50: *Die Düse sprüht auf die in der Luft aufgewirbelten Fasern*
- Abb. 51: *Die Faser (grüne Flächen) von der Düse aus betrachtet, verschiedenen Schichten überlappen (beschatten) einander*
- Abb. 52: *Beschattete Fläche für Faserschichten in Abhängigkeit von Schichtenzahl, diskontinuierlich*
- Abb. 53: *Beschattete Fläche für Faserschichten in Abhängigkeit von der Schichtenzahl, kontinuierlich*
- Abb. 54: *Bindemittelauftragsmenge in Abhängigkeit von der Schichtenzahl, kontinuierlich*
- Abb. 55: *Bindemittelauftragsmenge nach einem Durchgang der Fasermatte durch die Sprühzone, für verschiedene Einstellungen der Maschine (Versuchsnummer) modelliert*

- Abb. 56: *Bindemittelauftragsmenge nach der Beleimung ganzer Charge, für verschiedene Einstellungen der Maschine (Versuchsnummer) modelliert*
- Abb. 57: *Systemgrenzen für die Ökobilanz*
- Abb. 58: *Aggregierter Energieaufwand unterschiedlicher Faserplatten*
- Abb. 59: *Luftemissionen (CO<sub>2</sub> Äquivalent) unterschiedlicher Faserplatten*
- Abb. 60: *Bedarf an Anbaufläche für 1 m<sup>3</sup> MDF Platte aus Hanfsilage- und Holzfaser*
- Abb. 61: *Aggregierter Energieaufwand unterschiedlicher Faserplatten, wenn das langsamere Wachstum von Holz (im Gegensatz zu Hanf) mit in Betracht genommen ist*
- Abb. 62: *Luftemissionen (CO<sub>2</sub> Äquivalent) unterschiedlicher Faserplatten, wenn das langsamere Wachstum von Holz im Gegensatz zu Hanf mit in Betracht genommen ist*
- Abb. 63: *Betriebsmittelkosten bei Plattenproduktion in der Pilotanlage /Grundmann 06/*
- Abb. 64: *Preise einer Platte bei verschiedenen Betriebsparametern der Pilotanlage (GUTEX Thermofloor - Marktgängige Trittschalldämmplatte aus Holzfaser) /Grundmann 06/*
- Abb. 65: *Kostenanteile bei der Produktion der MDF Holzfaserplatten /Lehnen 06/*
- Abb. 66: *Biegefestigkeiten von Faserplatten aus unterschiedlichen Fraktionen des Materials*
- Abb. 67: *Biegefestigkeit von Hanfsilagefaserplatten (mit gefärbten Bindemittel beleimt) bei verschiedenen Plattendichten und Versuchsreihen*
- Abb. 68: *Platten mit guter Bindemittelverteilung (links aus Versuchsnummer 1 hergestellt), und mit schlechter Bindemittelverteilung (rechts, aus Versuchsnummer 16 hergestellt)*
- Abb. 69: *Eine Schäbe der Dimension 12,6 x 3,5mm aus dem Versuchsnummer 1, mit rot gefärbtem Bindemittel besprüht*
- Abb. 70: *Bindemittelauftragsmenge für verschiedene Versuchsnummer*
- Abb. 71: *Funktion der Bindemittelauftragsmenge: Vergleich des Modells und experimentellen Ergebnisse für verschiedene Versuchsnummer*
- Abb. 72: *Biegefestigkeit der Faserplatten aus unterschiedlichen Materialien*

# 11. Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: *Charakteristische Werte für Dichte, Durchmesser, und mechanische Eigenschaften von Pflanzen- und synthetischen Fasern /Bismarck 05/ (angepasst)*
- Tabelle 2: *Eigenschaften von Faser- und Partikelplatten aus verschiedenen Literaturangaben*
- Tabelle 3: *Biegefestigkeit und Rohdichte von Gepäckräumabdeckungen /Klabunde 98/*
- Tabelle 4: *Volumengewichtete Median- und Mittelwerte morphologischer Parameter für unterschiedliche Faserstoffe*
- Tabelle 5: *Signifikanzniveaus für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Faserlängen nach dem Kolmogorov-Smirnov Test*
- Tabelle 6: *Signifikanzniveaus für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Faserdicken nach dem Kolmogorov-Smirnov Test*
- Tabelle 7: *Volumengewichtete Medianwerte morphologischer Parameter gesiebter Hanfsilage- und Holzfasern*
- Tabelle 8: *Tröpfchengrößen (Durchmesser der Tröpfchen im Flug) im Zusammenhang der Sprühparameter der Düse (Düsenöffnung 2,8 mm)*
- Tabelle 9: *Signifikanzniveaus nach dem Kolmogorov-Smirnov Test für unterschiedliche theoretische Verteilungen der Tröpfchengrößen*
- Tabelle 10: *Durchschnittliche Tröpfchengrößen für das mathematische Modell im Zusammenhang der Sprühparameter der Düse*
- Tabelle 11: *Beispiele spezifischer Materialoberflächen und Bindemittelauftragsmengen*
- Tabelle 12: *Parameter des Modells die sich auf Düsenstrahl und Tröpfchen beziehen*
- Tabelle 13: *Parameter des Modells die sich auf die Fasern im Düsenstrahl beziehen*
- Tabelle 14: *Parameter des Modells die sich auf mehrere Durchgänge der Fasermatten durch die Sprühzone beziehen*
- Tabelle 15: *Umweltfaktoren gegeben (mit Quellen) für unterschiedliche Prozesse und unterschiedliche Rohstoffe bei der Plattenherstellung*
- Tabelle 16: *Versuchskombinationen für die Faserplatten bei Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Morphologien des Faserstoffs auf die Biegefestigkeit der Faserplatten*

- Tabelle 17: *Arbeitsparameter des Belemmischers bei der Untersuchung deren Einflusses auf die Bindemittelverteilung*
- Tabelle 18: *Versuchskombinationen bei der Untersuchung der Biegefestigkeit von Faserplatten aus unterschiedlichen Materialien*
- Tabelle 19: *Ableitung der /DIN EN 622/, Mindestanforderungen an die Biegefestigkeit für unterschiedliche Plattenarten nach der Anwendung*
- Tabelle 20: *Erfüllung der jeweils höchsten /DIN EN 622/ Anforderungen der hergestellten Faserplatten*

# 12. Symbole

$A_c$	[m <sup>2</sup> ]	Gesamtoberfläche einer Charge im Beleimmischer
$A_F$	[μm <sup>2</sup> ]	Projektionsoberfläche eines Tröpfchens
$A_S$	[m <sup>2</sup> /kg]	Spezifische Oberfläche der Fasern
$A_{SK}$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnitt des Strahlkegels
atro		Absolut trocknen
$B_1$	[g/m <sup>2</sup> ]	Direkte Bindemittelauftragsmenge
$B_F$	[g/m <sup>2</sup> ]	Spezifische Bindemittelauftragsmenge
$B_F$	[g/m <sup>2</sup> ]	Die Bindemittelauftragsmenge /Meinecke 62/
$B_G$	[g/kg]	Anteil der Bindemittel /Meinecke 62/
$DD$	[g/s]	Bindemittelmassenstrom auf einer Düse
$DFM$	[mm]	Dicke der Fasermatte
$D_S$	[m]	Durchmesser des Strahlkegels
$DT$	Stück/s	Tröpfchendurchsatz auf einer Düse
$d_T$	[μm]	Tröpfchendurchmesser
$F$	[m <sup>2</sup> /0,1kg]	Oberfläche der Späne /Meinecke 62/
$H_S$	[m]	Höhe des Strahlkegels
$LD$	[m <sup>3</sup> /h]	Luftverbrauch auf einer Düse
$M_b$	[kg]	Bindemittelgewicht für eine Charge des Beleimmischer
$M_c$	[kg]	Masse einer Charge im Beleimmischer beträgt
$m_F$	[kg]	Fasermasse
$m_T$	[kg]	Tröpfchenmasse
$n$	-	Anzahl der Schübe (Entnahmen) der Maschine /Meinecke 62/
$n_T$	Stück/kg	Tröpfchen-anzahl in Bindemittel-masse
$O_F$	[μm <sup>2</sup> ]	Durchschnittliche Faseroberfläche
PF		Phenol-Formaldehyd
$p$	-	Wahrscheinlichkeit dass ein Span in einem Schub im Beleimmischer besprüht wird /Meinecke 62/
$SVD$	[m <sup>3</sup> /s]	Strahlvolumendurchsatz
$T$	Stück	Tröpfchenanzahl die auf eine Faser auftreffen
$T_B$	[s]	Beleimungszeit
$T_{FS}$	[s]	Zeit des Faserfluges durch den Düsenstrahl

## 12. Symbole

---

$V_{\text{BFM}}$	$[\text{m}^3]$	Volumen beleimter Fasermatte
$V_{\text{BM}}$	$[\mu\text{m}]$	Raumvolumen des Beleimmischers
$V_{\text{F}}$	$[\mu\text{m}^3]$	Durchschnittlicher Faservolumen
$v_{\text{F}}$	$[\text{m/s}]$	Geschwindigkeit der Fasern
$V_{\text{FS}}$	$[\text{mm}^3]$	Volumen des Faserfluges durch Strahl
$V_{\text{R}}$	$[\text{mm}^3/\text{Faser}]$	Raumbesatz für jede Faser
$v_{\text{S}}$	$[\text{m/s}]$	Tröpfchengeschwindigkeit
$V_{\text{T}}$	$[\mu\text{m}^3]$	Tröpfchenvolumen
$x$	-	Anzahl der Besprühungen derselben Span /Meinecke 62/
$x$	-	Zahl der Schichten in der Faserwolke
$y$	$[\text{g/m}^2]$	Funktion der Bindemittelauftragsmenge
$y_1$	-	Funktion der beschatteten Fläche
$y_2$	-	Einheitslose Funktion der Bindemittelauftragsmenge
$y_3$	-	Funktion der Bindemittelauftragsmenge unendlich in die Tiefe
$Z_{\text{G}}$	-	Durchgänge durch die Sprühzone
$\delta$	$[\mu\text{m}]$	Tröpfchendurchmesser /Meinecke 62/
$\xi$	-	Flächenverhältnis
$\lambda$	-	Kennzahl $\lambda=n \cdot p$ /Meinecke 62/
$\varphi(\text{BF})$	-	Charakteristische Funktion /Meinecke 62/
$\rho_{\text{TS}}$	$\text{Stück/m}^3$	Tröpfchendichte im Strahlvolumen

---

## 13. Literaturverzeichnis

- 1 /Ackermann 96/ Ackermann, I.: Hanffaserproduktion auf der Grundlage einer Feuchtgutlinie. Studie für das MELF Brandenburg, Institut für Agrartechnik, Potsdam 1996
- 2 /ATB 97/ Patentanmeldung DE 197 56 046 A1: Verfahren zur Ernte, Konservierung, Aufbereitung und Verarbeitung von Hanf, Anmelder: Institut für Agrartechnik e.V., Anmeldedatum 17.12.1997
- 3 /ATB 00/ Ernte, Konservierung und Erstverarbeitung von Hanf aus einer Feuchtgutlinie, Forschungsbericht des ATB Potsdam-Bornim, Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB), 2000/3, Potsdam, 2000
- 4 /Bätge 02/ Bätge T.: Untersuchungen zum Umformverhalten von Holzfaserverformstoffen bei der Herstellung von Automobilinnenbauteilen, Diplomarbeit an der Universität Hamburg, Hamburg, 2002
- 5 /Bergh 91/ Bergh, N.-O., Hemmes, J.-L.: Grundlagen der Stärketechnologie, Wochenblatt für Papierfabrikation, 4, 1991
- 6 /Berthold 90/ Berthold K., et al: Lexikon der Holztechnik, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1990
- 7 /Binos 05/ BINOS Trockenbeimung (Mischbeimung), Firmenbroschüre BINOS Technologies, 2005.
- 8 /Bismarck 05/ Bismarck A.; Mishra S.; Lampke T.: Plant Fibres as Reinforcement for Green Composites, In Fachsammlung: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, Herausgeber: Drzal L. T.; Misra M.; Mohanty A. K., Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005, S. 37 – 108
- 9 /Blümelhuber 02/ Blümelhuber G.: Einfluß von Fettsäuren und Pflanzenölen auf die Eigenschaften eines Faser-Epoxydharz-Verbundwerkstoffs, Dissertation an der Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München, München, 2002
- 10 /Brune 90/ Brune, D., Utz H., Westerhausen, J.: Untersuchung zum Einsatz Bioabbaubarer Kunststoffe im Verpackungsbereich, Kurzfassung, 1990

- 11 /Meyer-Aurich 06/ Meyer-Aurich A., et al: Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117 (2006) 119-127, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2006
- 12 /Deppe 64/ Deppe, H.-J.; Ernst, K.: *Technologie der Spanplatten*, Karl Weinbrenner und Söhne, Stuttgart 1964
- 13 /Deppe 96/ Deppe, Hans-Joachim; Ernst, Kurt: *MDF – Mitteldichte Faserplatten*, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen, 1996
- 14 /Deppe 00/ Deppe, H.-J.; Ernst, K.: *Taschenbuch der Spanplattentechnik*, 4. Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen, 2000
- 15 /Drzal 05/ Drzal L. T.; Misra M.; Mohanty A. K.: *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction*, In *Fachsammlung: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Herausgeber: Drzal L. T.; Misra M.; Mohanty A. K., Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005, S. 1 - 36
- 16 /DIN EN 13432/ DIN EN 13432 *Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen*; Ausgabe:2000-12, Beuth-Verlag, Berlin 2000
- 17 /DIN EN 14995/ DIN EN 14995 *Kunststoffe - Bewertung der Kompostierbarkeit - Prüfschema und Spezifikationen*; Ausgabe:2004-11, Beuth-Verlag, Berlin 2004
- 18 /DIN EN 310/ DIN EN 310 *Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit*, Ausgabe:1993-08, Beuth-Verlag, Berlin, 1993
- 19 /DIN EN 622/ DIN EN 622 *Faserplatten - Anforderungen*; Ausgabe:2003-09, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- 20 /Dix 01/ Dix, B.; Loth F.; Roffael E.: *Stärke-Tannin-Bindemittelsysteme für mitteldichte Faserplatten*, Schlussbericht, Projekt 97 NR 224, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) über die FNR
- 21 /Dix 07/ Dix B.; Meinschmidt P.; Thole V.: *Leichte Spanplatten aus ein- und mehrjährigen Pflanzen*, In: *Tagungsband: 6. Internationales Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“*, Erfurt, 2007

### 13. Literaturverzeichnis

---

- 22 /Döring 06/ Döring K.: Bewertung sowie weiterführende Potentialanalyse für Faser-Rohstoffe und Produkte aus einem neuartigen Aufbereitungsverfahren für feucht konservierte Hanfpflanzen, Diplomarbeit an der BTU Cottbus, 2006
- 23 /Eisner 65/ Eisner, K., Nemrhal, J.: Herstellung von mitteldichter Platten unter besonderer Berücksichtigung der Verwendung von Abfallsortimenten, Holztechnologie 6, 1965
- 24 /Fabo 04/ Fabo A.: Untersuchungen zur Wechselwirkung von Polyethylenimin (PEI) mit Holzkomponenten, Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg, 2004
- 25 /Flake 03/ Flake, M., Schäper, S.: Altfahrzeuggesetzgebung – Auswirkungen auf den Einsatz naturfaserverstärkter Werkstoffe, Naturfaserforum am 04.09.2003 in Wildeshausen
- 26 /Frühwald 00/ Frühwald A., Hasch J., Scharai-Rad M.: Ökologische Bewertung von Holzwerkstoffen, Schlussbericht, Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg, Hamburg, 2000
- 27 /Gefahrt 67/ Gefahrt, J. : Die Verwendung der Hochfrequenzenergie in der Holzindustrie, HOLZ als Roh- und Werkstoff, Heft 4, 1967
- 28 /Göhre 54/ Göhre, K.: Werkstoff Holz – Technologische Eigenschaften und Vergütung, VEB Verlag Technik Berlin, 1954
- 29 /Grewatsch 07/ Grewatsch C.: Aufbereitung von Hanfkonservat zu Faserstoff in einer Scheibemühle, Diplomarbeit, Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Antriebstechnik und Mechatronik, Rostock, 2007
- 30 /Grundmann 06/ Grundmann Ph., et al: Ökonomische Bewertung der Herstellung und Verarbeitung von Hanfkonservat, Workshop Innovative Entwicklungen bei Naturfasern, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam, 18. – 19.9.2006
- 31 /Gusovius 01/ Gusovius, H.-J.: Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf. Dissertation; Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Nr. 390; Culliver Verlag, Göttingen, 2002
- 32 /Hemmes 91/ Hemmes, J.-L.; Palm, C.: Der Einsatz von Masse- und Sprühstärke in der Papierindustrie, Wochenblatt für Papierfabrikation 5, 1991

- 33 /Henton 05/ Henton, D.E.; Gruber P.; Lunt J.; Randall J.: Polylactic Acid Technology, In Fachsammlung: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, Herausgeber: Drzal L. T.; Misra M.; Mohanty A. K., Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005, S. 528 – 567
- 34 /ISO 14040/ Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework, Hrsg. International Organisation for Standardisation, Genève, 2006.
- 35 /Kehr 98/ Kehr, E.; Sirch, H.-J.: Entwicklung, Herstellung und Prüfung von Spannplatten unter Einsatz von natürlichen Bindemitteln, Forschungsverbund „Natürliche Bindemittel für Holzwerkstoffe“, Dresden, 1998
- 36 /Kharazipour 97/ Kharazipour A.; Nonningen K.; Bergmann K.; Hüttermann A.:Laccase Behandlung von Holzfasern als Weg zu vollständig bindemittelfreien Holzwerkstoffen, Tagungsband: Biokonversion nachwachsender Rohstoffe, Fachagentur nachwachsender Rohstoffe e.V., Gülzow, 1997
- 37 /Klabunde 98/ Klabunde, S.: Eignung von Fasern und natürlichen Bindemitteln zur Herstellung von Faserplatten und Faserformteilen unter technischen und ökologischen Aspekten, Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Dresden, 1998.
- 38 /Klauditz 52/ Klauditz, W.: Untersuchungen über die Eignung von verschiedenen Holzarten, insbesondere von Rotbuchenholz zur Herstellung von Holzspanplatten, Bericht, Institut für Holzforschung, Braunschweig, 1952
- 39 /Kneule 59/ Kneule F.: Das Trocknen, Band 6, In: Fuchs O.; Mohler H. (Hrsg.): Grundlagen der chemischen Technik, Verfahrenstechnik der chemischen und verwandter Industrien, Verlag H.R.Sauerländer & Co. Aarau und Frankfurt am Main, Aarau, 1959
- 40 /Korn 93/ Korn, M.: Nachwachsende und bioabbaubare Materialien im Verpackungsbereich, Verlag Roman Kovar 1993
- 41 /Kossatz 93/ Kossatz C. und G.: Formteile aus organischem Fasermaterial – moderne Produkte mit Tradition, Holz-Zentralblatt, Stuttgart Nr. 55,Seite 858, 1993
- 42 /Krug 06/ Krug D., Heep W.: Proteine als Klebstoffgrundlage, VHI Workshop „Leimbörse“, Kassel, 2006

### 13. Literaturverzeichnis

---

- 43 /Kühne 97/ Kühne, G.: Herstellung Bindemittelfreie Werkstoffe aus lignocellulosen Rohstoffen durch enzymatische Modifikation. Tagungsband: Biokonversion nachwachsender Rohstoffe, Fachagentur nachwachsender Rohstoffe e. V., Gülzow, 1997
- 44 /Lampert 67/ Lampert, H.: Faserplatten: Rohstoffe, Herstellung, Eigenschaften, VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1967
- 45 /Lechler 04/ N.N.: Präzisionsdüsen und Zubehör, Firmenkatalog, Lechler GmbH, Metzingen, 2004
- 46 /Lehnen 06/ Lehnen, R.: Lignine, Tannine und Polyamide als Klebstoffkomponenten, VHI Workshop „Leimbörse“, Kassel, 2006
- 47 /Lörcks 94/ Lörcks J., et al: Verfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, DE4317692C2
- 48 /Madlin 75/ Madlin, B. D.; Otlev I. A.: Herstellung von Spanplatten, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975
- 49 /Marutzky 05/ Marutzky R.: Schaumklebstoffe Möglichkeiten der Bindemittelsparung bei Holzwerkstoffen, Tagungsband, „Klebstoffe für Holzindustrie“, Wilhelm-Klauditz Institut, Braunschweig, 2005
- 50 /May 73/ May, Hans-Albrecht: Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Beileimung von Spänen in industriellen Beileimungsmaschinen bei der Holzspanplattenherstellung, Verein für technische Holzfragen e.V., Braunschweig, 1973
- 51 /Meinecke 62/ Klauditz, W., Meinecke, E.: Über die physikalischen und technischen Vorgänge bei der Beileimung und Verleimung von Holzspänen bei der Herstellung von Holzspanplatten, Manuskript, Westdeutsche Verlag / Köln und Opladen, 1962
- 52 /Metzger 05/ Metzger M. et al: Naturnahe Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Holzwerkstoffen, In: Tagungsband: 5. Internationales Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“, Erfurt, 2005
- 53 /Michanickl 05/ Michanickl A.: Möglichkeiten der Bindemittelsparung bei Holzwerkstoffen, Tagungsband, „Klebstoffe für Holzindustrie“, Wilhelm-Klauditz\_Institut, Braunschweig, 2005
- 54 /Müller 05/ Müller, C.: Mechanisch-enzymatischer Aufschluss von Kartoffelpulpe als Bindemittel zur Herstellung von Holzwerkstoffen, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen, 2005

### 13. Literaturverzeichnis

---

- 55 /Müller 97/ Müller, M.: Möglichkeiten der Herstellung stärkegebundener lignocellulöser Formkörper als Variante dämmender, biologisch abbaubarer Werkstoffe. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Dresden 1997
- 56 /Neusser 63/ Neusser, H.: Mixolit, eine haltbare Holzfaserverplatte, hergestellt in einem speziellen Nassverfahren, *Holzforschung und Holzverwertung* 15 (1963), 4
- 57 /NOVA 03/ Kaup, M.; Karus, M.; Ortmann, S.: Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen in der deutschen und österreichischen Automobilindustrie, nova-Institut, Hürth, 2003
- 58 /Paul 99/ Paul, R.: PUR Faserverbundwerkstoffe für den Leichtbau im Fahrzeuginnenraum. *Mobiles* 25 (1999), S. 32-37
- 59 /Pecenka 07a/ Pecenka R.; et al: Herstellung von Naturfaserwerkstoffen aus feucht-konserviertem Hanf in einer Pilotanlage, In: Tagungsband: 6. Internationales Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“, Erfurt, 2007
- 60 /Pecenka 07b/ Pecenka R.; et al: Tube Ensiling of Hemp – Initial Practical Experience, *Agricultural Engineering Research* 13 (2007) 15-26, Leibnitz-Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim e.V., Potsdam, 2007
- 61 /PROBAS 06/ Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente, Materialien und Produkte, Prozesse: Fabrik/Kartoffelstärke, 16.11.2006, [www.probas.umweltbundesamt.de](http://www.probas.umweltbundesamt.de)
- 62 /Richter 01/ Richter K.: LCA – reuse/recycle. Cost Action E13: Wood Adhesion and Glued Products, State of the Art-Report, Brüssel/Luxemburg S. 161-189, 2001
- 63 /Rittershofer 08/ Forst-Sachverständigenbüro Rittershoffer, Wald, Holz, Brennwert von Holz, [www.rittershofer.com/Wald/Holz/holz.html](http://www.rittershofer.com/Wald/Holz/holz.html), 27.05.2008
- 64 /Scheibert 58/ Scheibert, W.: Spanplatten: Herstellung, Verarbeitung, Anwendung, Fachbuchverlag Leipzig, 1958
- 65 /Schmid 01/ Schmidt H., Müssig J.: Image scanning for materials characterization of fibres, Vortrag zur Sitzung des Arbeitskreises Qualität des DNV (Deutscher Naturfaserverband e.V.), DNV (Veranst.), Sächsisches Textilforschungsinstitut – STFI, 2001-11-22, Chemnitz, 2001.
- 66 /Scholz 97/ Scholz V.: Methodik zur Ermittlung des Energieaufwandes pflanzenbaulicher Produkte am Beispiel Biofestbrennstoffen, *Agrartechnische Forschung* 3, H. 1, S. 11-18, Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB), Potsdam, 1997
- 67 /Schubert 03/ Schubert, H.: Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik Band 1 u. 2, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003

- 
- 68 /Schwarz 04/ Schwarz, K. U.: Untersuchungen zum Einsatz biogener Ligninklebstoffe bei Massivholzverklebungen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 2004
- 69 /Sudell 05/ Sudell, C.B.; Evans J.W.; Natural Fiber Composites in Automotive Applications, In Fachsammlung: Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, Herausgeber: Drzal L. T.; Misra M.; Mohanty A. K., Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005, S. 231 - 259
- 70 /Tegge 04/ Tegge, G.: Stärke und Stärkederivate, 3. vollständig überarbeitete Auflage, B. Behr's Verlag GmbH & Co. KG, Bobingen 2004
- 71 /Thole 97/ Thole V.: Entwicklung neuartiger Press- und Härtungstechnologien für wasserhaltige oder wasserbedürftige Klebstoffsysteme. In: Klein, Marutzky (Hrsg.): Klebstoffe für Holzwerkstoffe und Faserformteile: Neue Entwicklungen, Applikationen und Analysetechniken. WKI-Bericht Nr. 32, Eigenverlag, Braunschweig, 1997
- 72 /Topan 88/ Topan: Technische Empfehlung zur Be- und Verarbeitung von Mitteldichten Faserplatten (MDF), am Beispiel von Topan, herausgegeben vom „Arbeitskreis MDF“ Firmengruppenausgabe, Göttingen, 1988
- 73 /Vorreiter 58/ Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch, Band 2, Verlag Georg Fromme und Co., Wien und München, 1958
- 74 /Wald 08/ Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, Landesforstverwaltung, Rohstoff, CO<sub>2</sub>-Bilanz, [www.wald-online-bw.de/index.php?id=353](http://www.wald-online-bw.de/index.php?id=353), 27.05.2008
- 75 /Walther 06/ Walther T.: Methoden zur qualitativen und quantitativen Analyse der Mikrostruktur von Naturfaserwerkstoffen, Dissertation an der Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Hamburg, 2006
- 76 /Wartenberg 87/ Wartenberg, G.: Untersuchungen zur Applikation von Flüssigkeitstropfen auf Strohoberflächen, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Physik und Technische Wissenschaften des Wissenschaftlichen Rates der Wilhelm-Pieck- Universität Rostock, Potsdam, 1987
- 77 /Wöckinger 03/ Wöckinger J.: Biologisch abbaubare Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Projektarbeit aus Biologie und Umweltkunde, Gymnasium und Realgymnasium Kollegium Aloisianum Linz, Linz, 2003
- 78 /Zimmer 99/ Zimmer, H.: Naturfasern für die Automobilindustrie – Vorstellung eines neuen Projekts. Symposium Hanfwirtschaft 2000, Hürth 1999