



Agglomeration von Fasermaterialien

Prozess- und anlagentechnische Untersuchungen der angepassten Faseragglomeration sowie deren Produktcharakterisierung zur Qualitätsbewertung

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (o. a. Titel nach § 1 (2)) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Sven Hildebrandt

aus
Kiel
(Schleswig-Holstein)

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

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

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2009

„Wenn du ein wirklicher Wissenschaftler werden willst, dann denke
wenigstens eine halbe Stunde am Tag das Gegenteil von dem, was
deine Kollegen denken.“

(Albert Einstein)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Aufbereitungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Ay (BTU Cottbus) für die Möglichkeit zu dieser Arbeit sowie die wissenschaftliche Betreuung und die wertvollen Gespräche. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Fürll (Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.) für die Bereitschaft des Zweitgutachtens danken.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls Aufbereitungstechnik sowie der Fachwerkstatt der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik für ihre Hilfsbereitschaft und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dr. agr. H.-J. Gusovius (ATB Potsdam) für zahlreiche fachliche Gespräche sowie wichtige Ratschläge bedanken.

Mein ganz spezieller Dank gilt meinen Eltern, die meine Ausbildung und meinen beruflichen Weg stets mit viel Interesse verfolgt und mich nach Kräften unterstützt haben.

Kurzfassung

Fasermaterialien gewinnen zunehmend in unterschiedlichen technischen Anwendungsbereichen an Bedeutung. Insbesondere der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, meist in Form von pflanzlichen Fasern, stellt hierbei durch ihre endliche Länge eine Herausforderung an die Aufbereitungstechnik, um eine problemlose Lagerung, Transport sowie Zufuhr und Dosierung in weiterführende Anwendungs- bzw. Weiterverarbeitungsprozesse zu ermöglichen. Der Schritt zur Erzeugung eines Schüttgutes aus voreingestellten Faserlängen wird in der Anwendung von Agglomerationsprozessen gesehen. In den durchgeführten Untersuchungen kam neben der Aufbauagglomeration (Mischagglomeration) das innovative Verfahren der Rollagglomeration zum Einsatz. Für eine Charakterisierung der Faseragglomerate bzw. zur Bewertung des Herstellungsprozesses wurden entsprechende Möglichkeiten der Analyse des Einzelkörpers betrachtet, welche für die Qualitätssicherung späterer Produktionen anwendbar sind. Aus den Erkenntnissen der durchgeführten Untersuchungen werden Weiterentwicklungsansätze von der Laboreinheit hin zur Technikumsanlage abgeleitet, welche für anwendungsorientierte Untersuchungen erforderliche Produktionsvolumina aufweisen.

Short Abstract

The importance of fiber materials for various technical uses is rising more and more. Particularly the application of natural fibers, mainly of plant fibers, affects problems for a subsequent processing. In this context especially the finite length of natural fibers poses a challenge for their treatment in order to enable undisturbed unproblematic storing, transport and charged feeding in further processing steps. An answer to these problems is the generation of a bulk material by means of agglomeration processing. "Growth agglomeration" as well as the innovative process of "Roll-Forming-Agglomeration" was realized within the lab experiments. Pertinent opportunities for analysis of single particles were contemplated especially for the characterization of the fiber agglomerates. A quality control system for a prospective production line will be feasible in this manner. Finally the further development from laboratory to a pilot plant scale was deduced from the findings of conducted experimental studies of agglomeration processing.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Fasermaterialien	12
2.1	Naturfasern.....	13
2.2	Chemiefasern	17
2.3	Charakterisierung von Fasern	18
2.3.1	Faserlänge	18
2.3.2	Faserdicke/Faserfeinheit	19
2.3.3	Faserfeuchte	20
2.3.4	Faserbiegefestigkeit.....	21
2.3.5	Faserkräuselung.....	22
2.4	Eingesetzte Fasermaterialien	23
3	Grundprozesse der Faseragglomeration	26
3.1	Bindemechanismen der Faseragglomeration	28
3.2	Klassische Agglomerationsverfahren	32
3.2.1	Aufbauagglomeration.....	32
3.2.2	Pressagglomeration	34
3.2.3	Anschmelzagglomeration.....	35
3.3	Angepasste Agglomerationsverfahren	35
3.3.1	Fasergranulationsverfahren des FLZ.....	35
3.3.2	Pull-Drill-Verfahren	37
3.3.3	Wickelverfahren	39
3.3.4	Rollagglomeration.....	42
3.4	Textile Faserverarbeitungsverfahren	45
4	Eingesetzte Versuchsanlagen.....	48
4.1	Eirich-Intensivmischer	48
4.2	Rollagglomerationsteller.....	50

5	Charakterisierungs- und Bewertungsansätze der Faseragglomerate.....	56
5.1	Charakterisierung der äußeren Gestalt	57
5.1.1	Gestaltbestimmung mittels Photogrammetrie	58
5.1.2	Bewertung der Makrogestalt von Faseragglomeraten	65
5.1.3	Bewertung der Mesogestalt von Faseragglomeraten.....	67
5.1.4	Bewertung der Mikrogestalt von Faseragglomeraten.....	77
5.2	Charakterisierung der inneren Struktur	84
5.2.1	Porositätsmittlung.....	85
5.2.2	Innere Oberflächen	87
5.3	Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften.....	88
5.3.1	Drucksteifigkeit und Restverformung	89
5.3.2	Zugfestigkeit.....	92
5.3.3	Wechselwirkungen zu benachbarten Faseragglomeraten.....	93
5.4	Eigenschaften des eingebundenen Fasermaterials	93
6	Experimentelle Untersuchungen	98
6.1	Untersuchungen im Rollagglomerationsteller.....	99
6.1.1	Möglichkeiten der Beeinflussung der geometrischen Makrogestalt	104
6.1.2	Einfluss des Reibwiderstandes der Wandbeläge	113
6.1.3	Einfluss der Faserbefeuchtung auf relevante Agglomerateigenschaften	116
6.1.4	Faserlängeneinfluss	122
6.1.5	Einfluss der Rollgangsabmessung	128
6.1.6	Eigenschaftsverschiebung aufgrund von Rollstreckenvariationen.....	132
6.1.7	Möglichkeiten von Rollgangsverjüngungen und weiteren Einbauten...	134
6.1.8	Potentialabschätzung weiterer Fasermaterialien	137
6.2	Experimentelle Untersuchungen im Eirich-Intensivmischer	138
6.2.1	Allgemeine Erkenntnisse der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien.....	140
6.2.2	Drehzahlabhängige Agglomerationserfolge	146
6.2.3	Auswirkung der Faserlängenverteilung.....	148
6.2.4	Gegenüberstellung ein- und zweistufiger Prozess.....	149
6.2.5	Auswirkungen der Agglomerationszeit	151
6.3	Einfluss der Trocknungsvariation auf die Festigkeit.....	153
6.4	Diskussion der Faseragglomerationsprozesse	155

7	Gestaltung möglicher Technikumsanlagen.....	160
8	Ausblick.....	172
9	Zusammenfassung.....	176
10	Verzeichnisse.....	182
10.1	Literaturverzeichnis	182
10.2	Abbildungsverzeichnis.....	194
10.3	Tabellenverzeichnis	198
10.4	Symbolverzeichnis.....	199
11	Anhang	203

Kapitel 1

Einleitung und Zielsetzung

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Nutzung von Fasermaterialien begleitet die Menschheit schon seit mehreren Jahrtausenden durch die Geschichte und reicht bis in die Gegenwart. Im europäischen Raum spielten vor allem Hanf (*Cannabis sativa*) und Flachs bzw. Faserlein (*Linum usitatissimum*) als Quelle für Fasermaterialien sowie als Lebensmittellieferanten eine große Rolle. Hierbei unterlag die Nutzung dieser Faserpflanzen im Laufe der Zeit Höhen und Tiefen.

Die Verwertung des Hanfs kann bis in die Jungsteinzeit nach China zurückverfolgt werden. Dies wird mit Funden von Schnüren aus der Zeit etwa um 2.800 v. Chr. belegt [M.C.'08]. In Europa sind die ältesten Funde zu Beginn der vorrömischen Eisenzeit (ca. 500 v. Chr.) in Form von Baststreifen, welche zu Stoffen verarbeitet wurden, im Raum Stuttgart nachgewiesen [M.C.'93]. Die Nutzung von Flachsfasern reicht noch weiter in der Geschichte zurück. So ist der kultivierte Anbau dieser Nutzpflanze in Mesopotamien, Babylon und Ägypten im Jahre 4.000 v. Chr. belegt [A.H.'26]. Die ältesten europäischen Funde wurden auf 2.700 v. Chr. datiert [M.C.'08]. Ein weiteres frühes Hanfprodukt ist das Papier, welches Funde in China aus der Zeit zwischen 140 v. Chr. und 87 v. Chr. belegen [M.C.'08].

Seine Hochkonjunktur erfuhren die in Europa kultivierten Faserpflanzen im 17. Jahrhundert zur Deckung des enormen Bedarfs der Schifffahrt in Form von Takelwerk, Seilen, Flaggen, Netzen, Uniformen und Segeltüchern [M.C.'08]. Mit der Umstellung der Schifffahrt auf dampfgetriebene Schiffe im 19. Jahrhundert zeichnete sich ein Niedergang der Faserproduktion ab. Außerdem wurden die heimischen Fasermaterialien im 18. Jahrhundert durch den verstärkten Einsatz von Baumwollfasern vor allem in der Textilindustrie substituiert [M.C.'08]. Das Handelsembargo von Baumwolle und Jute während der Weltkriege ließ den Hanf- und Flachs-anbau in Deutschland erneut aufblühen [F.T.'38]. 1982 erfolgte in Deutschland wegen des berauschenden Inhaltsstoffes THC¹ ein generelles Verbot des Anbaues von Hanfpflanzen [M.C.'08]. Erst im Jahre 1996 kam es zur Lockerung des Verbotes. Seitdem ist der Anbau von Hanfpflanzen mit einem geringen THC-Gehalt (< 0,3%) legalisiert [FNR'08].

Seither gewannen Naturfasermaterialien für technische Anwendungen wieder an Bedeutung. Besonders für die Einsatzgebiete der naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe ist ein gesteigertes Interesse in zahlreichen Forschungseinrichtungen (ATB², BTU³ Cott-

¹ Tetrahydrocannabinol

² Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

³ Brandenburgische Technische Universität Cottbus

bus, TITK⁴, TU Chemnitz u. a.) festzustellen. Eine weitere Verstärkung des Trends lässt sich mit dem steigenden Erdölpreis sowie mit der Zunahme des Umweltbewusstseins begründen. Vor allem Hanf- und Flachsfasern besitzen gegenüber weiteren Fasermaterialien (bspw. Kokos- und Sisalfasern) den Vorteil, in Europa kultiviert zu sein. So betrug die Anbaufläche im europäischen Raum von Hanf im Jahre 2006 ca. 14.000 ha, die von Flachs etwa 103.000 ha [M.C.'08], wobei ein leicht steigender Trend zu verzeichnen ist. Während die Flachs-Langfasern überwiegend im textilen Bereich verwendet werden, liegen die Absatzmärkte der Hanf- und Flachs-Kurzfasern in der EU in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen (siehe Abbildung 1-1).

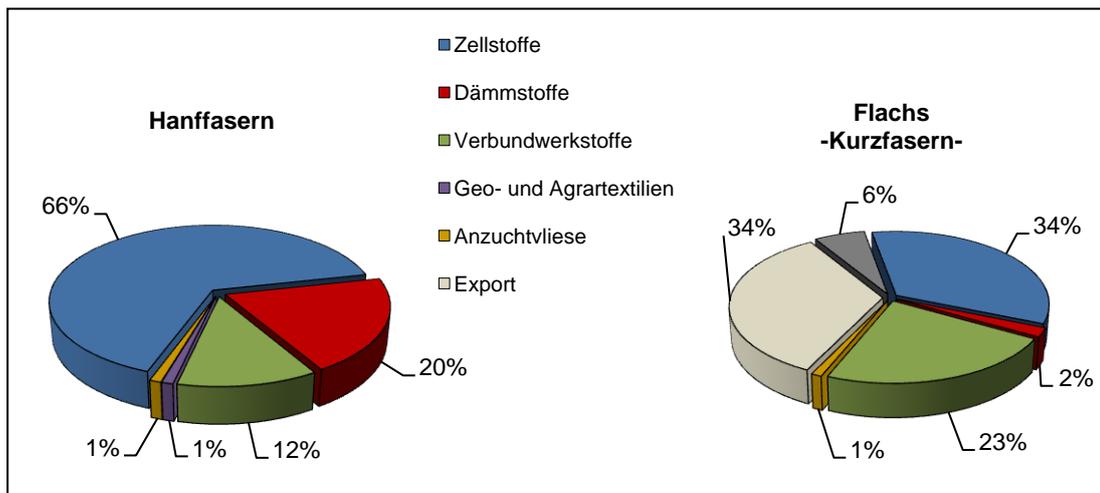


Abbildung 1-1 Absatzmärkte von Hanf- und Flachs-Kurzfasern in der EU 2006 nach [M.C.08]

Die Marktpreise (inkl. Subvention) dieser heimischen Kurzfasermaterialien befinden sich seit etwa 2003 mit 0,50 bis 0,60 €/kg auf einem relativ konstanten Niveau ($\pm 10\%$). Die Preise für vergleichbare exotische Fasermaterialien, beispielsweise Jute und Sisal, liegen mit 0,55 bis 0,70 €/kg oberhalb der heimischen Produkte. Die Kokosfaser hingegen weist schon seit einigen Jahren eine Preisabnahme auf. Derzeitig wird sie am Markt mit Preisen zwischen 0,40 und 0,49 €/kg gehandelt. [M.C.'08]; [N-FibreB'08]

Naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

Der Begriff der naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe wird meist mit den Eigenschaftsverbesserungen von Kunststoffen in Bezug gesetzt. Doch wie schon vor hundert Jahren wird auch heute noch, vor allem in den gemäßigten sowie heiß-trockenen Klimazonen der Erde, mit Lehm gebaut, wobei oft Faser- oder Strohmaterialien zur Verstärkung der Struktur eingesetzt werden [D.S.'03].

⁴ Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung

In den Industrieländern bilden faserverstärkte Kunststoffe und Harze schon seit vielen Jahren einen festen Bestandteil auf den Märkten (z. B. glasfaserverstärkte Kunststoffe „GFK“). Hierzu sind bereits einige Herstellungsverfahren in der Industrie etabliert [M.F.'96]. Die derzeitigen Forschungsaktivitäten orientieren sich in Richtung der naturfaserverstärkten Kunststoffe „NFK“. *Flemming et. al.* [M.F.'95] sieht zur Verstärkung von Kunststoffen im Bereich der Naturfasern vor allem Flachs-, Ananas- und mit Einschränkungen Ramie- und Sisalfasern als geeignet an. Des Weiteren hebt er für technische Anwendungen Hanf-, Jute- und Bananenfaser hervor. Eine detailliertere Beschreibung unterschiedlicher Verfahren für eine direkte sowie indirekte Fasereinbindung in Thermoplaste wurde bereits in einer früheren Arbeit [S.H.'03] dargestellt.

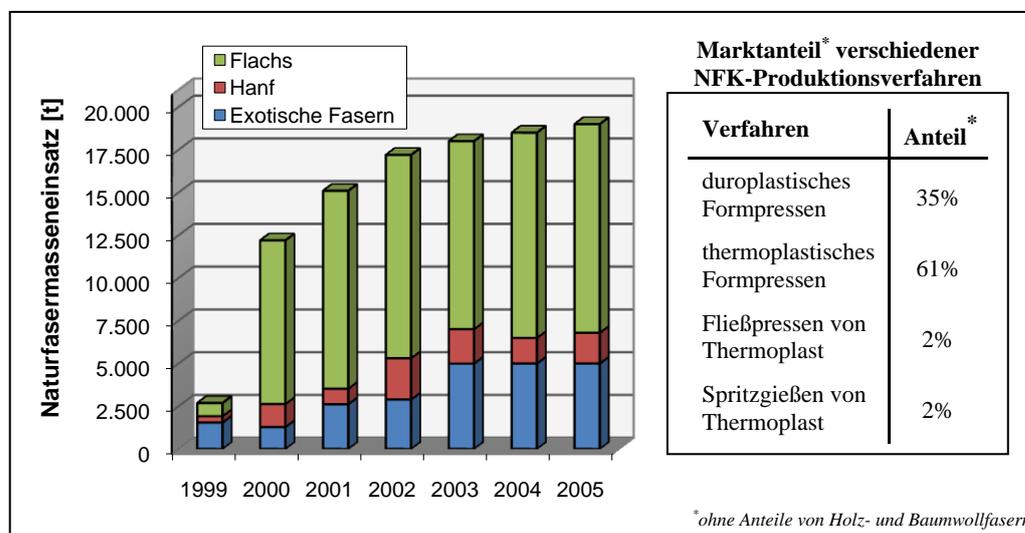


Abbildung 1-2 Naturfasermasseneinsatz für NFK in der deutschen Automobilindustrie nach [M.C.'08]

Insbesondere liegt eine steigende Bedeutung der Nutzung von NFK in der Automobilindustrie vor (siehe Abbildung 1-2), was weiterhin zu einer Intensivierung der Forschung in diesem Gebiet führt. Eine weitere Motivation des Einsatzes von NFK liegt vor allem in den zusätzlichen Eigenschaftsverbesserungen der Bauteile. Durch die Kombination von Naturfasern und Kunststoff kommt es neben der Steigerung der mechanischen Festigkeiten zu einer Verbesserung der wärme- und schalldämmenden Kennwerte. Zudem besitzen NFK im Vergleich zu GFK eine geringere Bauteildichte sowie ein geringeres Splitterrisiko. Weitere Einsatzbereiche, mit steigendem Marktpotential, liegen in den Bereichen von Sport- und Freizeitgeräten, Spielzeugen sowie bei Gerätegehäusen [J.M.'06]. Nach der technischen Umsetzung der Pressverfahren ([J.B.'05]; [T.S.'95] u. a.; siehe auch Anhang) stellt sich die Erzeugung von NFK-Baugruppen mittels Spritzguss- sowie Extrudierverfahren als ein interessantes Forschungsgebiet dar. Im Gegensatz zu den Pressverfahren lassen sich über das Spritzgie-

ßen höher strukturierte Formteile erzeugen (z. B. Verstrebungen und Rippen). Bislang werden lediglich 2% der in der Automobiltechnik eingesetzten naturfaserverstärkten Kunststoffe über den Spritzgussprozess erzeugt [M.C.'08]. Dieser geringe Anteil liegt in dem Hauptproblem der Faserzufuhr begründet. Während Chemiefasern als Filamente kontinuierlich dem Spritzgussverfahren zugeführt werden können (z. B. Verfahren von *Krauss Maffei*), müssen Naturfasern erst zu einem zugfesten Streckengebilde verarbeitet werden, um auf gleiche Art und Weise dem Prozess zugeführt werden zu können. Neben den erhöhten Kosten der Herstellung von Faserhalbzeugen setzt dieses Verfahren zudem eine Modifikation der Spritzgusstechnik voraus. Ein weiterer zielführender Lösungsansatz ist die Erzeugung von stückigen, dosierfähigen faserbeinhaltenden Agglomeraten, welche wie die eingesetzten Kunststoffgranulate der Verarbeitungsanlage zugeführt werden können.

Faserbaustoffe

Im Baubereich der Industrieländer werden Fasermaterialien überwiegend zur Schall- und Wärmedämmung sowie zur Abdichtung von Spalten und Fugen eingesetzt. Aber auch in Form von geleimten Verbundplatten sind Naturfaserprodukte (z. B. Holzfasern) vertreten. Hierbei handelt es sich überwiegend um organische und anorganische Naturfasern. Chemiefasern, meist Polypropylenfasern, werden in einigen Naturfasermatten als Stützfasern eingesetzt [C.S.'00]; [Hock'07]. Neben den am Markt weit etablierten Produkten sind zudem faserverstärkte Lehmbauelemente in Form von Platten oder Steinen erhältlich (z. B. Holzfaser oder Holzspäne verstärkte Lehmbauelemente der *Hock GmbH & Co. KG* [Hock'07]). Ein weiterer Einsatz in der Bautechnik ist die Herstellung von faserverstärkten Betonen (meist Chemie- oder Stahlfasern, aber vereinzelt auch Naturfasern) [M.C.'08].

Den größten Anteil an Faserbaustoffen bilden die Dämmprodukte. Hierbei betrug im Jahre 2003 der Anteil an Dämmprodukten aus Mineral- und Glaswolle 59% (siehe Abbildung 1-3). Trotz des höheren Preises der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu den mineralischen Produkten ist ein steigender Trend des Marktanteils dieser Produkte zu verzeichnen. Dies lag neben dem Umweltgedanken der Kunden auch an der Förderpolitik, die den Kauf zertifizierter Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bezuschusste.

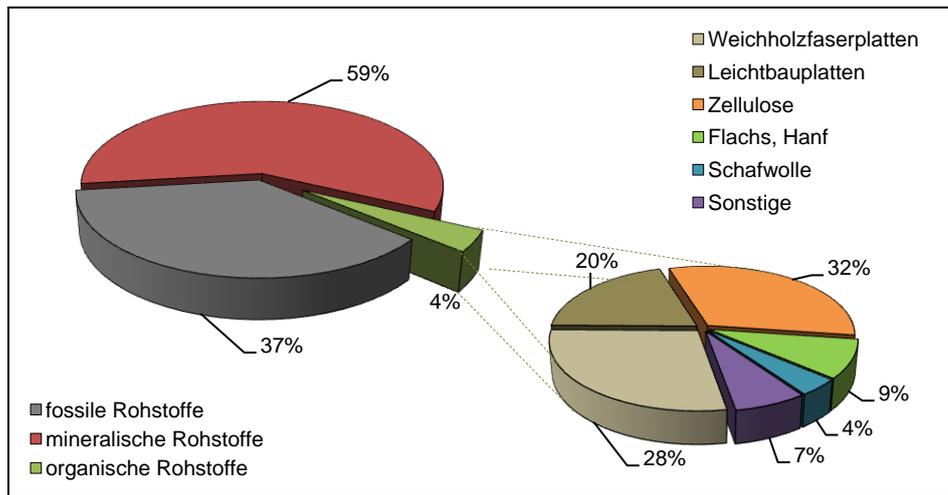


Abbildung 1-3 Dämmstoffmarktzusammensetzung in Deutschland 2003
nach [C.S.'00]; [M.C.'08]

Bei einer Weiter- bzw. Neuentwicklung von Dämmstoffen sollte somit neben den physikalischen Kennwerten wie beispielsweise Wärmeleitzahl, Wasseraufnahme- und Brandverhalten auch auf das Erlangen von Zertifikaten der Produktlabel geachtet werden, beispielsweise:

- *Blauer Engel* (Bundesumweltamtes/Deutsches Institut für Gütesicherung)
- *natureplus* (Internationaler Verein für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen)
- *Tox Proof* (TÜV Produkt und Umwelt)
- *IBR* (Institut für Baubiologie Rosenheim)

Fluidaufbereitung

Fasermaterialien kommen in der Fluidaufbereitung insbesondere in Form von Filtermedien wie auch als Aufwuchsmaterial für Mikroorganismen zum Einsatz. Für die Filtertechnik liegen die Fasermaterialien in der Regel in Form von Geweben, Vliesen oder Filzen vor. In diese Materialien werden die im Fluid mittransportierten Bestandteile (Partikel, Aerosole) durch Sieb-, Trägheits-, Diffusions- sowie elektrostatische Effekte abgeschieden bzw. eingelagert [K.H.'02]. Das Filtermedium bildet 10 - 15% der gesamten Investitionskosten einer Filteranlage [E.S.'03].

Die Auslegung von Filteranlagen und damit auch die Wahl der erforderlichen Filtermedien sind besonders von den abzuscheidenden Partikeln (v. a. Materialeigenschaften und Größe) sowie von dem Fluidstrom (v. a. Partikelbeladung, Strömungsgeschwindigkeit und Viskosität) abhängig. Nach *Fischer et. al.* [K.F.'02] gewinnen die biologischen Verfahren in der Fluidaufbereitungstechnik immer mehr an Bedeutung. Der Einsatz von Fasermaterialien ist auch in den technischen Umsetzungen von Biofiltern sowie der

Bioreaktortechnik möglich [BUWAL'93]; [V.P.'04]. *Preuß* [V.P.'04] wies in den Untersuchungen zur Aufbereitung sulfathaltiger Wässer darauf hin, dass grobporige Strukturen vorliegen müssen, um einen Abtransport der gebildeten Gase zu gewährleisten. Zudem muss im Gegenzug ein Hintransport des Substrates stattfinden. Für eine Umsetzung ist wie bei den Biofiltern eine möglichst große Oberfläche von entscheidender Wichtigkeit. Die Materialien für die Biofilter haben neben der Grundaufgabe als Trägerfläche zu fungieren, auch die Nebenaufgabe der Speicherung von Feuchtigkeit und die Versorgung der Mikroorganismen mit weiteren Nährstoffen sicherzustellen. Diesbezüglich versprechen vor allem organische Trägermaterialien Vorzüge. Empfohlen werden Ausgangsträgermaterialien mit einem organischen Anteil von mindestens 70% [BUWAL'93].

In bestehenden Anlagen der Luftaufbereitung mittels Biofilter werden meist verschiedene Komposte, Fasertorf oder Reisig, Holz- oder Rindenhäcksel, Kokosfasern sowie weitere, poröse Materialien wie Schaumglas als Aufwuchsmaterialien eingesetzt [K.F.'02]. Hierbei liegen die Porositäten, je nach Filtermaterial, zwischen 35% (Müllkompost) und 85% (Fasertorf) [BUWAL'93]. Als Richtwert für die Flächenbelastung werden in der *DIN-Richtlinie 3477* Werte zwischen 30 und 300 $m^3/m^2 \cdot h$ angegeben [BUWAL'93].

Problem- und Zielstellung

Das Vorliegen der Naturfasern in endlicher Länge sowie deren Neigung zur ungewollten Bildung von Nestern durch gegenseitiges Verhaken stellen sich bei der industriellen Nutzung als ein entscheidendes Problem dar. Hierdurch wird eine dosierte Zuführung in den weiterverarbeitenden Prozessen behindert. Um dennoch einen Einsatz bzw. die dosierte Einspeisung der Fasermaterialien zu gewährleisten, werden nach dem Stand der Technik meist Gewebe, Flächengelege (v. a. Flore und Vliese) und Stränge (z. B. Kardenbänder) hergestellt. Zudem haben sich Halbzeuge in Form von rieselfähigen Pellets und Granulaten (meist Compounds) am Markt etabliert. Während eine Vielzahl von verfahrenstechnischen Lösungen der Herstellung von Flächen- und Strangstrukturen aus der Textilindustrie vorliegen, ist die Produktvielfalt im Bereich von Granulaten und Pellets recht überschaubar. Bei einem Großteil dieser Verfahren müssen die Fasern im Vorfeld textil aufbereitet werden, was zu höheren Produktkosten führt. Bei weiteren Verfahren der Pressagglomeration ist eine Schädigung der Fasern durch mechanische und thermische Einwirkungen nicht auszuschließen. Zudem erlauben diese Herstellungsverfahren meist nur eine eher geringe Variabilität einzelner Produkteigenschaften (z. B. Porosität), so dass die einzelnen Verfahren lediglich einen begrenzten

Produktmarkt (Faserverbundwerkstoffe, Faserbaustoffe oder Fluidaufbereitung) beliefern können. Ein weiteres Kriterium der Wirtschaftlichkeit sind Lagerung und Transport zur Gewährleistung einer dezentralen Produktion. Hierfür müssen die hergestellten Produkte eine ausreichende Formstabilität aufweisen. Eine Verschiebung im Gefüge durch Absacken und Verdichtung tiefer liegender Bereiche darf nicht auftreten. Dies spielt auch bei den Einsatzgebieten der Dämmstoffe eine entscheidende Rolle.

Innerhalb dieser Arbeit wird der Begriff der „*Faseragglomeration*“ als Prozess der Vereinigung von Fasermaterialien geprägt. Hierbei wird vornehmlich die Herstellung stückiger Gebilde (Agglomerate) betrachtet. Aufgrund des fasrigen Ausgangsmaterials kommt es zur Ausbildung des inneren Gefüges und der Oberfläche mit von der klassischen Agglomeration von Schüttgütern abweichenden Strukturen. Aus diesem Grund wird ein Screening unterschiedlicher Charakterisierungsverfahren durchgeführt und teils modifiziert, um so die Anwendbarkeit auf die Faseragglomerate zu verbessern. Hierbei handelt es sich um die Charakterisierungsansätze des Einzelagglomerates. Diese Kennwerte können herangezogen werden, um eine Bewertung des Agglomerationserfolges unterschiedlicher Herstellungsverfahren und -einflüsse, aber auch eine Bewertung des Prozesszustandes (Qualitätssicherung) späterer Produktionsanlagen zu ermöglichen.

Des Weiteren werden in dieser Arbeit zwei Verfahren der Faseragglomeration untersucht. Hierbei handelt es sich zum einen um ein neuartiges Verfahrensprinzip, der *Rollagglomeration*, welche speziell zur Faseragglomeration entwickelt wurde. Zum anderen soll die optionale Adaption der klassischen Aufbauagglomeration zur Herstellung möglichst kugelförmiger Faseragglomerate betrachtet werden. Hierfür sind im ersten Schritt eine Gestaltung der Versuchsanlage zur Umsetzung des Rollagglomerationsprinzips sowie die Wahl einer geeigneten Anlage zur Aufbauagglomeration erforderlich, welche ein weites Spektrum an Untersuchungsparametern zulässt. Anhand dieser Anlagen soll ein Überblick über die Möglichkeiten, Vorzüge und Nachteile dieser Verfahren mittels der festgelegten Charakterisierungsansätze erfolgen. Zudem bleibt es festzustellen, über welche Anlagen- und Faserparameter die Agglomeratkennwerte beeinflusst werden und den Einsatz in den drei Hauptanwendungsgebieten in Aussicht zu stellen.

Als Fasermaterialien sollen aufgrund der derzeitigen Entwicklungen vor allem Hanf- und Flachsfasern herangezogen werden. Zudem wird das prinzipielle Agglomerationsverhalten weiterer Naturfasern wie auch von Chemiefasern und Mischungen dieser Faserarten untersucht.

Tabelle 1-1 Faseragglomeratsanforderungen in Bezug auf die betrachteten Verwendungszwecke

	Transport Lagerung Dosierung	Verbundwerkstoffe	Dämmschüttung	Fluidaufbereitung
Fasercharakteristika				
Faserart		x	x	(x)
Faserlänge		x		
Faserdicke		x		
Faserdichte		x	x	
Agglomeratcharakteristika				
Masse	x			
geometrische Gestalt	x			
räumliche Ausdehnung	x			
innere Oberfläche				x
Formfaktor	x			
Porosität		x	x	x
Oberflächenstruktur	x			(x)
Verformungswiderstand (Druckspannung)	x		x	x
Formrückgewinnungsvermögen	x			(x)
anwendungsspezifische Eigenschaften				
Abriebsfestigkeit	x			x
Agglomeratzugfestigkeit	als Indiz für Auflöseverhalten			
Auflöseverhalten ¹ /Strukturbeständigkeit ²		x ¹	x ²	x ²
Durchströmbarkeit				x
Formrückgewinnung	x			x
Schüttdichte	x		x	x
Verformungswiderstand	x		x	
Wärme- und Schalldämmwirkung			x	
Wasserdampfdiffusionswiderstand			x	
Wechselwirkung/Verhakung	x	x	(x)	(x)

x: direkter Einfluss auf Anwendungsbereich

In Hinblick auf die Verwendungsbereiche müssen die Faseragglomerate mit unterschiedlicher Gewichtung gewisse Eigenschaftsanforderungen erfüllen (siehe Tabelle 1-1). Die Grundform der Faseragglomerate hat neben einem Einfluss auf das Fließverhalten auch einen auf das Schüttvolumen. Somit wird teils bei der Substitution bestehender Produkte eine vergleichbare äußere Form vom Anwender bevorzugt, da dies eventuelle anlagentechnische Modifikationen gering hält.

Kapitel 2

Fasermaterialien

2 Fasermaterialien

Da die Eigenschaften der Fasermaterialien einen entscheidenden Einfluss auf den Agglomerationserfolg besitzen, werden im Folgenden die unterschiedlichen Faserarten sowie die durchgeführten Charakterisierungsschritte dargestellt, um so eine hohe Reproduzierbarkeit und Ableitung der Einflüsse zu ermöglichen.

Der Begriff „Faser“ gleicht in der Regel einer subjektiven Betrachtung der äußeren Erscheinungsform eines länglichen Elements. Er wird in einer Reihe von Literaturquellen verwendet, ohne dass eine klare Definition bzw. Eingrenzung gegeben ist. So auch in der DIN 60000, wo der Begriff der textilen Faserstoffe wie folgt definiert wird:

„Textile Faserstoffe im Sinne dieser Norm sind linienförmige Gebilde, die sich textil verarbeiten lassen (Textilfasern). Sie besitzen das gemeinsame Kennzeichen einer im Verhältnis zu ihrem Querschnitt großen Länge sowie ausreichender Festigkeit und Biegsamkeit.“ [DIN 60000]

Wie das Verhältnis definiert und was hierbei unter „ausreichender Festigkeit“ zu verstehen ist, wird in dieser wie auch in weiteren Normen nicht klar benannt. Eine mögliche Einordnung dieser Verhältnisse wird im Naturfaserlexikon von Schenek [A.S.'00] gegeben. Demnach weisen technische Fasern ein minimales Verhältnis von Länge zu Durchmesser von 10:1, textile Fasern von 1000:1 auf.

Zu den textilen Fasern werden neben den Chemiefasern (PP⁵, PE⁶ usw.), den geläufigen Naturfasern (vor allem Hanf und Flachs) auch Gummifasern, Metallfasern sowie Spinnpapierfasern gezählt, sofern diese textil verarbeitbar sind. Grundsätzlich erfolgt eine Unterscheidung in Naturfasern (pflanzliche, tierische und mineralische Fasern) und Chemiefasern (aus natürlichen oder synthetischen Polymeren). Durch unterschiedliche Verfahren können die textilen Fasern zu Halb- und Fertigfabrikaten verarbeitet werden. [DIN 60000]

Fasern weisen je nach Art und Herkunft unterschiedliche, charakteristische Kennwerte und Eigenschaften auf. Für technische Anwendungen sind vor allem der Faserdurchmesser (Feinheit), die Dichte der Faser, die Faserlänge, die Zugfestigkeit bzw. das E-Modul sowie die Dehnungsgrenze von wesentlicher Bedeutung. Die Tabelle 2-1 zeigt für einige Fasermaterialien beispielhaft Werte auf, wobei diese für Naturfasern in unterschiedlichen Literaturstellen teilweise auffällig variieren. Dies ist vor allem darin begründet, dass die Qualität der Naturfaser aufgrund von äußeren Einflüssen verhältnis-

⁵ Polypropylen

⁶ Polyethylen

mäßig starken Schwankungen unterliegt (siehe auch Kapitel 2.1). Außerdem beeinflussen unterschiedliche Aufbereitungsverfahren sowie Messbedingungen die Faserkennwerte.

Tabelle 2-1 Vergleich allgemeiner Fasereigenschaften

[E.W. '81]; [W.B. '93]; [E.K. '00]

Faserart	Durchmesser [μm]	Dichte [g/cm^3]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [GPa]	Dehnung [%]	Faserlänge [mm]
<i>E-Glas</i>	10,2	2,54	72,4	3,45	4,8	∞
<i>Carbon (PAN-HAT)</i>	7,6	1,74	240	3,60	1,5	∞
<i>Aramid</i>	12,7	1,44	124	3,62	2,9	∞
<i>Hanf (technische Faser)</i>	50 - 100	1,4 - 1,5	12,7	0,2 - 0,7	1,0 - 4,7	600 - 2500
<i>Hanf (Elementarfaser)</i>	12 - 20	1,4 - 1,5	90	1,10	1,6	15 - 30
<i>Flachs (technische Faser)</i>	33	1,48 - 1,5	12 - 27,6	0,25 - 0,39	1,3 - 3,2	100 - 1500
<i>Flachs (Elementarfaser)</i>	17 - 22	1,48 - 1,5	64,5 - 93	0,36 - 1,10	1,7	20 - 50
<i>Asbest</i>	5,1	2,5	159	2,07	k.A.	k.A.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden „*textile Fasern*“ wie auch „*technische Fasern*“ lediglich als „*Fasern*“ bezeichnet, wobei es sich bei den verwendeten Naturfasern in realer Betrachtung um Naturfaserbündel handelt (siehe auch folgende Kapitel).

2.1 Naturfasern

Naturfasern lassen sich in eine Reihe von Unterklassen gliedern (siehe Abbildung 2-1). Die Hauptunterteilung erfolgt zwischen organischen und anorganischen Fasern. Die Bildung von Pflanzenfasern wird durch Biokatalysatoren (Enzyme) strukturabhängig gesteuert, wobei eine exakte Reproduktion von Sequenzen vorliegt. Der Bildungsprozess der pflanzlichen Naturfasern begründet sich im Wachstumsvorgang der Pflanze selbst oder deren Früchte bzw. Samen. Die Faserbildung ist durch äußere Bedingungen beeinflusst (Temperatur, Wasserangebot, Schädlinge, Nährstoffangebot u. a.). Diese Einflüsse wirken sich auf die Menge und die Beschaffenheit der gebildeten Fasern aus. So ist beispielsweise beim Flachs durch Wassermangel mit Faserertragseinbußen zu rechnen. Aus diesen Gründen kann es zu einer Variation der Faserqualität kommen. Auch die verwendete Pflanzen- bzw. Faserverarbeitung hat einen Einfluss auf die Qualität und die Eigenschaften der gewonnenen Fasern. [W.B.'93]

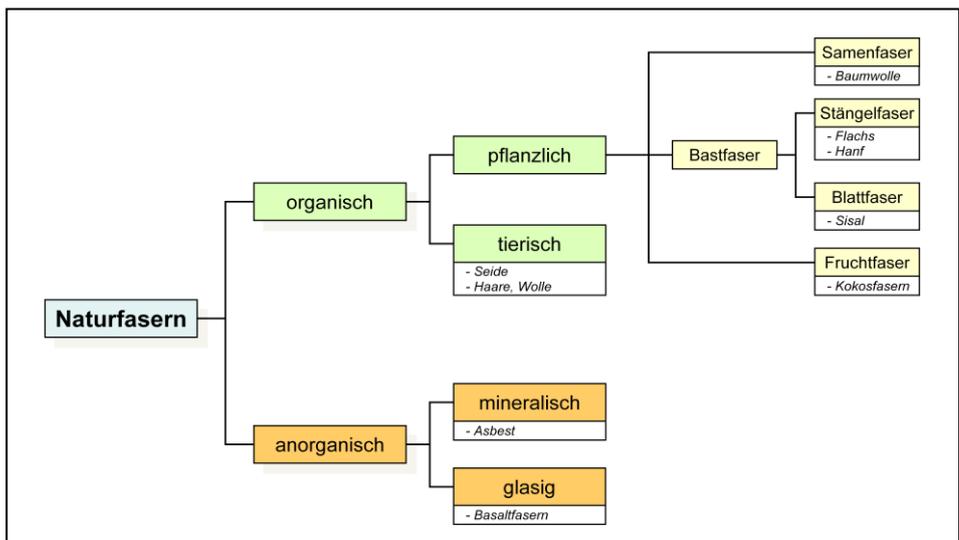


Abbildung 2-1 Gliederung von Naturfasern

nach [W.B. '93]

Der kleinste Baustein jeder pflanzlichen Faser ist die Faserzelle (Mikro-Fibrille), welche aus sogenannten Bastzellen gebildet wird (siehe Abbildung 2-2). Pflanzenfasern besitzen in der Regel keine glatten Oberflächen wie es bei Chemiefasern der Fall sein kann (abhängig vom eingesetzten Herstellungswerkzeug). Je dicker das Faserbündel ist, desto höher ist die Anzahl an Elementarfaser, womit die Wahrscheinlichkeit von Ungleichmäßigkeiten wie abstehenden Fasern und Hohlräumen (siehe Abbildung 2-3) ansteigt.

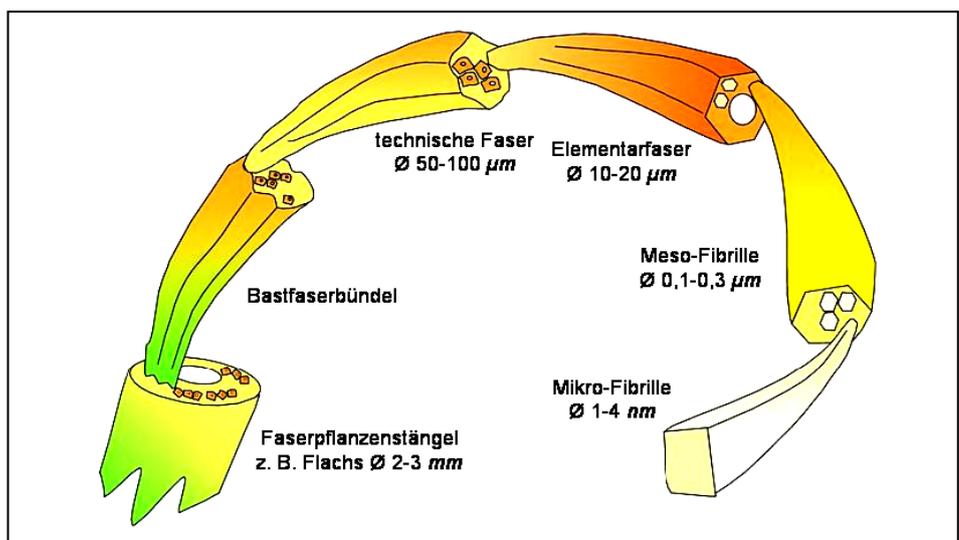


Abbildung 2-2 Faserunterstrukturen eines Faserpflanzenstängels

nach [H.B. '05]

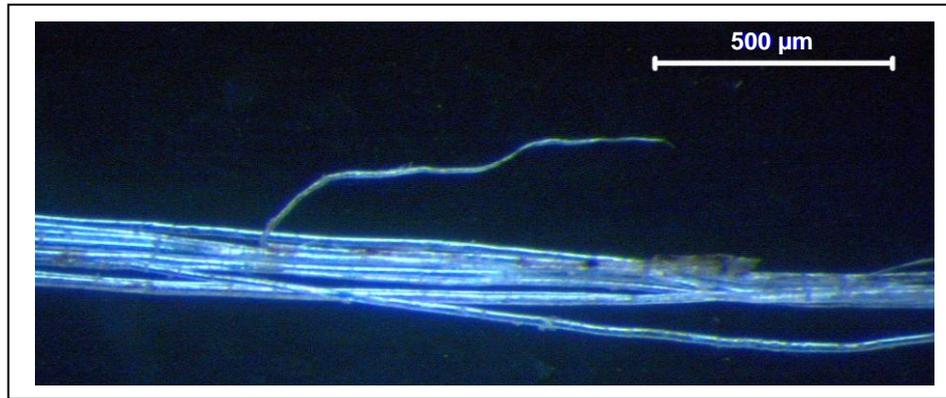


Abbildung 2-3 Mikroskopische Betrachtung einer Hanffaser

Der Einfluss des Aufbereitungsverfahrens bzw. Aufschlussgrades von Naturfasern zeigt sich neben der Faserdickenabnahme mit höherem Aufschlussgrad exemplarisch in der Betrachtung der Dichte von Elementar- und technischer Faser. Prinzipiell liegt die Dichte bei technischen Pflanzenfasern unterhalb der Dichte, die deren Elementarfasern aufweisen. Dies ist in dem Aufbau der Faserstruktur begründet, wodurch die technische Faser eine Porosität besitzt. Es handelt sich streng genommen bei den Angaben der Dichte der technischen Fasern um einen Wert der Scheindichte. So weist die Kokosfaser eine Elementardichte von $1,46 \text{ g/cm}^3$ auf, während die Faserdichte bei $0,95 \text{ g/cm}^3$ liegt [W.B.'93]. Kokosfaser besitzt somit eine Porosität von 34,9% [E.W.'81]. Flachs und Hanffasern weisen hingegen eine mittlere Porosität zwischen 1,5% und 4,7% auf [E.W.'81]. Mit Abnahme des Aufschlussgrades bzw. Zunahme der Faserdicke nimmt die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im Fasergefüge zu, was sich auch anhand einer geringeren Zugfestigkeit belegen lässt (siehe auch Tabelle 2-1).

Die Grundsubstanz aller pflanzlichen Fasern ist die Cellulose (siehe Tabelle 2-2), welche in esterartigen Verbindungen mit einer Reihe von Begleitstoffen vorliegt. Bei den Begleitstoffen handelt es sich vor allem um Lipide (Fette, Wachse, Harze), Mineralien, Wasser sowie Lignin- und Pektinstoffe. Besonders die Ligninkomplexe beeinflussen den technischen Wert und die Einsatzmöglichkeiten der Fasern. Je höher deren Anteil liegt, desto höher ist der Verholungsgrad, wodurch die Teilbarkeit der Faserbündel abnimmt (erzeugte Fasermaterialien weisen eine größere Dicke auf). [E.W.'81]

Tabelle 2-2 Chemische Zusammensetzung ausgewählter Pflanzenfasern [E.W.'81]

Faserart	Cellulose	Hemi-cellulose	Pektin	Lignin	Fette, Wachse	Wasser
<i>Flachs</i>	64,1%	16,7%	1,8%	2,0%	1,5%	10,0%
<i>Hanf</i>	67,0%	16,1%	0,8%	3,3%	0,7%	10,0%
<i>Jute</i>	64,4%	12,0%	0,2%	11,8%	0,5%	10,0%
<i>Sisal</i>	65,8%	12,0%	0,8%	9,9%	0,3%	10,0%

Die Gewinnung der Pflanzenfasern erfolgt in einer Reihe von Prozessschritten (siehe Abbildung 2-4). Beispielhaft soll anhand einer am *Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim e.V.* entwickelte Maschinenlinie der Aufwand des Aufschlusses von Faserpflanzen dargestellt werden (siehe Abbildung 2-5).

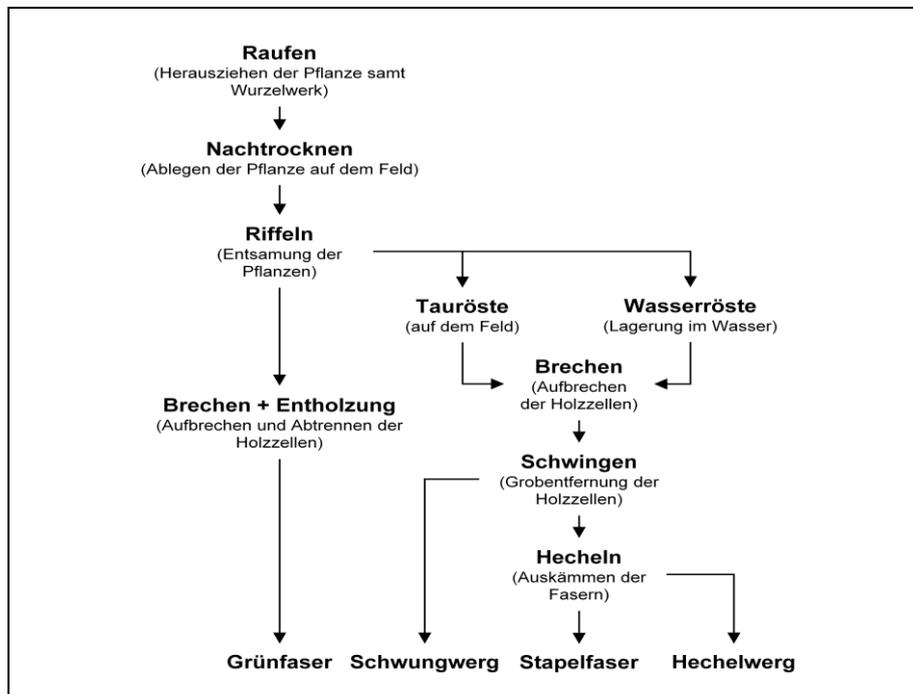


Abbildung 2-4 Grundprinzip der klassischen Fasergewinnung nach [S.O.'02]

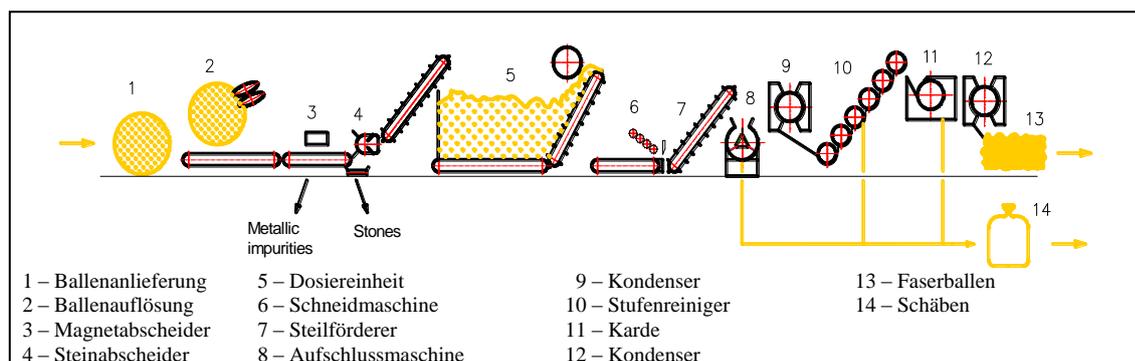


Abbildung 2-5 Maschinenlinie zur Naturfasergewinnung des ATB

[F.M.'02]

Die erste Anlageneinheit wird von einem Ballenöffner (2) gebildet. Nach der Abscheidung von Fremdstoffen (3)+(4) folgt der eigentliche Faseraufschlussprozess. Hierbei durchlaufen die Pflanzenstängel eine Reihe von Presswalzen, um so eine Einkürzung durch die oszillierenden Messer der Schneideeinheit (6) zu ermöglichen. Innerhalb der Aufschlussmaschine (8) werden die Stängel anschließend gebrochen, so dass es zum Aufschluss des Gefüges von Schäben und Fasern kommt. In weiteren Schritten können

die Schäben beispielsweise mittels Kammschüttel [R.P.'08] abgetrennt und die Faserstränge weiter vereinzelt bzw. weiter aufgeschossen werden. [F.M.'02]

Die erzeugten Naturfasern lassen sich anhand ihrer Gestalt und den weiteren Verwendungszwecken untergliedern. Da alle Naturfasern (ausgenommen Kokonfasern der seidenspinnenden Insekten) in ihrer Länge endlich sind, werden sie von der Faserform als *Spinnfasern* eingestuft, auch wenn sie nicht versponnen, sondern andere Verarbeitungsprozesse durchlaufen. Kurzfasern, welche aufgrund ihrer Länge nicht verspinnbar sind, werden als *Flockfasern* bezeichnet. Hingegen werden Kurzfasern, die bei der Verarbeitung von Bastfasern anfallen, unter dem Begriff *Werg* zusammengefasst. [DIN 60001-2]

2.2 Chemiefasern

Innerhalb der weiterführenden Untersuchungen der Rollagglomeration mit unterschiedlichen Fasermaterialien wurden neben Naturfasern auch Chemiefasern eingesetzt. Im Gegensatz zu den Naturfasern werden Chemiefasern auf technischem Wege erzeugt. Auch wenn natürliche Ausgangsmaterialien zur Faserherstellung eingesetzt werden, gelten diese als Chemiefaser. Eine geläufige Gliederung der Chemiefasern ist in der Abbildung 2-6 wiedergegeben.

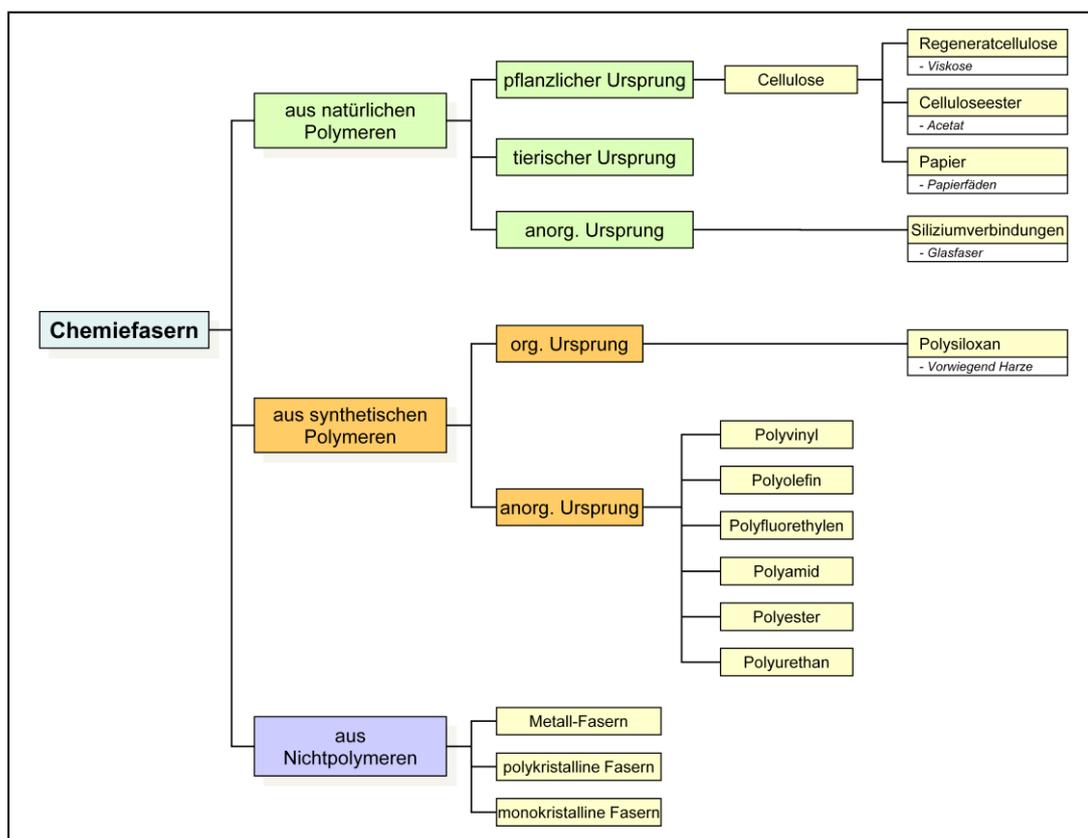


Abbildung 2-6 Gliederung der Chemiefasern

nach [W.B.'93]

Chemiefasern können theoretisch eine endlose Länge aufweisen. Diese Endlosfasern werden auch als *Filamente* bezeichnet. Durch Weiterverarbeitung lassen sich hieraus weitere Erscheinungsformen wie z. B. Kabel⁷ (siehe Abbildung 2-7) herstellen. [DIN 60001-2]

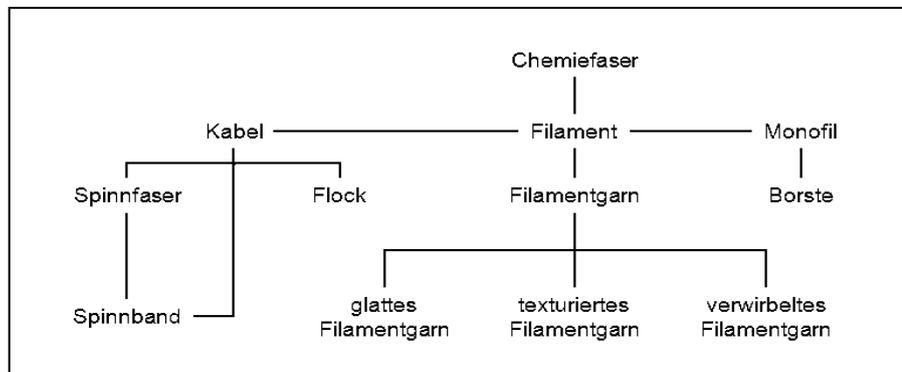


Abbildung 2-7 Herstellungsförmungen von Chemiefasern nach [DIN 60001-2]

Der traditionelle Weg der Herstellung von Chemiefasern geschieht über die Teilprozesse des Reckens und Fixierens. Dabei wird die übermolekulare Struktur der erzeugten Fasern sowie deren Feinheit und Oberflächenstruktur weitestgehend festgelegt [W.B.'93]. Die weiteren Möglichkeiten der Faserprodukterzeugung sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen.

2.3 Charakterisierung von Fasern

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die charakteristischen Eigenschaften der in den Versuchen eingesetzten Fasern bestimmt. Hierbei wurden die charakteristischen Größen wie Länge, Dicke, Feuchtegehalt und Steifigkeit der unterschiedlichen Fasern aufgenommen. Die Untersuchungen der Fasern erfolgten unter Normklimatisierung nach DIN EN ISO 139. In den folgenden Unterkapiteln werden die Messverfahren sowie die faserspezifischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien aufgeführt.

2.3.1 Faserlänge

Die Faseragglomerationsprozesse wurden für unterschiedliche Faserlängen untersucht. Diese Variationen der Faserlängen erfolgten per Hand wie auch durch Einsatz einer Schneidmühle. Bei beiden Verfahren der Einkürzung von Faserkollektiv traten Faserlängenverteilungen auf. Somit wurde für eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche

⁷ Vielzahl von Filamenten ohne oder mit geringer Verdrehung

sowie zur Klärung der Faserlängeneinflüsse die Faserlängenverteilungen für bestimmte Schnittlängen bzw. Maschenweiten des Austragssiebes der Schneidmühle ermittelt.

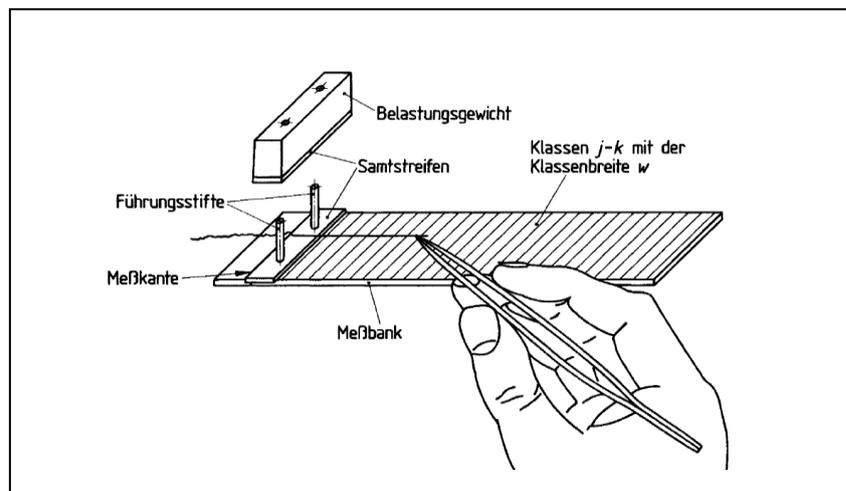


Abbildung 2-8 Ein-Pinzetten-Verfahren

[DIN 53808-1]

Die Vermessung der Faserlängenverteilungen des eingekürzten Faserkollektivs mit großen Faserlängen erfolgte mittels Ein- bzw. Zwei-Pinzetten-Verfahren nach DIN 53808-1 (siehe Abbildung 2-8). Hierbei werden die Fasern einzeln vermessen. Für die Längenanalyse der in der Schneidmühle eingekürzten Fasermaterialien kam das CIS⁸ Programm *WCIS100* der Firma *Galai Production Ltd.* zum Einsatz.

2.3.2 Faserdicke/Faserfeinheit

Als Faserdicke wird der Durchmesser des Faserquerschnitts verstanden. Für kreisrunde sowie nahezu kreisrunde Fasern lässt sich die Faserdicke über ein Projektionsverfahren ermitteln. Bei Fasern, deren Querschnittsflächen variieren bzw. stark von einer runden Geometrie abweichen, ist nach DIN 53811 das Wiegeverfahren (gravimetrische Faserdickenbestimmung) anzuwenden.

Da die eingesetzten Naturfasern eine längenabhängige Faserdickenverteilung aufwiesen, erfolgte die Charakterisierung über ein computergestütztes Bildanalyse-System *Fibreshape* [G.W.'05], um diese Abhängigkeit mit zu erfassen. Die zu untersuchenden Fasermaterialien lagen beim Scannprozess frei von Verunreinigungen und vorzugsweise ohne Überlagerungen vor. Das so erzeugte Grauwertbild besaß 256 Grauwertabstufungen bei einer Bildauflösung von 4.000 dpi. Aus diesem Graubild wurde ein Binärbild erzeugt, aus dem anschließend die entsprechenden Verteilungskurven ermittelt wurden.

⁸ Computerized Inspection System

Neben der Angabe des Faserdurchmessers erfolgt in der textilen Industrie eine Charakterisierung der Faserfeinheit mittels Tex-System. Dies beinhaltet die längenbezogene Masse textiler Fasern, Zwischenprodukte, Garne, Zwirne sowie verwandter Erzeugnisse [DIN 53810; DIN 60905-1/-3]. Mathematisch lässt sich der Faserdurchmesser (d_F [μm]) unter Kenntnis der Faserdichte (ρ_F [g/cm^3]) in die Faserfeinheit „Titer Tex“ (Tt [dtex]) umrechnen (siehe Gleichung 2-1). Hierbei wird ein kreisrunder Faserquerschnitt angenommen. Die Einheit *tex* ist als Gramm pro Kilometer Länge definiert. Nach DIN 60905-3 ist eine spezielle Rundungstabelle zu verwenden, nach der die errechneten Faserfeinheiten vorzugsweise angegeben werden (siehe Anhang).

$$Tt = \frac{d_F^2 \cdot \rho_F \cdot \pi}{4 \cdot 10^2}$$

Gleichung 2-1

Neben der direkten Vermessung besteht zudem die Möglichkeit einer Bestimmung der mittleren Faserfeinheit mittels unterschiedlicher Luftstromprufverfahren. Hierbei kann die Faserfeinheit aufgrund des Durchstromungswiderstandes eines Faserpfropfens ermittelt werden. Je feiner das Fasermaterial des Ppropfens ist, desto größer wird seine volumenspezifische Oberfläche, was eine Erhöhung des Durchstromungswiderstandes mit sich zieht [E.K.'00]. Dieses Fasercharakterisierungsverfahren wurde innerhalb der durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der spezifischen Oberfläche der Faseragglomerate verwendet. Weiteres hierzu wird im Kapitel 5.4 behandelt.

2.3.3 Faserfeuchte

Die Faserfeuchte hat einen Einfluss auf die geometrischen Abmessungen sowie auf die physikalischen Eigenschaften (vor allem Zugfestigkeiten) [W.B.'93]. Die Faserfeuchte „ ω “ wurde nach der DIN 53800-1 ermittelt. Hierbei wurden die Faserproben bei $105 \pm 3^\circ\text{C}$ in einem Trockenschrank mit einem Luftvolumenstrom von 1,5 bis $2 \text{ m}^3/\text{min}$ getrocknet. Der Trocknungsprozess gilt als abgeschlossen, wenn die Massenabnahme zwischen zwei Wägungen im Abstand von 10 *min* unterhalb von 0,05% liegt. Die Differenz der Ausgangsmasse zur Trockenmasse ist der Anteil des Wassers im Ausgangsmaterial. Aus diesen Messwerten lässt sich der Feuchtegehalt nach Gleichung 2-2 berechnen.

$$\omega = \frac{m_{\text{Feucht}} - m_{\text{Trocken}}}{m_{\text{Feucht}}} \cdot 100\%$$

Gleichung 2-2

2.3.4 Faserbiegefestigkeit

Die Zugfestigkeit von Fasern - insbesondere von Naturfasern - ist in zahlreichen Literaturstellen aufgeführt. Speziell für die in dieser Arbeit untersuchten Faseragglomerationsverfahren ist jedoch die *Biegesteifigkeit* von entscheidender Bedeutung, da diese einen Einfluss auf das Reexpansionsverhalten hat. Auch für die Textilverarbeitung ist dieser Eigenschaftswert von Bedeutung. Für eine Reihe von Faserarten, die sich in der Textilindustrie etabliert haben (Chemie-, tierische Natur- sowie Baumwollfasern), liegen Zahlenwerte in unterschiedlichen Veröffentlichungen vor. Innerhalb dieser Literaturquellen wird zudem darauf hingewiesen, dass die Messverfahren nicht standardisiert sind. Da eine Abhängigkeit der Biegesteifigkeit von der vorherrschenden Temperatur, Feuchtigkeit und Beanspruchungsdauer vorliegt [W.B.'93]; [E.K.'00], weisen verschiedene Publikationen unterschiedliche Kennwerte der Biegefestigkeit auf (beispielhafte Werte siehe Abbildung 2-9).

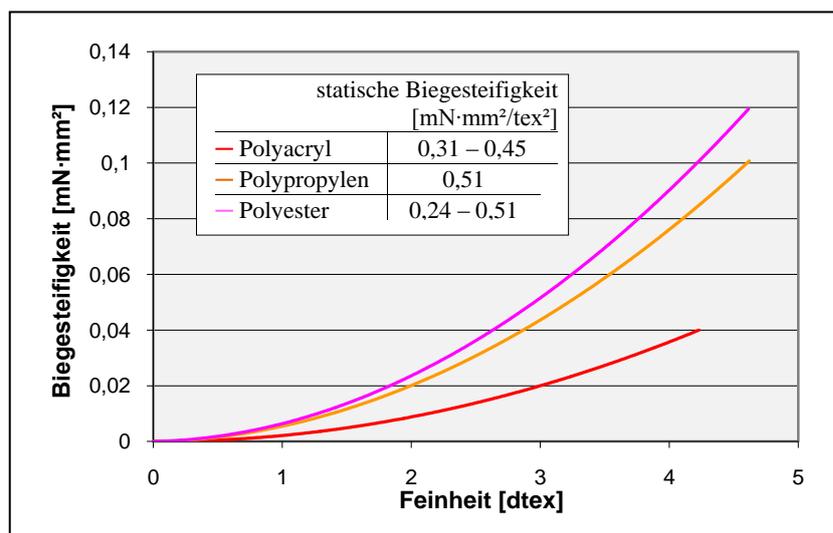


Abbildung 2-9 Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Feinheit nach [E.K'00]

Bei Probeuntersuchungen am „Institut für Textil- und Bekleidungstechnik“ der TU Dresden wurde eine Reihe von Problemen bei der Messung der Biegesteifigkeit der verwendeten Naturfasern, die eine Bewertung des Widerstandes nicht möglich machten, festgestellt. Hauptproblem war die über die Faserlänge gesehene unregelmäßige Querschnittsfläche. Hierdurch konnte kein exakter Faserquerschnitt ermittelt werden, auf den der Biegevorgang einwirkt. Zudem kam es durch weitere Unregelmäßigkeiten im Gefüge der Faser zu einem punktuellen Einknicken und nicht zu einer gleichmäßigen Biegung über die beanspruchte Länge. Dieses Verhalten machte eine gesicherte Aussage über die Biegesteifigkeit der eingesetzten Naturfaser nicht möglich.

Ein weiterer Kennwert für Fasern bezüglich der Biegefestigkeit ist die *Dauerbiegezahl*. Hierbei wird die Faser mehrfach bis zum Bruch wechselseitig gebogen, wofür es eine Vielzahl unterschiedlicher Prüfverfahren gibt. Ohne Angabe des eingesetzten Analyseverfahrens gibt *Reumann* [E.K.'00] für Flachfasern eine Biegezahl von 849 an. Für Hanffasern wurden keine Zahlenwerte gefunden. Es lässt sich annehmen, dass die Biegezahl der Hanffasern im vergleichbaren Bereich liegt. Eigene Untersuchungen innerhalb eines *Sinus-Dauerbiegeversuchs* (10 g Zuglast, -90° ... $+90^{\circ}$ Faserbiegung) an den verwendeten Hanffasern, ergaben nach 1000 Biegeintervallen kein Durchreißen der Faser. Lediglich ein leichtes Aufspalten des Gefüges (Abspleizungen) ließ sich per Mikroskop erkennen.

2.3.5 Faserkräuselung

Unter einer Kräuselung wird prinzipiell ein wellenförmiger Faserverlauf verstanden. Für dessen Bewertung haben sich zwei Methoden durchgesetzt. Zum einen die Anzahl der Bögen pro Länge, zum anderen das Verhältnis der gekräuselten zur gestreckten Faserlänge. [E.K.'00]

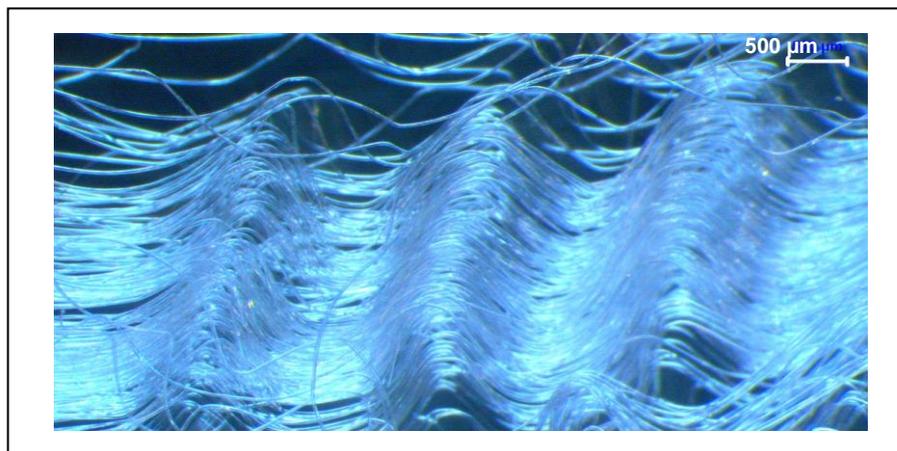


Abbildung 2-10 Kräuselung eines PP-Faser-Kollektivs (6,7dTex)

Während die verwendeten Naturfasern keine Kräuselung aufwiesen, zeigte sich bei den PP-Fasern eine eindeutige Kräuselung. Am Beispiel der 6,7 dtex feinen PP-Faser (siehe Abbildung 2-10) ist eine regelmäßige Kräuselung zu erkennen. Da die Täler flach sind und die Wellenberge spitz verlaufen, wurde zur Charakterisierung der Kräuselung das Verhältnis der gekräuselten zur gestreckten Faser verwendet.

2.4 Eingesetzte Fasermaterialien

In den durchgeführten Versuchen der Faseragglomeration wurden unterschiedliche Fasermaterialien verwendet. Vor allem kamen Hanffasern, geschnitten aus einem Kalfaterband der *Hanf-Faser-Fabrik (Prenzlau)*, zum Einsatz. Des Weiteren wurden Flachsfasern aus einem Kardenband der *Flachshaus GmbH (Giesendorf)* sowie Polypropylenfasern der *Heinrich Reinhold GmbH&Co.KG (Selbitz)* verwendet. Die charakteristischen Kennwerte ausgesuchter Fasermaterialien wie Dichte, E-Modul, Zugfestigkeit sowie Dehnungsgrenze sind der Tabelle 2-1 des vorhergehenden Kapitels zu entnehmen.

Während die Faserdicken des Polypropylenfaserkollektivs mit $30,6 \mu\text{m}$ bzw. $17,5 \mu\text{m}$ ($6,7$ bzw. $2,2 \text{ dTex}$) einen konstanten Wert aufwiesen, zeigte sich bei den beiden Naturfasermaterialien eine Faserdickenverteilung (siehe Abbildung 2-11).

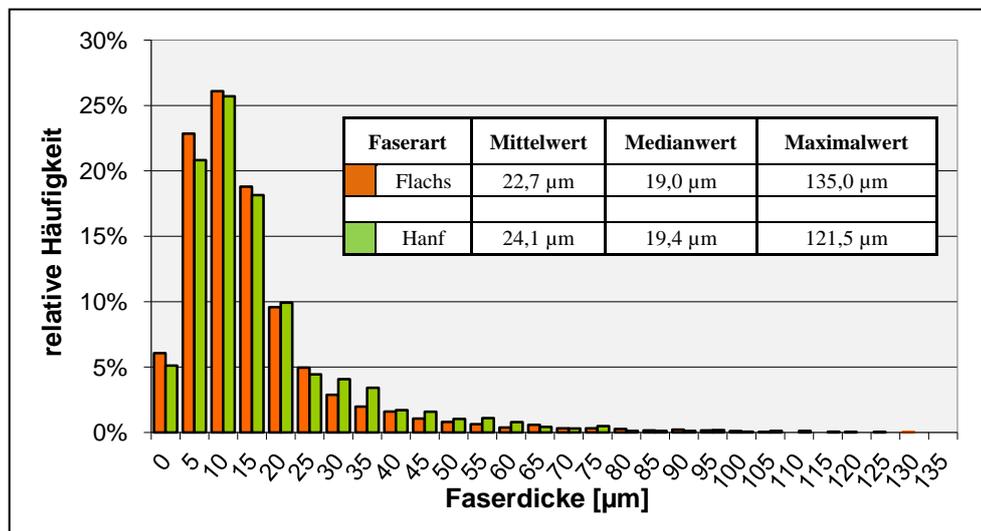


Abbildung 2-11 Faserdicken-Verteilung für eingesetzte Naturfasermaterialien

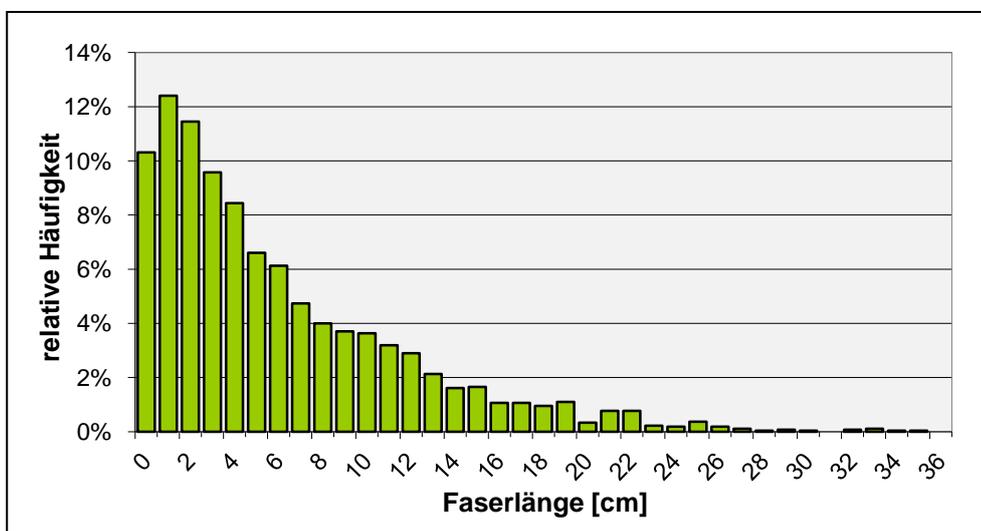


Abbildung 2-12 Faserlängenverteilung des Hanf-Kalfaterbandes

Die im Kalfaterband vorliegenden Hanffasern besaßen wie die verwendeten Flachsfasern eine Faserlängenverteilung (siehe Abbildung 2-12). Auch nach dem Einkürzen der Fasern stellt sich keine einheitliche Faserlänge ein (siehe Anhang A.2). Vielmehr ergibt sich hierbei eine bimodale Verteilung. Diese ist vor allem dadurch begründet, dass das Maximum der relativen Häufigkeit der Faserlängenverteilung des Kalfaterbandes unterhalb dieser Schnittlänge liegt. Zudem kommt es durch die nicht exakte Parallelisierung des Faserkollektives zu ungleichmäßigen Einkürzungen. Entsprechende Kennwerte der verwendeten Fasermaterialien sind der Tabelle 2-3 zu entnehmen.

Tabelle 2-3 Charakteristische Werte eingesetzter Fasermaterialien im Ausgangszustand

	Hanffaser	Flachsfasern	PP-Faser	
Faserdichte [E.K.'00]	1,45 g/cm ³	1,49 g/cm ³	0,91 g/cm ³	
mittlere Faserfeinheit	6,8 dTex	6,0 dTex	2,2 dTex	6,7 dTex
Faserdurchmesser (Mittelwert)	24,1 µm	22,7 µm	17,5 µm	30,6 µm
Faserdurchmesser (Medianwert)	19,4 µm	19,0 µm	17,5 µm	30,6 µm
Faserlänge (Mittelwert)	69,9 mm	—	—	
Faserlänge (Medianwert)	47,4 mm	34,6 mm	38,2 mm	99,8 mm
Faserlänge (Maximalwert)	360 mm	—	—	
Kräuselung	glatt	glatt	22,2%	11,5%
Faserfeuchtegehalt	10%	10%	5%	
Biege­widerstand [W.B.'93]	k. A.	k. A.	0,51 mN·mm ² /tex ²	
Erweichungstemperatur [W.B.'93]	—	—	150-160°C	
Wärmeleitfähigkeit [E.K.'00]	k. A.	0,3 W/m·K	0,2 W/m·K	
spez. Wärmekapazität [E.K.'00]	k. A.	1,4 J/g·K	1,8 J/g·K	

Kapitel 3

Grundprozesse der Faseragglomeration

3 Grundprozesse der Faseragglomeration

Der Begriff der Agglomeration im klassischen Sinne beinhaltet ein Grundverfahren der mechanischen Verfahrenstechnik, welches klar und eng definiert ist:

„Agglomerieren als Oberbegriff für die Verfahren der mechanischen Kornvergrößerung meint das Zusammenlagern und Aneinanderbinden von feindispersen festen Partikeln zu größeren Teilchenverbänden, den Agglomeraten.“ [M.S.'94] S.182

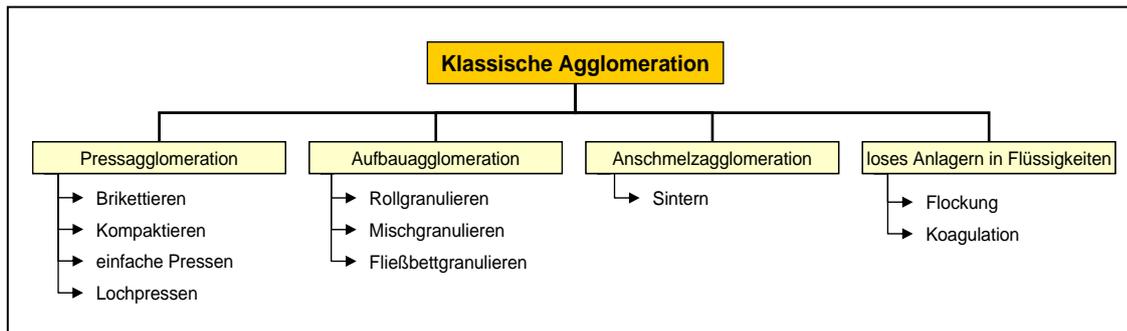


Abbildung 3-1 Gliederung der klassischen Agglomerationsverfahren

nach [G.H.'00];[M.S.'94]

Auch weitere Literaturstellen definieren die Agglomeration auf ähnliche Art und Weise, wobei sich auch diese nur auf Partikel beziehen. Prinzipiell wird in der klassischen Verfahrenstechnik zwischen vier Agglomerationsverfahren unterschieden (siehe Abbildung 3-1). Nach der DIN 53206-1 werden die Produkte der Agglomerationsprozesse in *Agglomerat* (nicht verwachsener Verband), *Aggregat* (verwachsener Verband) sowie als *Flokkulat* (in Suspensionen aufgetretene Agglomerate) unterschieden. Unabhängig von der äußeren Gestalt und des Agglomerationsverfahrens verfolgt jede gewollte Agglomeration dasselbe Ziel. Diese sind nach Schubert [H.S.'03-b] vor allem folgende Eigenschaftsverbesserungen:

- Verbesserte Fließeigenschaften sowie Dosierverhalten und Rieselfähigkeit
- Minderung von Staubanteilen
- Verbesserung der Durchströmbarkeit
- Vermeidung von Entmischungen
- Verbesserung der Dispergier- und Löseverhalten
- Erzeugung gleichmäßiger Partikelformen und -größen
- Verminderung der Korngrößenvarianz.

Um diese Eigenschaftsverbesserungen zu erreichen, werden in industriellen Prozessen seit langem klassische Agglomerationsverfahren wie Pressagglomeration, Aufbauagglomeration und Anschmelzagglomeration eingesetzt, so dass auf dem Markt eine große

Anzahl an anlagentechnischen Lösungen für unterschiedliche Schüttgüter besteht. Hierbei sind jeweils die ablaufenden Agglomerationsvorgänge der drei Agglomerationsverfahren vergleichbar und in zahlreichen Literaturstellen dargestellt. Der Einsatz von Fasermaterialien innerhalb dieser Agglomerationsprozesse dient, abgesehen von der Herstellung von Dämmstoffen, meist zur Verstärkung des Gefüges. *Pietsch* [W.P.'05] verweist hingegen auf die Herstellung von Papier und ähnlichen Produkten (klassisches Nassverpressen von Fasern) sowie Vliesen (textiles Herstellungsverfahren) als spezielle Agglomerationsprozesse.

Da die klassische Agglomeration ein klar definierter Prozess zur „Kornvergrößerung“ ist, wird an dieser Stelle eine weiterführende Definition der „Faseragglomeration“ vorgenommen, da die eingesetzten Fasermaterialien ein abweichendes Schüttgut- und Verarbeitungsverhalten zu körnigen Partikeln aufweisen. Ziele der Faseragglomeration sind dieselben wie bei den klassischen Agglomerationsverfahren (siehe oben). Ein weiterer Grund der Erweiterung des Agglomerationsbegriffes hin zur Faseragglomeration ist der, dass entgegen der klassischen Agglomeration theoretisch auch eine einzelne Faser mit sich selbst eine Art „Pseudoagglomerat“ bilden kann. Im klassischen Sinne handelt es sich nicht um einen Agglomerationsprozess. Jedoch sind die Ziele bei der Bildung von Pseudoagglomeraten sowie die Bildungsprozesse identisch mit denen der anderen Faseragglomerationsverfahren. Beispielsweise lassen sich Pseudoagglomerate innerhalb der untersuchten Rollagglomerationsverfahren erzeugen.

Zu den Faseragglomerationsprozessen werden somit neben den klassischen Verfahren (Pressagglomeration, Aufbauagglomeration und Anschmelzagglomeration) auch formgebende Verfahren der Faservereinigung der Faserindustrie sowie innovative bzw. angepasste Agglomerationsverfahren hinzugezählt (siehe Abbildung 3-2).

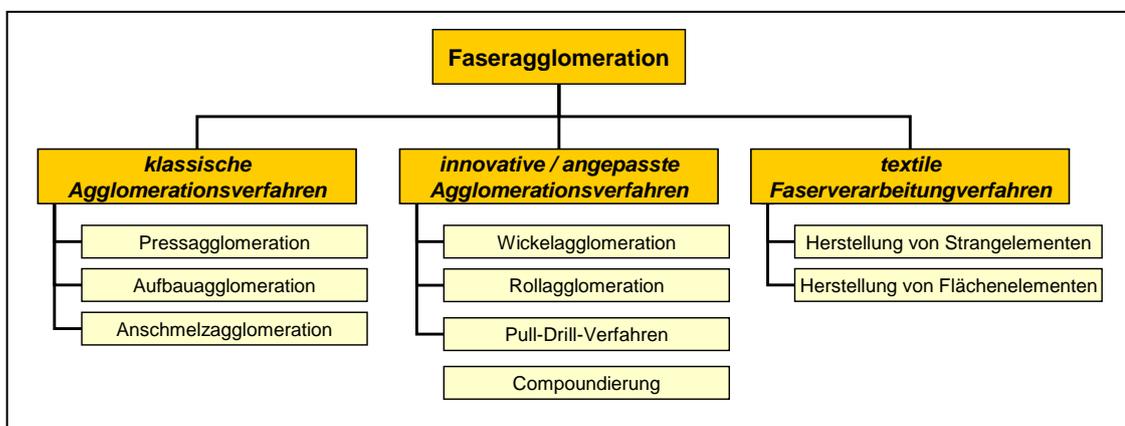


Abbildung 3-2 Faseragglomerationsverfahren

3.1 Bindemechanismen der Faseragglomeration

Prinzipiell entsprechen die Bindemechanismen der Faseragglomeration denen der klassischen Agglomerationsprozesse zur Schüttgutaufbereitung. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle lediglich eine kurze Darstellung der unterschiedlichen Wirkprinzipien gegeben, wobei auf die Bindemechanismen genauer eingegangen wird, die für die untersuchten Faseragglomerationsprozesse von entscheidender Relevanz sind. Allgemein lassen sich die Bindemechanismen in fünf Gruppen unterteilen (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 Bindemechanismen der Agglomeration

nach [W.P. '02]

<p>I. Feststoffbrücken</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sintern 2. partielles Schmelzen und Erhärten 3. erhärtende Bindemittel 4. Rekristallisation 5. Trocknungsvorgänge <ol style="list-style-type: none"> a. Auskristallisation gelöster Stoffe b. Ablagerung kolloidaler Teilchen <p>II. Adhäsion und Kohäsion (nicht freibewegliche Bindemittel)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Hochviskose Bindemittel 2. Adsorptionsschichten (< 3 nm Dicke) <p>III. Grenzflächenkräfte und Kapillardruck (freibewegliche Flüssigkeiten)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Flüssigkeitsbrücken 2. Kapillardruck <p>IV. Anziehungskräfte zwischen Feststoffen</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Van der Waals-Kräfte <ol style="list-style-type: none"> a. freie chemische Bindung (Valenzkräfte) b. Rekombinationsbindung an neu geschaffenen Oberflächen c. Wechselwirkung zwischen Atomen ohne Valenzbindung (z. B. Wasserstoffbrücken) 2. elektrische Kräfte (Elektrostatik, elektr. Dipolschicht, Überschussladung) 3. magnetische Kräfte <p>V. Formschlussbindung</p>	<p style="text-align: center;"> I.1, I.2, I.4 I.3, II.1, II.2 I.3, I.5, III.1 IV.1, IV.2, IV.3 V. III.2 </p>
--	--

Für die in dieser Arbeit untersuchten Faseragglomerationsverfahren (Rollagglomeration, Aufbauagglomeration) sind vor allem die Bindemechanismen der Formschlussbindung, der freibeweglichen Flüssigkeiten und der Auskristallisation gelöster Stoffe von

Bedeutung. Bei plastifizierbaren bzw. schmelzbaren Fasermaterialien kann es außerdem durch Sinterung und Schmelzvorgänge zur Bildung von Feststoffbrücken kommen.

Formschlussbindung

Formschlussbindungen basieren auf dem Verhaken der Fasern untereinander. Eine Zugabe von Bindemitteln ist hierbei nicht erforderlich. Je nach Art der Agglomerationsbedingungen kann eine raue, zerklüftete Faseroberfläche von Vorteil sein, da die Abspleizungen der einen Faseroberfläche in die der benachbarten greifen und so eine Bindung hervorrufen. Jedoch lassen sich auch glatte Fasern mittels Formschlussbindungen agglomerieren. Hierfür muss durch eine mehrfache Verschiebung bzw. Verpressung des Gefüges (Walken) eine Verschlingung der Faserenden und -schlaufen hervorgerufen werden. Entscheidend ist dieser Bindemechanismus für die Agglomeration innerhalb von Rollagglomerations- und Pressagglomerationsprozessen. Bei der betrachteten Aufbauagglomeration von verhältnismäßig kurzen Naturfasern spielt die Formschlussbindung eine eher untergeordnete Rolle.

Bindungen mittels freibeweglicher Flüssigkeiten

Häufig kommt Wasser als freibewegliche Flüssigkeit bei unterschiedlichen Agglomerationsprozessen zum Einsatz. Es besitzt eine freibewegliche Oberfläche und ist auch in sich freibeweglich. Die Zusammenhänge und Einflüsse der Bindungskräfte in Abhängigkeit des Sättigungsgrades lassen sich anhand einer sättigungsabhängigen Leistungsaufnahme eines Mischorgans feststellen (siehe Abbildung 3-3).

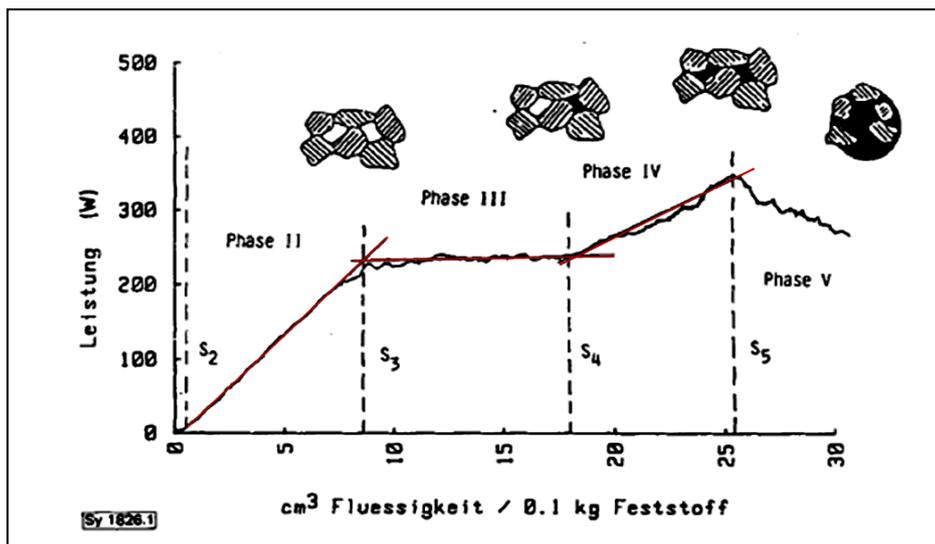


Abbildung 3-3 Bindungsmodell durch freibewegliche Flüssigkeiten (Lactose + dest. Wasser im Diosna-V10-Schnellmischer) [M.U. '89]

Die Leistungsaufnahme bei steigendem Sättigungsgrad „S“ der Partikelschüttung lässt sich nach *Usteri et. al.* [M.U.'89] in fünf Phasen unterteilen:

1. Phase ($S_1 \dots S_2$): Flüssigkeit wird von Feststoffpartikeln adsorbiert
2. Phase ($S_2 \dots S_3$): Bildung isolierter Flüssigkeitsbrücken ($\hat{=}$ Brückenbereich)
3. Phase ($S_3 \dots S_4$): Ausbau der Flüssigkeitsbrücken ($\hat{=}$ Brückenbereich)
4. Phase ($S_4 \dots S_5$): Füllung der Hohlräume ($\hat{=}$ Übergangsbereich)
5. Phase ($S > S_5$): Bildung einer Suspension ($S_5 \hat{=}$ Kapillarbereich).

$$S_N = \frac{(S_i - S_2)}{(S_5 - S_2)}$$

Gleichung 3-1

Die höchsten Bindungskräfte liegen bei einem nahezu komplett flüssigkeitsgefüllten Hohlraumgefüge ($S < 1 \hat{=}$ S_5), dem sogenannten Kapillarbereich, vor. Nach Überschreitung des Kapillarbereiches kommt es zur Ausbildung einer Suspension und so zu einem Abfall der Bindekräfte. Eine Aufbauagglomeration muss somit unterhalb dieses Wertes erfolgen. [M.U.'89]

Der genaue Verlauf der Leistungskurve in Abhängigkeit von dem Sättigungsgrad ist neben den Partikeleigenschaften wie Größe und Benetzungsverhalten mit dem verwendeten Bindemittel auch von dem Mischersystem sowie der Viskosität des Bindemittels abhängig [W.P.'90]. So stellt *Pietsch* in seinem Werk „Size Enlargement by Agglomeration“ [W.P.'90] für den Leistungsaufwand von Lactose mit destilliertem Wasser als Bindemittel einen abweichenden Verlauf dar. Hierbei zeigt sich im Bereich der 3. Phase eine weitere Leistungssteigerung, welche nach *Pietsch* in der beginnenden Füllung des Hohlraumes begründet liegt. Zudem kommt es bereits innerhalb der 4. Phase zu einem Abfall der Leistung (lokales Minimum bei S_5), welche in der 5. Phase kurzzeitig steil ansteigt, bevor die Leistungskurve endgültig abfällt. Nach *Pietsch* [W.P.'90] und *Usteri et. al.* [M.U.'89] liegen in der 3. Phase die besten Bedingungen für die Erzeugung von Agglomeraten mit guten Verteilungs- und Qualitätseigenschaften vor. Als Normierungsansatz des Sättigungsgrades nutzen beide Autoren die Gleichung 3-1.

Bindung durch Auskristallisation gelöster Stoffe

Die im Bindemittel gelösten Stoffe können ein gezielter Bestandteil der Flüssigkeit sein (z. B. Zugabe von Salzen), sie können jedoch auch aus dem zu agglomerierenden Feststoff bzw. von seiner Oberfläche, beispielsweise aus Verunreinigungen, stammen. So wies *Schubert* [H.S.'74]; [H.S.'75] darauf hin, dass es bei fast allen Trocknungsprozessen zu Agglomerationsphänomenen aufgrund der Kristallisation gelöster Stoffe kommt. Dieses ist auch bei den eingesetzten Pflanzenfasern der Fall. So gehen neben Verunreinigungen auch fasereigene Bindemittel wie Pektine in das zugebene Wasser über und reichern sich dort an.

Bei der Trocknung des feuchten Agglomerates nimmt zunächst die Konzentration der Lösung zu bis es nach Überschreitung der Lösungssättigung zu einer Auskristallisation kommt. Die Größe der gebildeten Kristalle sowie deren Festigkeit und somit auch die Festigkeit des gebildeten Agglomerates sind abhängig von der Geschwindigkeit des Kristallwachstums, welche im Zusammenhang mit der Trocknungsgeschwindigkeit steht. Bei einer langsamen Trocknungsgeschwindigkeit bilden sich große Kristalle, die nur wenig zur Festigkeit des Agglomerates beitragen. Hingegen bringt eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit kleinere, schlecht formierte Kristalle mit einer vergleichsweise höheren Festigkeit hervor. [G.H.'00]

Neben dem vorherrschenden Trocknungsmilieu hat auch die Größe der im Agglomeratgefüge vorliegenden Kapillaren einen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Nach *Heinze* [G.H.'00] zeigte sich, dass die Agglomerate bestehend aus feineren Primärteilchen eine geringere Festigkeit aufweisen als vergleichbare Agglomerate aus größeren Teilchen. Dies liegt in den engeren Zwischenräumen begründet, wodurch die Kapillarkräfte größer sind. Des Weiteren lässt sich daraus ableiten, dass es bei Agglomerattrocknung aufgrund der durch die Kristallbildung hervorgerufenen Porenverengung zu einer Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit kommt. Somit nimmt im weiteren Trocknungsverlauf die Größe der gebildeten Kristalle zu und deren Festigkeit ab.

Ein weiteres Phänomen ist, dass bei Erhöhung des Lösungsfüllgrades (höherer Gehalt an gelösten Stoffen) die Festigkeit des getrockneten Agglomerates zunimmt (größeres Kristallvolumen). Nach Überschreitung eines kritischen Punktes nimmt die Festigkeit des Agglomerates jedoch wieder ab. Hintergrund hierfür ist die Bildung einer durchgängig geschlossenen Kruste auf der Agglomeratoberfläche, welche den weiteren Abtransport der Feuchtigkeit behindert und somit die Trocknungsgeschwindigkeit herabsetzt (Bildung größerer, instabilerer Kristalle). Im Extremfall kann es bei einem hohen

Dampfdiffusionswiderstand der Kruste und einem hohen Dampfdruck im Inneren des Agglomerates zum Platzen des Körpers kommen. [G.H.'00]

Bedingt durch die Einflüsse der Kristallisationsgeschwindigkeiten auf die Kristallfestigkeiten lässt sich mit einer gezielten Steuerung des Trocknungsverlaufes sowie durch den Lösungsfüllgrad die Agglomeratfestigkeit regeln und den Erfordernissen des weiteren Verwendungszweckes anpassen.

3.2 Klassische Agglomerationsverfahren

Zu der betrachteten Faseragglomeration zählen aus dem Bereich der klassischen Agglomerationsverfahren die Press-, Aufbau- und Ansmelzaggglomeration. Die Grundprozesse der Agglomeration von Fasern sind vergleichbar mit denen der Schüttgutagglomeration. Da die Aufbauaggglomeration tiefgehend in den durchgeführten Versuchen untersucht wurde, wird im weiteren Verlauf vergleichsweise umfangreich auf deren Grundlagen eingegangen.

3.2.1 Aufbauaggglomeration

Aufbauagglomerationen zählen zu den Nassagglomerationsverfahren. Dem zu agglomerierenden Aufgabegut wird hierfür eine benetzende Flüssigkeit bzw. ein Bindemittel zugegeben. In den häufigsten Fällen handelt es sich hierbei um Wasser oder Alkohole. Durch das Einbringen mechanischer Energie werden die aufgegebenen Primärpartikel in Bewegung gebracht. Aufgrund der Relativbewegung der Partikel untereinander kommt es zu ersten Kollisionen, was bei Anwesenheit einer benetzenden Feuchtebeaufschlagung an den Kontaktstellen zur Bildung einzelner Keime führt. Die Bindekräfte basieren hierbei fast ausschließlich auf den Kapillarkräften (siehe auch Unterkapitel 3.1). Durch weiteres Abrollen dieser Keime über das feuchte Aufgabegut oder durch Anhaften von Keimen oder kleiner Agglomerate (Koaleszens) kommt es zu einem Agglomeratwachstum. Die so gebildeten feuchten Agglomerate werden auch als „grüne Agglomerate“ bzw. „Grünpellets“ bezeichnet. Die Festigkeit (Grünfestigkeit) dieser noch feuchten Agglomerate wird wie bei den Keimen vornehmlich durch die Kapillarkräfte hervorgerufen. Um eine stabile Aufbauaggglomeration zu gewährleisten, ist eben diese Kraft von entscheidender Bedeutung. Sie muss dem Energieeintrag durch das Abrollen und die Stoßeinwirkung gegen Agglomerate, Einbauten und Rührwerkzeugen standhalten. Ausschlaggebend ist hierfür zum einen die Feinheit der Primärpartikel (kleinere Partikel → kleinere Poren → größere Kapillarkräfte) zum anderen der Feuchtegehalt bzw. Sättigungsgrad des Aufgabegutes. Bei zu geringem Feuchtegehalt kommt

es zu keiner bzw. nur zu einer lockeren Keimbildung, die meist aufgrund des Energieeintrages zerfällt. Bei einer Flüssigkeitszugabe oberhalb des Sättigungspunktes kommt es zu einem Zerfließen des Aufgabegutes, was wiederum keine Aufbauagglomeration zulässt. Höchste Grünfestigkeiten stellen sich bei einer Agglomeration direkt unterhalb des Sättigungszustandes ($S=1$) ein (siehe auch Kapitel 3.1). [H.S.'03-b]

Aufgrund der Abrollbewegung und der Stoßenergie während des Prozesses kommt es zu einer Verdichtung des inneren Gefüges der Grünagglomerate. Durch das Wachstum nimmt mit der Zeit auch die Stoßenergie aufgrund der höheren Agglomeratmassen zu. Somit erhöht sich mit der Zeit die Agglomeratdichte (geringere Porosität). Zudem kommt es zur Ausbildung von Porositätsgradienten im Agglomerat (Abnahme der Porosität in außenliegenden Schichten) durch dichtere Packungen mit zunehmendem Agglomeratsradius. [N.C.'73]

Nach *Schubert* [H.S.'03-b] beeinflussen vor allem der Energieeintrag sowie die Kapillarkräfte die Verdichtung positiv, wohin gegen die interpartikuläre Reibung und der viskose Strömungswiderstand beim Auspressen der Flüssigkeit einer Verdichtung entgegenwirken. Mit zunehmender Verdichtung verringert sich die Porosität des Agglomerates. Somit kommt es zu einer Zunahme der interpartikulären Reibung sowie des Sättigungsgrades. Diese Verschiebung stagniert in einem Gleichgewicht der Kräfte, was eine Verdichtung des Agglomerates begrenzt. Das Austreten der Feuchte aus dem Agglomerat aufgrund der Verdichtung des Gefüges begünstigt wiederum die weitere Partikelanlagerung sowie Koaleszenz von Keimen und kleinen Agglomeraten. Bei einer Aufbauagglomeration mit einer geringen Gutfeuchte entsteht so eine Anlaufperiode des Agglomeratwachstums. Erst nach ausreichender Verdichtung der Keime sammelt sich genügend Feuchte an der Keimoberfläche an, um aufgrund der Kapillarkräfte weitere Partikel an der Peripherie anzulagern. [H.S.'03-b]

Eine weitere limitierende Größe ist der schon erwähnte viskose Strömungswiderstand. Bei Viskositäten oberhalb von $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Viskosität von Wasser bei 20°C) besitzt die interpartikuläre Reibung eine untergeordnete Rolle. Beim Einsatz von Flüssigkeiten höherer Viskositäten kann aufgrund der viskosen Widerstandskraft die im Agglomerat eingeschlossene Feuchtigkeit nicht entweichen, so dass Agglomerate mit einer höheren Porosität entstehen. [H.S.'03-b]

Die in den Prozess eingebrachte Energie hat ebenfalls einen Einfluss auf die Grünfestigkeit sowie auf die Agglomeratgröße. Generell lässt sich sagen, dass mit steigendem Energieeintrag die Stoßzahl und die Stoßenergie zunehmen. Hierdurch kommt es zu einer erhöhten Verdichtung des Agglomerates, was aus oben genannten Gründen eine

Stagnation des Wachstums mit sich führt. So hat die Anlagengestaltung einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des Agglomerates. Es können beispielsweise Agglomerate, welche mittels Pelletiertrommel hergestellt wurden, Durchmesser bis 20 mm aufweisen. Agglomerate eines Hochleistungsmischagglomerators besitzen meist kleine Durchmesser von 1 bis 3 mm. Jedoch ist deren Porosität geringer und ihre Grünfestigkeit höher. Je nach weiteren Anforderungen bzw. weiterem Verwendungszweck ist eine entsprechende Voruntersuchung vorzunehmen. Zudem kann ein erhöhter Energieeintrag die Abrasion sowie den Zerfall der schon gebildeten Agglomerate hervorrufen. [H.S.'03-b]

Um einem Zerfall der Agglomerate nach der Trocknung (Wegfall der Kapillarkräfte) entgegenzuwirken, muss durch Sinterprozesse oder durch Kalthärten (Aushärten der Bindemittel bzw. Ausbilden von Feststoffbrücken) eine ausreichende Festigkeit gegeben sein [H.S.'03-b]. Bei fasrigen Materialien können zudem erforderliche Festigkeiten durch formschlüssige Bindungen (bspw. Verhakungen) vorliegen.

3.2.2 Pressagglomeration

Bei diesem Agglomerationsverfahren sind hohe Pressdrücke zwischen 10 und 1.000 MPa erforderlich [H.S.'03-b]. Die äußere Form wird durch einen allseitig begrenzenden Pressraum oder durch eine radiale Begrenzung, der Matrizenbohrung, definiert. Diese Art der Agglomeration kann sowohl mit als auch ohne Bindemittel vonstatten gehen. Vor allem bei Nieder- und Mitteldruck-Extrusionsverfahren ist die Zugabe eines flüssigen Bindemittels erforderlich. Mit Zunahme der wirkenden Pressdrücke kann die Zugabemenge herabgesetzt werden [W.P.'02-b]. Während bei den Kompaktier-, Brikettier- und einfachen Pressverfahren optional Bindemittel zugesetzt werden, ist bei den Lochpressverfahren (Matrizenpressen u. a.) teilweise die Zugabe von Schlupfmittel wie Tenside oder Schmierstoffe sinnvoll, um die Reibung zur Lochwandung zu verringern und so eine geringere Verdichtung des Materialgefüges zu erreichen [H.S.'03-b]. Aber auch weitere produktorientierte Additive können in die Verfahren der Pressagglomeration eingebracht werden. Neben der möglichen Zugabe von Bindemitteln hängt die Festigkeit der Agglomerate von dem im Herstellungsprozess anliegenden Pressdruck sowie dem elastischen Verhalten des Aufgabegutes ab [H.S.'03-b].

3.2.3 Anschmelzagglomeration

Meist wird lediglich vom Sintern gesprochen, wenn von der Anschmelzagglomeration die Rede ist. Bei diesem Prozess wird der Aufgabemasse genügend Wärme zugeführt, um die Oberflächen der einzelnen Primärpartikel anzuschmelzen. Durch Wiedererkalten kommt es im Kontaktbereich benachbarter Partikel zu einer Bildung von fest miteinander verbunden Gerüststrukturen. Die Temperaturen, die für diesen Prozess von Nöten sind, hängen von den Materialeigenschaften ab. So ist auch nicht jedes Material hierfür geeignet (geeignet: Metalle, Kunststoffe; ungeeignet: Naturfasern). Die erforderliche Wärme kann von außen eingebracht oder auch durch Anlegen eines hohen mechanischen Druckes im Aufgabegut selbst erzeugt werden (Drucksintern).

3.3 Angepasste Agglomerationsverfahren

Für unterschiedliche Anwendungsbereiche besteht bereits eine Reihe unterschiedlicher Anlagen zur Faseragglomeration. Die Gruppe der angepassten Agglomerationsverfahren besteht aus speziell auf den angestrebten Verwendungszweck der Faseragglomerate optimierten Produktionsverfahren. Hierbei handelt es sich teilweise um klassische Agglomeration- oder textile Verarbeitungsverfahren, die kombiniert bzw. modifiziert wurden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden beispielhafte Verfahren näher dargestellt, die dem Stand der Technik und Forschung entsprechen.

3.3.1 Fasergranulationsverfahren des FLZ [DE 299 20 772 U1]

Speziell für das Granulieren von pflanzlichen Fasern wurde vom *Faser Logistik Zentrum Schwarza (FLZ)* ein angepasstes Verfahren als Gebrauchsmuster angemeldet [DE 299 20 772 U1]. Die so erzeugten Faseragglomerate sollen vor allem in Spritzgusseinheiten der Kunststoffindustrie (Produktion von NFK) weiter verarbeitet werden. Die Granulationsanlage besteht aus einem zweistufigen Pressagglomerationsprozess (siehe Abbildung 3-4). Innerhalb dieses Verfahrens können neben thermoplastischen Kunststoffen (in Form von Pulvern, Fasern oder Granulaten) Zusätze wie Haftmittel, Flammschutzmittel, Füllstoffe, Farbstoffe sowie antibiotisch wirkende Mittel in das Granulat mit eingebunden werden.

Funktionsprinzip

Über den Zufuhrschacht 203 wird das zu agglomerierende Fasermaterial sowie weitere weiche Ausgangsmaterialien (z. B. Foliengranulate, recycelte Bestandteile) der Vorgranuliereinheit zugeführt. Des Weiteren können über die Zuführungen 202 und 201

harte schüttfähige Ausgangsmaterialien (z. B. Farbstoffe, Haftvermittler) aufgegeben werden. Sämtliche Ausgangsmaterialien gelangen in den Mischbereich 215. Über die Hochdruckdüsen 205 und 204 lässt sich ein Wasser- bzw. Wasserdampfeintrag realisieren. Das so eingebrachte Wasser kann mit Zusatzstoffen (z. B. Flammschutzmittel, Fungiziden) beladen sein. Eine Mischung der Aufgabegutströme wird zudem durch das zu einem Kegel geformten Prallblech 206 unterstützt. Der Hauptteil des Vorgranulators wird von einem Kollergang gebildet, in dem der gezahnte Koller 208 das Material durch die Lochmatrize 209 presst. Dieses Profil dient zur Erhöhung der Scherwirkung auf die Fasern, was eine intensivere Zerkleinerung und Mischung des Materials zur Folge hat. Die Löcher der Matrize sind auf der Fasereintrittsseite geweitet und besitzen auf der Granulataustrittsseite Entlastungsschlitze. Aufgrund dieser geometrischen Gestaltung lässt sich die Verdichtung sowie die Wärmeentwicklung konstruktiv einstellen (Gestaltungsbeispiel: 5 mm Lochdurchmesser; Pressverhältnis 1:6; Temperatur 120 -130°C). Unterhalb der Lochmatrize ist die Abräumvorrichtung 210 zum Abstreifen der Granulate vorgesehen.

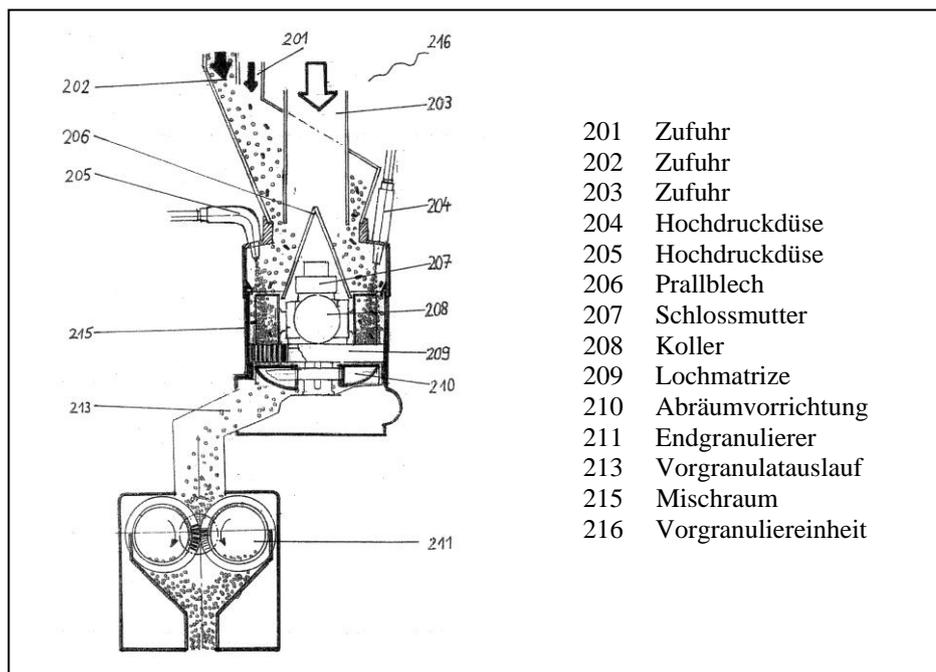


Abbildung 3-4 Zweistufiger Fasergranulator des FLZ

[DE 299 20 772 U1]

Die in der Vorgranuliereinheit erzeugten Granulate werden direkt oder nach einer Mischung mit weiteren Zusatzstoffen der Endgranuliereinheit zugeführt. Diese besteht aus zwei gegenläufigen zylindrischen Matrizen 211. Die Endgranulate werden durch die Löcher der Matrizen in das Innere der Zylinder gepresst und dort durch Räumkämme

abgetrennt. Anstelle der gegenläufigen, zylindrischen Matrizen sind von Erfinderseite auch der Einsatz von ineinanderlaufenden Ringmatrizen als Option vorgesehen.

Produkte

Die Granulate werden unter den Namen Fiberbond (bis 50 Ma.-% Fasergehalt) und Fiberdrops (50 bis 92 Ma.-% Fasergehalt) auf dem Markt angeboten. Der restliche Anteil der jeweiligen Granulate wird von Kunststoffen bzw. weiteren Zusätzen gebildet. Die Gestaltung und Zusammensetzung dieser Granulate ist so ausgelegt, dass sie direkt in Spritzgussseinheiten verarbeitet werden können. Hierbei sind eine gravimetrische Dosierung sowie eine Mischung mit anderen Granulaten möglich. [FLZ'06]

3.3.2 Pull-Drill-Verfahren [Miek'01], [T.R.'99], [T.R.'03], [Svoboda'06], [DE 197 56 126 C2]

Diese Verfahren wurden vom *Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoffforschung e.V.* entwickelt, wobei der Vertrieb von der *Svoboda Umformtechnik Ges.m.b.H* übernommen wurde. Prinzipiell lässt sich das Herstellungsverfahren als eine Weiterentwicklung des Pultrusionsverfahrens verstehen. Innerhalb dieses Verfahrens werden Verstärkungsfaserstränge in Form von Rovings oder Garnen eingesetzt, die eine Mindestzugkraft von 10 N aufnehmen müssen [DE 197 11 247 C2]. Die Faserstränge werden innerhalb der Anlage mit der Matrixmasse (in der Regel thermoplastische Kunststoffe) imprägniert, so dass nach einer anschließenden Einkürzung ein Verbundgranulat aus Verstärkungsfaser und Matrixmaterial entsteht.

Funktionsprinzip

Im Gegensatz zu den Pultrusionsverfahren werden beim Pull-Drill-Verfahren als Ausgangsmaterial Hybridkardenbänder, bestehend aus Verstärkungsfasern (10 - 60 Ma.-%) und thermoplastischen Fasern, eingesetzt [DE 197 56 126 C2]. Im ersten Abschnitt der Anlage (siehe Abbildung 3-5) wird das Kardenband der Vorheizzone zugeführt. Hier werden die thermoplastischen Fasern aufgeschmolzen. Dieser Strang wird anschließend durch eine beheizte Formdüse gezogen, wobei der Querschnitt des Stranges kalibriert wird. Um beim Einsatz von Naturfasern eine thermische Schädigung und Minderung der Fasereigenschaften gering zu halten, sollte der Schmelzpunkt der thermoplastischen Fasern unter 210°C liegen [DE 197 56 126 C2]. Nach der Kalibrierung des Faserstranges durchläuft dieser die Kühlzone (Ausführungsbeispiel: 50°C).

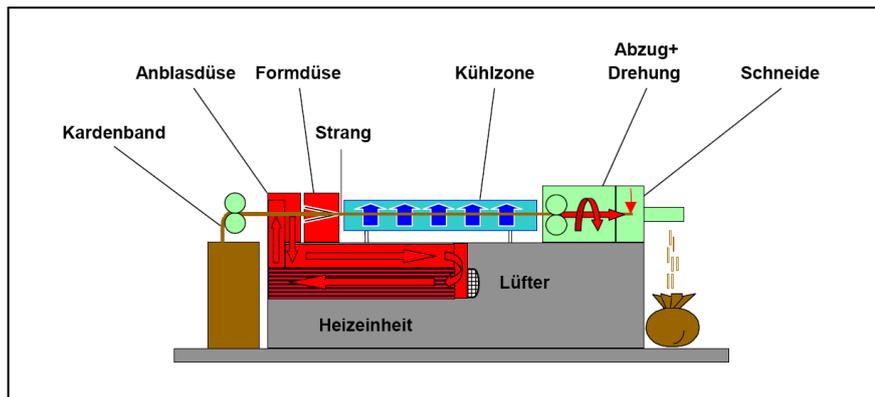


Abbildung 3-5 Pull-Drill-Verfahren der TITK

[TITK'05]

Neben der Abkühlung des Stranges und der Verfestigung des thermischen Kunststoffes erfährt der Strang in diesem Bereich eine Verdrehung durch das auf die Kühlzone folgende Drehorgan. Durch dieses Verdrehen (10 – 150 Verdrehungen/m) wird ein verstärkter Kontakt zwischen den Verstärkungsfasern und den noch weichen thermoplastischen Fasern hervorgerufen. Zudem kommt es hierbei zu einer Kompaktierung des Stranges [DE 197 56 126 C2]. Der abgekühlte und in sich verdrehte Strang wird anschließend durch eine Schneideeinheit zu Granulaten geschnitten.

In der Patentanmeldung [EP 1 424 179 A2] der Firma Svoboda ist eine weitere Variation des Verfahrens vorgenommen worden. Durch eine spezielle Formdüse (siehe Abbildung 3-6) wird ein Granulat erzeugt, dessen Mantelfläche in Gänze aus thermoplastischem Kunststoff besteht. Das Faserband 1 wird hierbei in die beheizte Beschichtungs- und Kalibrierdüse 71 eingezogen. Über die in die Bohrung 72 mündende Schmelzzufuhr 73 wird das Faserband über eine Ringnut ummantelt. Der Vorteil eines reinen Mantels aus thermoplastischem Kunststoff besteht darin, dass eine glatte Oberfläche erzeugt wird.

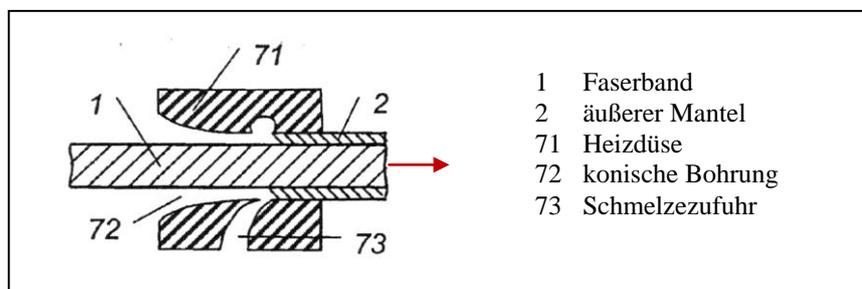


Abbildung 3-6 Beschichtungs- und Kalibrierdüse

[EB 1 424 179 A2]

Produkte

Diese Granulate werden auf dem Markt unter dem Produktnamen *NAFARU* angeboten. Die Fasern des Agglomerates sind schraubenförmig angeordnet. Des Weiteren weisen die Agglomerate eine Kern-Mantel-Struktur auf. Durch die Verdrehung des Stranges besitzen die Fasern des Granulates eine größere Länge als die Granulatschnittlänge. Diese eingebundene Faserlänge ist neben der Granulatschnittlänge vor allem von der Stärke der Verdrehung abhängig. Die Schnittlängen der Granulate variieren im Bereich von 5 bis 30 mm, wobei der Anteil der Verstärkungsfaser zwischen 20 Ma.-% und 60 Ma.-% liegt [K.M.'01].

3.3.3 Wickelverfahren [S.H.'03], [DE 103 54 848 B4], [S.H.'04]

Das Wickelverfahren (Patentschriften: DE 103 54 848 B4; WO/2005/051622) ist ein innovatives Agglomerationsverfahren, welches speziell für den Einsatz zur Agglomeration von Naturfasern an der *BTU Cottbus (LS Aufbereitungstechnik)* entwickelt wurde. Mit diesem Verfahren ist es möglich, pelletähnliche Körper bzw. Granulate zu erzeugen, welche primär als Vorprodukte zur Herstellung von NFK mittels Spritzguss-, Extrudier- oder Pressverfahren eingesetzt werden können. Des Weiteren sind auch Verwendungen im Bereich der Fluidaufbereitung als Aufwuchskörper sowie als Dämmstoffe denkbar. Dieses Verfahren wird als Stand der Forschung betrachtet, da bislang keine technischen Umsetzungen des Wickelverfahrens untersucht wurden.

Funktionsprinzip

Das Fasermaterial wird dem Verfahren als Fasergelege (z. B. Flor oder Vlies) zugeführt. Neben reinen Faserarten ist auch die Verarbeitung von Fasermischungen möglich. Ebenso können andere Strukturen wie zum Beispiel Schüttgüter oder Pasten in das Granulat eingebunden werden. Eine unidirektionale Faserorientierung ist vorteilhaft, um eine optimale Faserlänge mit einer engen Längenverteilung in den pelletartigen Körpern einzubinden.

Die Zufuhr erfolgt über eine Rampe, auf der durch eine Schneideeinrichtung 301 eine optionale Voreinkürzung des aufgegebenen Fasermaterials erfolgen kann (siehe Abbildung 3-7). Von hieraus gelangt das Material auf das Rollband 302, welches den Weitertransport durch die Prozesseinheiten realisiert. Im Bereich vor der Presswalze 304, der als Variantenzone 303 bezeichnet wird, erfolgt die Aufgabe des Bindemittels, falls dies nicht schon im Faseraufgabestrom enthalten ist, und wird wenn erforderlich in einen aktiven Zustand überführt.

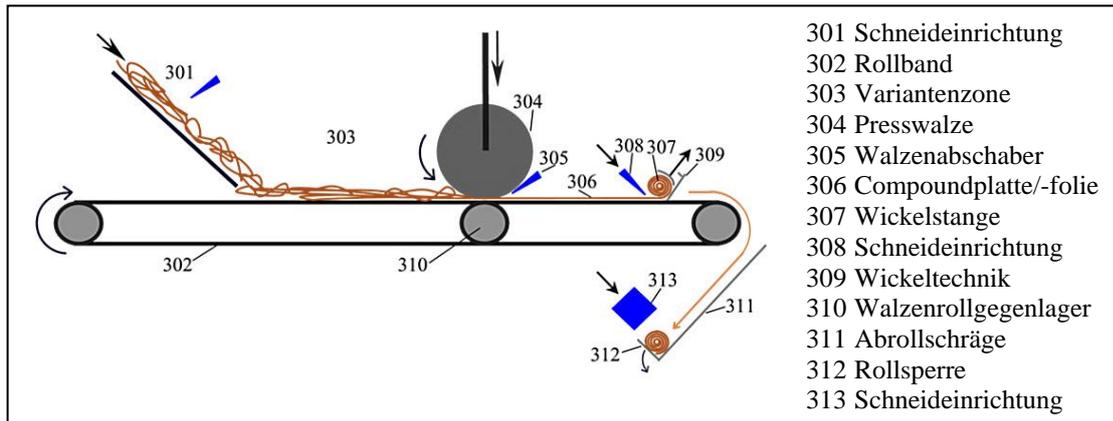


Abbildung 3-7 Schematische Darstellung der Wickelverfahrensanlage

[S.H.'03]

Für das Ziel der späteren Erzeugung von NFK besteht das Bindemittel aus dem Matrixmaterial, dass später verstärkt werden soll (thermoplastische Kunststoffe). Wird der entsprechende thermoplastische Kunststoff in fester Form (Pulver, Granulat, Faser oder Folie) zugeführt, kann dieser in der Variantenzone durch Wärmestrahlung, einen Heißgasstrom oder durch die Beheizung der Presswalze plastifiziert werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, den Kunststoff in plastifizierter Form unmittelbar vor der Presswalze auf das Fasermaterial aufzugeben. Die nachfolgende Presswalze komprimiert das Fasergelege und presst den plastifizierten Kunststoff in die Zwischenräume, wodurch die Fasern miteinander verklebt werden. Die so erzeugte Compoundplatte bzw. -folie 306 wird anschließend durch eine Wickeleinheit 309 zu einer Wickelstange 307 (siehe Abbildung 3-8) aufgerollt.

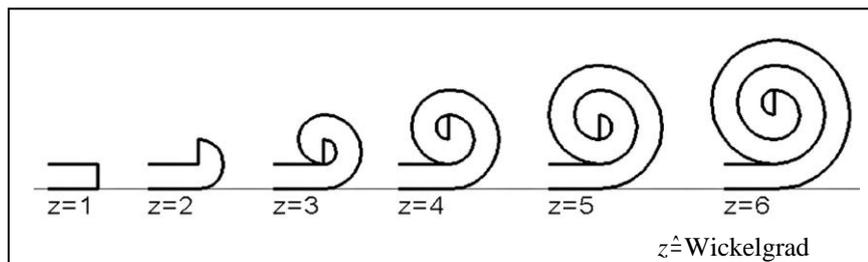


Abbildung 3-8 Wickelvorgang des Wickelverfahrens

[S.H.'04]

Nach Erreichen des erwünschten Wickelgrades „z“ (Anzahl der Compoundplattenschichten im größten Durchmesser) wird die entstandene Wickelstange von der nachfolgenden Compoundplatte abgetrennt. Während des Abrollens auf einer Abrollschräge 311 kommt es zum einen zur Vergleichmäßigung der Oberfläche und zum anderen zum Abkühlen der Wickelstange. Am Ende der Abrollschrägen wird diese Wickelstange aufgefangen und durch eine weitere Schneideinrichtung in vorgegebene große Granulate eingekürzt.

Produkt

Die Granulate weisen eine zylindrische Form mit einer nahezu kreisrunden Querschnittsfläche auf (siehe Abbildung 3-9). Im Querschnitt des Granulates lässt sich eine schneckenförmige Wickelstruktur erkennen. Die Orientierung der Faser im Verbund ist abhängig von der Anlagenvariante. Bei allen Wickelagglomeraten wird die äußere Oberfläche durch einen hohen Anteil oder in Gänze aus thermoplastischem Kunststoff gebildet. Hierdurch wird ein gutes Schüttverhalten realisiert. Wird das Faservlor lediglich mit einer dünnen Kunststoffschicht beaufschlagt, liegen die Fasern zwischen den Wickellagen nahezu frei vor. Mit Zunahme des Kunststoffanteils bzw. durch ein tieferes Eindringen in die Faserlagen kommt es zunehmend zur Ausbildung eines durchgehend, festen Verbundes.

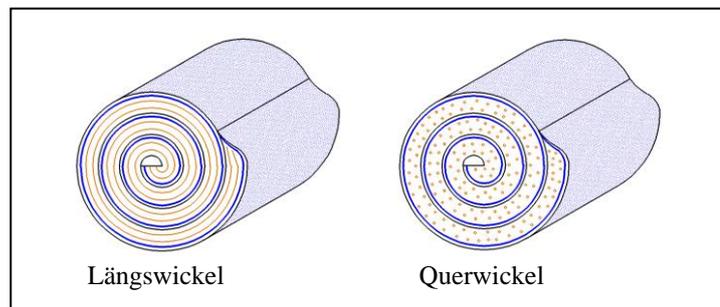


Abbildung 3-9 Gestalt von Wickelgranulaten [S.H. '04]

Die im Granulat gebundene Faserlänge ist primär abhängig von der Faserorientierung in der Compoundplatte. Liegen die Fasern quer zur Wickelrichtung, entspricht die mittlere Faserlänge in etwa der Schnittlänge des Granulates, sofern die aufgegebene Faserlänge größer als die Granulatschnittlänge ist. Bei längs zum Faserverlauf gewickelten Granulaten besteht eine weitere Abhängigkeit der theoretischen Faserlänge von der Stärke der Compoundplatte „ h_p “ und dem Wickelgrad „ z “.

Die Schnittlänge sowie der Granulatdurchmesser lassen sich individuell auf die späteren Verwendungszwecke anpassen. So lassen sich neben den Granulaten auch Wickelstangen erzeugen, welche als eine Art Rohr durchströmt werden können. Diese können so im Bereich der Fluidaufbereitung als Filter oder als Aufwuchsoberfläche für Mikroorganismen eingesetzt werden. Die flexible Einsatzmöglichkeit liegt in der frei wählbaren Porosität und somit der Durchströmbarkeit des Wickelelementes.

3.3.4 Rollagglomeration [S.H.'03], [S.H.'04], [DE 103 58 245 B4]

Mit Hilfe dieses an der *BTU Cottbus (LS Aufbereitungstechnik)* entwickelten Faseragglomerationsverfahrens (Patentschrift: DE 103 58 245 B4; WO/2005/056172) lassen sich einzelne Fasern zu einem kugelähnlichen Agglomerat vereinen. Hierbei ist es nicht erforderlich, dem Prozess Bindemittel zuzuführen, was jedoch optional möglich ist. Prinzipiell erfolgt die Bildung eines Agglomerates durch das mehrfache Walken der aufgegebenen Fasermasse, welche sich somit ineinander verhakt. Es besteht zudem die Möglichkeit, während des Agglomerationsprozesses weitere Stoffe in das Agglomerat einzubinden. Durch eine Fasermischung aus Verstärkungsfasern und thermoplastischen Kunststofffasern eröffnet sich die Option, das Agglomeratgefüge durch eine kurzzeitige thermische Beanspruchung aufgrund des Memory-Effektes der Kunststofffasern zu einem kompakteren und festeren Verbundgebilde zusammenzuziehen. Wie das Wickelverfahren fand auch die Rollagglomeration noch keine technische Umsetzung. Bislang wurden lediglich erste Versuche der Erzeugung von Rollagglomeraten durchgeführt.

Funktionsprinzip

Die Hauptbauteile des Rollagglomerationstellers bestehen aus einem untenliegenden rotierenden Stempel 102 und einem ihn von oben umschließenden statischen Teller 101 (siehe Abbildung 3-10). Die Bauteile sind so gestaltet, dass sich ein ringförmiger Prozessraum bzw. Rollgang 105 bildet. Dieser Rollgang wird zum einen durch den unteren Stempel nach unten und innen, zum anderen durch den oberen Teller nach oben und außen begrenzt. Durch die Rotation des unteren Stempels und dem ihm gegenüber feststehenden oberen Tellers stellt sich eine Relativgeschwindigkeit zweier gegenüberliegender Wände ein, die der Rotationsgeschwindigkeit entspricht. Die den Rollgang begrenzenden Wände sind mit einem Material versehen, welches ein ausreichendes Haftmoment bzw. Reibwiderstand zu den Fasern aufweist. Dies kann durch das Vorhandensein einer rauen Oberflächenstruktur sowie durch eine Gummierung erfolgen. Des Weiteren kann der Rollgang mit Einbauten oder Aussparungen versehen werden, um lokal Einfluss auf die einwirkenden Widerstandsmomente zu nehmen. Ebenfalls sind Einbauelemente an dem oberen Teller möglich, welche den Rollgang zum Ende hin kontinuierlich verjüngen. Die Zufuhr des Fasermaterials (Aufgabeöffnung 106) und das Auswurffenster 103 sind am oberen, statischen Teller vorgesehen und somit ortsfest. Über die Aufgabeöffnung gelangen die Fasern direkt in den Rollgang. Durch die Relativgeschwindigkeit der gegenüberliegenden Wände entsteht ein Mitreißen der Fasern an der rotierenden und ein Zurückhalten an der feststehenden Wand. Hierdurch wird Rotation bzw. Walken des Fasermaterials initialisiert. Durch das Walken kommt es zu einer

Bewegung und Verschiebung im Gefüge der Fasermasse, wobei sich eine Verdichtung einstellt. Durch das ständige Abrollen nimmt die Masse eine kugelhähnliche Form an. Nach einer Anlagenrunde wird das so entstandene Agglomerat mit Hilfe eines Auswurfarmes aus der Anlage ausgetragen.

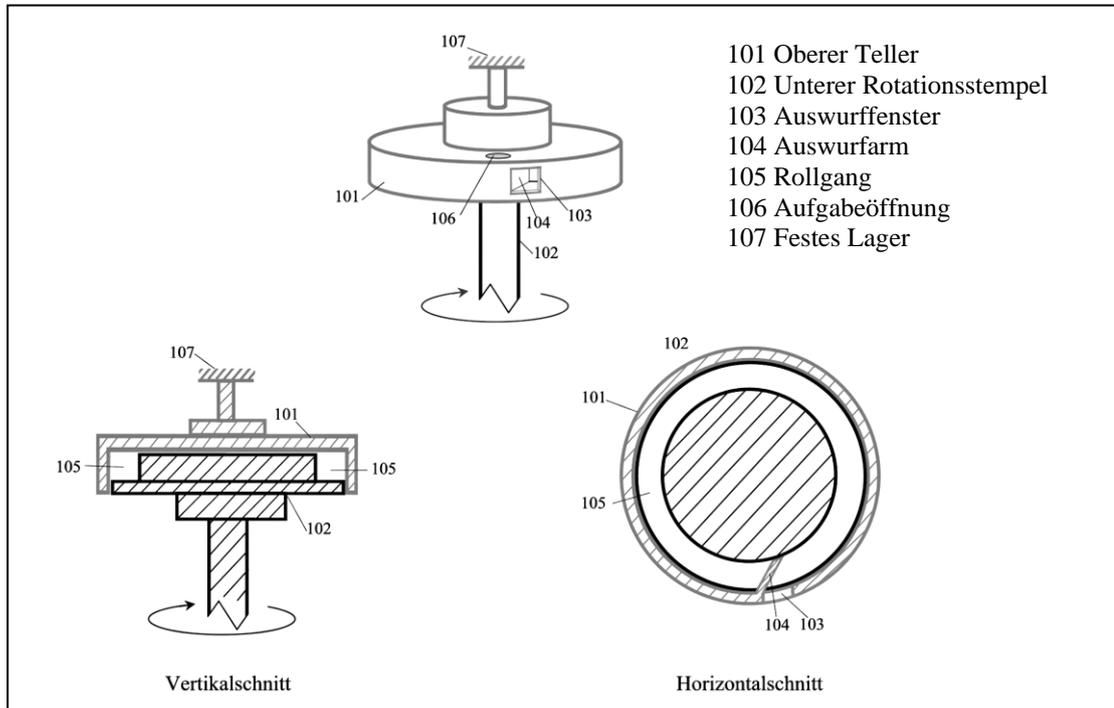


Abbildung 3-10 Schematische Darstellung eines Rollagglomerationsteller [DE 103 58 245 B4]

Neben der Erzeugung von Faseragglomeraten in dem bisher betrachteten Rollagglomerationsteller, ist ein weiterer theoretischer Ansatz den Rollagglomerationsprozess innerhalb eines Bandrollagglomerators (siehe Abbildung 3-11) umzusetzen [S.H.'04].

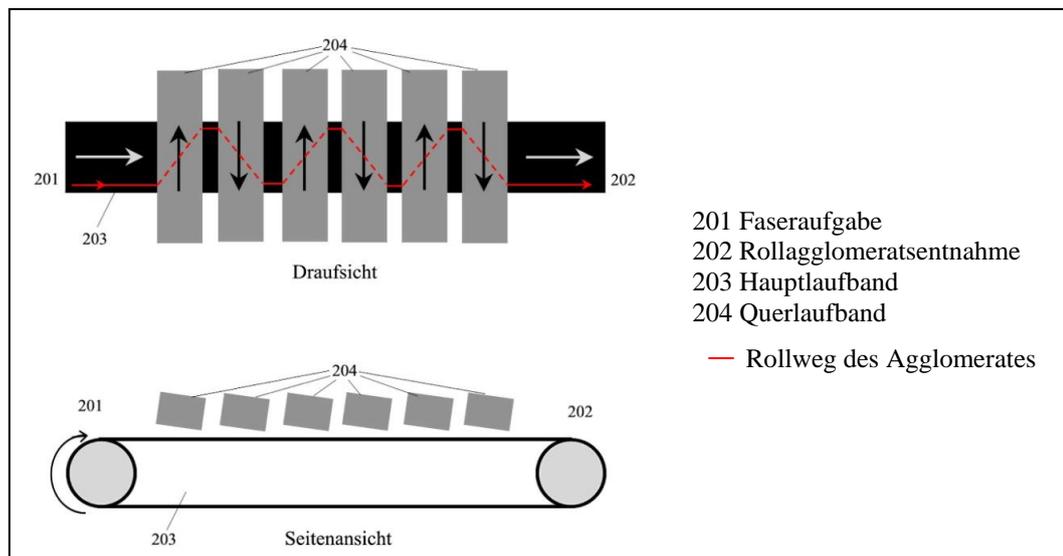


Abbildung 3-11 Schematische Darstellung eines Bandrollagglomerators [S.H.'04]

Hierbei wird die portionierte Fasermasse auf das Hauptlaufband 203 aufgegeben. Dieses verläuft unterhalb einer Reihe, in Förderrichtung geneigten, Querlaufbändern 204. Wie auch bei der Tellervariante ist eine Oberfläche der Bänder zu wählen, welche ein ausreichendes Widerstandsmoment auf die Fasern ausübt. Beim Unterlaufen des ersten Querlaufbandes erfährt die Fasermasse eine Auslenkung in Laufrichtung dieses Querlaufbandes. Durch das weiterlaufende Hauptlaufband ist der Weg der Fasermasse diagonal. Hierbei wird die Fasermasse wiederum einer Rotation bzw. einem Walken ausgesetzt. Nach Durchlaufen des ersten Querlaufbandes folgt ein weiteres Querlaufband, welches eine zum vorigen entgegen gerichtete Laufrichtung aufweist und so das entstehende Agglomerat zur Ausgangsseite des Hauptrollbandes zurücktransportiert. So entspricht der Rollweg des Agglomerates einer Zick-Zack-Bahn auf dem Hauptlaufband. Durch eine Abnahme des Spaltmaßes unter den Querlaufbändern erfolgt eine weitere Verdichtung des Gefüges. Am Ende wird das fertige Agglomerat der Laufrichtung des Hauptlaufbandes oder des letzten Querbandes folgend ausgetragen.

Produkte

Vereinfacht lassen sich diese Faseragglomerate als kugelförmiges Fasergeflecht verstehen (siehe Abbildung 3-12). Zudem kann die äußere Geometrie optional eine längliche Gestalt aufweisen.

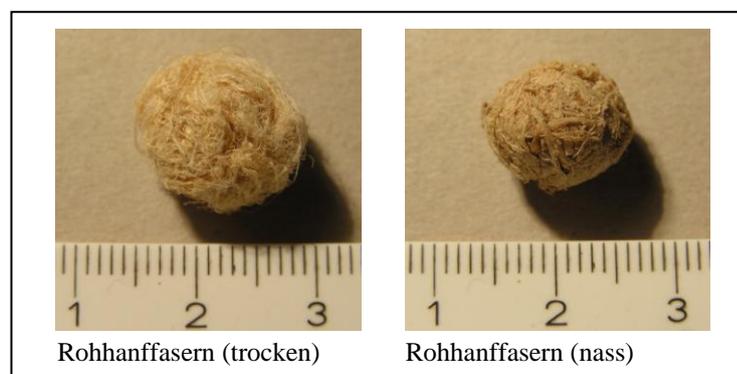


Abbildung 3-12 Rollagglomerate aus Rohhanffasern [S.H.'05]

Die Strukturdichte bzw. die Porosität der erzeugten Agglomerate kann durch die Prozessparameter vorgegeben werden. Auch eine Variation der Agglomeratfestigkeit lässt sich verfahrenstechnisch den Anforderungen anpassen. Es ist möglich, ein breites Spektrum von Fasermaterialien in dieser Anlage alleine oder in Kombination mit anderen Fasern zu agglomerieren. So können zum Beispiel Agglomerate aus einer Polypropylen- und Naturfaser-Mischung aber auch aus 100 Ma.-% Naturfasern hergestellt werden. Dies ist ohne den Einsatz von Bindemitteln möglich. Optional ist die

Einbindung weiterer Additiven möglich. Die gebundenen Faserlängen können im Langfaserbereich liegen.

3.4 Textile Faserverarbeitungsverfahren

Über herkömmliche textile Faserverarbeitungsverfahren lassen sich Produkte wie z. B. Kardenbänder, Seile und Stricke sowie Flore und Vliese herstellen. Diese Produkte können theoretisch eine endlose Länge besitzen und können je nach Anforderungen entsprechend eingekürzt werden. Neben der Herstellung von Endprodukten lassen sich mittels dieser Verfahren Halbzeuge erzeugen, welche wiederum als Eduktmaterial (z. B. in Form von Agglomeraten oder Bänder) in weitere Produktionseinheiten (z. B. Spritzgießanlagen) zugeführt werden. Da diese Herstellungsverfahren weit verbreitet und zahlreiche Publikationen vorliegen, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Kapitel 4

Eingesetzte Versuchsanlagen

4 Eingesetzte Versuchsanlagen

Bei der Auswahl bzw. bei der Gestaltung der Laboreinheiten wurde darauf geachtet, dass gleichbleibende Bedingungen sowie geringe Prozesstoleranzen vorlagen, so dass vergleichende Untersuchungen der Variation der Anlagenparameter durchgeführt werden konnten. Die Möglichkeiten der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien ist innerhalb eines Labor-Intensivmischers der Firma *Eirich* (Eirich-Intensivmischer) untersucht worden. Für die angestrebten Untersuchungen des innovativen Rollagglomerationsverfahrens (DE 103 58 245 B4; WO/2005/056172) musste ein spezieller Rollagglomerationssteller im Labormaßstab konstruiert und gebaut werden.

4.1 Eirich-Intensivmischer

Bei dem Prozess der Mischagglomeration handelt es sich um eine klassische Aufbauagglomeration. Im Unterschied zur Pelletierung (v. a. Pelletierteller und Pelletiertrommel) wird zusätzlich zum rotierenden Mischbehälter ein Energieeintrag mittels Agitationsorgan (Mischwerkzeug) eingebracht. Vorteil ist eine verbesserte Durchmischung des Aufgabegutes, was eine verbesserte Feuchteverteilung mit sich führt. Des Weiteren nehmen die Stoßrate sowie die Stoßenergie mit steigendem Energieeintrag zu (Bildung kleinerer, festerer Agglomerate). Einen weiteren Vorteil verspricht die Mischagglomeration zur Agglomeration von Primärpartikeln, die stark von einer runden Form abweichen (bspw. fasrige Materialien) und somit ein geringes Abrollverhalten aufweisen. Jedoch besteht die Gefahr einer Umschlingung des Agitationsorgans durch verhältnismäßig lange Fasern.

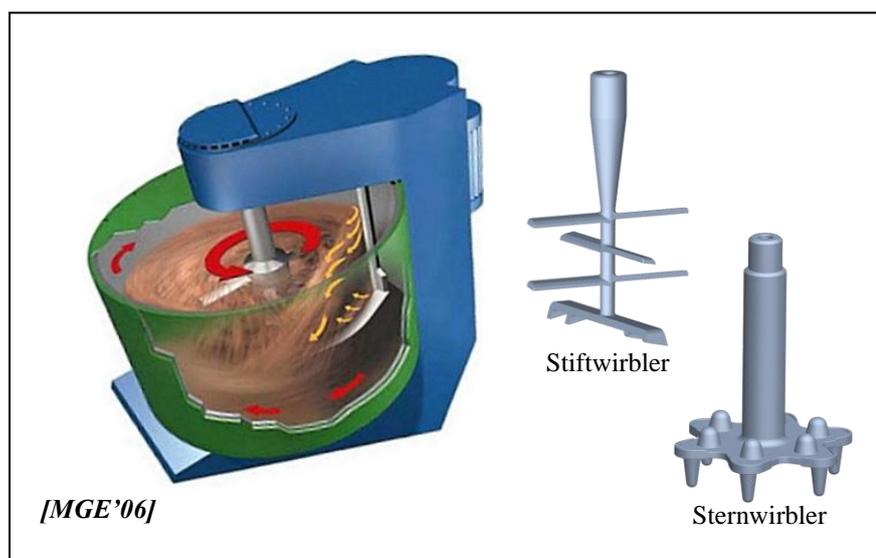


Abbildung 4-1 Darstellung des Eirich-Intensivmischers

Bei dem verwendeten *Eirich-Intensivmischer R02* handelt es sich um einen Labormischer der Firma *Eirich*. Diese Anlage wurde prinzipiell zum Mischen sowie Agglomerieren von feinkörnigen Schüttgütern und Stäuben entwickelt (100%ige Materialumwälzung innerhalb eines Anlagenumlaufes) [MGE'06]. Das Mischsystem der Firma *Eirich* besteht im Wesentlichen aus 3 Komponenten, deren Arbeitsweise flexibel auf die Anforderungen der Misch- bzw. Agglomerationsprozesse angepasst werden kann (siehe Abbildung 4-1).

Kernstück des Intensivmischers ist das austauschbare, exzentrisch angeordnete Agitationsorgan. So kann über dessen Geometrie sowie über die eingestellte Drehzahl der Energieeintrag geregelt werden, wodurch in Abhängigkeit des Eduktmaterials Einfluss auf die mögliche Agglomeratbildung und dessen Eigenschaften genommen werden kann. Durch die Rotation des Mischbehälters wird dem Agitationsorgan kontinuierlich das eingebrachte Material zugefördert. Ein statischer Abstreifer dient zur Vermeidung von Anlagerungen des Fasermaterials an der Behälterwandung und bewirkt zudem, je nach Drehzahl des Mischbehälters, ein Aufwirbeln bzw. Auflockern des Agglomerationsgutes.

Der Mischbehälter der eingesetzten Laboranlage weist bei einem Durchmesser von 235 mm ein Nutzvolumen von 5 l auf. Zudem besitzt dieser eine Neigung von 30° . Innerhalb dieses Behälters ist das Agitationsorgan 40 mm exzentrisch angeordnet und weist eine dem Mischbehälter entgegengerichtete Rotation auf. Neben der Wahl des Agitationsorgans unterschiedlicher Gestaltungsformen bietet der Labormischer eine weitere Reihe von Variationsmöglichkeiten (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 Variationsmöglichkeiten des Agglomerationsprozesses im *Eirich-Intensivmischer*

Parameter	Variationen
Agitationsorgan	Stiftwirbler/Sternwirbler
Drehzahl des Agitationsorgans	900 min^{-1} / 1500 min^{-1} / 1800 min^{-1} 2500 min^{-1} / 3000 min^{-1} / 5000 min^{-1}
Drehzahl des Mischbehälters	42 min^{-1} / 84 min^{-1}
Füllgrad Mischbehälter	stufenlos 0% bis 100%
Faserart	variabel
Faserdicke	variabel
Faserlänge	bedingt variabel (Umschlingungsgefahr)
Bindemittel-Sättigungsgrad	stufenlos 0 bis 1
Bindemittelart	variabel
weitere Zuschlagsstoffe	optional

Voruntersuchungen zeigten, dass der Einsatz des vorliegenden *Stiftwirblers* zu keinem zufriedenstellenden Agglomerationsergebnis führt. Zum einen sind die Stiftausläufer für dieses Eduktmaterial zu schlank ausgelegt, so dass es zu einer vermehrten Anhaftung bzw. Umschlingung des Rührwerkes mit Fasermaterial kam. Zum anderen wurde durch dieses Agitationsorgan eine zu hohe Energie in das Aufgabegut induziert, so dass es zu einer Zerstörung von schon gebildeten Agglomeraten kam. Deshalb wurde der schon bewehrte *Sternwirbler* für die weiteren Untersuchungen eingesetzt (siehe Abbildung 4-1).

4.2 Rollagglomerationsteller

Die im Vorfeld durchgeführten Machbarkeitsuntersuchungen der Rollagglomeration [S.H.'03] wurden an einfach gestalteten Rollagglomeratoren untersucht (5x5 mm Rollgang mit einem Radius von 68,5 mm). In den ersten Schritten wurde hierfür eine diskontinuierliche Versuchsanlage eingesetzt. Zur Agglomeration der Fasern verbleiben diese für mehrere Anlagenumläufe im Agglomerator. Hierbei waren drei Wandungen mit Sandpapier (220 bzw. 120 Körnung) beklebt, um den erforderlichen Reibwiderstand hervorzurufen. Die verbliebene radiale Statorwandung wurde von einer glatten PVC-Platte gebildet und mit Störeinheiten versehen.

Spätere Vorversuche [S.H.'05]; [J.P.'06] wurden mit einem teilautomatisierten, kontinuierlichen Rollagglomerator (5x5 mm Rollgang mit einem Radius von 350 mm) vorgenommen. Hierbei zeigte sich, dass auch bei geringerer Rollgangskrümmung (größerer Radius) innerhalb eines Anlagenumlaufes eine Agglomeration des Fasermaterials aufgrund eines mehrfachen Walkens möglich ist. Zudem fanden Untersuchungen zur Gestaltung und Optimierung der Auswurfeinheit statt. Das Hauptproblem dieser Versuchsanlage der 2. Generation war das zu große Spaltmaß zwischen Teller und Stempel. Hierdurch kam es zu Verklemmungen einzelner Fasern, was einem störungsfreien Umlauf des Faseragglomerates im Rollgang entgegenwirkte.

Zur Gestaltung einer geeigneten Laboranlage wurden die Erkenntnisse der im Vorfeld untersuchten Rollagglomerationsteller [S.H.'03] einbezogen. Anhand dieser Versuchsanlagen sollte die Untersuchung unterschiedlicher Variationsmöglichkeiten des Rollganges sowie unterschiedliche Fasermaterialien realisierbar sein. Die Funktionsweise dieser Laboreinheit entspricht der Patentschrift DE 103 58 245 B4. Bei der technischen Umsetzung des Verfahrens wurden an Aufbau bzw. Gestaltung einzelner Anlagenbauteile eine Reihe von Modifikationen vorgenommen, wobei der Fokus neben einem

stabilen Betrieb auf einer hohen Variabilität bezüglich eines weitgefassten Versuchsspektrums lag (siehe Abbildung 4-2).

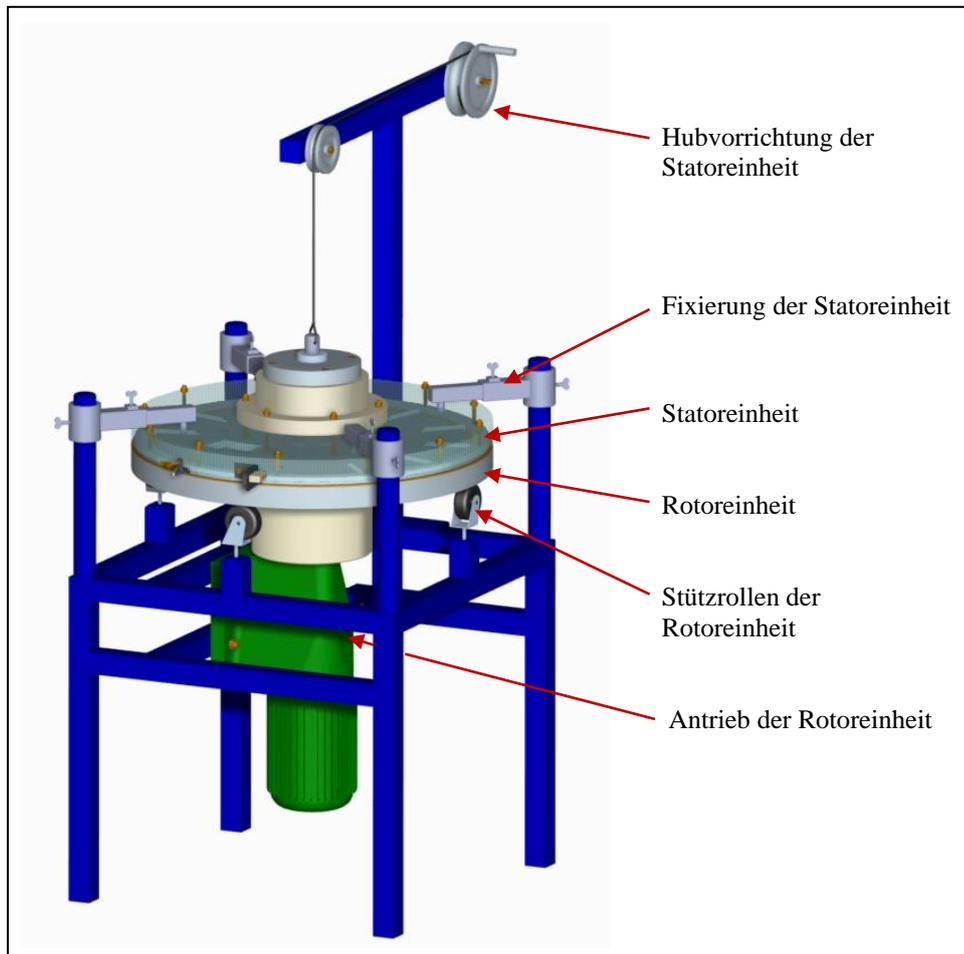


Abbildung 4-2 Gesamtanlage des Rollagglomerationstellers

Der Rollagglomerationsteller weist eine vertikal ausgerichtete Rotationsachse auf, so dass der Rollgang eine horizontale Orientierung besitzt. Um ein Auseinanderdrücken der Rotor- und Statoreinheit zu vermeiden (aufgetreten bei Vorversuchen mit hohem Füllgrad des Rollganges), wird die Rotoreinheit von Stützrollen geführt und die Statoreinheit durch in sie greifende Fixierungen stabilisiert (siehe auch Abbildung 4-4). Diese spezielle Fixierung wirkt zudem einer ungewollten Rotation der Statoreinheit entgegen. Zur weiteren Verbesserung der Stabilität wurde ein modifizierter Anlagenkern vorgesehen. Hierbei ragt ein Führungsdorn der Statoreinheit in zwei axial orientierte Kugellager der Rotoreinheit (siehe Abbildung 4-3). Somit wird innerhalb des Betriebes ein Verschieben bzw. ein gegenseitiges Kippen von Rotor- und Statoreinheit vermieden.

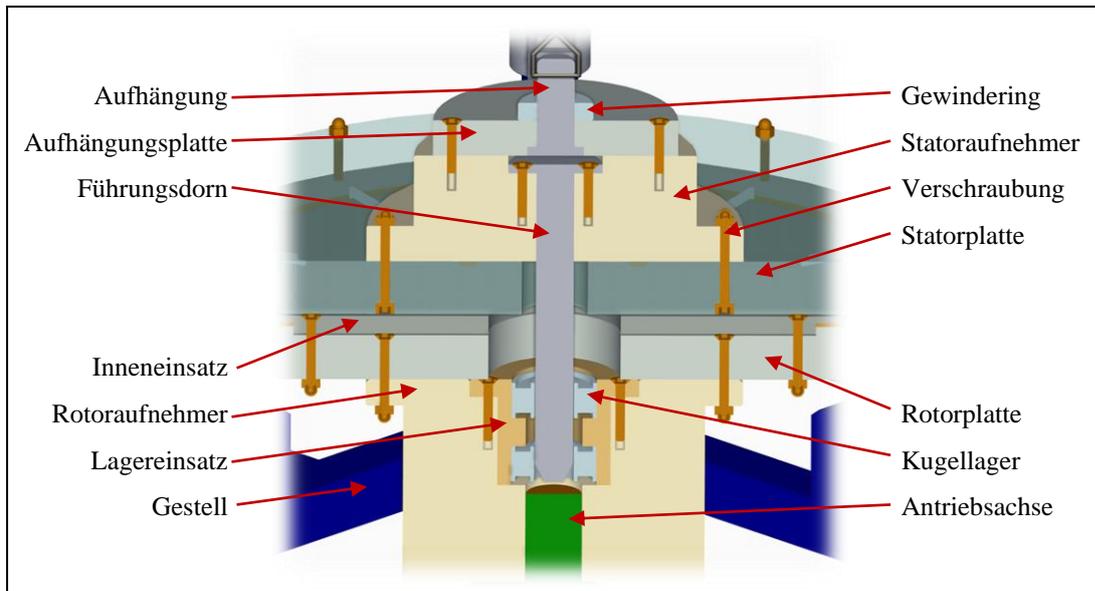


Abbildung 4-3 Schnitt durch den Kern des Rollagglomerationstellers

Der ringförmige Rollgang wird wie bei der Patentschrift DE 103 58 245 B4 durch die Statoreinheit (Statorplatte und Außenbund) sowie der Rotoreinheit (Rotorplatte und Inneneinsatz) begrenzt (siehe Abbildung 4-4). Entgegen der Patentschrift liegt der Außenbund flach auf dem Rotor auf. Die Kontaktflächen zwischen Rotor- und Statoreinheit wurden mit Teflونغewebe beaufschlagt, um die Reibungswerte im Betrieb herabzusetzen. Der Austausch des Außenbundes und Inneneinsatzes erlaubt eine Variation des Rollgangsquerschnittes. Hierdurch lassen sich neben unterschiedlichen Rollgangsabmessungen verschiedene Rollgangsquerschnittsprofile realisieren. Außerdem besteht die Möglichkeit, verschiedenartige Reibschlussbeläge sowie deren Orientierung im Rollgang zu untersuchen. Darüber hinaus können in die dafür vorgesehenen Nuten der Statorplatte verschiedene Störeinheiten eingesetzt werden, um lokale Widerstände und so eine Rotation um die horizontale Achse des Agglomerates hervorzurufen.

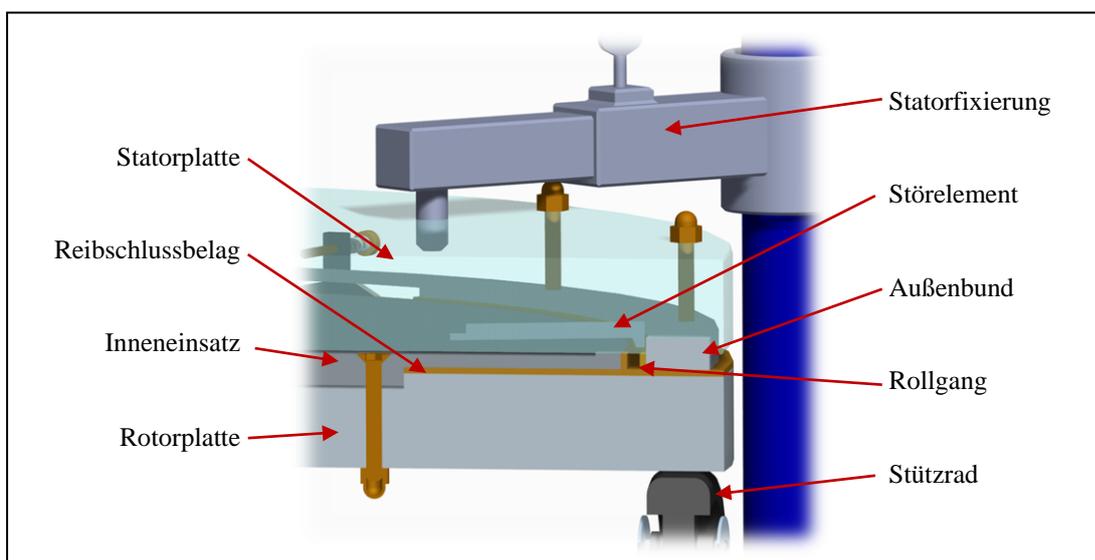


Abbildung 4-4 Querschnitt des Rollgangs (5x5 mm; 3 Reibschlusswandungen mit Störeinheit)

Die Zufuhr des Fasermaterials erfolgt bei der bisherigen Versuchsanlage weiterhin händisch. Während der Faserzufuhr befindet sich die Rotoreinheit in Rotation, so dass es vor allem bei der Aufgabe von relativ kurzen Fasern zu einer Verteilung des Fasermaterials über die Länge des Rollgangs kommen kann, bevor die angestrebte Menge aufgegeben wurde. Um dies zu verhindern, wurde ein Sperrschott vorgesehen (siehe Abbildung 4-5), welches den Rollgang während der Faseraufgabe verschließt und erst nach Erreichen des gewünschten Füllgrades den Rollgang freigibt. Dieses Vorgehen erwies sich zudem bei der Agglomeration von im Verhältnis zur Rollgangsquerschnittsfläche relativ langen Fasern sowie bei geringen Füllgraden von Vorteil. Durch die Stauung kommt es zu ersten Verschiebungen im Gefüge des Faserkollektivs und zu einem stärkeren Kontakt zwischen Fasermaterial und Wandungen. So zeigte sich eine Agglomeratbildung schon nach einer kürzeren Rollstrecke (Vergleich zur Anlage der zweiten Generation nach [S.H.'05]; [J.P.'06]). Nach einer Anlagenrunde wird das Faseragglomerat durch den Auswurfarm aus dem Rollgang ausgeschleust. Optional kann dieser aus dem Rollgang herausgezogen werden, um den Agglomerationsprozess innerhalb einer weiteren Anlagenumrundung fortzusetzen.

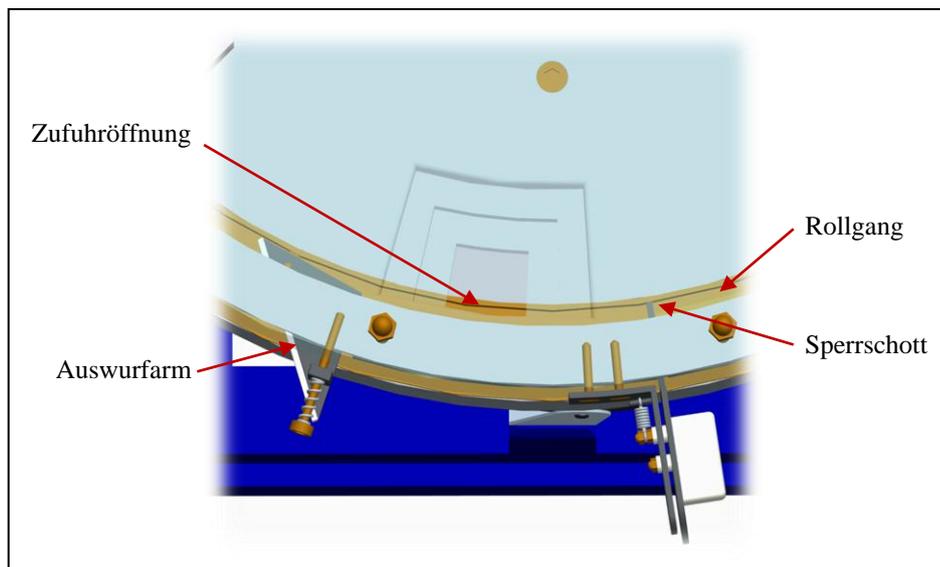


Abbildung 4-5 Ausschnittsdarstellung des Zufuhr- und Auswurfsbereichs

Wie schon im vorangegangenen Textverlauf dargestellt, lassen sich mit der gestalteten Versuchsanlage eine Reihe von Variationen realisieren, so dass deren unterschiedliche Einflüsse auf das Agglomerationsergebnis untersucht werden können. In der Tabelle 4-2 sind weitere Variationsparameter zusammengefasst. Konstant bei allen Versuchen blieb mit 430 mm der Durchmesser des ringförmigen Rollganges. Aufgrund des Bereiches für Zufuhr und Auswurf beträgt eine Anlagenrunde 1126 mm . Durch Herausziehen des

Auswurfarmes ist ein Mehrfachumlauf möglich. Eine Verkürzung der Wegstrecke kann zudem durch einen Versatz des Ausbundes (35,8 mm-Intervall) erfolgen.

Tabelle 4-2 Variationsmöglichkeiten des Agglomerationsprozesses im Rollagglomerationsteller

Parameter	Variationen
Drehzahl	nachgewiesen von 2 bis 14 min^{-1}
Rollstrecke	1 Anlagenrunde $\hat{=}$ 1126 mm
Rollgangsabmessungen	variabel
Rollgangsauskleidung	variabel
Rollgangseinbauten	optional alle 20°
Rollgangsverjüngungen	optional
Füllgrad	10% bis 100% (teils Überfüllung möglich)
Bindemittelzugabe	intern/extern
Bindemittelart/-menge	variabel
Faserart	variabel
Faserdicke	variabel
Faserlänge	variabel
weitere Zuschlagstoffe	optional

Kapitel 5

Charakterisierungs- und Bewertungsansätze der Faseragglomerate

5 Charakterisierungs- und Bewertungsansätze der Faseragglomerate

Die charakteristischen Eigenschaften von Schüttgütern wie z. B. die äußere Gestalt, räumliche Ausdehnung, Porosität und Verformungswiderstand haben einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten im Kollektiv sowie die Realisierung angestrebter Verwendungszwecke. So beeinflussen die äußere Gestalt sowie die Oberflächenstruktur bzw. -rauigkeit die Fließeigenschaften und somit das Dosierverhalten. Dies gilt ebenfalls für die hier betrachteten Faseragglomerate, welche für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche verschiedene Eigenschaften aufweisen müssen (siehe Tabelle 1-1).

Die charakteristischen Eigenschaften der erzeugten Faseragglomerate werden als Resultat der Fasereigenschaften, Anlagenparameter sowie der optionalen Agglomeratnachbehandlung aufgenommen. Somit lässt sich eine Eigenschaftsverschiebung als Folge der Kombination einzelner Einflussfaktoren darstellen. Anhand dieser Erkenntnisse sollen in späteren, produktionsnahen Technikumsanlagen über eine gezielte Einstellung der Einflussfaktoren die zielgerichtete Erzeugung relevanter Agglomerateigenschaften möglich sein, um weitere anwendungsorientierte Untersuchungen durchführen zu können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, diese Charakterisierungswege des Einzelagglomerates für eine Qualitätskontrolle bzw. -sicherung bei Massenproduktionen heranzuziehen. Der messtechnische Bezug zwischen den Eigenschaften des einzelnen Faseragglomerates und den anwendungsrelevanten Eigenschaften des Agglomeratkollektivs wird innerhalb dieser Arbeit nicht betrachtet. Da es sich vor allem bei den Rollagglomeraten um eine neue Produktstruktur handelt, wird eine Reihe von Charakterisierungsmöglichkeiten einzelner Merkmale betrachtet, um die zweckmäßigste Methode zu eruieren.

Da Naturprodukte wie Naturfasern immer eine Schwankung bzw. Verteilung der charakteristischen Merkmale wie z. B. Faserdurchmesser sowie Zug- und Biegesteifigkeit aufweisen, wird bei der Agglomeratcharakterisierung darauf geachtet, eine weitere Messwertstreuung aufgrund systematischer und stochastischer Fehler so gering wie möglich zu halten. So wurde zum Ausschluss von Messabweichung bedingt durch schwankende Raumklimaten die Agglomeratcharakterisierung im Normklima nach DIN EN ISO 139 durchgeführt.

Die auf dem Markt etablierten Verfahren ermöglichen meist lediglich zweidimensionale Formbeschreibungen von Partikeln. Eine Beschreibung von Körpereigenschaften ist für nahezu kugelförmige Partikel ausreichend, jedoch mit Zunahme der Abweichung zur Kugelgestalt stark fehlerbehaftet. Hierbei handelt es sich um Verfahren, bei denen die

Partikel im freien Fall und somit in stochastischer Orientierung erfasst werden (z. B. *CAMSIZER* [Retsch]) wie um Verfahren, die die Partikel in stabiler Lage aufnehmen (z. B. *PharmaVision* [Malvern]).

Ein Verfahren zur vollautomatisierten Charakterisierung von dreidimensionalen Partikelformen wird in der Offenlegungsschrift der *BASF AG* [DE 10 2005 055 825 A1] dargestellt. Ermittelt werden in erster Linie die geometrischen Abmessungen sowie das Volumen und die Oberfläche anhand mehrerer Bildaufnahmesysteme unter verschiedenen Winkeln. Die Bestimmung des Volumens und der Oberfläche erfolgt auf mathematischem Weg unter Verwendung von finiten Flächenelementen bzw. durch Zuhilfenahme diskreter Volumenelemente.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen dieser Arbeit lag noch keine Freigabe der Offenlegungsschrift DE 10 2005 055 825 A1 vor, so dass basierend auf eigenständigen Überlegungen mit den vorliegenden Analyseeinrichtungen autonome Charakterisierungsansätze der dreidimensionalen Merkmale der Faseragglomerate entwickelt und durchgeführt wurden. Hierbei kamen direkte Messverfahren sowie mathematische Ansätze zum Einsatz. Bei der Wahl der Messmethodik wurde vor allem auf eine gute Reproduzierbarkeit des Messablaufes geachtet. Zudem wurden allgemeine, mathematische Berechnungsformen herangezogen, um eine subjektive Eingruppierung der Faseragglomerate in Geometrieklassen zu vermeiden. Somit ist eine Abweichung in späteren Forschungsarbeiten aufgrund von anderen Arbeitsalgorithmen bzw. anderer subjektiver Empfindungen als gering einzuschätzen. Im Weiteren werden neben der für die Charakterisierung der Faseragglomerate herangezogenen Analyseverfahren auch nicht genutzte Möglichkeiten der Analyse einzelner Kennwerte dargestellt und bewertet, um einen Abriss weiterer Optionen zu geben.

5.1 Charakterisierung der äußeren Gestalt

Die äußere Gestalt ist eines der offensichtlichsten Merkmale eines Objektes. Form und Größe werden sofort vom Betrachter subjektiv analysiert und bewertet. Für einen objektiven Vergleich sowie eine Bewertung unterschiedlicher Faseragglomerate ist dies allein nicht ausreichend. Um eine gleichbleibende Bewertungsbasis zu erzielen, wurden konstante Bedingungen und Bewertungskriterien geschaffen. Angesichts des verwendeten Analyseverfahrens, der Photogrammetrie (siehe Unterkapitel 5.1.1), ist eine Unterteilung in so genannte Gestaltklassen sinnvoll, um hiernach notwendige Mindestanforderungen an die Abbildungsauflösung festzulegen. Nach *Zlatev* [M.Z.'05] lässt sich die Gestaltbetrachtung eines Körpers in drei Klassen unterteilen:

- Makrogestalt: äußere Erscheinungsform
- Mesogestalt: geometrische Form (Rundheit, Längenverhältnisse u. a.)
- Mikrogestalt: mathematische Form (fraktale Dimension u. a.).

Die Merkmale der einzelnen Gestaltklassen lassen sich über unterschiedliche Mess- und Analyseverfahren direkt sowie indirekt ermitteln. Weitere Einzelheiten zur Untergliederung der einzelnen Klassen werden in den späteren Unterkapiteln (5.1.2 bis 5.1.4) tiefergehend behandelt.

5.1.1 Gestaltbestimmung mittels Photogrammetrie

Aufgrund der Einfachheit, Zerstörungsfreiheit der Probekörper sowie geringer Kosten wird meist eine optische Analyse (Photogrammetrie) durchgeführt. Dies geschieht in der Regel durch die Auswertung von Projektionsschatten des zu charakterisierenden Objektes. Auch lässt sich ein genaues Abbild der äußeren Geometrie mit tomographischen Messverfahren erzeugen [M.N.'01]; doch die Kosten übersteigen die der Photogrammetrie um ein Vielfaches. Hingegen bleibt bezüglich des Anwendungszweckes zu prüfen, in wie weit die daraus erlangte „Mehrerkenntnis“ der äußeren Geometrie (konkave Bereiche) den höheren Kostenaufwand eines tomographischen Messverfahrens rechtfertigen.

Vor allem bei stark unregelmäßigen Körpern besitzt die Gestaltscharakterisierung über eine Projektionsflächenanalyse Schwächen. Während konvexe Körper eine charakteristische Projektionsfläche aufweisen, ist dies bei konkaven Bereichen (z. B. Mulden) nur in seltenen Fällen (z. B. lange Furchen) gegeben. Doch auch bei konvexen Körpern ist die erzeugte Projektionsfläche vom Betrachtungs- bzw. Beleuchtungswinkel abhängig. So kann beispielsweise ein elliptischer Zylinder im Idealfall elliptische, rechteckige oder quadratische Projektionsflächen hervorbringen (siehe Abbildung 5-1).

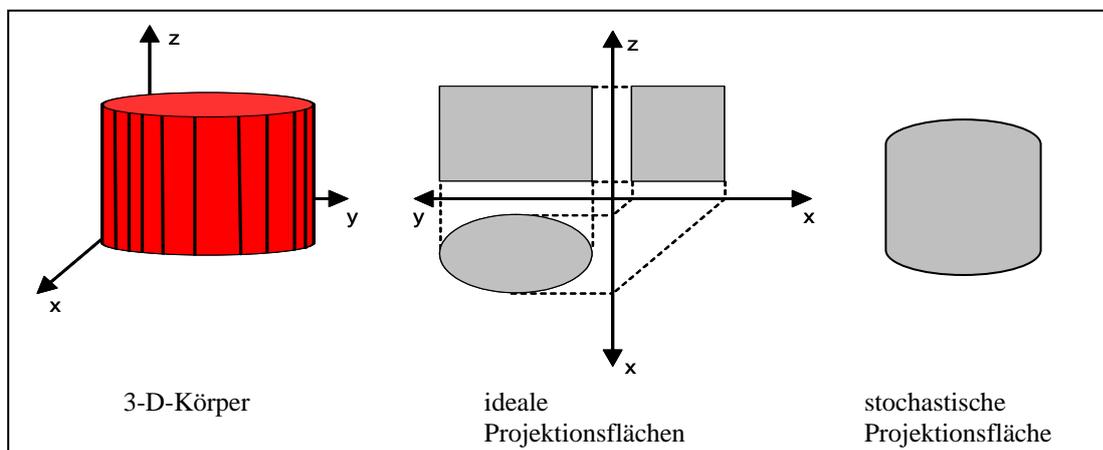


Abbildung 5-1 Projektionsflächenenerfassung eines elliptischen Zylinders

Der Übergang zwischen den abgebildeten, idealen Projektionsflächen (mathematisch beschreibbare Grundgeometrien) ist fließend. So liegt die größte Wahrscheinlichkeit bei Verwendung eines stochastischen Betrachtungswinkels darin, ein Projektionsbild in Form eines Rechtecks zu erhalten, dessen zwei gegenüberliegende Seiten gerundet sind.

Zur Charakterisierung der Faseragglomerate werden idealerweise pro Körper drei Ansichten herangezogen. Neben der Grundfläche „x-y-Projektion“ (Definition siehe Unterkapitel 5.1.2), werden die charakteristischen Seitenansichten „x-z-Projektion“ und „y-z-Projektion“ bewertet.

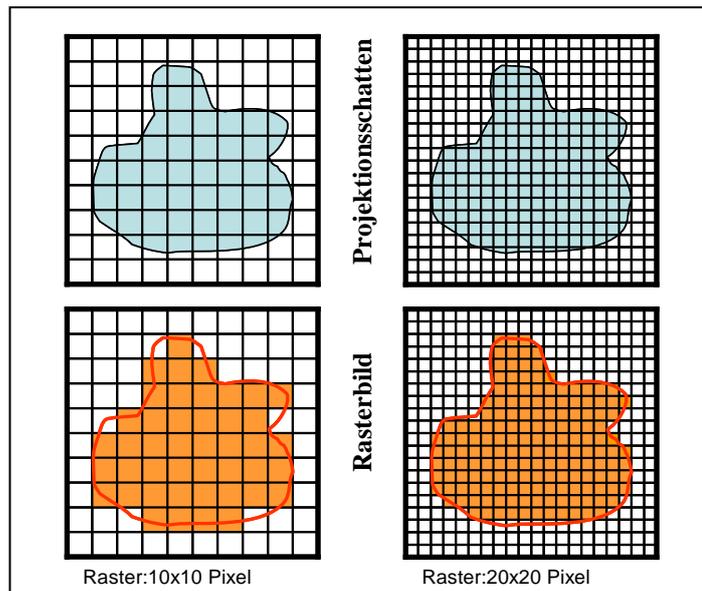


Abbildung 5-2 Umwandlung der realen Projektionsfläche zum digitalen Binärbild

Durch die Nutzung eines digitalen, optischen Aufnahmesystems ist eine computergestützte Auswertung der erzeugten Bilder möglich. Hierbei wird in der Regel das aufgezeichnete Projektionsbild des Körpers zu einem Binärbild generiert und rechenstechnisch vermessen. Die Pixel, welche zu mehr als 70% durch die reale Projektionsfläche bedeckt sind, werden als belegt (Wert = 1) betrachtet [M.Z.'05]. Die restlichen Pixel erhalten den Wert 0. Auf diese Art und Weise erfolgt ein Rasterbild der Projektionsfläche (siehe Abbildung 5-2). Es ist ersichtlich, dass die Größe der Pixel einen entscheidenden Einfluss auf die Detailliertheit der Widerspiegelung des Ist-Zustandes und somit auch auf die Qualität der Auswertung hat.

Ähnlich verhält es sich mit der verwendeten Pixelform. Als optimale Pixelform wird von Zlatev [M.Z.'05] eine quadratische Form angegeben, wie sie auch bei den durchgeführten Untersuchungen zur Anwendung kam. Des Weiteren liefert Zlatev [M.Z.'05] Angaben zu der Mindestpixelanzahl bzw. -pixelgröße für die Bewertung der unter-

schiedlichen Gestaltklassen. Hiernach lässt sich der relative Pixelflächenanteil bzw. die relative Rasterfläche „ $A_{rel.R}$ “ aus der vorliegenden Pixelfläche „ A_P “ und der Projektionsfläche des Schattens „ Pf “ berechnen.

$$A_{rel.R} = \frac{1}{n_R} = \frac{A_P}{Pf}$$

Gleichung 5-1

Für eine repräsentative Aussage wird eine Mindestpixelanzahl „ $n_{P,min}$ “ von 5 Pixeln im Makrobereich, von 16 Pixeln im Mesobereich und von 7300 Pixeln im Mikrobereich für eine bewertbare Darstellung empfohlen. Unterhalb dieser Werte ist eine hochwertige Wiedergabe der Projektionsflächenstruktur nicht möglich, da die entsprechenden Verhältnisse und Feinheiten nicht erfasst werden können. [M.Z.'05]

Unter Annahme quadratischer Pixel mit einer bekannten Kantenlänge „ a_P “ lässt sich die Mindestprojektionsfläche „ Pf_{min} “ ermitteln, die für eine aussagekräftige Analyse erforderlich ist.

$$Pf_{min} = a_P^2 \cdot n_{R,min}$$

Gleichung 5-2

Die zugehörigen Werte sind in Abhängigkeit zur Pixelgröße in der Tabelle 5-1 des nachfolgenden Abschnittes aufgeführt.

Beschreibung des eingesetzten Photogrammetriesystems

Zur Charakterisierung der geometrischen Gestalt kam ein Photogrammetriesystem bestehend aus einer digitalen Fotokamera (*Konica Minolta – DiMAGE Z2*) und einem Bildanalyseprogramm (*QWin V3* der Firma *Leica Microsystems Imaging Solutions Ltd.*) zum Einsatz (siehe Abbildung 5-3).

Als Lichtquelle diente ein Lichttisch, auf dem das Stativ positioniert wurde. Bedingt durch das vorliegende Gegenlicht kommt es lediglich zur Aufnahme des Projektionsschattens der einzelnen Agglomerate. Da es sich bei der verwendeten Lichtquelle nicht um parallele Lichtstrahlen handelte, kam es zu einer Überleuchtung der Peripherie des Agglomerates, was einen helleren Außenbereich des Projektionsschattens zur Folge hatte. Zur Minderung dieses Effektes sowie zur Erlangung einer größeren Schärfe und Kontrast im Randbereich des Schattens (bessere Detektion und Darstellung der Oberflächenstruktur) wurde mit einer Abdeckung des Lichttisches gearbeitet, um so die Größe des Lichtbereiches auf das mindesterforderliche Maß zu begrenzen.

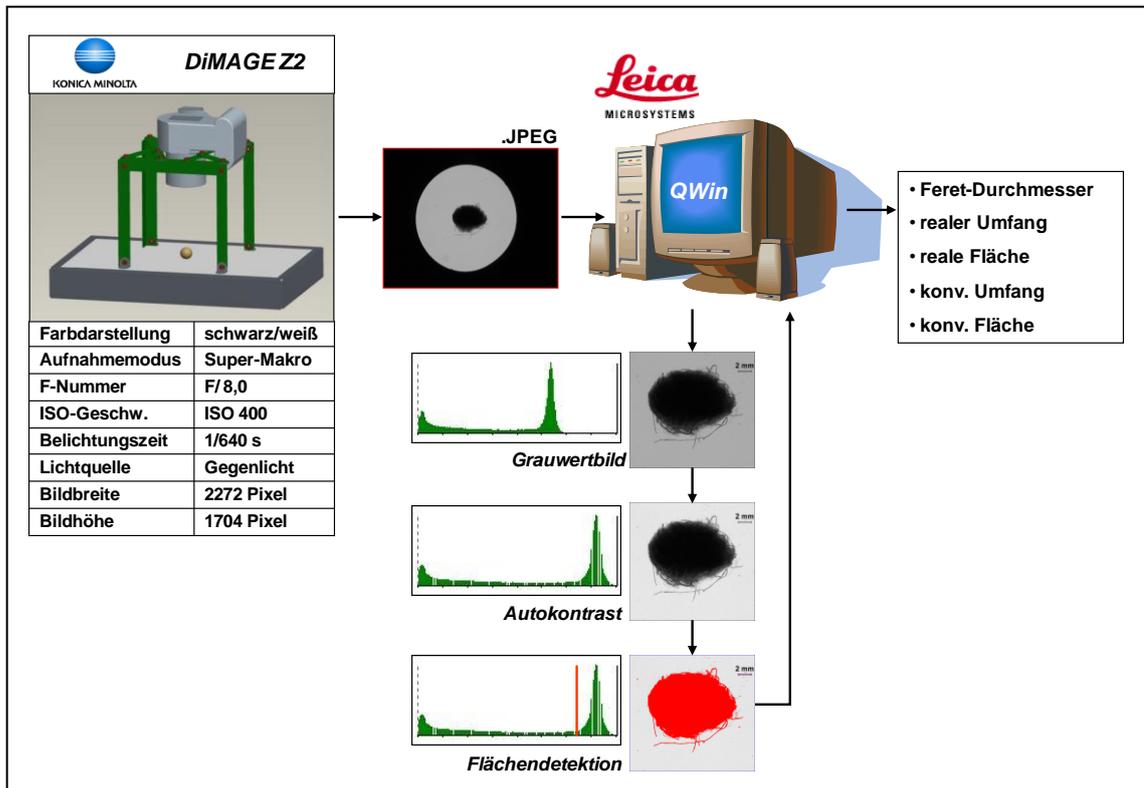


Abbildung 5-3 Verwendetes Photogrammetriesystem

Der Abstand zwischen dem Lichttisch und dem Objektiv (85 mm) sowie weitere foto-technische Einstellungen wurden bei allen Aufnahmen konstant gehalten (siehe Tabelle in Abbildung 5-3). Um eine Abweichung durch Varianz der räumlichen Orientierung auszuschließen, fand bei allen Aufnahmen der Projektionsflächen eine zentrierte Positionierung der Agglomerate im Bildausschnitt statt. Des Weiteren wurden die Agglomerate, die einen auffälligen Längenunterschied der Achsabschnitte aufwiesen, so orientiert, dass die maximale Länge in der Bilddarstellung horizontal verlief, da es sonst durch abweichende Orientierungen der Längsachse zu Abweichungen in der Flächendetektion kommen kann [K.H.'81].

Mit Hilfe des Computeranalyseprogramms *QWin V3* wurden die so erzeugten JPEG-Dateien vermessen. Neben einer Reihe von Feret-Durchmessern konnten der reale und konvexe Umfang sowie deren entsprechenden Flächeninhalte bestimmt werden. Zur erfolgreichen Auswertung war im Vorfeld eine Kalibrierung des Systems erforderlich. Aus der verwendeten Kombination von Kameraeinstellung und des Analyseprogramms *QWin V3* ergab sich eine dargestellte Pixelkantenlänge a_p von 30 μm . Diese Kantenlänge entsprach der vorliegenden Rasterung des Bildes. Hieraus lässt sich nach der Gleichung 5-2 die Projektionsfläche berechnen, die für eine aussagekräftige Analyse mindestens vorliegen muss (siehe Tabelle 5-1). Die so ermittelten Werte zeigen, dass die Kombination von Kamera und Analyse-System für die zu untersuchenden Faseragglomerate geeignet ist.

Tabelle 5-1 Mindestanforderungen der optischen Analyse

	Gestaltklassen		
	Makrogestalt	Mesogestalt	Mikrogestalt
<i>mind. Pixelanzahl $n_{g,min}$</i>	5	16	7300
<i>mind. Pixelflächenanteil $P_{r,min}$</i>	20,00%	6,25%	0,0136%
<i>mind. Projektionsfläche Pf_{min}</i>	0,0045 mm ²	0,0144 mm ²	6,57 mm ²

(Pf_{min} für $a_p=30 \mu\text{m}$)

Für eine bessere Detektion der relevanten Projektionsflächen wurde das Bild aus dem HSV⁹-Farbsystem in ein Grauwertbild umgerechnet und ein automatisierter Kontrastabgleich durchgeführt. So modifiziert wird das Bild eine Grauwertverteilung über den gesamten Grauwertbereich auf (siehe Abbildung 5-3). Die Detektion der Projektionsfläche erfolgte über die Festlegung des Grauwertbereiches, der dem Projektionsschatten entspricht (siehe Abbildung 5-4). Eine automatische Detektion ist aufgrund der teils zerklüfteten Umfangslinien und der unterschiedlichen Grauwertverteilungen bei unterschiedlich großen Faseragglomeraten nicht sinnvoll.

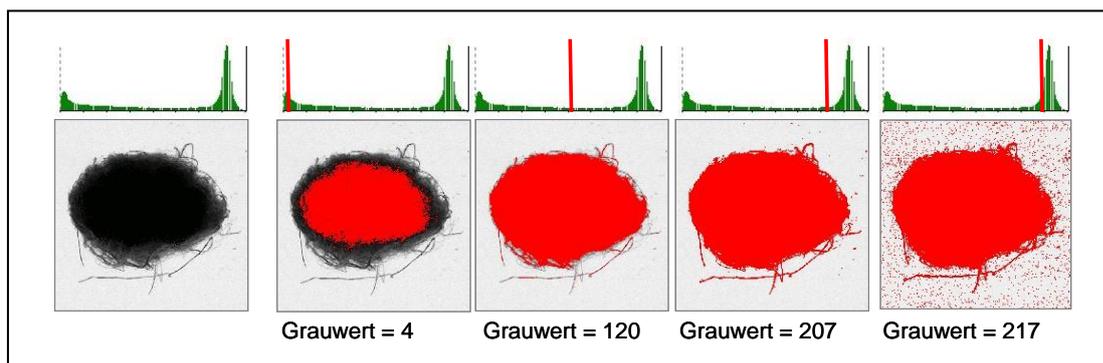


Abbildung 5-4 Detektion der Projektionsschatten

Der Kernschatten des Faseragglomerates bildet im Grauwertdiagramm ein erstes örtliches Maximum (Peak) aus. Mit Zunahme des Grauwertes nimmt die detektierte Fläche zu, bis direkt vor dem Anstieg des zweiten Peaks (absolutes Maximum) die komplette Projektionsfläche detektiert ist. Bei Überschreitung dieses Wertes wird der Grauwert bzw. das Pixelrauschen des Hintergrundes detektiert, was eine qualitative Auswertung unmöglich macht.

⁹ Hue-Saturation-Value

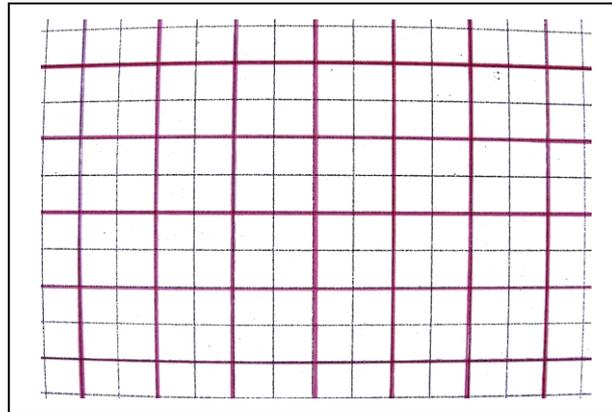


Abbildung 5-5 Kissenförmige Verzeichnung der Fotokamera

Trotz der oben aufgeführten Festlegung der Einstellung und des Arbeitsablaufes der Bildanalyse kam es durch Verzeichnungseffekte (Bildverzerrung siehe Abbildung 5-5) zu einem systematischen Fehler. Des Weiteren hatte auch der Abstand der relevanten Agglomeratebene („Agglomerat-Äquator“) einen Einfluss auf die Kalibrierung der Pixelgröße. Diese Effekte hatten zur Folge, dass größere bzw. höhere Faseragglomerate mit konstanter Pixelgrößenkalibrierung von $30\ \mu\text{m}$ die reale Projektionsfläche falsch widerspiegelten. Zur Ermittlung dieser Abweichungen wurde eine Pixelgrößenkalibrierung mit verschiedenen Normflächen mit unterschiedlichen Abständen zur Lichttischoberfläche durchgeführt, wobei die jeweilige Pixelkantenlänge ermittelt wurde (siehe Abbildung 5-6).

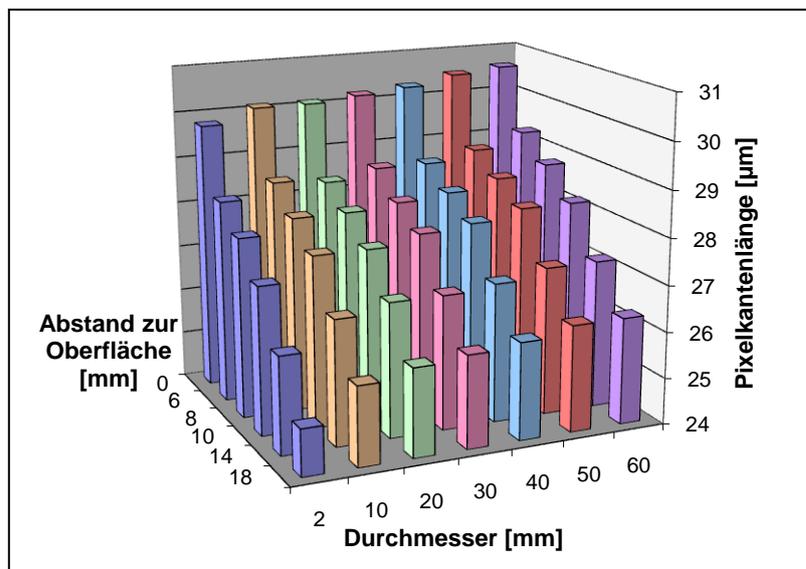


Abbildung 5-6 Auswirkung von Abstandsvariation und Linsenverzerrung

Es zeigte sich, dass mit Zunahme des gemessenen Durchmessers sowie durch Abnahme der Distanz zum Lichttisch bzw. größer werdenden Abstand zum Objektiv die ermittelte Pixelkantenlänge zunahm. Da bei der Messung und dem Vergleich von Agglomeraten

unterschiedlicher Größe eine deutliche Messabweichung entstehen würde, erfolgte eine mathematische Messwertkorrektur. Die Herleitung dieser Korrektur basiert auf der Gegenüberstellung von Messwertkurven genormter Kugeln und deren Real-Werten (3 bis 32 mm Durchmesser). Hierbei wiesen die Messwertkurven für die ermittelten Durchmesser, Umfänge und Flächeninhalte der Projektionsschatten leicht polynomische Trendverläufe auf, wie es am Beispiel des ermittelten Durchmesserverlaufes in Abbildung 5-7 zu sehen ist.

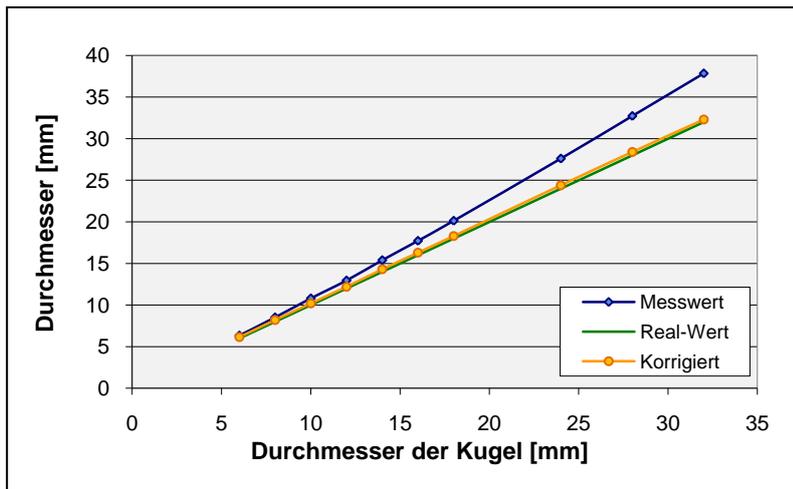


Abbildung 5-7 Messwertabweichungen bei der Messung von Normkugeln

Aufgrund der vorliegenden Trendverläufe lässt sich eine entsprechende Messwertkorrektur für die verschiedenen Messparameter erstellen, mit der die Abweichungen der ermittelten Werte gemindert werden konnten. Die Parameter dieser Ausgleichsfunktion wurden so angepasst, dass es zu einer möglichst optimalen Deckung der korrigierten Messkurve mit der Real-Wert-Geraden kommt. Die verbleibenden Restabweichungen der einzelnen Agglomeratcharakteristika sind samt Messwert-Korrekturgleichung in der Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5-2 Messwert-Korrekturgleichungen der Agglomeratcharakteristika

	Korrekturgleichung	Restabweichung
Durchmesser	$x = 104,16 \cdot \sqrt{0,0192 \cdot x_{mess}} - 102,5$	+3,0% / -2,4%
Umfang	$Pu = 357,14 \cdot \sqrt{1,0015 + 0,0056 \cdot Pu_{mess}} - 356,6$	+3,8% / -3,0%
Fläche	$Pf = 2500 \cdot \sqrt{1,27 + 0,0008 \cdot Pf_{mess}} - 2810,07$	+5,7% / -4,2%

Die vorliegenden Restabweichungen beruhen auf stochastischen Fehlern, hervorgerufen durch die Abweichungen der subjektiven Festlegung des Grauwertbereiches der einzel-

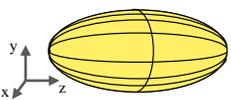
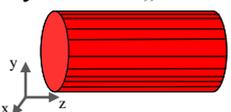
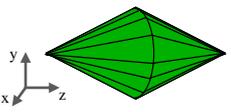
nen Projektionsschatten. Die angegebenen Korrekturgleichungen sind lediglich für das genutzte Photogrammetriesystem (siehe Abbildung 5-3) heranzuziehen. Bei Abwandlungen des Systems sind erneut die Abweichungen der Messwerte sowie die Korrekturansätze zu überprüfen.

Eine Minimierung der systembedingten Messfehler ist durch die Verwendung einer Lichtquelle mit parallelen Lichtstrahlen sowie durch den Einsatz eines Fotosystems mit je einer Linse vor und hinter der Blende (Vermeidung von Verzeichnungen) möglich [J.M.'93].

5.1.2 Bewertung der Makrogestalt von Faseragglomeraten

Als Makrogestalt wird die äußere Erscheinungsform eines Körpers verstanden und unterschieden (siehe auch Anhang A.5-2). Zur Beschreibung der erzeugten Faseragglomerate wurde deren Makrogestalt mittels geometrischer Grundformen beschrieben. Hierbei handelt es sich um geometrische Körper, die die tatsächliche Form des Faseragglomerates mehr oder weniger exakt wiedergeben. Dies ist erforderlich, um aus den ermittelten Projektionsflächen einen dreidimensionalen Körper auf mathematischem Wege generieren zu können. Somit lassen sich charakteristische Größen wie Volumen, Oberfläche und Porosität bestimmen. Aufgrund der unterschiedlichen Faseragglomerate, die sich mit den untersuchten Agglomerationsprozessen herstellen lassen, wird in kugelförmige, zylindrische und doppelkegliche Makrogestalten unterschieden (siehe Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3 Darstellung der verwendeten Grundformen

Makrogestalt	ideale Grundform	abweichende Grundform	Hauptverfahren
<p>kugelig „k“</p> 	Kugel ($a=b=c$)	triaxialer Ellipsoid ($a \neq b \neq c$)	- Rollagglomeration - Aufbauagglomeration
<p>zylindrisch „z“</p> 	Kreiszyylinder ($a=b; c$)	elliptischer Zylinder ($a \neq b; c$)	- Rollagglomeration - Wickelverfahren - Pressagglomeration
<p>doppelkeglig „dk“</p> 	Kreis-Doppelkegel ($a=b; c$)	elliptischer Doppelkegel ($a \neq b; c$)	- Rollagglomeration

$a; b; c$: geometrische Abmessung in x-, y- und z-Richtung

Die ideale Grundform, Geometrien mit einer kreisrunden Grundfläche ($a=b$) bzw. Kugelform ($a=b=c$), stellt einen optimalen Grenzfall dar, der von realen Faseragglomeraten nur in wenigen Fällen erfüllt wird. Bei den weiteren Ansätzen der Charakterisierung von Faseragglomeraten wurde darauf geachtet, dass die gewählten Berechnungsformen sowohl für die ideale wie auch für die abweichende geometrische Grundform anwendbar sind.

Während die Faseragglomerate der Aufbau- und Pressagglomeration sowie des Wickel- und Pull-Drill-Verfahrens auch durch Variation des Produktionsprozesses eine nahezu gleichbleibende Makrogestalt aufweisen (kugelig bzw. zylindrisch), kann es vor allem bei der Rollagglomeration mit Zunahme des aufgegebenen Faservolumens zu einer Verschiebung der Makrogestalt kommen (siehe Abbildung 5-8). So weisen die Agglomerate, die aus einem geringen Faservolumen bestehen, unabhängig von der vorliegenden Anlagenkonfiguration, eine relativ kugelige Makrogestalt auf. Je nach Anlagenkonfiguration verschiebt sich die Makrogestalt mit Steigerung des in das Agglomerat eingebundenen Faservolumens hin zu doppelkegligen, elliptischen bzw. zylindrischen Makrogestalten.

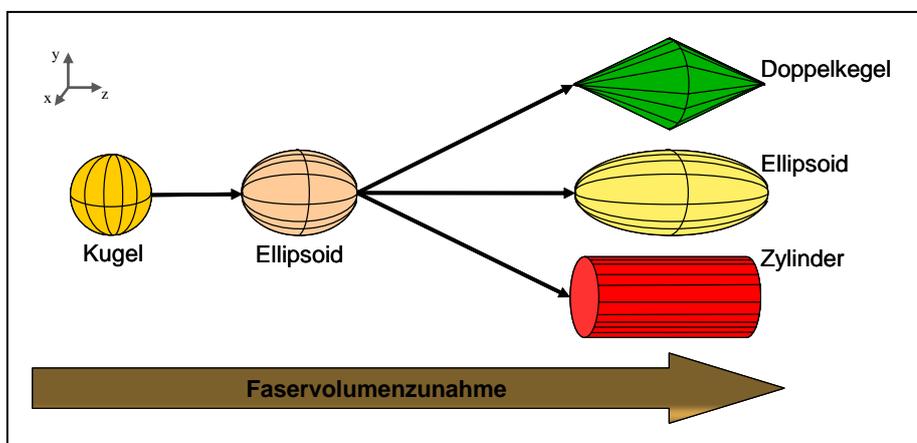


Abbildung 5-8 Verschiebung der Makrogestalt aufgrund Faservolumenzunahme

Welche Gestaltsverschiebung sich einstellt ist abhängig von der Auskleidungsvariante des Rollganges (2-Wand-, 3-Wand- oder 4-Wand-Reibschluss), worauf im Kapitel 6 „Experimentelle Untersuchung“ intensiver eingegangen wird. Der Übergang zwischen den Makrogestalten ist fließend, so dass in den meisten Fällen Mischformen der geometrischen Gestalt vorliegen, deren subjektive Klassifizierung in Gruppen als fragwürdig anzusehen ist, da dies eine geringe Reproduzierbarkeit der Charakterisierung beinhaltet. Deutliche Übergangsformen bilden sich vor allem in den Verläufen zwischen Ellipsoid und Zylinder sowie zwischen Ellipsoid und Doppelkegel aus. Die idealen

geometrischen Körper (Kugel bzw. Ellipsoid, Doppelkegel sowie Zylinder) sind Grenzfälle. Aufgrund der fließenden Verschiebung der Makrogestalt müssen die Analyseverfahren so ausgelegt werden, dass eine weitestgehend objektive Bewertung bzw. Einteilung in Formklassen für die weitere Charakterisierung möglich ist.

5.1.3 Bewertung der Mesogestalt von Faseragglomeraten

Grundcharakteristika der Mesogestalt sind die direkt sowie indirekt ermittelten Kennwerte der Makrogestalt bzw. des Grundkörpers. Hierunter fallen:

- räumliche Ausdehnung
- äußere Oberfläche
- Körpervolumen
- Formfaktoren.

Diese Kennwerte erlauben direkte Rückschlüsse auf die Möglichkeiten eines späteren Verwendungszweckes (z. B. Größenlimitierung) sowie auf das Transport-, Lager- und Dosierverhalten.

5.1.3.1 Längenabmessungen, Projektionsflächen sowie -umfang

Mit Hilfe des verwendeten Computeranalyseprogramms lassen sich eine Anzahl unterschiedlicher Längenmaße automatisiert ermitteln. Bei den direkt gemessenen Längenabmessungen handelt es sich um Feret-Durchmesser (Abstand zweier paralleler Tangenten). Zur Verfügung stehen hierbei neben den Feret-Durchmessern unterschiedlicher Winkelorientierung zur Horizontalen (von 0° bis 157° in $22,5^\circ$ -Schritten) der längste und kürzeste Feret-Durchmesser (beliebige Winkelorientierung) sowie der orthogonale Feret-Durchmesser (senkrecht zum längsten Feret-Durchmesser; siehe Abbildung 5-9).

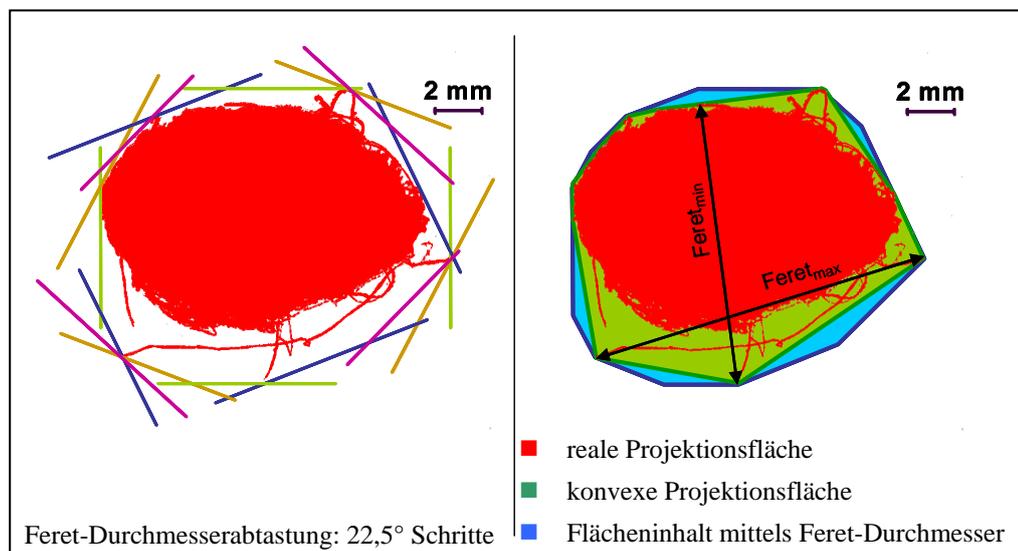


Abbildung 5-9 Fehlmessung bei Verwendung des Feret-Durchmessers

Reinhard et. al. [P.R.'03] sehen die Verwendung der Feret-Durchmesser entlang vorgegebener Messrichtungen bzw. Messwinkel als fragwürdig an, da es zum Wegfallen charakteristischer Punkte (Ausstülpungen) kommen kann (siehe Abbildung 5-9 li.). Dieses würde ein falsches Bild des zu messenden Objektes wiedergeben. Eine weitere Abweichung der Feret-Durchmesserabtastung eines Projektionsschattens wird bei der Gegenüberstellung zu den realen und konvexen Projektionsflächen sowie dessen Umfangslinie deutlich (siehe Abbildung 5-9 re.). Eine geringere Abweichung zur realen Projektionsfläche weist die von ihm aufgespannte konvexe Fläche (konvexe Projektionsfläche) auf.

Zur Charakterisierung der Abmessungen des Faseragglomerates werden somit der längste und kürzeste Feret-Durchmesser beliebiger Orientierung des einzelnen Projektionsschattens verwendet. Für die weitere Charakterisierung des Faseragglomerates werden zudem die reale und die konvexe Projektionsfläche sowie deren Umfangslinien herangezogen.

5.1.3.2 Äußere Oberfläche des Faseragglomerates

Die vorliegende äußere Oberfläche des Faseragglomerates ist für die späteren Anwendungsbereiche im Gegensatz zur inneren bzw. zugänglichen Oberfläche von geringer Bedeutung. Jedoch ist die geometrische Oberfläche des Körpers zur Bestimmung eines dreidimensionalen Formfaktors des Körpers – beispielhaft nach *Wadell* bzw. *Heywood* [DIN 66160] – erforderlich.

In den meisten Anwendungen kommt zur Beschreibung konvexer Körper das Theorem von *Cauchy* zum Einsatz, welches als Bezugskörper die Kugel verwendet. Auch durch eine weitere Anpassung der Gleichung war es nicht möglich, über eine universelle Formel die Körperoberfläche zu berechnen, ohne vorab eine subjektive Einteilung der erzeugten Faseragglomerate in geometrische Klassen vorzunehmen (siehe auch Anhang).

Ein Einbeziehen der so ermittelten Oberflächenwerte beispielsweise zur Berechnung der dreidimensionalen Sphärizität würde falsche Schlüsse der äußeren Gestalt mit sich ziehen. Aus diesen Gründen werden die Körperoberflächen der Faseragglomerate nicht zur Bewertung von Versuchsreihen herangezogen. Lediglich in einzelnen Fällen, für eindeutige geometrische Makrogestalten, wird diese Größe für weitere Betrachtungen ermittelt. So können beispielsweise die Sphärizitätsverläufe bei der Aufbauagglomeration in Abhängigkeit zur Siebklasse ermittelt werden, um einen Wert für die Rundheit zu quantifizieren.

5.1.3.3 Körpervolumen

Wie die äußere Oberfläche weist auch das Agglomeratvolumen keinen direkten Einfluss auf die Anwendungsmöglichkeiten auf. Jedoch ist das Agglomeratvolumen zur mathematischen Ermittlung der Porosität erforderlich. Bei der Bestimmung der Körpervolumina von Faseragglomeraten stellt sich die teils hohe Porosität als eine Limitierung der möglichen Untersuchungsansätze dar. So sind Verfahren, die mit der Verdrängung eines Mediums arbeiten, nicht zur Volumenermittlung geeignet. Zudem war ein Ummanteln der Faseragglomerate aufgrund der ungleichmäßigen Geometrien sowie der teilweise geringen Stabilität nicht zielführend. Um dennoch eine Aussage zu erlangen, wurde das Volumen der Faseragglomeratkörper über einen mathematischen Ansatz aus den Messwerten der Photogrammetrie ermittelt.

Anhand der Berechnungsformeln für das Agglomeratvolumen „ V_j “ sowie Projektionsflächen „ $Pf_{Ansicht,j}$ “ der betrachteten Grundkörpergeometrien (j = kugelförmige, zylindrische oder doppelkeglige Makrogestalt) konnte eine allgemeingültige Formel aller betrachteten Geometrien unter Zuhilfenahme der geometriespezifischen Flächenkonstanten „ $k_{A,i}$ “ sowie geometriespezifischen Volumenkonstanten „ $k_{V,j}$ “ hergeleitet werden (siehe auch Anhang).

$$V_j = k_{V,j} \cdot (x_x \cdot x_y \cdot x_z)$$

Gleichung 5-3

$$Pf_{x-y,j} = k_{A,i} \cdot (x_x \cdot x_y)$$

$$Pf_{x-z,j} = k_{A,i} \cdot (x_x \cdot x_z)$$

$$Pf_{y-z,j} = k_{A,i} \cdot (x_y \cdot x_z)$$

Gleichung 5-4 a-c

{ x = Feret-Durchmesser des Agglomerates in x -, y - und z -Richtung}

Tabelle 5-4 Geometriespezifische Konstanten

geo.-spez. Flächenkonstanten	geo.-spez. Volumenkonstanten
$k_{A,Rechteck} = 1$	$k_{V,Zylinder} = \frac{1}{4} \cdot \pi$
$k_{A,Ellipse} = \frac{1}{4} \cdot \pi$	$k_{V,Ellipsoid} = \frac{1}{6} \cdot \pi$
$k_{A,Rhombus} = \frac{1}{2}$	$k_{V,Doppelkegel} = \frac{1}{12} \cdot \pi$

Der Hintergrund der unterschiedlichen geometriespezifischen Konstanten verschiedener Grundkörpergeometrien (siehe Tabelle 5-4) wird in der Abbildung 5-10 verdeutlicht.

Bei gleichen geometrischen Abmessungen spannt ein Rechteck die größte, ein Rhombus die kleinste Fläche auf. Ein gleiches Verhalten trifft auf die Volumina entsprechender elliptisch rotierender Körper zu.

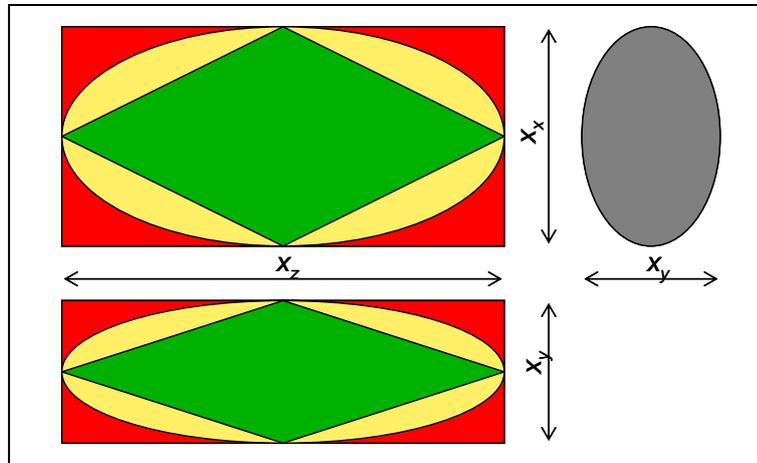


Abbildung 5-10 Projektionsflächen idealer Geometrien gleicher geometrischer Abmessungen

Da eine Ermittlung der geometrischen Abmessungen der realen Projektionsbilder aufgrund abweichender Geometrien nicht exakt ermittelbar ist, wird wie oben erläutert, auf klar detektierbare Messwerte zurückgegriffen. Hierbei werden für die Volumenberechnung die Flächeninhalte der einzelnen Projektionsschatten verwendet. Aus der Quadratwurzel des Produktes der Projektionsflächen entsprechender Ansichten (unter Beachtung der in Unterkapitel 5.1.1 erläuterten Aufnahmeroutine der Projektionsbilder, siehe Abbildung 5-1), lässt sich unter Bildung einer zusammengefassten geometrischen Projektionsflächenkonstanten „ $k_{Pf,j}$ “ das Produkt der geometrischen Abmessungen berechnen.

$$\begin{aligned} \sqrt{Pf_{x-y,j} \cdot Pf_{x-z,j} \cdot Pf_{y-z,j}} &= \sqrt{(k_{A,i1} \cdot k_{A,i2} \cdot k_{A,i3})} \cdot \sqrt{(x_x \cdot x_y) \cdot (x_x \cdot x_z) \cdot (x_y \cdot x_z)} \\ &= k_{Pf,j} \cdot \sqrt{x_x^2 \cdot x_y^2 \cdot x_z^2} \\ &= k_{Pf,j} \cdot (x_x \cdot x_y \cdot x_z) \end{aligned}$$

daraus folgt:

$$(x_x \cdot x_y \cdot x_z) = \frac{1}{k_{Pf,j}} \cdot \sqrt{Pf_{x-y,j} \cdot Pf_{x-z,j} \cdot Pf_{y-z,j}}$$

Gleichung 5-5

Aus dem Ansatz der Gleichung 5-3, unter Verwendung der Gleichung 5-5, lässt sich das Körpervolumen in Abhängigkeit der einzelnen Projektionsflächen und der zusammen-

gefassten geometriespezifischen Volumenkonstante „ $k_{V,j}^*$ “ (siehe Tabelle 5-5) ermitteln.

$$V_j = \frac{k_{V,j}}{k_{Pf,j}} \cdot \sqrt{Pf_{x-y,j} \cdot Pf_{x-z,j} \cdot Pf_{y-z,j}}$$

$$= k_{V,j}^* \cdot \sqrt{Pf_{x-y,j} \cdot Pf_{x-z,j} \cdot Pf_{y-z,j}}$$

Gleichung 5-6

Tabelle 5-5 Zusammengefasste geometriespezifische Volumenkonstanten

<i>geometrische Makrogestalt</i>	
<i>zylindrisch</i>	$k_{V,z}^* = \frac{\pi}{2} \approx 0,8862$
<i>kugelförmig</i>	$k_{V,k}^* = \frac{4}{3 \cdot \pi} \approx 0,7523$
<i>doppelkeglig</i>	$k_{V,dk}^* = \frac{\sqrt{\pi}}{3} \approx 0,5908$

Anhand der hier durchgeführten Untersuchungen lässt sich das geometrische Volumen des Faseragglomerates anhand der Projektionsflächen (Grundfläche „ $Pf_{G,j}$ “, Seitenansichten „ $Pf_{S1,j}$ “ und „ $Pf_{S2,j}$ “) und der zusammengefassten geometriespezifischen Volumenkonstante „ $k_{V,j}^*$ “ berechnen.

$$V_j = k_{V,j}^* \cdot \sqrt{Pf_{G,j} \cdot Pf_{S1,j} \cdot Pf_{S2,j}}$$

$$= k_{V,j}^* \cdot \sqrt{Pf_{G,j}} \cdot \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Pf_{Si,j}}$$

Gleichung 5-7

Bei einer genaueren Abtastung der Seitenansichten (mehrere Abbildungen unter fortlaufendem Betrachtungswinkel) kann das Volumen nach der Gleichung 5-7 berechnet werden. In dieser allgemeinen Form ist das Volumen als Produkt der zusammengefassten geometriespezifischen Volumenkonstante, der Quadratwurzel der Grundseitenprojektionsfläche und des geometrischen Mittelwertes der Seitenprojektionsflächen ermittelbar.

Während die Faseragglomerate der Aufbau- und Pressagglomeration sowie des Pull-Drill-Verfahrens unabhängig der Anlagenparameter immer dieselbe geometrische Makrogestalt aufweisen, kommt es bei der Rollagglomeration mit Zunahme des eingebundenen Faservolumens zu einer Verschiebung der Makrogestalt. Aus diesem Grund musste speziell für die möglichen Mischgeometrien der Rollagglomerate eine Anpassung der zusammengefassten geometriespezifischen Volumenkonstante vorgenommen werden. Für den Verlauf von der Kugel hin zu einer zylindrischen Makrogestalt wird ein Wert von 0,814, hin zu einer doppelkegeligen Makrogestalt ein Wert von 0,662 verwendet. Berechnet wird somit ein Körper, dessen Gestalt zwischen Ellipsoid und Zylinder bzw. Doppelkegel liegt. Die Abweichungen, die aufgrund dieser Vereinfachungen auftreten, lassen sich anhand der Abbildung 5-11 darstellen.

Für Agglomerate mit einer Mischgestalt zwischen Ellipsoid und Zylinder liegt der systematische Fehler des berechneten Volumens unterhalb eines Wertes von 8,2%. Hierbei würde ein idealer Zylinder eine negative, ein idealer Ellipsoid eine positive Abweichung aufweisen (gestrichelte Linie). Bei einer Mischgestalt zwischen Ellipsoid und Doppelkegel liegt die Volumenabweichung bei $< 12\%$. Da bei den hergestellten Rollagglomeraten in den wenigsten Fällen eine ideale Geometrie zu erwarten ist und somit der Fehler geringer ist als bei den oben aufgeführten Abweichungen, stellt diese Herangehensweise eine gute Näherungsform dar, um ohne subjektive Bewertung der geometrischen Gestalt eine Volumenermittlung bei fortlaufender Verschiebung von Mischgestalten zu ermöglichen.

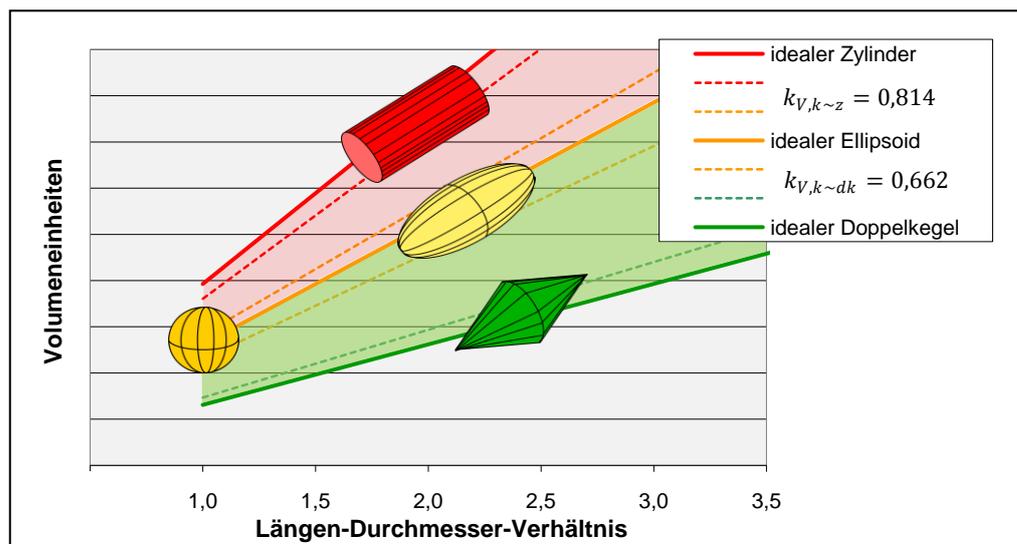


Abbildung 5-11 Volumenabweichung zwischen Körpern idealer Makrogestalt gegenüber der Berechnung mit gemittelter geometriespezifischer Volumenkonstante

5.1.3.4 Formanalyse des Faseragglomerates

Als Formfaktor wird eine dimensionslose Größe verstanden, die sich aus den Verhältnissen messbarer Körpereigenschaften zusammensetzt [DIN 66160]. Unterschieden wird hauptsächlich in geometrische und dynamische Formfaktoren [K.G.'97]. Nach *Zlatev* [M.Z.'05] sind mehr als 2000 unterschiedliche Formfaktoren in der einschlägigen Literatur bekannt. Meist wurden jedoch lediglich geringfügige Variationen der Berechnungsweisen vorgenommen, um eine bessere Darstellung sowie Anwendbarkeit innerhalb verschiedener Anwendungsgebiete zu erreichen. Anwendungsrelevanten Einfluss besitzt die Kornform beispielsweise auf das Fließverhalten sowie die Dosierbarkeit von Schüttgütern. Das Optimum der Kornform stellt die Kugel dar, jedoch ist diese nicht immer erforderlich und kann sogar für gewisse Anwendungen von Nachteil sein (geringer Böschungswinkel von Schüttungen). *Pietsch* [W.P.'90] sieht die Form von Agglomeraten als die wichtigste charakteristische Größe an.

Bei der Ermittlung von dynamischen Formfaktoren mittels Sedimentationsversuchen kann es aufgrund von Partikelrotationen sowie unterschiedlicher Durchströmungsverhalten des inneren Agglomeratgefüges zu abweichenden Messwerten kommen [O.P.'06]. Da die zu charakterisierenden Faseragglomerate zum einen eine teils auffällige Verschiedenartigkeit zur Kugelgeometrie, zum anderen eine teils hohe Porosität aufweisen, ist eine Ermittlung von dynamischen Formfaktoren der äußeren Gestalt nicht möglich. Aus diesem Grund wird lediglich auf photogrammetrische Analysen zurückgegriffen.

Bei der Bewertung mittels geometrischer Formfaktoren werden in der Regel die Kubizität und Sphärizität herangezogen. In einzelnen Fällen wird auf Fourier-Analysen [H.B.'85] sowie die Ermittlung der fraktalen Dimensionen der konvexen Hülle ([B.K.'87]; [G.B.'92]; [C.L.'94] u. a.) zurückgegriffen. Da sowohl die Fourier-Analyse, wie auch die Ermittlung der fraktalen Dimension, einen gesteigerten analytischen Aufwand bedeuten, finden diese Formanalysen in technischen Bereichen geringe Anwendung. Zudem liegt ihre Eignung eher im Gebiet einer Feinabtastung der Oberflächenstruktur und eignet sich somit eher zur Beschreibung der Mikrogestalt.

Aus genannten Gründen wird in erster Linie zur Formanalyse der Mesogestalt auf geometrische Formfaktoren wie die Kubizität des dreidimensionalen Körpers sowie die Sphärizität entsprechender zweidimensionaler Projektionsschatten zurückgegriffen. Von einer Ermittlung der dynamischen Formfaktoren wurde abgesehen, da eine Unterscheidung der Widerstände aufgrund einer Umströmung sowie einer Durchströmung schwer realisierbar ist [O.P.'06]. Der Ansatz einer Füllung des Porenraumes zur Vermeidung

einer Durchströmung ist wiederum durch die teils weichen sowie unregelmäßigen Strukturen fragwürdig, da es hierdurch zu einer Veränderung der äußeren Gestalt kommen kann.

Kubizität

Die Kubizität ist eine Verhältniszahl direkt messbarer Längenwerte. Zur Charakterisierung grobdispenser Schüttgüter wie Gesteinskörper und Zuschlagsstoffe fand die Kubizität „ ψ_{Kub} “ in den DIN-Schriften DIN EN 933-4 und DIN 52114 Verwendung. Hiernach lässt sich die Kubizität mittels eines speziellen Messschiebers einteilen bzw. als Verhältniszahl der gemessenen Körperlänge (max. Feret-Durchmesser „ x_{max} “) zu dessen Dicke (min. Feret-Durchmesser „ x_{min} “) über die Gleichung 5-8 berechnen. Zur Bewertung wird lediglich in kubische und nicht-kubische Körper unterschieden. Als nicht-kubisch gelten alle Körper mit $\psi_{Kub} > 3$. Auch wenn bei den erzeugten Faseragglomeraten tendenziell Werte von $\psi_{Kub} < 3$ zu erwarten sind, wurde diese charakteristische Größe herangezogen, um Streckungen bzw. Stauchungen der geometrischen Körper aufgrund von Rollgangsüberfüllung sowie durch Rollgangsvariationen bzw. Einbauten zu manifestieren. Zudem weisen Körper mit einer geringen Kubizität (gegen 1) einen kleineren Rollwiderstand und somit ein besseres Fließverhalten auf.

$$\psi_{Kub} = \frac{x_{max}}{x_{min}}$$

Gleichung 5-8

Als Merkmal für spätere Verwendungszwecke lässt sich vereinfacht festhalten, dass mit Abnahme der Kubizität die Rieselfähigkeit bzw. das Fließverhalten und dadurch auch das Dosierverhalten verbessert wird.

Sphärizität

Während in der Normung DIN EN 933-4 lediglich auf die Kubizität als Kornformmerkmal zurückgegriffen wird, finden sich in einer Reihe von einschlägigen Literaturstellen weitere Herangehensweisen, welche zum Teil der Sphärizitätsermittlung nach *Wadell* gleichen. In der Regel beruht die charakteristische Größe der Sphärizität auf nicht direkt messbaren Größen wie beispielsweise den Äquivalentdurchmessern unterschiedlicher Bezugsgrößen (z. B. Oberfläche oder Volumen). Dieses kann zum einen für räumliche Körper sowie für deren Projektionsflächen angewandt werden. Als Referenzgeometrie wird die Kugel bzw. die Kreisfläche herangezogen. Somit gibt der Formfaktor eine quantitative Bewertung der Abweichung zur Kugel und kann so vereinfacht

Rückschlüsse auf ein Rollverhalten des Faseragglomerates zulassen. Die am häufigsten zitierte Sphärizität ist die nach *Wadell* (Verhältnis von der Oberfläche einer volumengleichen Kugel zur tatsächlichen Oberfläche) bzw. der *Heywoodfaktor* (Verhältnis der gemessenen spez. Oberfläche zur spez. Oberfläche einer Kugel mit einem Äquivalentdurchmesser), der bei Verwendung des volumenäquivalenten Kugeldurchmessers dem Reziprokwert der Sphärizität nach *Wadell* entspricht [U.S.'04].

Von der Ermittlung der dreidimensionalen Sphärizität des Körpers nach *Wadell* wurde aufgrund der nicht exakt bestimmbar Körperoberfläche abgesehen (siehe Unterkapitel 5.1.3.2). Lediglich für mathematisch eindeutige Geometrien wie bei den Faseragglomeraten der Aufbauagglomeration fand sie in dieser Arbeit Verwendung. Bei den Rollagglomeraten mit ihren Mischgeometrien wird somit, wie auch in den meisten technischen Anwendungen der Formbestimmung, auf die zweidimensionale Projektionsflächenanalyse zurückgegriffen. Hierbei beziehen sich eine Reihe von Sphärizitätsberechnungen bzw. Formfaktoren auf die Sphärizität nach *Wadell* (siehe Tabelle 5-6).

Tabelle 5-6 Beispielhafte Sphärizitätsberechnungen von zweidimensionalen Projektionsflächen

Sphärizitätsansätze	auf Projektionsschatten bezogen	Abhängigkeit von Ψ_{Wadell}
$\Psi_{Wadell} = \frac{Pu_{\bar{a}-Pf}}{Pu}$ [H.S.'89]	$\Psi_{Wadell} = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot Pf}}{Pu}$	—
$F_1 = \frac{Pf}{Pf_{\bar{a}-Pu}}$ [V.K.'91]	$F_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot Pf}{Pu^2}$	$F_1 = \Psi_{Wadell}^2$
$SPHT_{Index} = \frac{x_{\bar{a}-Pu}}{x_{\bar{a}-Pf}}$ [U.S.'04]	$SPHT_{Index} = \frac{Pu}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot Pf}}$	$SPHT_{Index} = \frac{1}{\Psi_{Wadell}}$
$F_2 = \frac{x_{\bar{a}-Pu}^2}{x_{\bar{a}-Pf}^2}$ [U.R.'91]	$F_2 = \frac{Pu^2}{4 \cdot \pi \cdot Pf}$ [J.B.'99]	$F_2 = \frac{1}{\Psi_{Wadell}^2} \cong SPHT_{Index}^2$

Während die Ansätze nach *Wadell* und *Kofler et. al.* [V.K.'91] im Wertebereich > 0 und ≤ 1 liegen, bilden die Ergebnisse der anderen beiden Berechnungsformen Werte ≥ 1 . Durch die Quadrierung des Ansatzes nach *Riebel et. al.* [U.R.'91] sowie *Kofler et. al.* [V.K.'91] wird eine stärkere Streckung des Kurvenverlaufes erzeugt, so dass die Unterschiede der betrachteten Formen größer sind.

Aus diesen Gründen werden für die Ermittlung des Formfaktors die Ansätze von *Riebel et. al.* [U.R.'91] und *Card et. al.* [J.C.'99] herangezogen, wobei diese im Weiteren

lediglich als Sphärizität unter dem Symbol „ $SPHT^2$ “ geführt werden. Diese Sphärizität kann für die unterschiedlichen geometrischen Grundformen allein in Abhängigkeit des Verhältnisses vom maximalen zum minimalen Feret-Durchmesser der jeweiligen zwei-dimensionalen Fläche „ $\chi = x_{max}/x_{min}$ “ (entsprechend der Kubizität dreidimensionaler Körper Gleichung 5-8) berechnet werden (siehe Gleichung 5-9 a, b, c). Die sich einstellenden Verläufe der Sphärizität sind für die drei betrachteten geometrischen Grundformen in der Abbildung 5-12 dargestellt.

$$SPHT_{Rechteck}^2 = \frac{(\sqrt{\chi^2 - 1} + 1)^2}{\pi \cdot \sqrt{\chi^2 - 1}} \quad \{\chi \in \mathbb{R} \mid \sqrt{2} \leq \chi\}$$

$$SPHT_{Ellipse}^2 = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{1 + \chi}{\sqrt{\chi}} - \frac{1}{2}\right)^2 \quad \{\chi \in \mathbb{R} \mid 1 \leq \chi\}$$

$$SPHT_{Rhombus}^2 = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\chi^2}{\sqrt{\chi^2 - 1}}\right) \quad \{\chi \in \mathbb{R} \mid \sqrt{2} \leq \chi\}$$

Gleichung 5-9 a, b, c

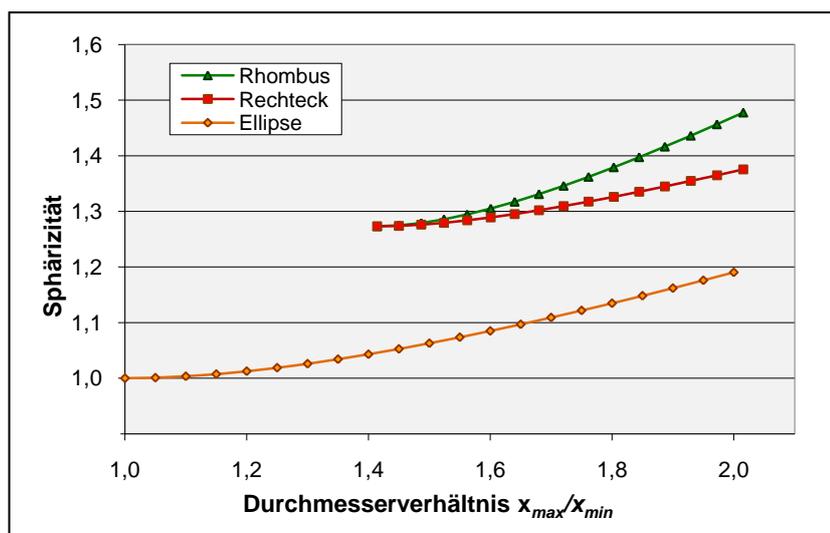


Abbildung 5-12 Sphärizitätsverläufe in Abhängigkeit des Durchmesser-
verhältnisses von Projektionsflächen

Je geringer der Wert der ermittelten Sphärizität ist, desto kreisähnlicher ist die Projektionsfläche. Da die betrachteten Faseragglomerate zum Teil durch unregelmäßig herausragende Fasern eine zerklüftete Umfangslinie des Projektionsschattens aufweisen und die Sphärizität als Wert der äußeren Grundform und nicht als Rauheit bzw. Oberflächenstrukturwert herangezogen werden soll, ist eine spezielle Betrachtungsweise erforderlich. Durch die Zerklüftung kommt es zu einem extremen Anstieg der Umfangslinienlänge, woraus ein zu hoher Wert der Sphärizität folgt. Aus diesem Grund wird zur Berechnung die konvexe Umfangslinie verwendet. Um jedoch ein „Rundrechnen“ des

Projektionsschattens zu vermeiden, wird hingegen der reale Flächeninhalt des Projektionsschattens herangezogen.

$$SPHT^2 = \frac{Pu_{konv}^2}{4 \cdot \pi \cdot Pf_{real}}$$

Gleichung 5-10

Anhand der ermittelten Sphärizitäten in Verbindung mit dem zugehörigen Verhältnis aus maximalem und minimalem Feret-Durchmesser, kann mit Hilfe der Kurvenverläufe des Diagramms (Abbildung 5-12) eine Zuordnung des vorliegenden Projektionsschattens in die geometrische Grundform vorgenommen werden.

5.1.4 Bewertung der Mikrogestalt von Faseragglomeraten

Die oben aufgeführten Herangehensweisen zur Bewertung der Mesogestalt der Faseragglomerate beziehen sich weitestgehend auf einen Körper mit einer geschlossenen Oberfläche (konvexe Hülle). Da die Oberflächenstruktur jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die späteren Anwendungsbereiche hat, ist deren Bewertung notwendig. So steigt mit Zunahme der aus dem Agglomerat herausragenden Fasern (Sichel- sowie Schlaufenform) die Neigung sich untereinander zu verhaken. Dies wiederum hat einen Einfluss auf das Fließ- bzw. Dosierverhalten einer Faseragglomeratschüttung. Auch wenn über das Verfahren der Photogrammetrie nicht alle konkaven Bereiche der Oberflächenstruktur erfasst werden können, so ist dennoch die Struktur der herausragenden Fasern zu erkennen. Somit wird von den Projektionsschatten ausgehend ein Index für die Struktur der Oberfläche verwendet, um die Verhakungsneigung unterschiedlich erzeugter Faseragglomerate vereinfacht abschätzen zu können.

Die meisten Veröffentlichungen zur Charakterisierung von Schüttgütern, Kristallen und Agglomeraten bzw. Aggregaten beziehen sich auf Fourier-Reihen bzw. dessen Fourier-Koeffizienten sowie auf die Bewertung mittels fraktaler Dimension des Projektionsumfangs. In einzelnen Fällen sind Herangehensweisen über Verhältnisse aus den Projektionsschatten dargestellt.

5.1.4.1 Bewertung mittels fraktaler Dimension

Anfänglich nutzte *Richardson* die fraktale Dimension zur Charakterisierung von topologischen Beschaffenheiten (Beschreibung von Küstenlinien) [G.B.'92]. Nachfolgend wurde dieser Ansatz verwendet, um beliebige Umfangslinien sowie Oberflächenrauheiten zu charakterisieren [B.K.'93]. Zur Ermittlung der fraktalen Dimension einer

Umfangslinie wird in der Regel das Sehnen- bzw. das Zirkelschlagverfahren (Yardstick) verwendet (siehe Abbildung 5-13).

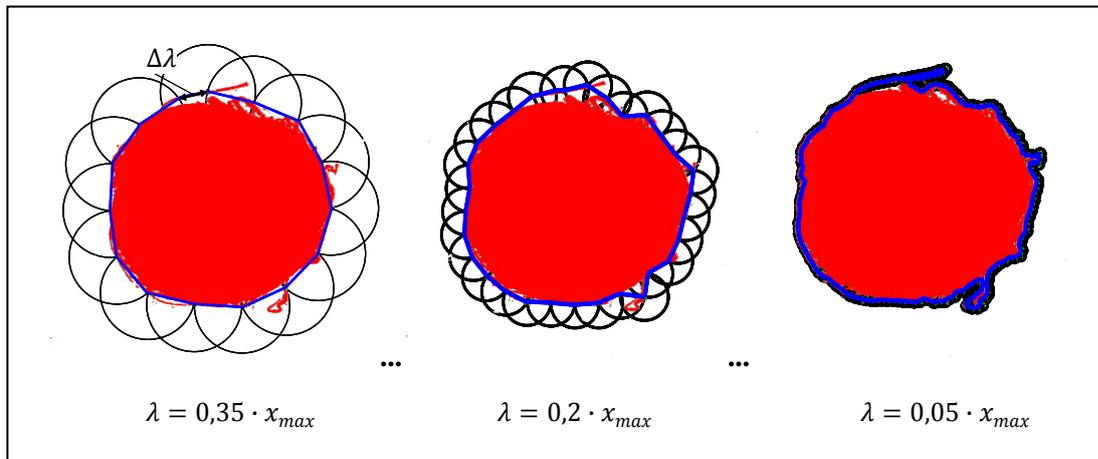


Abbildung 5-13 Zirkelschlagverfahren zur Ermittlung der fraktalen Dimension

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i + \Delta\lambda = L(\lambda) = \eta \cdot \lambda^{1-D} \quad \begin{cases} \{D \in \mathbb{R} | 1 < D < 2\} \\ \{\lambda \in \mathbb{R} | \lambda \leq 0,35 \cdot x_{max}\} \end{cases}$$

Gleichung 5-11

Hierbei wird die Umfangslinie mit einem Zirkel bzw. Sehne konstanter Länge „ λ “ abgemessen ($\Delta\lambda$ entspricht dem nicht vollständigen Schlussstück). Das Produkt aus Sehnenlänge und Anzahl der notwendigen Schläge zur Umrundung des Umfanges ergeben die Länge des so erzeugten Polygonzuges „ $L(\lambda)$ “ in Abhängigkeit der Sehnenlänge. Hierbei nimmt die Länge des Polygonzuges mit kleiner werdenden Sehnenlängen zu. Die Unregelmäßigkeit der Umfangslinie wird hierbei durch die Konstanten „ η “ und „ D “ wiedergegeben (siehe Gleichung 5-11). Nach der fraktalen Theorie gibt „ D “ die Dimension der Umfangslinie wieder.

Der Wert der fraktalen Dimension einer Linie liegt zwischen 1 (glatte Umfangslinie) und 2 (unendlich raue Umfangslinie). Grafisch im voll-logarithmischen Koordinatensystem nach *Richardson* bildet die Abhängigkeit eine Gerade mit der Steigung „ $1-D$ “. Bei Körpern mit einem multifraktalen Verhalten kann es zu einem Knickpunkt im Verlauf kommen, so dass sich zwei unterschiedliche fraktale Dimensionen ermitteln lassen (siehe Abbildung 5-14) [H.S.'89]; [G.B.'92]; [B.K.'85].

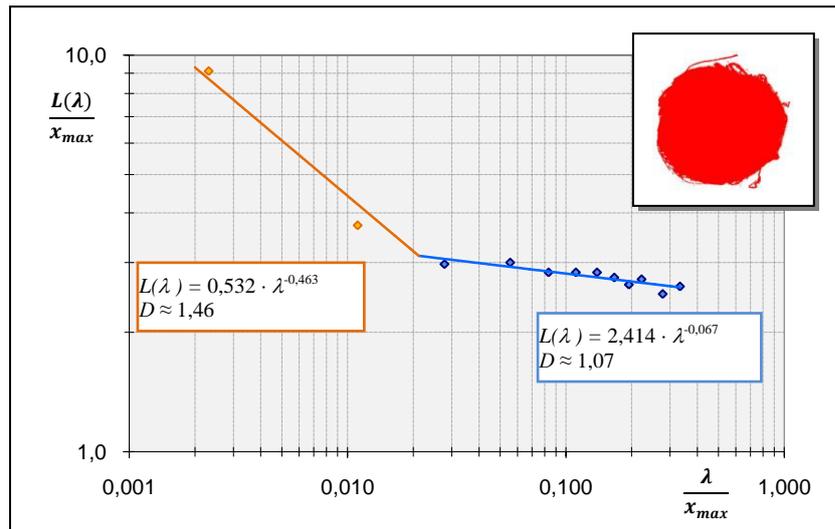


Abbildung 5-14 Beispielhafter Kurvenverlauf der sehnenlängenabhängigen Polygonumfangslinie

Die fraktale Dimension der Textur (Umfangslinienrauigkeit) liegt im Bereich kleinerer Sehnenabtastung. Bei Sehnenlängen größer des Knickpunktes spiegelt die fraktale Dimension einen Wert der Struktur bzw. Ausbildung der Umfangslinie wider. *Kaye et. al.* [B.K.'87] gibt als maximale Sehnenlänge das 0,35-fache des maximalen Feret-Durchmessers an. Um unterschiedlich große Körper (Projektionsschatten) miteinander vergleichen zu können, wird in der Regel eine Normierung der Sehnenlänge sowie der ermittelten Umfangslänge auf den Feret-Durchmesser vorgenommen [G.B.'92]; [B.K.'87].

Andere Ansätze, wie die Untersuchung der Umfangslinie nach *Minkowski*, lassen ebenfalls eine Bestimmung der fraktalen Dimension zu [C.L.'94]. Hiernach wird die Umfangslinienlänge mittels einer Rasterung mit abnehmenden Rasterabständen ermittelt, wobei die Länge dem Produkt aus Rasterkantenlänge und Anzahl der durch die Umfangslinie belegten Felder entspricht. Über die Betrachtung der Projektionsfläche kann mit Hilfe des Rasterverfahrens sowie über ein Radiusverfahren (Anzahl von Pixeln des Projektionsschattens, die auf einer Kreisbahn mit abnehmendem Radius liegen) ein charakteristischer Wert mittels fraktaler Dimension wiedergegeben werden. Zu beachten ist, dass durch die unterschiedlichen Verfahren verschiedene Werte der fraktalen Dimension des gleichen Projektionsbildes auftreten. Ebenfalls besitzen die Startpunkte beim Sehnenverfahren sowie die Lage der Rasterung beim Rasterverfahren vor allem bei größeren Sehnenlängen bzw. Rasterkantenlängen einen Einfluss auf den Wert der fraktalen Dimension [M.Z.'05].

Da mit diesem Verfahren die reale Umfangslinie abgetastet wird, lassen sich mit extrem kurzen Sehnenlängen auch sichelförmige Schattenausläufe erfassen, was ein Vorteil

gegenüber der Fourier-Analyse ist. Aufgrund des hohen Aufwandes zur Ermittlung des Polygonzuges in Abhängigkeit unterschiedlicher Sehnenlängen ist zur Verwendung dieses Verfahrens das Erstellen einer speziellen Software sinnvoll. Bei einer rechnergestützten Auswertung würde sich das Rasterverfahren empfehlen, da es ohnehin zu einer Rasterung des Bildes kommt. Da jedoch die Mehrkenntnis aus diesem Verfahren in Anbetracht des Anwendungsbereiches der Faseragglomerate nicht zielführend ist, wurde von diesem aufwändigen Verfahren abgesehen.

5.1.4.2 Umfangliniendarstellung mittels Fourier-Koeffizienten

Durch die Bewertung des Verlaufes der Umfanglinie eines Projektionsschattens lassen sich gute Rückschlüsse über die Oberflächenstruktur ziehen. Über das Radius-Winkel-Verfahren kann der Verlauf der Umfanglinie wiedergegeben und verglichen werden. In Anlehnung an *Beddow* (1980) lässt sich die Ausdehnung (Radius zum Schwerpunkt) in Abhängigkeit des fortlaufenden Winkels aufnehmen und in einem Diagramm darstellen. Zur Ermöglichung des Vergleichs unterschiedlich großer Körper wird eine Normierung des Radius vorgenommen. In den meisten Publikationen z. B. *Zlatev* [M.Z.'05] wird als Referenzradius „ R “ auf den mittleren Radius der Umfanglinie normiert. Auch existieren Ansätze einer Normierung auf den minimalen bzw. maximalen Radius (*Kaye* [B.K.'85]), sowie nach *Schubert* [H.S.'89] auf den Radius des flächengleichen Kreises „ $R_{\text{ä-Pf}}$ “. In der grafischen Darstellung wird so eine positive sowie negative Abweichung zum mittleren Radius wiedergegeben (siehe Abbildung 5-15).

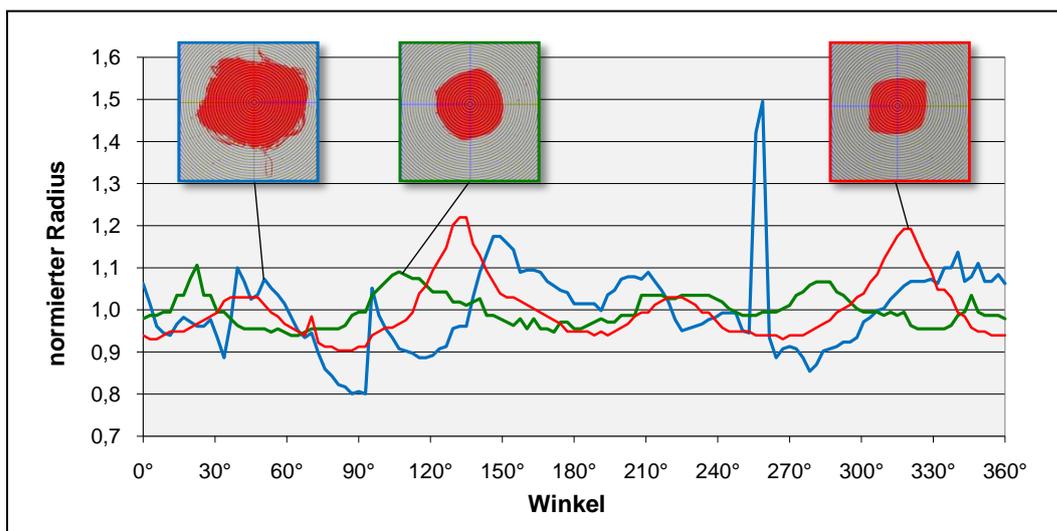


Abbildung 5-15 Umfangslinien Verlaufsdarstellung über Radius-Winkel-Verfahren

Nach dem kompletten Überschreiten eines 360° Umlaufes würde eine Wiederholung des Verlaufes eintreten. Die so erzeugte Kreisfrequenz ist ein ganzzahliges Vielfaches des einzelnen Messumlaufes. Durch dieses Verhalten lässt sich die Messumlaufkurve

mittels einer angepassten, numerischen, harmonischen Analyse als eine trigonometrischen Reihe wiedergeben (Fourier-Reihe, Gleichung 5-12) [H.B.'85]; [W.L.'95].

$$f(\varphi) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cdot \cos(k \cdot \varphi) + B_k \cdot \sin(k \cdot \varphi)) \quad \begin{array}{l} \{k \in \mathbb{N} | 1 \leq k\} \\ \{\varphi \in \mathbb{R} | 0 \leq \varphi \leq 2\pi\} \end{array}$$

Gleichung 5-12

mit

$$A_0 = \frac{1}{N} \cdot \int_{i=0}^{N-1} r(\varphi_i) \, d\varphi$$

$$A_k = \frac{2}{N} \cdot \int_{i=0}^{N-1} r(\varphi_i) \cdot \cos(k \cdot \varphi_i) \, d\varphi$$

$$B_k = \frac{2}{N} \cdot \int_{i=0}^{N-1} r(\varphi_i) \cdot \sin(k \cdot \varphi_i) \, d\varphi$$

Gleichung 5-13 a/b/c

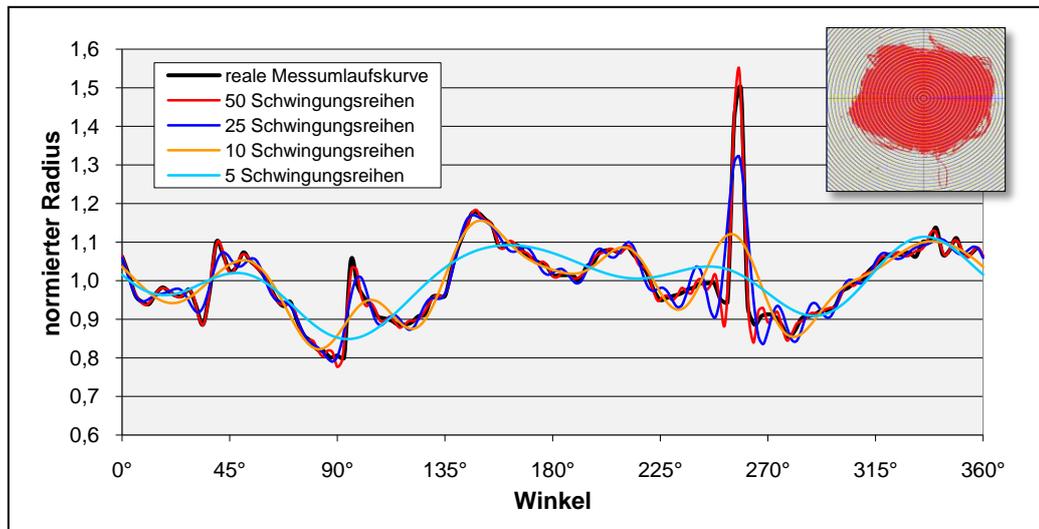


Abbildung 5-16 Fourier-Analyse Messumlaufskurve mittels 15 harmonischer Schwingungen

Mittels der Fourier-Entwicklung (Gleichung 5-13 a/b/c) wird eine Reihe von harmonischen Schwingungen mit unterschiedlichen Periodizitäten, Phasenverschiebungen und Gewichtungen (Amplituden) ermittelt, deren Überlagerung den Verlauf der Messumlaufskurve wiedergibt. Durch Erhöhung des Laufindex „ k “ $\{k \in \mathbb{N} | 1 \leq k\}$ nimmt die Wellenlänge linear ab. Hierbei wird die Gewichtung der verschiedenen harmonischen Schwingungen durch die Fourier-Koeffizienten A_k und B_k bestimmt. Das Verhältnis der Fourier-Koeffizienten zueinander hat wiederum Einfluss auf die Phasenverschiebung. Mit steigender Formabweichung sind mehr harmonische Schwingungen erforderlich,

um eine qualitative Wiedergabe der Umfangslinie zu gewährleisten (siehe Abbildung 5-16; ermittelt über 128 Stützstellen „ N “). Als Richtwert empfiehlt *Bandemer et al.* [K.G.'97] zur Analyse von Projektionsschatten die Verwendung von mindestens 50 harmonischen Schwingungskurven.

Der Zusammenhang zwischen den Fourier-Koeffizienten und den technologisch interessanten Eigenschaften ist nach *Schubert* [H.S.'89] nur schwer erkennbar. Zudem findet eine Überlagerung aus Meso- und Mikrogestalt statt, so dass ein Vergleich der Oberflächenstruktur von Körpern mit unterschiedlicher Geometrie nicht sinnvoll ist. Eine Minderung dieser Überlagerung von Meso- und Mikrogestalt kann eine Normierung auf den Radiusverlauf der konvexen Hülle des gleichen Winkels erbringen. In diesem Fall würde die Messumlaufkurve lediglich die negative Abweichung zur konvexen Hülle wiedergeben, was als eine Art Oberflächenrauigkeit angesehen werden kann. Für diese Herangehensweise ist allerdings ein erhöhter rechentechnischer Aufwand erforderlich, weswegen sie lediglich als Ausblick dient, da eine derartig genaue Darstellung der Oberflächenstruktur für die angestrebten Verwendungszwecke der Faseragglomerate nicht notwendig ist. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass sichelförmige Faserausläufer nicht exakt wiedergegeben werden.

5.1.4.3 Charakterisierung der Oberflächenstruktur

Die Charakterisierung der Oberflächenstruktur der erzeugten Faseragglomerate bezieht sich wie die Analyse der fraktalen Dimension und des Fourier-Koeffizientens auf die Umfangslinie des zweidimensionalen Projektionsschattens. Da die Bewertungswege der Mikrogestalt der Faseragglomerate mittels Fourier-Koeffizienten sowie fraktaler Dimension neben ihrer komplexen Ermittlung eine Reihe von Nachteilen zeigen und zudem nicht eindeutige Ergebnisse aufweisen können (Startpunkt bzw. rasterungsabhängig), wird eine vereinfachte, automatisierte Erfassungsweise der Oberflächenstruktur herangezogen. Hierbei wurde sich an dem Konkavitäts-Index (Verhältnis von konkaver zu realer Projektionsfläche) nach *Pons et al.* [M.P.'97] orientiert. Eine Verwendung dieses Konkavitäts-Index ist im Fall der Faseragglomerate aufgrund möglicher durchgängiger Hohlräume nicht sinnvoll, da hierdurch eine geringere Projektionsfläche detektiert werden würde. Zur Verdeutlichung wird mittels des Radius-Winkel-Verfahrens die Herleitung der Berechnungsform anhand eines mathematisch bestimmbar, geometrischen Projektionsschattens mit konkaven Bereichen herangezogen (siehe Abbildung 5-17).

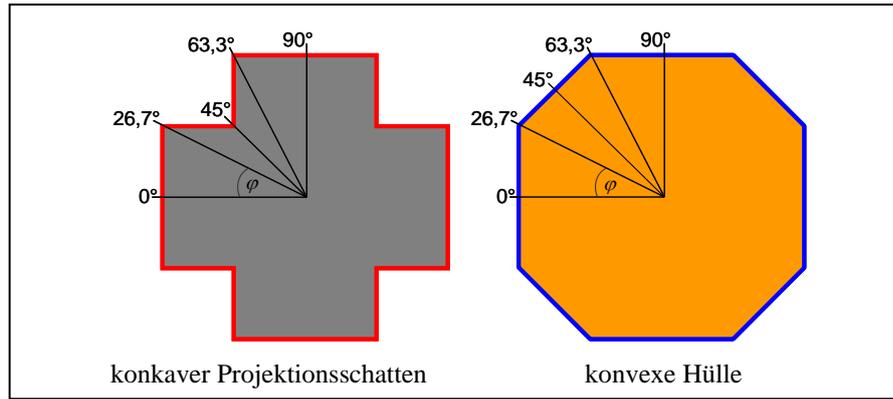


Abbildung 5-17 Projektionsschatten und konvexe Hülle eines konkaven Objektes

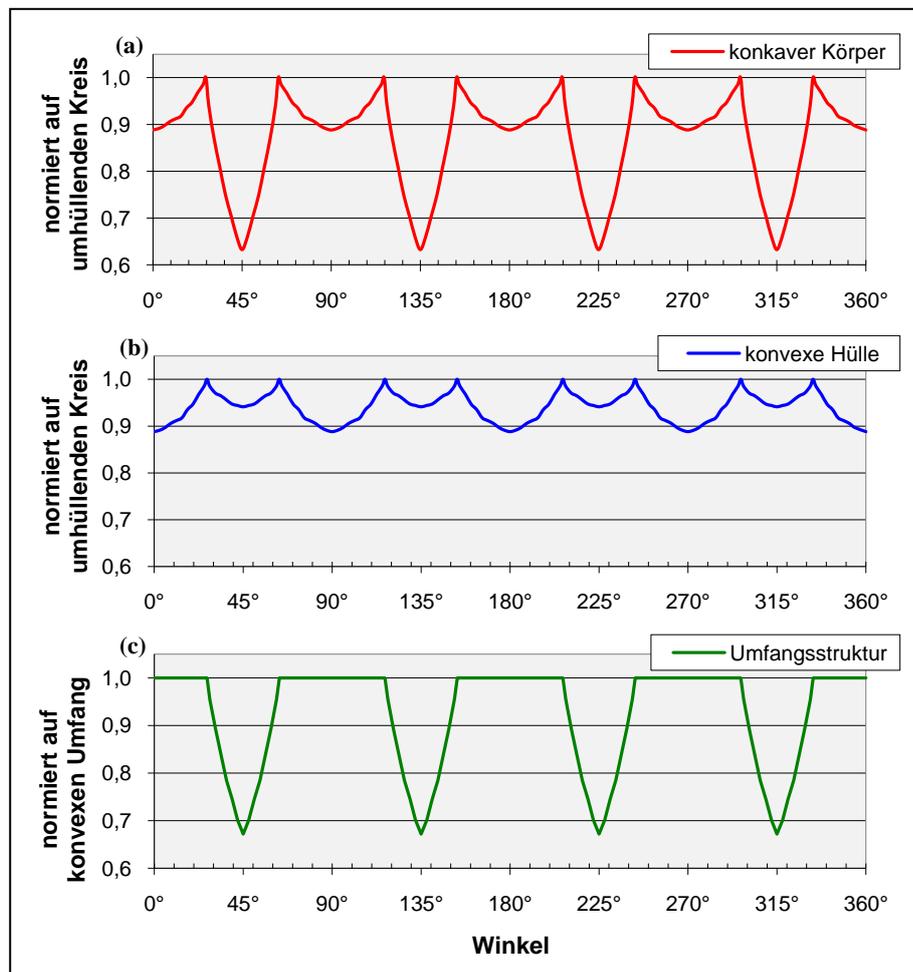


Abbildung 5-18 Herleitung der Umfangsstruktur mittels Radius-Winkel-Verfahren

Als konvexe Hülle spannt der konkave Projektionsschatten ein Achteck auf, wobei die vier langen Seitenkanten mit der Umfangslinie des konkaven Objektes deckungsgleich verlaufen. Der Umfangslinienverlauf in den Winkel-Radius-Diagrammen weist eine Periodizität von 90° auf (siehe Abbildung 5-18). Bei einer Normierung über den maximalen Feret-Durchmesser (Normierung auf den umhüllenden Kreis) ergibt sich für die konkaven Ecken (alle 26,7° sowie 63,3°) der Wert 1. Neben den absoluten Minimalwer-

ten (konvexer Bereich alle 45°) weisen die Kurvenverläufe (a) und (b) weitere örtliche Minimalwerte im Bereich der geraden Kanten auf.

Bei einer Normierung der realen konkaven Projektionsumfangslinie auf den entsprechenden Verlauf des Umfangs der konkaven Hülle lässt sich die Abweichung bzw. die Umfangsstruktur darstellen (siehe Abbildung 5-18 c). Die deckungsgleichen Bereiche ergeben hierbei den Wert 1, wogegen die Abweichungen Werte < 1 aufweisen. Da es bei den betrachteten Faseragglomeraten neben vergleichbaren geradlinigen Einbuchtungen auch zur Ausbildung von sichelförmigen Faserausläufen kommen kann, wäre die Verwendung des Begriffes „Rauheit“ irreführend. Zudem kann bei den Faseragglomeraten ein stark unregelmäßiger Verlauf der Umfangslinie vorliegen, hingegen weist eine Oberflächenrauheit eher kürzere periodische Strukturähnlichkeiten auf.

Zum quantitativen Vergleich auf der Basis der aufgezeigten Abhängigkeiten wird eine Verhältniszahl aus dem konvexen und realen Umfang des Projektionsschattens herangezogen, welche im Weiteren als Umfangsstrukturindex „ Ω_{Pu} “ bezeichnet wird (siehe Gleichung 5-14).

$$\Omega_{Pu} = 1 - \frac{Pu_{konv}}{Pu_{real}} (\cdot 100\%)$$

Gleichung 5-14

Unter dem Gesichtspunkt, dass pro Faseragglomerat drei Bildaufnahmen gemacht werden, wobei die Projektionsschatten im 90° Winkel zueinander stehen und somit ein verhältnismäßig guter Abriss der Oberfläche wiedergegeben werden kann, wird zum Vergleich der Faseragglomerate der Mittelwert dieser Umfangsstrukturindizes herangezogen (Oberflächenstrukturindex „ Ω_5 “). Der Oberflächenstrukturindex kann als ein Kennwert zum Vergleich unterschiedlich erzeugter Faseragglomerate herangezogen werden. Mit steigendem Wert nimmt die Unregelmäßigkeit der Umfangslinie des Projektionsschattens und so auch der Agglomeratoberfläche zu, was zu einer gesteigerten Verhakensneigung der Faseragglomerate innerhalb einer Schüttung führt.

5.2 Charakterisierung der inneren Struktur

Neben der inneren Oberfläche sind insbesondere die Porosität sowie die Porengestalt und Verteilung für die unterschiedlichen Anwendungen von Interesse. Hochwertige Aussagen über Porositätsverteilungen, die Porengestalt sowie über die Faserorientierung im Agglomerat lassen sich durch aufwändige Röntgen- und Schallverfahren oder über Schnittanalysen ermitteln. Kostengünstiger und zerstörungsfrei sind hingegen rechneri-

sche Ermittlungen sowie die Untersuchungen des Durchströmungsverhaltens. Diese Methoden geben jedoch nur Aufschluss über die Gesamtporosität und lassen nicht auf Porositätsverteilung, Porengestalt sowie Orientierung von Fasern schließen.

Die Porengestalt der meisten Faseragglomerate stellt sich nicht als ein Geflecht von Porenstrukturen in einem Feststoffvolumen dar, sondern ähnelt eher einem Feststoffgeflecht in einem leeren Raumvolumen (siehe auch Abbildung 5-19). Deshalb wird keine weitere Charakterisierung der Porengestalt wie Porendurchmesserverteilung verfolgt.

5.2.1 Porositätsermittlung

Die Porosität hat vor allem einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit und die Durchströmbarkeit von Agglomeraten. So gilt sie als eine wichtige charakteristische Größe zur Bewertung von Agglomeraten [W.P.'02].

Bei der Analyse der erzeugten Faseragglomerate kam vor allem eine mathematische Ermittlung der Gesamtporosität zum Einsatz. Traditionell wird hierfür das Verhältnis des Hohlraumvolumens „ V_H “ zum Gesamtvolumen „ V_{Agg} “ verwendet, wobei durch Umformung der Gleichung ein Bezug auf die Fasermasse „ m_F “ und deren Dichte „ ρ_F “ genommen werden kann.

$$\varepsilon_{ges} = 1 - \frac{m_F}{V_{Agg} \cdot \rho_F}$$

Gleichung 5-15

Vorteil der zerstörungsfreien Untersuchung ist, dass neben der Photogrammetrie und des Wiegens keine weiteren Analyseverfahren durchgeführt werden müssen. Somit stellt dieses Vorgehen eine gute Realisierbarkeit zur Qualitätsprüfung der Produkte späterer Produktionsanlagen dar.

Die von Wöll *et al.* [F.W.'03] beschriebene Stanz- sowie NIRS-Methode ist für die charakterisierenden Faseragglomerate nicht möglich. Bei der Normierung der Agglomeratvolumina mittels Stanz- und Schnittwerkzeugen würde die Struktur des Agglomerates durch Stauchungen verändert (siehe auch Unterpunkt Schnittanalyse). Bei der NIRS-Methode (Detektion der NIR-Transmissionsstrahlung) stellt die nicht angleichbare Größe der Faseragglomerate ein Problem dar. So kann die Schicht senkrecht zu den Infrarotwellen unterschiedlich mächtig sein, wodurch ein Rückschluss von der gemessenen Strahlungsintensität auf die Porosität mit hoher Wahrscheinlichkeit fehlerbehaftet ist. Ein weiteres messtechnisches Problem liegt bei unterschiedlichen Schichtstärken radial zur Lichtquelle aufgrund unterschiedlicher Geometrien vor.

Durchströmungswiderstand

Eine Möglichkeit der Bestimmung der Porosität von durchströmbaren Medien, wie beispielsweise Filtern und Membranen, wird über die so genannte „Bubbel Point Methode“ vorgenommen. Hierbei wird das Medium mit einer Flüssigkeit bekannter Viskosität getränkt (Sättigung = 1). Durch Anlegen eines kontinuierlich steigenden Luftdruckes wird der Punkt ermittelt, an dem es zum Durchbruch der Luft (Luftblasenbildung) durch die Agglomeratstruktur kommt. Der so ermittelte Druck entspricht dem Widerstand der größten Pore, woraus sich der Porendurchmesser ermitteln lässt.

Speziell bei der Untersuchung der Faseragglomerate besteht das Problem, dass die äußere Struktur ummantelt werden muss, so dass die Luft lediglich durch das Zentrum des Agglomerates strömen kann. Aufgrund der ungleichmäßigen Gestalt der Faseragglomerate stellt sich dies als schwierig heraus, da eine Verschiebung des inneren Gefüges vermieden werden muss [O.P.'06]; [T.S.'00].

Schnittanalysen

Zur Bestimmung von Porositätsverteilungen kommt das Schnittverfahren in vielen Analysebereichen zum Einsatz [W.W.'06]. Hierbei werden die zu untersuchenden Proben nach einer Einbettung in dünne Scheiben geschnitten und anschließend mittels Bildanalyse bewertet. Da es sich hierbei um ein zerstörendes Analyseverfahren handelt, sollte die Schnittanalyse lediglich als Bewertung der mathematischen Porositätsbestimmung dienen und zudem einen Aufschluss über die Faserorientierung im Agglomerat liefern.

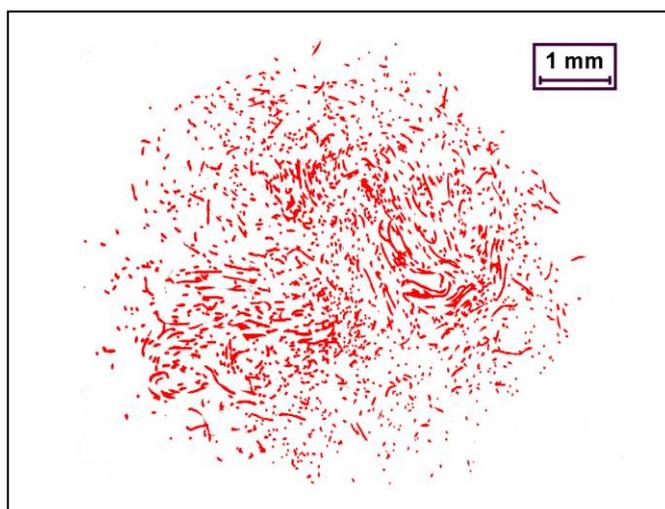


Abbildung 5-19 Detektierter Schnitt eines Rollagglomerates aus Polypropylenfasern (5x5-O3')

Für die Untersuchungen der Agglomerate aus Naturfasern stellte sich jedoch das Problem dar, dass ein Aufquellen der Fasern nicht ausgeschlossen werden konnte, was einen Einfluss auf die ermittelte Porosität hat. Ein gravierendes Problem war jedoch neben dem Einschließen von Luftblasen das Herausziehen der Fasern aus dem Gefüge „Pull-Out“ beim Schneidevorgang. Hierdurch entstanden Fehlstellen, die die Aussagekraft der Schnittanalyse minderte und teils unmöglich machte.

Röntgen- und Schallverfahren

Eine weitere Möglichkeit der Charakterisierung sind tomographische Messverfahren (Magnetspinn-, Kernspintomographie u. a.) sowie Untersuchungen mittels Schallwellen (v. a. Ultraschall), die jedoch aus Kostengründen selten Anwendung finden. Bei letzterem Verfahren ist es für einen besseren Transport der Schallwellen erforderlich, dass das Agglomerat in einer die Partikel- bzw. Faseroberfläche benetzenden Flüssigkeit vorliegt.

Hierzu wurde in Kooperation mit der *TU Leipzig, Institut Physik II - Abt. Festkörperoptik* Untersuchungen der Machbarkeit durchgeführt. Bei den zur Verfügung stehenden tomographischen Messverfahren lag eine zu geringe Bildauflösung für die eingesetzten Fasermaterialien vor. Die Untersuchungen mittels Ultraschall (100 MHz mit einer Auflösung von etwa 10 μm) stellten sich als vielversprechend dar, wurden jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Hierbei zeigten sich bisher insbesondere Probleme in der vollständigen Benetzung des Fasergerüsts im Inneren des Agglomerats.

5.2.2 Innere Oberflächen

Wie bereits beschrieben, wird unter der äußeren Oberfläche des Faseragglomerates die umschließende konvexe Hülle verstanden. Die theoretische innere Oberfläche kann über die Differenz aus Gesamtoberfläche und äußerer Oberfläche berechnet werden. In einzelnen Fällen bleibt hierbei zu überprüfen, inwieweit die innere Oberfläche von außen zugänglich ist (erforderliche Porosität) und somit überhaupt eine Gewichtung in der Betrachtung der Oberfläche besitzt.

Die gesamte Oberfläche eines porösen Objektes kann beispielsweise über Sorptionsverfahren direkt ermittelt werden [R.P.'79]. Liegt bei den erzeugten Faseragglomeraten eine geringe Verpressung vor, so entspricht die vorliegende Gesamtfläche der Oberfläche des in das Agglomerat eingebundenen Fasermaterials. Da der Wert der Gesamtoberfläche für manche Anwendungsbereiche (bspw. Aufwuchskörper) von entscheidender

Wichtigkeit ist, wird im Weiteren die Gesamtoberfläche unter der Voraussetzung, dass keine Überpressung vorliegt über folgende mathematische Ansätze als charakteristisches Merkmal des Faseragglomerates ermittelt.

$$S_F \approx m_F \cdot \frac{4}{d_F \cdot \rho_F}$$

Gleichung 5-16

$$S_{F,ges} \approx m_F \cdot \sum \frac{4 \cdot h_i}{d_{F,i} \cdot \rho_F}$$

Gleichung 5-17

Bei der Berechnung der Faseroberfläche „ S_F “ wird von einer gleichmäßigen, zylindrischen Faserstruktur ausgegangen, wobei die Stirnseiten der Fasern aufgrund ihrer geringen Gewichtung vernachlässigt werden. Durch Gleichsetzen der Faserlängen der Berechnungsformen für die Mantelfläche sowie des Volumens eines Zylinders ergibt sich die faserlängenunabhängige Gleichung 5-16. Da eine bestehende Abhängigkeit der Oberfläche von der Faserdicke „ d_F “ besteht, muss bei der Berechnung der Gesamtfaseroberfläche eines Kollektives unterschiedlicher Faserdicken die relative Häufigkeit „ h_i “ der Faserdickenklassen mit einbezogen werden (siehe Gleichung 5-17).

5.3 Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

Vornehmlich liegt die Bedeutung der mechanischen Eigenschaften der Faseragglomerate im jeweiligen Anwendungsbereich begründet. In den verschiedenen Bereichen werden teils unterschiedliche Anforderungen an die Faseragglomerate gestellt. Als Schnittmenge der Anforderungen aller Verwendungszwecke steht die ausreichende Festigkeit für eine mögliche Lagerung, Transport und Dosierung. Hierbei kommt es vor allem auf die Druckfestigkeit bzw. Drucksteifigkeit der Faseragglomerate sowie deren Abriebsfestigkeit an, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten.

Bei der Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften wie Drucksteifigkeit, Zugfestigkeit und Formrückgewinnungsvermögen bestehen kaum Variationen in den Grundverfahren. Dennoch liegt bereits für die unterschiedlichen Materialien sowie Anwendungsgebiete eine Reihe von Normungsschriften vor. Da für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der speziellen Faseragglomerate keine Normung vorlag, wurden bestehende Normschriften unter anderem Messverfahren zur Charakterisierung von Produkten mit vergleichbaren Strukturen bzw. Eigenschaften adaptiert, kombiniert sowie den eigenen Bedingungen und Anforderungen angepasst. Für die Durchführung

der Untersuchungen zur Ermittlung der Zug- und Druckfestigkeiten kamen eine Traversen-Prüfmaschine sowie Software der *Zwick GmbH & Co. KG* zum Einsatz.

5.3.1 Drucksteifigkeit und Restverformung

Zur Vermessung der Drucksteifigkeit sowie des Formrückgewinnungsvermögens bzw. der Restverformung wird das Faseragglomerat in stabiler Lage zwischen zwei ebenen, parallelen Stempeln gestaucht. Die Steuerung erfolgt hierbei über eine Abstandsverringern der Stempel. Die Vorschubgeschwindigkeit sollte nach DIN EN 826 ein Zehntel der Prüfkörperhöhe in Millimeter pro Minute betragen. Da die Faseragglomerate eine Streuung der äußeren Abmessungen aufweisen, wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $0,5 \text{ mm/min}$ gearbeitet. Diese Vorschubgeschwindigkeit entspricht nach DIN EN 826 einer Prüfhöhe von 5 mm , was in etwa einem Rollagglomerat aus befeuchteten Fasern eines 5×5^{10} -Rollgangs entspricht. Prüfungen mit solch geringen Vorschubgeschwindigkeiten werden nach *Reumann* [R.R.'00-b] als „quasistatische Prüfung“ eingruppiert.

Die Faseragglomerate weisen ein viskoelastisches Verhalten auf. Zur Untersuchung des Rückformungsverhaltens nach der Belastung der unterschiedlich agglomerierten Körper wurde eine einfach zyklische Fahrweise verwendet, bei der die Rückschubgeschwindigkeit identisch der Vorschubgeschwindigkeit war (siehe Tabelle 5-7 sowie Abbildung 5-20).

Tabelle 5-7 Parameter der Druckfestigkeitsmessung

		Orientiert an:
Prüfungsverlauf	Streckenänderung { $0\% \leq \varepsilon \leq 10\%$ }	[DIN 52272-1]
Messwert	Kraft, Restverformung	—
Vorkraft	$0,1 \text{ N}$	[DIN 53835-1]
Prüfgeschwindigkeit	$0,5 \text{ mm/min}$	[DIN EN 826]

Zu Beginn des Messzyklus wird der obere Stempel mit konstanter Geschwindigkeit gesenkt, bis sich die Vorkraft „ F_V “ von $0,1 \text{ N}$ einstellt. Der Abstand des Stempels zur unteren Auflagenplatte entspricht der Prüfkörperhöhe „ l_V “ mit einer Stauchung von $\varepsilon_0 = 0\%$. Anschließend folgt eine Deformation des Faseragglomerates bis zu einer Stauchung der Ausgangshöhe von 10% „ ε_{10} “ [DIN EN 826].

¹⁰ quadratischer Querschnitt mit 5 mm Seitenlänge

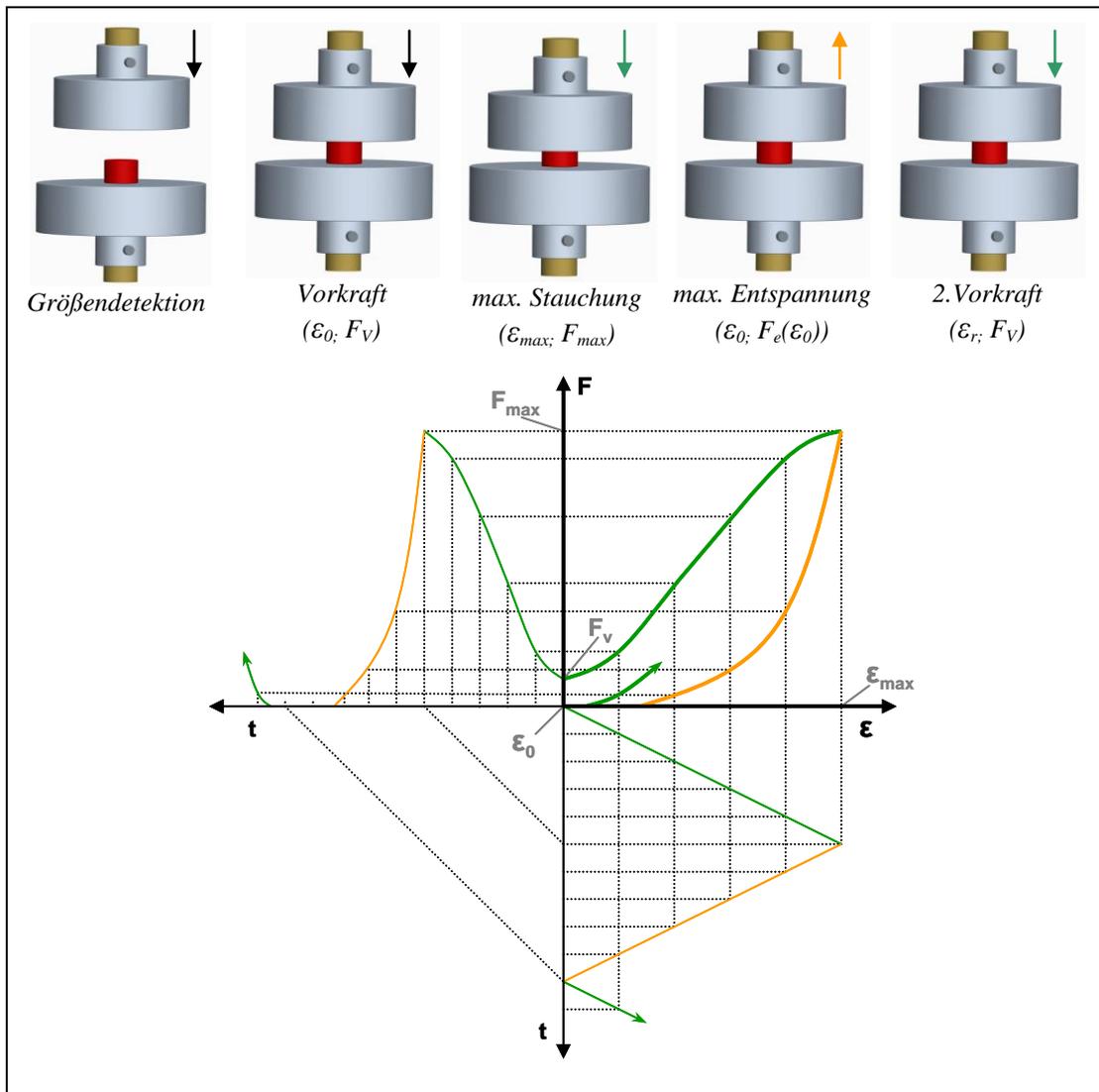


Abbildung 5-20 Anlagenfahrweise der Druckfestigkeitsprüfung

Nach Erreichen dieser Stauchungsgrenze fährt der Stempel bis zum Stempelabstand „ l_V “ zurück [nach DIN 53835-1/-3]. Auf der gesamten Strecke ($l_V \rightarrow l_{10} \rightarrow l_V$) wird die zugehörige Kraft der entsprechenden Stauchung aufgezeichnet. Zur Ermittlung des nach einem Messzyklus der Be- und Entlastung vorliegenden Restverformungsverhältnisses des Faseragglomerates wird erneut bis zur Einstellung der Vorkraft angefahren und die Reststauchung „ ϵ_r “ aufgenommen [nach DIN 53835-1/-3]. Aus den ermittelten Abstandslängen der Stempel „ l_i “, lässt sich die jeweilige Stauchung „ ϵ_i “ jedes Punktes des Kurvenverlaufes über die folgende Gleichung ermitteln.

$$\epsilon_i = \frac{l_V - l_i}{l_V}$$

Gleichung 5-18

Nach der DIN EN 826 wird als Wert der Drucksteifigkeit die Druckspannung bei 10%iger Verformung „ σ_{10} “ herangezogen. Hierbei wird die zugehörige Kraft „ F_{10} “ zur Ausgangsquerschnittsfläche „ A_0 “ (senkrecht zur Kraftlinie) ins Verhältnis gestellt (siehe Gleichung 5-19). Bei Körpern mit unregelmäßiger äußerer Geometrie wird statt der nicht ermittelbaren Ausgangsquerschnittsfläche die mittlere Projektionsfläche „ $\overline{P\overline{f}}$ “ verwendet.

$$\sigma_{10} = \frac{F_{10}}{A_0} \approx \frac{F_{10}}{\overline{P\overline{f}}}$$

Gleichung 5-19

$$E_{S,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_i - \sigma_V}{\varepsilon_i}$$

Gleichung 5-20

Da bei den Messungen keine exakte Bestimmung eines Druck-Elastizitätsmoduls „ $E_{S,i}$ “ im reinen elastischen Bereich möglich war, kann zum Vergleich der unterschiedlichen Proben ein mittleres Dehnungsmodul mittels eines Sekantenverfahrens ermittelt werden (siehe Gleichung 5-20). Weil alle durchgeführten Druckversuche die gleichen Werte der Vorkraft und der Endstauchung ergaben, besaß dieser Wert keine Mehrerkenntnis über die mechanischen Eigenschaften des untersuchten Faseragglomerates.

Ein weiteres entscheidendes Merkmal der mechanischen Eigenschaften des Faseragglomerates ist das Verhalten der Rückverformung nach der Entlastung. In den hier durchgeführten Versuchen wurde keine Ruhezeit bzw. Wartezeit nach Entspannung vor der Wiederbelastung angesetzt, um so den ungünstigsten Fall darzustellen. Als Kennwert wird hierfür das Rückverformungsverhältnis der 10%igen Stauchung „ $R_{\varepsilon 10}$ “ in Anlehnung an die DIN 53835-3 herangezogen, welches dem Verhältnis aus elastischer Stauchung „ $(\varepsilon_{10} - \varepsilon_r)$ “ zu Gesamtstauchung „ ε_{10} “ entspricht.

$$R_{\varepsilon 10} = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_r}{\varepsilon_{10}}$$

Gleichung 5-21

5.3.2 Zugfestigkeit

Als physikalisch messbarer Wert der Faseragglomeratfestigkeit bezüglich eines möglichen Auflöseverhaltens bzw. der Neigung zur Faserfreisetzung wird die Zugfestigkeit der Einzelkörper herangezogen. Es wird hierbei nicht betrachtet, inwieweit eine Zugelastizität vorliegt, vielmehr wird durch Kraft und Zugstrecke die Arbeit ermittelt, welche für eine Streckung des Faseragglomeratgefüges erforderlich ist. Um die Kraft an das Faseragglomerat anzulegen, wurde eine Fixierung ähnlich der Schlingenschiene nach DIN EN 14704-1 konstruiert (siehe Abbildung 5-21). Das Faseragglomerat wird hierbei von zwei Nadeln mit einem Abstand von 2,5 mm durchdrungen. Die möglichen Messabweichungen durch regionale Strukturänderungen des inneren Gefüges aufgrund der Nadeln werden als gering eingeschätzt und nicht weiter bewertet.

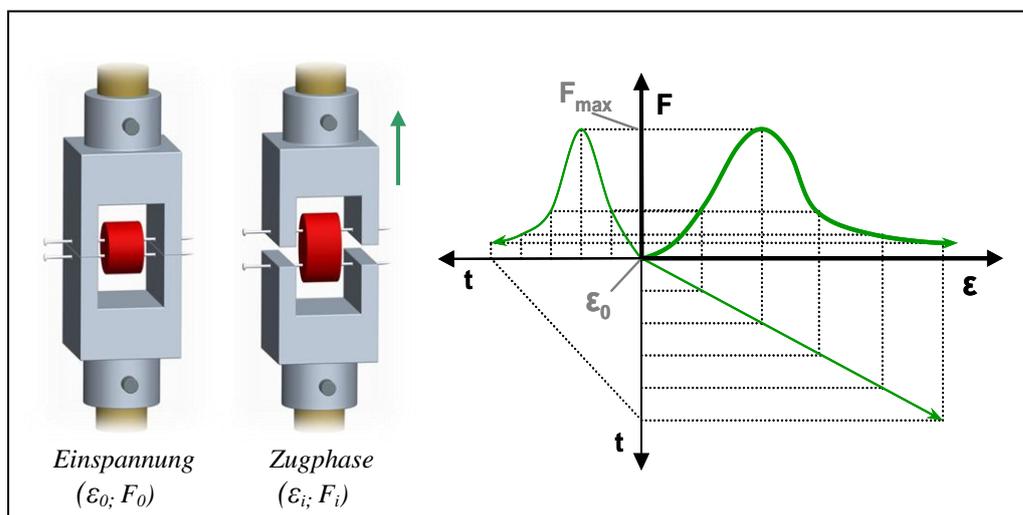


Abbildung 5-21 Anlagenfahrweise für Zugversuche

Tabelle 5-8 Parameter der Zugfestigkeitsmessung

		Orientiert an:
Prüfungsverlauf	Streckenänderung	[DIN EN 14704-1]
Messwert	Kraft	[DIN EN 14704-1]
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min	[DIN EN 826]

Nach Fixierung des Faseragglomerates, mittig in der Vorrichtung, werden diese mit konstanter Zuggeschwindigkeit ($v = 50 \text{ mm/min}$) auseinander gezogen. Hierbei erfährt die innere Struktur des Körpers eine Verschiebung des Gefüges. Die Kraft, die hierfür erforderlich ist, wird in Abhängigkeit der zurückgelegten Zugstrecke aufgenommen.

Zum Vergleich der unterschiedlichen Faseragglomerate wird jeweils die aufgebrachte Arbeit als Integral der Kraft-Weg-Kurve ermittelt.

$$W_i = \int_0^i F(l_i) \cdot dl$$

Gleichung 5-22

5.3.3 Wechselwirkungen zu benachbarten Faseragglomeraten

Die Wechselwirkung der Faseragglomerate untereinander beinhaltet vor allem die Neigung sich aufgrund von herausragenden Fasern bzw. Faserschlaufen zu verhaken. Dieses hat besonders einen Einfluss auf das Fließverhalten von Schüttungen und somit auch auf das Dosierverhalten. Ähnlich des Zugversuches können Untersuchungen durchgeführt werden, bei denen in die beiden *U-Profile* je ein Faseragglomerat eingebracht ist. Anschließend werden die Agglomerate mit einer vorgegebenen Kraft gegeneinander gedrückt. Optional kann innerhalb dieses Druckzustandes ein Verdrehung der Halterungen erfolgen. Bei dem Wiederauseinanderziehen lässt sich der Kraftverlauf aufzeichnen und mit der Belastungskurve vergleichen. Bei einer stärkeren Wechselwirkung der Agglomerate zueinander zeigt sich eine größere Zugkraft, die benötigt wird, um die Agglomerate wieder voneinander zu trennen. Trotz der Abhängigkeit, in welcher Position (Orientierung der Fasern zueinander) die Agglomerate eingespannt werden, kann dieses Vorgehen als eine mögliche Voruntersuchung des Einflusses einzelner Oberflächenstrukturen herangezogen werden. Weitergehende Erkenntnisse sind durch die Analyse der Fließeigenschaften in Anlehnung an die DIN 933-6 in späteren Untersuchungen zu erwarten (siehe auch Kapitel 8 - Ausblick).

5.4 Eigenschaften des eingebundenen Fasermaterials

Eine Frage, die sich meist bei der Verarbeitung von Naturfasern stellt, ist inwieweit der Prozess eine Schädigung der Faserstruktur durch mechanische sowie thermische Beanspruchung entsteht. Bei der Untersuchung möglicher Fasereigenschaftsverschiebungen wie beispielsweise Faserlänge, -dicke und -festigkeit ist vor allem darauf zu achten, dass bei der Entnahme der Faser aus dem Agglomeratgefüge keine Schädigung hervorgerufen und somit ein falsches Ergebnis wiedergespiegelt wird. Besonders interessant scheint diese Fragestellung für das innovative Verfahren der Rollagglomeration zu sein, da dieses Verfahren als faserschonender Agglomerationsprozess eingestuft wird.

Neben den Untersuchungen von Einzelfasern mittels Faserdauerbiegeversuch wurden mittels Luftstromprüfverfahren (*AirFlow*) eine mögliche Faserschädigung aufgrund des

Rollagglomerationsprozesses durchgeführt. Bei vorliegender Konfiguration der Anlage (Probenkammergröße) können lediglich Faseragglomerate größerer Abmessungen untersucht werden. Das Luftprüfverfahren wurde für die Charakterisierung von Baum- sowie Schafwolle entwickelt, wobei sich zwei Betriebsweisen ergaben. Während bei der Feinheitsbestimmung von Baumwollfasern der durchdringende Luftstrom bei konstanter Luftdruckdifferenz der Ein- und Ausgangsströmung gemessen wird (*Micronaire-Wert-Bestimmung*), wird bei Schafwolle mittels *AirFlow-Gerät* die Druckdifferenz bei konstantem Volumenstrom der Luft aufgenommen. [E.K.'00]

$$\dot{Q}_L = K \cdot \frac{1}{S_F}$$

Gleichung 5-23

Hierbei weist der durchströmende Volumenstrom der Luft „ \dot{Q}_L “ eine Abhängigkeit von der Anlagenkonstante „ K “ und der vorliegenden Faseroberfläche „ S_F “ auf. Innerhalb von labortechnischen Untersuchungen setzten *Otto* und *Rohs* [R.O.'69] die *AirFlow-Technologie* zur Charakterisierung von Bastfasern erfolgreich ein. Zur Ermittlung eines Kennwertes (*Index der spez. Oberfläche* $\hat{= A'$) wird unter Annahme eines runden Faserquerschnittes eine laminare Durchströmung des Faserpfropfens vorausgesetzt.

$$A' = \sqrt{\frac{\Delta p}{\dot{Q}_L} \cdot \frac{\omega}{L} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}}$$

Gleichung 5-24

Δp : Druckdifferenz
 ε : Porosität des Probevolumens
 L : Prüfkammerhöhe
 ω : Prüfkammerquerschnitt

$$S_F = \frac{A'}{\sqrt{K \cdot \eta}}$$

Gleichung 5-25

η : dynamische Viskosität der Luft
 K : Anlagenkonstante

Der Vorteil dieser Messmethode liegt in der geringen Aufbereitung der zu vermessenden Faserprobe. Es muss nicht wie bei den bildanalytischen und gravimetrischen Verfahren zur Faserfeinheitsbestimmung eine Vereinzelnung bzw. Vergleichmäßigung des Faserkollektivs vorgenommen werden. Bei solchen Vereinzelnungen besteht immer die Gefahr, dass es zum Faserbruch sowie zur Abtrennung von Faserabspleizungen kommt und so eine Verschiebung der Verteilungskurve hervorgerufen wird. Ein weiterer Vorteil des Luftprüfverfahrens von in Wirrlage orientierter Faserpfropfen ist, dass es entge-

gen der bildanalytischen Messmethode zu keinen wesentlichen Einflüssen der Faserorientierung kommt. Entscheidender Nachteil ist jedoch, dass lediglich ein Mittelwert der gesamten Faserdickenverteilung ermittelt wird und so keine Rückschlüsse auf die Faserdickenverteilung möglich sind.

Aufgrund der Vorteile wurde das AirFlow-Prüfgerät zur Aufnahme von Vergleichswerten der Faserfeinheit in Folge zunehmender Rollstrecken im Rollagglomerationsteller herangezogen. Hierbei konnte ein Agglomerat entsprechender Größe ohne Zerstörung hinsichtlich eines möglichen Faseraufschlusses aufgrund der Walkbewegung untersucht werden. Die Messkammer der eingesetzten AirFlow-Einrichtung wies einen Durchmesser von 25 mm und eine Höhe von 15 mm auf. Um eine gleichmäßige räumliche Verteilung der Fasern in der Messkammer zu gewährleisten, sollte eine Porosität von 80% nicht unterschritten werden [R.O.'69].

Kapitel 6

Experimentelle Untersuchungen

6 Experimentelle Untersuchungen

Wie in der Einleitung dieser Arbeit dargestellt wurde, befassen sich die Versuche überwiegend mit der Verarbeitung von Naturfasern, vor allem mit Hanf- und Flachsfasern, da diese in der derzeitigen Marktentwicklung eine entscheidende Nachfrage aufweisen. Die heterogenen Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Fasermaterialien übertrugen sich auf die Faseragglomerate und indizierten somit eine zusätzliche Streuung der Agglomerateigenschaften. Dieses Verhalten erschwert eine allgemeine mathematische Beschreibung der Vorgänge und Einflussverläufe der unterschiedlichen Agglomerationsverfahren. Zudem sind einige Grundeigenschaften des Fasermaterials wie beispielsweise die Biegesteifigkeit von Naturfasern nicht ermittelbar gewesen. Jedoch zeigte sich, dass dieser Kennwert einen Einfluss auf die Drucksteifigkeit sowie auf das Reexpansionsverhalten und somit auf die räumlichen Abmessungen des Faseragglomerates besitzt.

Da die Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Faserfeuchte (siehe Abbildung 6-1) und so auf weitere Kennwerte wie Biege- und Zugfestigkeiten besitzt, wurden die gesamten Versuchsschritte, das heißt die Herstellung der Faseragglomerate sowie deren Charakterisierung in einem klimatisiertem Raum durchgeführt. Dieser wies über das in DIN EN ISO 139 vorgeschriebene Normklima auf ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$; $\varphi=65 \pm 4\%$). Bei diesen Bedingungen lag der Feuchtegehalt der Hanffasern um 10%, bei den verwendeten Chemiefasern um 5%.

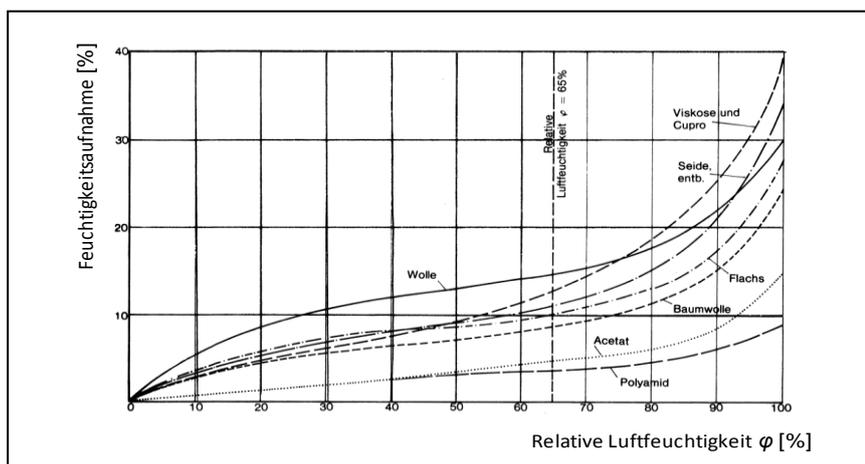


Abbildung 6-1 Wassergehalt beispielhafter Fasermaterialien in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [E.W.'81]

Die Regulierung des Wassergehaltes der Fasermaterialien weist zudem eine zeitliche Abhängigkeit auf. So stellt sich nicht umgehend nach einer Verschiebung der relativen Luftfeuchte die entsprechende Faserfeuchte ein [R.R.'00-a]. Zudem bleibt zu beachten, dass die Faserfeuchtigkeit zwischen Absorption und Desorption eine Hysterese bildet,

wobei Faserfeuchtigkeit der Desorption oberhalb der Absorption verläuft [W.B.'93]. Aus diesem Grund wurden die verwendeten Fasermaterialien 24 h vor dem Agglomerationsprozess innerhalb des Normklimas konditioniert.

Die so aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse über die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter beruhen auf dem jeweiligen eingesetzten Fasertyp und zeigen auf, über welche Prozessvariationen gezielt Einfluss auf anwendungsspezifische Eigenschaften des Faseragglomerates genommen werden kann. Die Übertragung genereller Einflüsse auf den Agglomerationsprozess ist für weitere Fasermaterialien denkbar.

Die Angaben des spezifischen Füllgrades „ ϕ “ beziehen sich nicht auf das gesamte Anlagenvolumen, sondern auf das Nutzvolumen. Dieses ist beim Eirich-Intensivmischer eindeutig definiert. Bei der Rollagglomeration wird hier als Nutzvolumen der Raum angenommen, der von einem idealen Rotationskörper im Rollgangsquerschnitt gebildet wird, wobei dessen Geometrie und somit sein Volumen abhängig von der Rollgangsauskleidungsvariante ist (siehe Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1 Ermittlung des Nutzvolumens unterschiedlicher Rollgangsvariationen

erzeugte Geometrie	Berechnung	5x5 Rollgang	10x10 Rollgang	15x15 Rollgang
<i>zylindrisch</i>	$V_{Nutz,z} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot b_{RG}^2 \cdot h_{RG}$	98,2 mm ³	785,4 mm ³	2650,7 mm ³
<i>kugelig</i>	$V_{Nutz,k} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot a_{RG}^3$	94,0 mm ³	752,3 mm ³	2538,9 mm ³
<i>doppelkegelig</i>	$V_{Nutz,dk} = \frac{1}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot \pi \cdot a_{RG}^3$	92,6 mm ³	740,5 mm ³	2499,1 mm ³

Die Bewertung und Gegenüberstellung der Messwerte der Rollagglomerationsversuche erfolgt in Abhängigkeit des spezifischen Füllgrades. Somit lassen sich auch Messreihen unterschiedlicher Rollgangsabmessungen miteinander vergleichen und deren Einflüsse bewerten. Das in den folgenden Diagrammen angegebene Bestimmtheitsmaß bezieht sich auf die Mittelwerte der einzelnen Agglomeratgewichtsklassen.

6.1 Untersuchungen im Rollagglomerationsteller

Der konzipierte Labor-Rollagglomerationsteller ermöglicht eine Reihe von anlagentechnischen Variationen (siehe Kapitel 4 – Eingesetzte Versuchsanlagen). Neben diesen anlagentechnischen Variationsmöglichkeiten haben auch die Eigenschaften der eingesetzten Fasern einen entscheidenden Einfluss auf das Agglomerationsverhalten und die Produkteigenschaften. Eine experimentelle Abdeckung der gesamten Kombinations-

möglichkeiten aus faser- und anlagentechnischen Variationen ist für die hier angestrebte Untersuchung der Agglomerationseinflüsse im Hinblick auf die Eigenschaften der Faseragglomeration nicht sinnvoll. Vielmehr sollen Möglichkeiten der Beeinflussung und Steuerung des Agglomerationsprozesses aufgeführt werden, um daraus die Anhaltspunkte für weitergehende Untersuchungen bei festgelegtem Agglomerateigenschaftsprofil zu erhalten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Grunduntersuchungen sind in der Abbildung 6-2 aufgeführt. Hierbei wurden in der Regel zudem die auf-gegebene Fasermasse und deren Feuchte innerhalb der einzelnen Versuchsreihen variiert. Eine Darstellung des aufgefächerten Versuchsstrukturbaumes inklusive aller Variationsparameter befindet sich im Anhang.

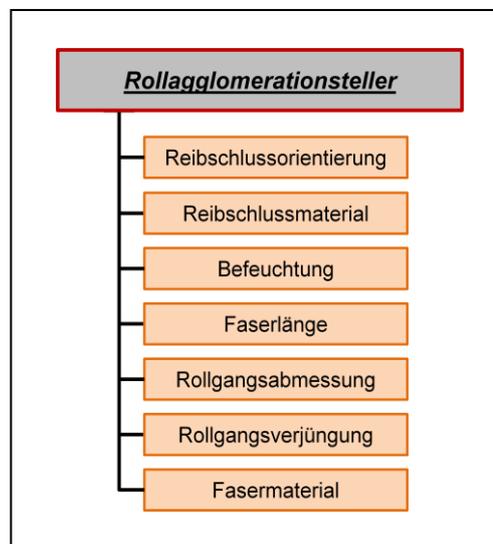


Abbildung 6-2 Darstellung Versuchsreihen im Rollagglomerationsteller

Tabelle 6-2 Nomenklatur der Versuchsreihen der Rollagglomeration

A-L-M-F (R-WXO)-SV		
A	Art des Fasermaterials	HA Hanffaser
		LI Flachsfaser
		PP_{xx} Polypropylenfaser mit xx dtex
L	Länge des Faserschnittes [mm]	
M	Masse des Fasermaterials [mg]	MV Massenvarianz
F	Feuchtezustand des Fasermaterials	N Faserfeuchte im Normzustand
		B Eintauchen in siedendes Wasser
		FV Befeuchtungsvariation
R	Rollgangsabmessung [mm]	[Höhe x Breite]
W	Wandungsbelag	V Vulkollan-Platte
		G Gummiplatte Para
X	Anzahl der Reibschlusswände	
O	Belagsorientierung	a axiale Orientierung
		r radiale Orientierung
		ˆ Störeinheiten auf Schlupfwandung
SV	sonstige Variationen	TV Trocknungsvariation
		RV Rollstreckenvariation

Im weiteren Textverlauf wird für eine kürzere Betitelung der Versuchsreihen der Rollagglomeration eine Nomenklatur verwendet, die die entscheidenden Versuchsparameter beinhaltet (siehe Tabelle 6-2).

In den durchgeführten Versuchen fand mit hoher Gewichtung eine Untersuchung der unterschiedlichen Rollganggestaltung mit Variation der zugeführten Faser- bzw. Füllgrad des Rollganges statt. Für die Ermittlung des Einflusses einer möglichen Faserbefeuchtung wurden neben Fasermaterialien im Normzustand (Feuchtegehalt der Hanffasern im Normklima 10%) auch befeuchtete Fasern agglomeriert. Abgesehen von der Versuchsreihe zur Untersuchung verschiedener Befeuchtungsvariationen „HA 40-100-FV (5x5-V2a)“ erfolgte die Befeuchtung der Fasern über ein kurzzeitiges Eintauchen in siedendes Wasser. Überschüssiges Wasser wurde durch leichtes Klopfen aus dem Gefüge entfernt. Hierdurch ließ sich ein Wassergehalt einstellen, der innerhalb einer Faser- bzw. Füllgradklasse relativ geringe Varianzen aufwies. Des Weiteren reguliert sich der Feuchtegehalt des Faseragglomerates während des Agglomerationsprozesses selbstständig. So wird überschüssiges Wasser durch die Verdichtung aus dem Gefüge gedrückt. Trocknere Faser- bzw. Füllgradmassen nehmen eben diese Flüssigkeit wieder auf. Da bei einem höheren Füllgrad größere Drücke vorliegen, stellt sich in Folge ein geringerer Feuchtegehalt des erzeugten Grünagglomerates ein (siehe Abbildung 6-3). Die Abnahmen der räumlichen Abmessungen während des Trocknungsprozesses sind mit gemessenen 0,3% bis 0,6% als gering anzusehen.

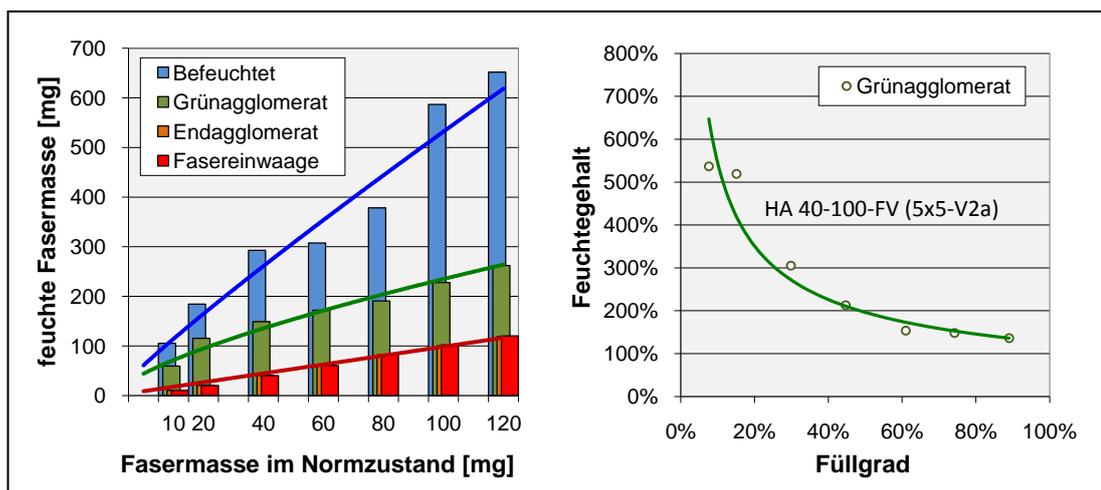


Abbildung 6-3 Feuchteinstellung mittels Tauchbefeuchtung im siedenden Wasser

In den bisherigen Untersuchungen kam vorzugsweise ein Rollgang von 5x5 mm zum Einsatz. Da jedoch die Größe der Agglomerate einen limitierenden Einfluss auf die späteren Anwendungsgebiete haben kann (bspw. NFK-Produkte über Spritzguss), wurden die Abmessungen des Rollgangsquerschnittes variiert. Somit wurden neben kleine-

ren Agglomeraten, die für die Nutzung in der Kunststoffindustrie geeignet sind, auch Faseragglomerate mit größeren Abmessungen hergestellt, die für Dämmzwecke sowie zur Fluidaufbereitung genutzt werden können.

Einen weiteren, entscheidenden Einfluss auf die mögliche Nutzung der erzeugten Faseragglomerate besitzt die im Agglomerat vorliegende Faserlänge. Hierbei können direkte Faserlängenlimitierungen für die einzelnen Anwendungsgebiete vorliegen. So ist beispielweise eine Obergrenze der Faserlänge beim Spritzguss von NFK wahrscheinlich. Durch längere Fasern kann es hierbei zu ungewollten Verschlüssen der Spritzdüsen, Nesterbildung der Fasern sowie Umschlingungen der Schneckenelemente kommen. Des Weiteren ist es denkbar, dass die Faserlänge einen indirekten Einfluss auf die Anwendbarkeit aufgrund unterschiedlicher Auflösungsverhalten bzw. Stabilitäten der Faseragglomerate besitzt.

Da anhand von Vorversuchen gezeigt wurde, dass die Tellerdrehzahl in den betrachteten Bereichen (2 bis 14 min^{-1}) keinen erkennbaren Einfluss auf das Agglomerationsverhalten hat, wurden hierzu bis zum derzeitigen Zeitpunkt keine weiteren Untersuchungen durchgeführt. Somit lag bei allen Versuchsreihen eine Drehzahl von 8 min^{-1} bzw. eine Tellerumlaufgeschwindigkeit von ca. 180 mm/s an.

Belagswahl der Rollgangswandung

Innerhalb der Untersuchungen wurden unterschiedliche Rollgangsbeläge für die Reibschlusswandungen (Sandpapier, Moosgummi, Vulkollan-Platte und Gummipatte Para) sowie Teflontextil als Schlupfwandungsbelag untersucht. Bei der Verwendung des Sandpapiers zeigte sich eine deutliche Schädigung des Fasermaterials. Das Moosgummi hingegen bewirkte keinen sichtbaren Einfluss auf die Faserstruktur, jedoch kam es nach einigen Versuchen zu einer inakzeptablen Abrasion der Laufstrecke, wobei sich die Gummifetzen im Faseragglomerat wiederfanden. Als vorteilhaft erwiesen sich hingegen die Vulkollan-Platte (80° Shore) sowie die Gummipatte Para (40° Shore). Innerhalb der Voruntersuchung wurden weder erhebliche Schädigungen der Fasern noch ein Abrieb des Belages festgestellt.

Neben der Faserschonung und Abriebsfestigkeit des Belages ist vor allem das Haft- bzw. Reibmoment entscheidend für den Rollagglomerationsprozess. In der Abbildung 6-4 sind für eine Reihe von Belagsmaterialien entsprechende Gleitkonstanten bei befeuchteten und trockenen Hanffasern gegenübergestellt. Im Ergebnis wurden für die weiteren Untersuchungen der Rollagglomeration neben der Vulkollan-Platte und Gum-

miplatte Para für die Reibschlusswandungen, das Teflongewebe für die Schlupfwandungen vorgesehen.

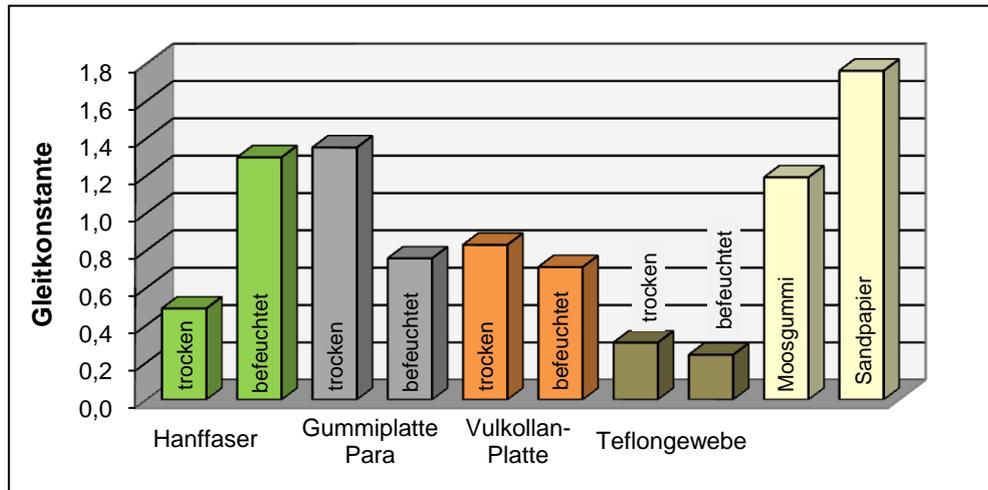


Abbildung 6-4 Gleitkonstanten von Hanffasern auf unterschiedlichen Belagsmaterialien

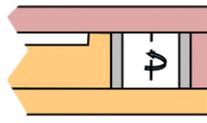
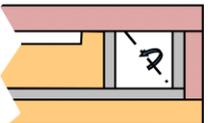
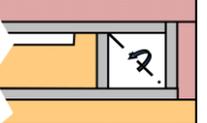
Um die Möglichkeiten des Rollagglomerationstellers zur Verarbeitung unterschiedlicher Fasermaterialien aufzuzeigen, wurden kurze Versuchsreihen mit verschiedenen Einsatzmaterialien durchgeführt. Eine Variation der Materialien kann für unterschiedliche Einsatzgebiete von Vorteil sein. Beispielsweise weisen die Faserarten mit verschiedenen chemischen Zusammensetzungen voneinander abweichende biologische Zersetzungsraten auf. So können Faseragglomerate mit immobilisierten Mikroorganismen nicht nur als Nährstoffquelle, sondern auch als Regelung der Verweilzeit fungieren.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Charakterisierungsschritte beziehen sich auf die Bewertung des einzelnen Faseragglomerates und nicht auf die Eigenschaften von Faseragglomeraten im Kollektiv innerhalb der unterschiedlichen Anwendungsbereiche. Diese Eigenschaften des Einzelagglomerates sind die Ursprünge des Verhaltens eines Faseragglomeratkollektivs. So hat beispielsweise die Oberflächenstruktur bzw. der Oberflächenstrukturindex einen entscheidenden Einfluss auf Wechselwirkungen, wie dem Verhaken untereinander und somit auf das Schüttverhalten der erzeugten Faseragglomerate. Anhand der aufgenommenen Kennwerte des Faseragglomerates kann somit in späteren Produktionsreihen eine Qualitätssicherung durch Stichprobenmessung des Einzelagglomerates erfolgen, ohne spezielle anwendungsorientierte Messungen durchführen zu müssen. Untersuchungen zur Klärung von Zusammenhängen zwischen den Grundeigenschaften des Einzelagglomerates und den Eigenschaften im Kollektiv sowie innerhalb der unterschiedlichen Anwendungsbereiche wird für spätere Forschungsarbeiten angestrebt (siehe Kapitel 8 - Ausblick).

6.1.1 Möglichkeiten der Beeinflussung der geometrischen Makrogestalt

Durch die gezielte Anpassung bzw. Orientierung der Rollgangsauskleidung besteht in erster Linie die Möglichkeit, Einfluss auf die geometrische Gestalt der erzeugten Rollagglomerate zu nehmen. So wurden Faseragglomerationsversuche mit zwei, drei und vier Reibschlusswandungen mit unterschiedlicher räumlicher Orientierung untersucht. Die verbliebenen Rollgangswände wurden mit Teflongewebe versehen, um hier einen möglichst optimalen Schlupf zu gewährleisten (Schlupfwandung). Im Falle der Rollgangsvariation mit drei Reibschlusswandungen kamen zudem Störeinheiten auf der Schlupfwandung zum Einsatz. Hierdurch erfuhrt sich bildende Faseragglomerat ein weiteres Widerstandsmoment, so dass an dieser Stelle eine zusätzliche Rotation des entstehenden Faseragglomerates initialisiert wurde. Der Einsatz von Störeinheiten stellte sich jedoch mit der gewählten Konfiguration (2 mm über der gesamten Rollgangsbreite) bei befeuchtetem Fasermaterial als nicht machbar heraus. Aufgrund der Kapillarkräfte entsteht ein stabileres Agglomeratgefüge, so dass eine innere Verschiebung erschwert wird. Somit blieben die befeuchteten Agglomerate zunehmend an den Störeinheiten hängen, so dass kein reibungsloser Betrieb möglich war.

Tabelle 6-3 Einfluss der Rollgangsauskleidung auf die Faseragglomeratgeometrie

HA 40-100 (5x5-V)	2-Reibschlusswände	3-Reibschlusswände	4-Reibschlusswände
Rollgangs- querschnitt			
Trocken Agglomeration			
Befeuchtete Agglomeration			

Durch die unterschiedlichen Auskleidungsvarianten kam es zu einer Verlagerung der Rotationsachse des aufgegebenen Fasergefüges und somit zu einer Erzeugung von Faseragglomeraten mit zylindrischen, kugelförmigen oder doppelkegligen Makrogestal-

ten (siehe Tabelle 6-3). Die hervorgerufenen Makrogestalten der Faseragglomerate werden neben der Orientierung der Reibschluss- und Schlupfwände auch von der Faserfeuchte (Normzustand, Oberflächenbefeuchtung) und den aufgegebenen Faservolumina beeinflusst.

Einfluss des aufgegebenen Faservolumens

Bei einem geringen Faservolumen „ V_F “ bzw. bei einem geringen Füllgrad „ ϕ “ (Verhältnis von Faservolumen zu Volumen des idealen Rotationskörpers in Abhängigkeit der Rollgangsabmessung und -auskleidungsvariante) bildet sich eine unregelmäßige, kugelhähnliche Makrogestalt aus. Mit Zunahme des Füllgrades verschiebt sich die Gestaltsform in Richtung der rollgangsvariationsabhängigen Endgeometrie (siehe Abbildung 6-5).

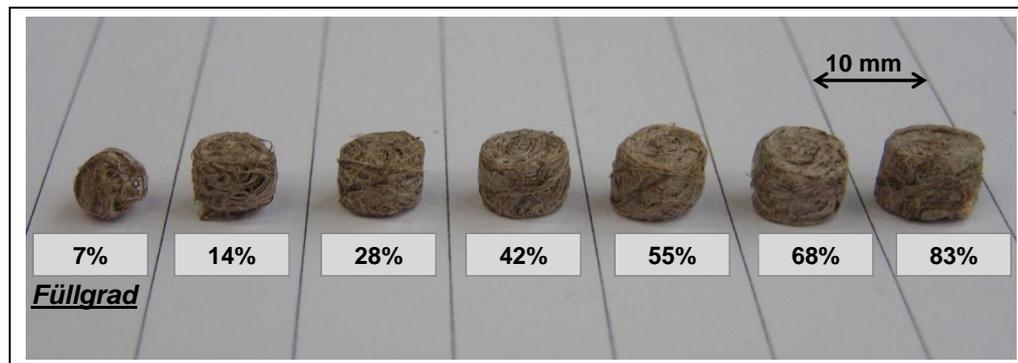


Abbildung 6-5 Einfluss des Füllgrades auf die äußere Makrogestalt HA 40-MV-B (5x5-V2r)

Neben der subjektiven Betrachtung des dreidimensionalen Körpers lässt sich dieses Verhalten durch Heranziehen des füllgradabhängigen Formfaktors der einzelnen Projektionsflächen „ $SPHT^2$ “ in Abhängigkeit des Längen-Breiten-Verhältnisses darstellen (siehe Abbildung 6-6). So zeigt sich für die Versuchsreihe HA 40-MV-N (5x5-V3), dass bei einem geringen Füllgrad von 4% und 8% ein hoher $SPHT^2$ -Wert vorliegt. Ab einem Füllgrad von 15% liegen die Werte der einzelnen Ansichten relativ eng beieinander, was auf Körper mit einer hohen Kubizität hinweist. Wird der Füllgrad von 44% überschritten, kommt es zu einer Streckung des Körpers. Hierbei nimmt mit zunehmendem Füllgrad das Längen-Breiten-Verhältnis der Seitenansichten zu, wobei die Grundseite weiterhin Werte zwischen 1,13 und 1,21 aufweist.

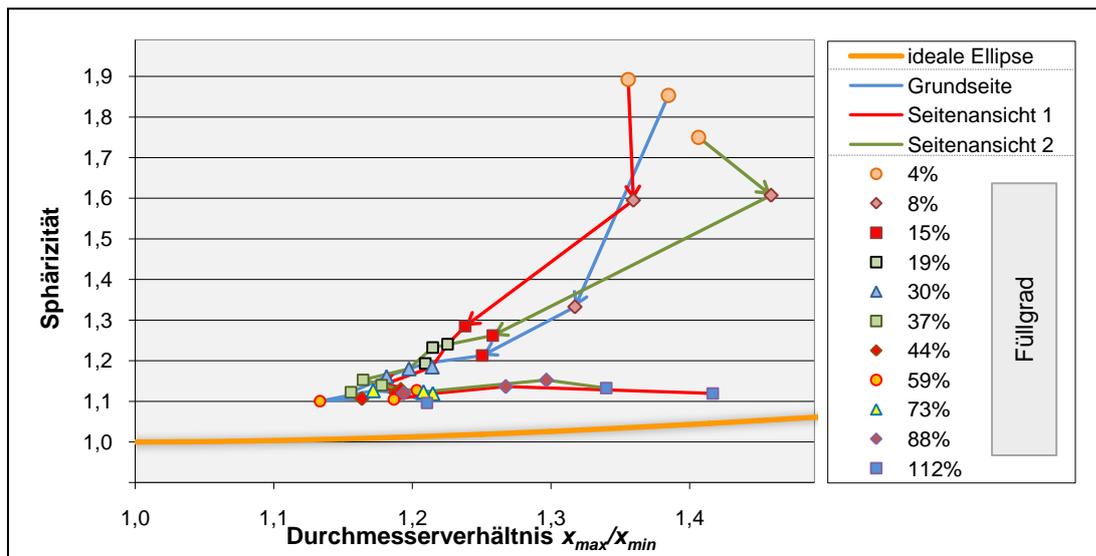


Abbildung 6-6 Sphärizitätsverlauf bei Füllgradsvariationen

HA 40-MV-N (5x5-V3')

Die $SPHT^2$ -Werte weisen ab einem Füllgrad von 30% eine Abweichung zum Kurvenverlauf idealer Ellipsen von weniger als 20% auf. Diese bestehende Abweichung der im Normzustand erzeugten Agglomerate liegt vor allem in der Unregelmäßigkeit der Oberflächenstruktur durch einzelne, herausragende Fasern begründet (geringer bei Befeuchtung). Mit Zunahme des Füllgrades nimmt der Oberflächenstrukturindex bei der Agglomeration in einem Rollgang mit drei Reibschlusswänden logarithmisch ab (siehe Abbildung 6-7), wodurch sich die geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Projektionsfläche dem Verlauf einer idealen Ellipse annähern (siehe Abbildung 6-6).

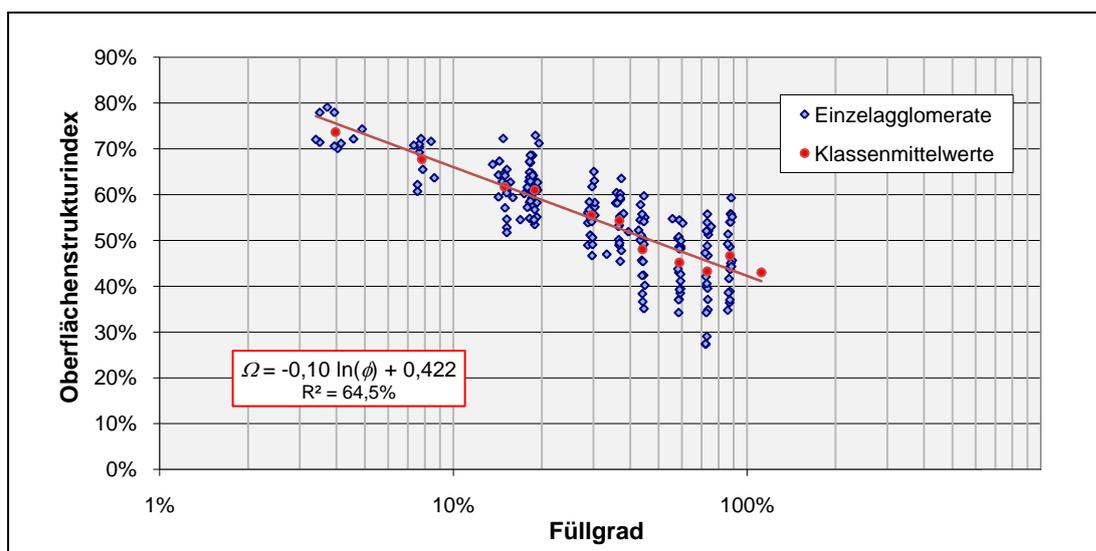


Abbildung 6-7 Füllgradabhängiger Oberflächenstrukturindex

HA 40-MV-N (5x5-V3')

Bei weiterer Erhöhung des eingebundenen Faservolumens nehmen aufgrund einer stärkeren Reexpansionsneigung die räumlichen Abmessungen der Faseragglomerate zu (siehe Abbildung 6-8). Diese Steigerung der Reexpansionsneigung wird durch eine

höhere Faserpackungsdichte im Gefüge hervorgerufen, wodurch es bei dem Agglomerationsprozess zu einer stärkeren Biegebeanspruchung der Einzelfaser kommt. Nach Auswurf aus dem Rollgang stellt sich eine Entspannung des Gefüges ein und ermöglicht so eine Reexpansion aufgrund der Biegespannung der Einzelfaser.

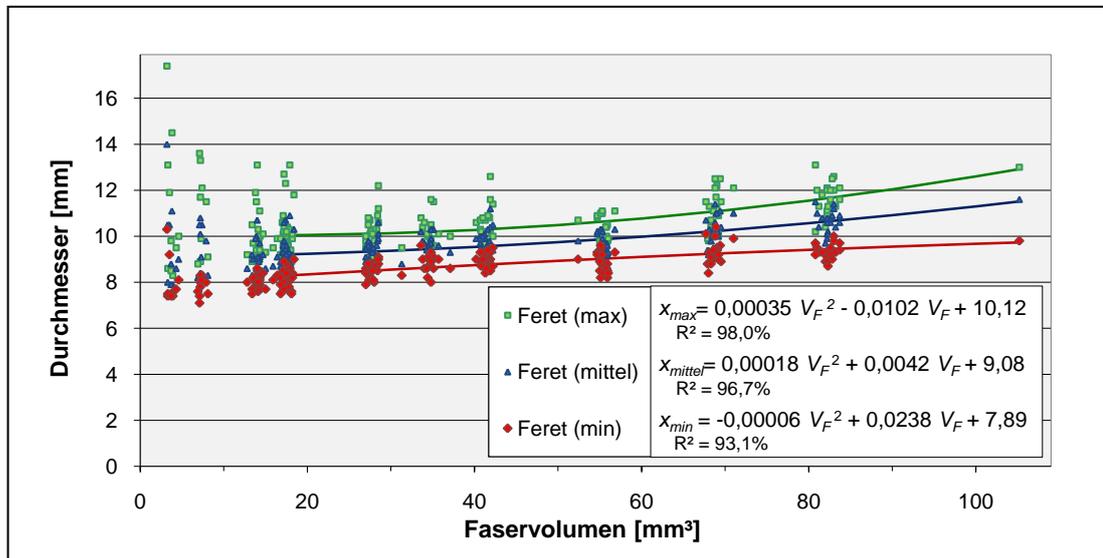


Abbildung 6-8 Füllgradsabhängiger Agglomeratdurchmesser HA 40-MV-N (5x5-V3')

Anhand der stärkeren Streuungen des Durchmessers im Bereich geringerer Faservolumina wird auch aus der Abbildung 6-8 ein gemindertes Agglomerationsergebnis (bei dem Ziel eine gleichmäßige Makrogestalt zu erzeugen) in diesem Bereich deutlich. Vor allem die maximalen Feret-Durchmesser der Agglomerate bei Füllgraden von 4% und 8% weisen eine weite Streuung auf. Deutlich wird dies auch in der Darstellung der Varianzkoeffizienten (siehe Abbildung 6-9).

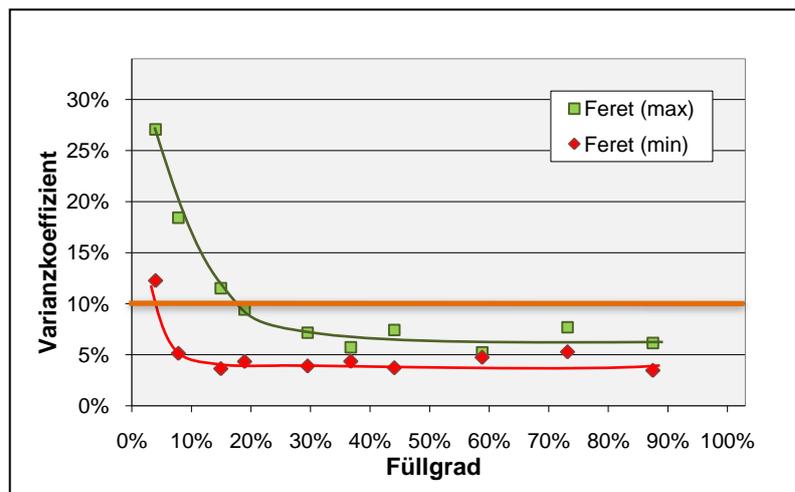


Abbildung 6-9 Varianzkoeffizient des Feret-Durchmessers HA 40-MV-N (5x5-V3')

Über den Weg der linearen Interpolation lässt sich abschätzen, dass ab einem Füllgrad von 17,9% der Varianzkoeffizient des maximalen Feret-Durchmessers unterhalb von 10% liegt. Ab diesem Füllgrad lässt sich somit bei der betrachteten Rollagglomerationskonfiguration HA 40-MV-N (5x5-V3') eine für die meisten Anwendungsgebiete vertretbare Produktgrößenabweichung von kleiner 10% erzielen. Der Varianzkoeffizient der minimalen Feret-Durchmesser liegt ab einem Füllgrad von 8% gering schwankend um einen Wert von 4,3%.

Im Verlauf der sich für den konvexen und realen Körper einstellenden Porositäten lässt sich neben der stetigen Abnahme das Streben gegen einen Grenzwert feststellen (86% bzw. 83%, siehe Abbildung 6-10). Bei der Zunahme des aufgegebenen Faservolumens kommt es zu einem stärkeren Kontakt der Fasern, was neben der Kontaktfläche die Wahrscheinlichkeit des Verhakens angrenzender Fasern im Gefüge erhöht und so zu einer Porositätsabnahme führt. Diesem Verhalten wirkt eine gesteigerte Reexpansionsneigung der Fasern entgegen, so dass sich eine Grenzporosität einstellt. Die Porositätsabnahme mit Zunahme des Füllgrades folgt hierbei einem potenziellen Trendverlauf. Der Unterschied zwischen der Porosität des realen und des konvexen Körpers liegt vor allem in der Oberflächenstruktur begründet, welche gesondert ermittelt wird. Somit wird im weiteren Verlauf überwiegend auf die Porosität des realen Faseragglomerates Bezug genommen.

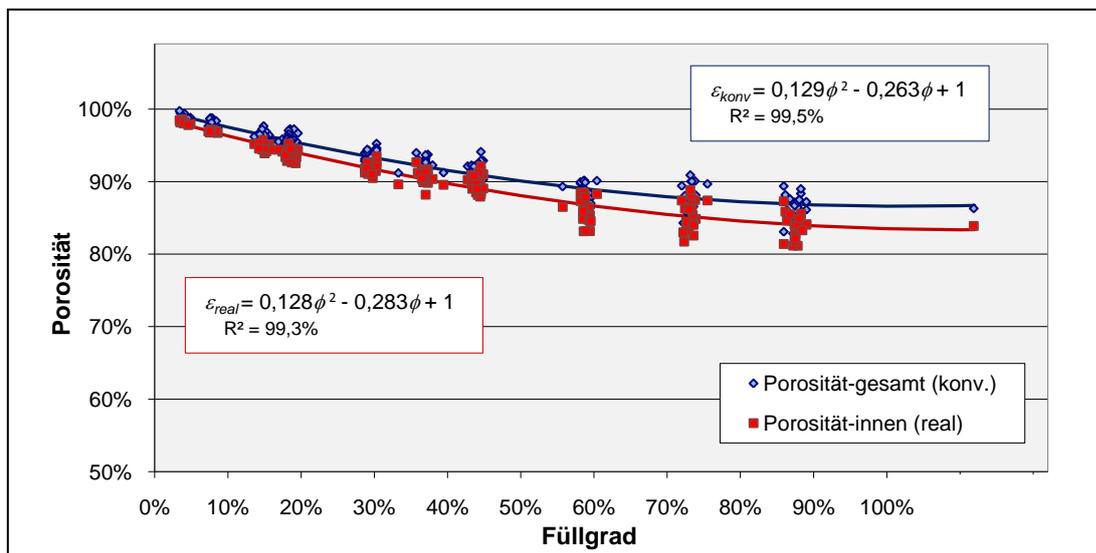


Abbildung 6-10 Füllgradabhängiger Porositätsverlauf

HA 40-MV-N (5x5-V3')

Einfluss der Reibschlussorientierung

Neben den unterschiedlichen Geometrien der Makrogestalt kommt es durch die Variationen der Rollgangsauskleidung zu abweichenden Trendverläufen der charakteristischen Eigenschaften der Faseragglomerate in Abhängigkeit des Füllgrades. Während die mathematischen Trendverläufe der kugeligen und der doppelkegligen Faseragglomerate der Trockenagglomeration ähneln, weisen die zylindrischen Agglomerate teils andere Verläufe auf (siehe Abbildung 6-11 bis Abbildung 6-14).

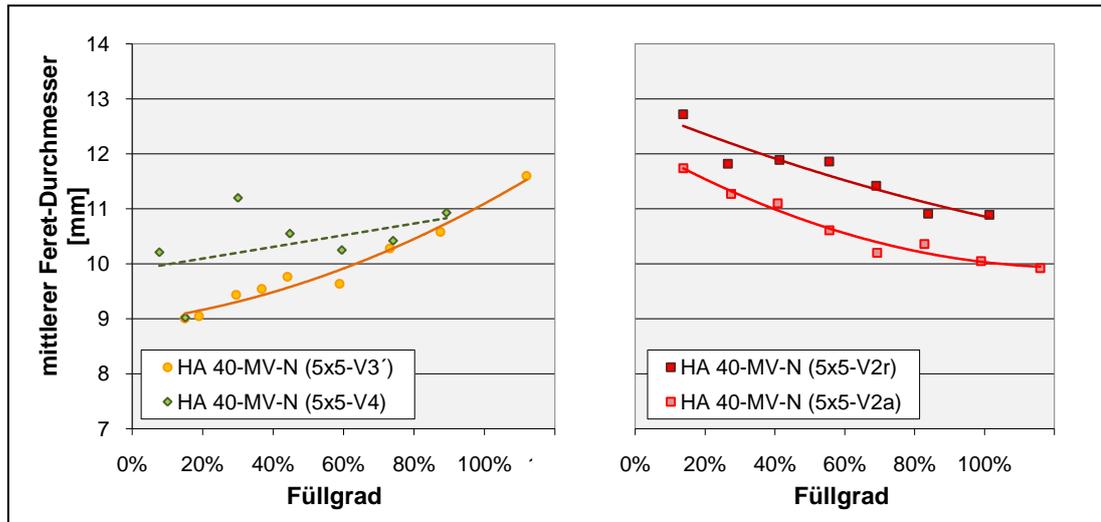


Abbildung 6-11 Verläufe mittlerer Feret-Durchmesser unterschiedlicher Rollgangsauskleidungen

Den deutlichsten Unterschied weisen die Feret-Durchmesserverläufe der im Normzustand erzeugten Faseragglomerate mit drei- sowie vierwandigem Reibschluss gegenüber denen mit zweiwandigem Reibschluss ausgekleideten Rollgängen auf (siehe Abbildung 6-11). Während sich bei den Versuchen *HA 40-MV-N (5x5-V3')* und *HA 40-MV-N (5x5-V4)* mit zunehmendem Füllgrad ein steigender Trend des mittleren Feret-Durchmessers einstellte, weisen die Kurven *HA 40-MV-N (5x5-V2a)* und *HA 40-MV-N (5x5-V2r)* einen fallenden Verlauf auf.

Der Hauptgrund für die unterschiedlichen Trendverläufe ist den sich einstellenden Oberflächenstrukturen bzw. Oberflächenstrukturindizes der unterschiedlichen Versuchsreihen geschuldet, deren Trendverläufe ebenfalls eine Abhängigkeit der Orientierung der Reibschlusswandungen aufweist (siehe Abbildung 6-12).

Es wird ersichtlich, dass es aufgrund der höheren Anzahl an Reibschlusswänden in den Rollgangsvariationen (*5x5-V3'*) und (*5x5-V4*) bei geringem Füllgrad zu einer besseren Einbindung der Fasern an der Oberfläche des Agglomerates als bei zweiwandiger Reibschlussauskleidung kommt. So weisen die Versuchsreihen mit zwei Reibschlusswandungen bei einem Füllgrad von 10% einen gemittelten Wert des Oberflächen-

strukturindex von 76,5% auf, wogegen die Werte der Agglomeratreihe (5x5-V3') mit 65,3% deutlich darunter liegen. Während der Oberflächenstrukturindex der Faseragglomerate des Rollganges mit zwei radialen Reibschlusswandungen über den gesamten Füllgradbereich oberhalb der Werte der dreiwandigen Versuchsreihe mit Störeinheiten auf der Schlupfwandung liegen, unterschreiten die Werte der Versuchsreihe mit zwei axialen (HA 40-MV-N (5x5-V2a)) Reibschlusswandungen diese Kurve ab einem Füllgrad von 75%.

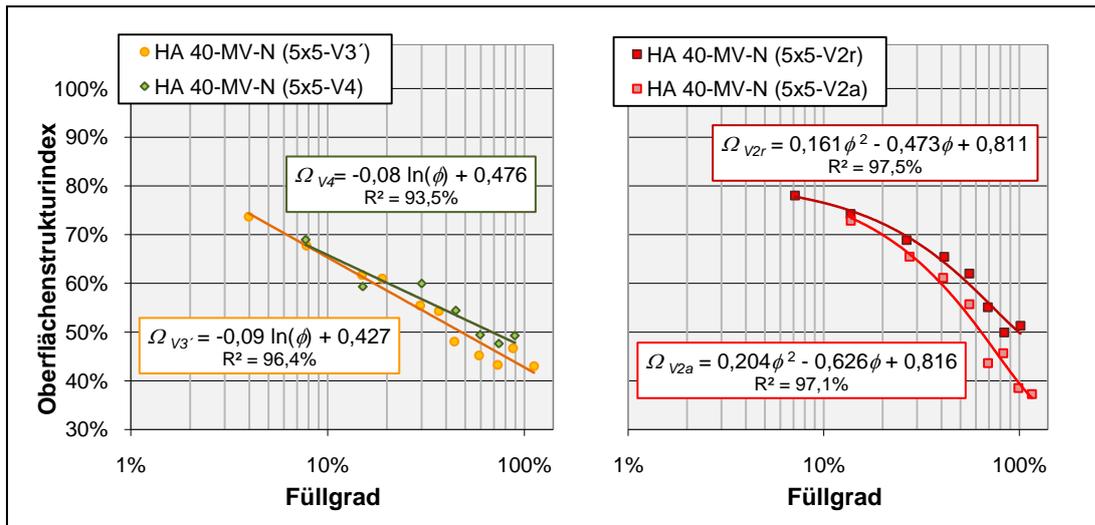


Abbildung 6-12 Oberflächenstrukturindizes untersuchter Rollgangsauskleidungen

Das Erzeugen geringerer Oberflächenstrukturindizes bei zwei axialen Reibschlusswandungen wird in einem Zusammenziehen der wickelähnlichen Struktur gesehen. Zudem werden die Fasern der Peripherie in die Agglomeratoberfläche gepresst. Die Abweichung zwischen der vierwandigen und der dreiwandigen Rollgangsvariante mit Störeinheiten (HA 40-MV-N (5x5-V3')) an der Schlupfwandung zeigt, dass durch die Störeinheit ein erfolgreiches Induzieren einer weiteren Rotation erfolgte. Hierdurch rotiert das Agglomerat nicht wie bei den Rollgängen mit vier und zwei Reibschlusswandungen konstant um eine Achse, sondern verlagert diese an jeder Störeinheit, so dass es zu einem stärkeren Umwalken des Fasergefüges kommt. Als Folge wird ein intensiverer Kontakt zwischen den einzelnen Fasern hervorgerufen.

Der Einfluss des Oberflächenstrukturindex der Faseragglomerate auf deren tatsächlich gemessene Feret-Durchmesser wird in der Darstellung des projektionsflächenäquivalenten Kreisdurchmessers ersichtlich (siehe Abbildung 6-13). Entgegen der unterschiedlichen Verläufe der direkt gemessenen Werte bei der Versuchsreihe mit drei und der mit zwei Reibschlusswandungen (siehe Abbildung 6-11) weisen hier beide Trendkurven

einen ähnlichen Kurvenverlauf auf. So nehmen die berechneten Äquivalentdurchmesser mit größeren agglomerierten Faservolumina ebenfalls zu.

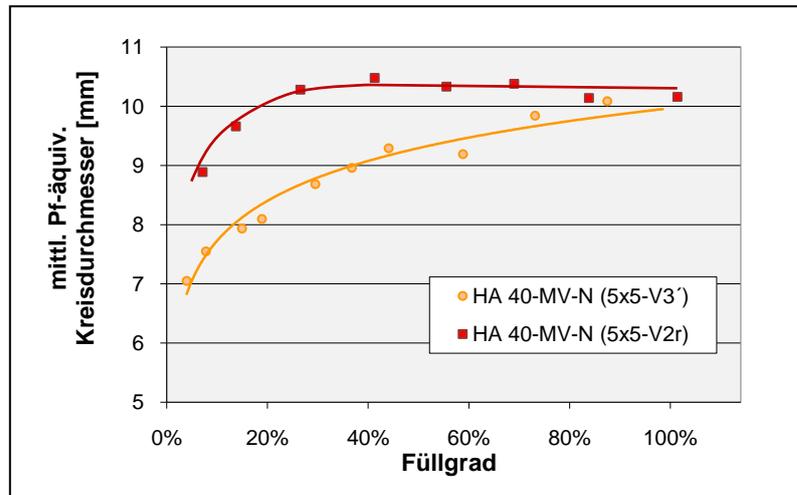


Abbildung 6-13 Projektionsflächenäquivalenter Kreisdurchmesser der Reihen mit zwei und drei Reibschlusswandungen

Wie aufgrund des Verlaufes der räumlichen Abmessungen zu erwarten ist, weisen alle Faseragglomerate der untersuchten Rollgangsauskleidungsvarianten bei einer Erhöhung des Füllgrades eine Abnahme der Porosität auf (siehe Abbildung 6-14). Bedingt durch die mit Füllgradzunahme stärker werdende Reexpansion der Faseragglomerate nähern sich die Porositäten einem theoretischen Grenzwert an. Dieser theoretische Ansatz wird in den Porositätsverläufen der Versuchsreihen (5x5-V3') und (5x5-V4) deutlich. Ab einem Füllgrad von ca. 100% ist der Volumenzuwachs der Agglomerate proportional zum aufgegebenen Faservolumen, so dass sich Grenzporositäten von 84% (5x5-V3') bzw. 78% (5x5-V4) einstellen.

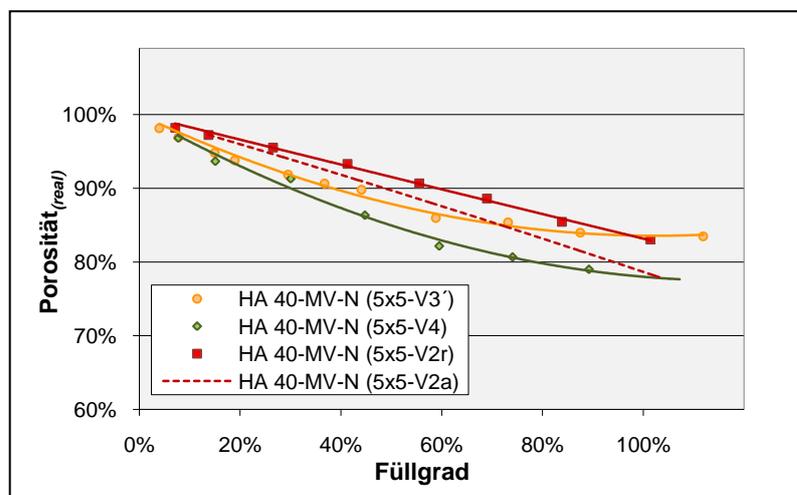


Abbildung 6-14 Porosität der Faseragglomerate bei verschiedenen Reibschlussvarianten unter Normbedingungen

Der niedrigere Porositätsverlauf der Versuchsreihe (5x5-V4) ist neben dem höheren Energieeintrag (größere Anzahl an Reibschlusswandungen) auf die entstandene Verdrillung an den Spitzen des Faseragglomerates zurückzuführen. Fasern, die sich mit axialer Orientierung (parallel zur Rotationsachse) über das gesamte Agglomerat erstrecken und somit in beiden Verdrillungsspitzen zugleich vorliegen, bewirken ein Zusammenziehen des Fasergefüges im Agglomerat. Hierdurch wird im Vergleich zu Agglomeraten der Versuchsreihe (5x5-V3) eine deutlich geringere Porosität hervorgerufen. Bei den Versuchsreihen mit zwei Reibschlusswandungen folgen die Porositätsverläufe in dem betrachteten Bereich einem nahezu linearen Trendverlauf, welcher überwiegend oberhalb der Versuchsreihen (5x5-V3) und (5x5-V4) liegt. Die linearen Kurvenverläufe der Versuchsreihen (5x5-V2r) und (5x5-V2a) sind in dem abweichenden Reexpansionsverhalten der Faseragglomerate, welches bei der Darstellung der projektionsflächenäquivalenten Kreisdurchmesser in der Abbildung 6-13 deutlich wurde, begründet. So bleibt die Agglomeratgröße bzw. das Agglomeratvolumen ab einem Füllgrad von etwa 22% bei weiterer Erhöhung des aufgegebenen Faservolumens nahezu konstant, was eine Abnahme der Porosität mit sich führt. In den betrachteten Füllgradsbereichen ließ sich hierbei keine Grenzwertporosität feststellen. So weisen die erzeugten Faseragglomerate Porositäten von 83% bei einer radialen und 79% bei einer axialen Orientierung der zwei Reibschlusswandungen auf.

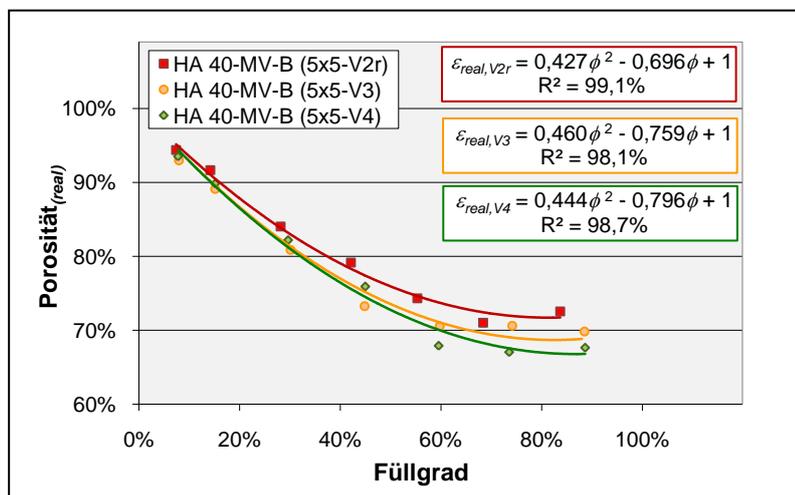


Abbildung 6-15 Porositätsverlauf verschiedener Reibschlussvariationen befeuchteter Fasern

Die Abhängigkeit der resultierenden Porosität von der Anzahl der Reibschlusswandungen und damit von dem Energieeintrag in das Faseragglomerat wird auch bei den Agglomerationsversuchen befeuchteter Fasermaterialien deutlich (siehe Abbildung 6-15). Bei allen drei Rollgangsvariationen wird ein Streben nach einer Grenzporosität ersichtlich. Im Gegensatz zu den im Normzustand agglomerierten Fasermaterialien stellen sich

annähernd konstante Porositäten ab einem Füllgrad 70-80% ein. Die bei einem Füllgrad von 80% erzielten Porositäten ($\epsilon_{real,V2r}(80\%) = 71,8\%$; $\epsilon_{real,V3}(80\%) = 68,7\%$; $\epsilon_{real,V4}(80\%) = 76,0\%$) liegen deutlich unterhalb der Porositäten, die bei nicht befeuchteten Fasern mit einem Füllgrad von 100% erzeugt wurden. Die weiteren Einflüsse der Faserbefeuchtung vor dem Agglomerationsprozess werden im späteren Unterkapitel 6.1.3 näher betrachtet.

6.1.2 Einfluss des Reibwiderstandes der Wandbeläge

Wie Untersuchungen zeigten, haben neben der Orientierung des Reibschussbelages auch dessen Materialeigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf das Agglomeratsergebnis. Dieses wurde auch bei den untersuchten Belägen der *Vulkollan-Platte* (80°Shore) und der *Gummiplatte Para* (40°Shore) anhand der ermittelten Kennwerte der einzelnen Faseragglomerate deutlich. Während die Kurvenverläufe der Agglomeratporositäten beider Wandbelagsreihen lediglich einen geringen Unterschied aufweisen, zeigen die weiteren Eigenschaftswerte der Faseragglomerate deutlichere Unterschiede im Bereich geringerer Füllgrade (siehe Abbildung 6-16).

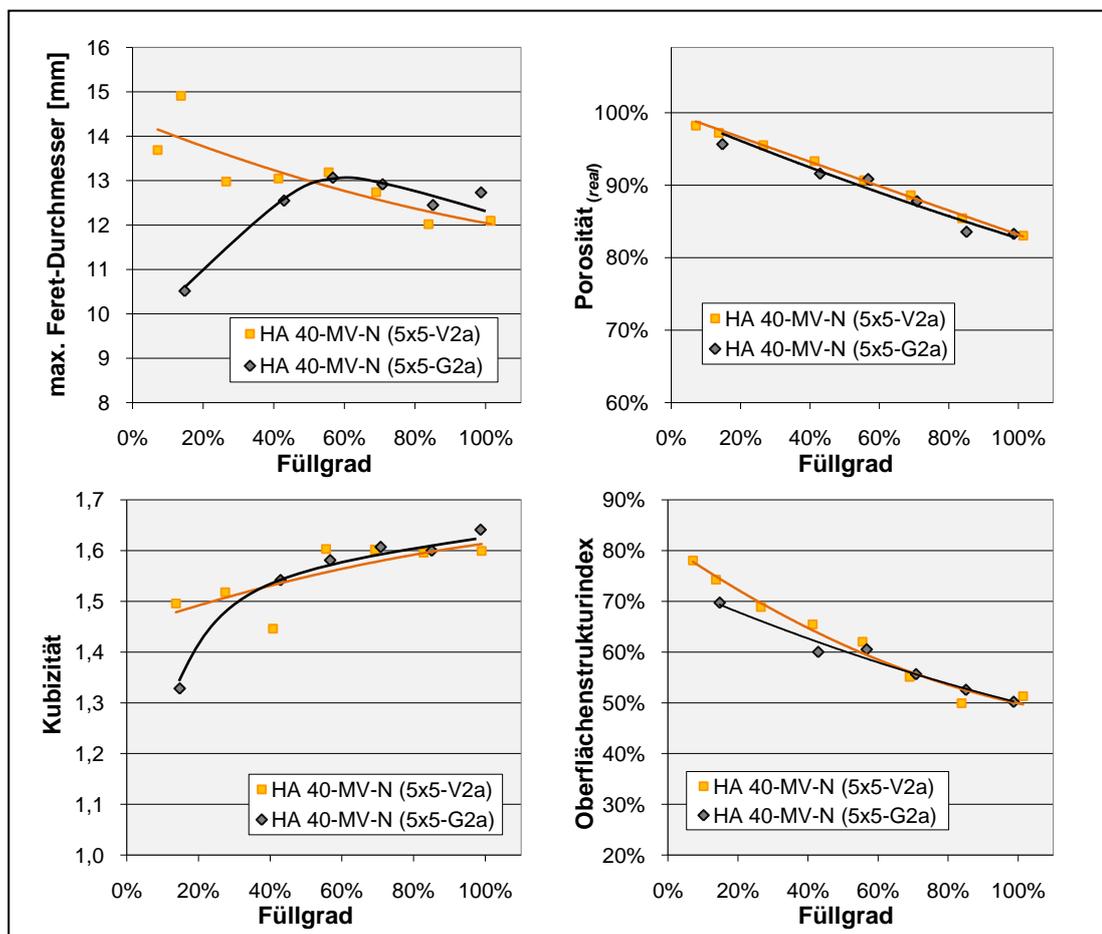


Abbildung 6-16 Verschiebung der Agglomerateigenschaften aufgrund unterschiedlicher Wandbeläge

So zeichnen die Faseragglomerate des mit der Gummiplatte ausgekleideten Rollganges bei geringerem Füllgrad kleinere räumliche Abmessungen, Kubizitäten und Oberflächenstrukturindizes als bei der Variante mit der Vulkollan-Platte aus. Dieses ist auf die bessere Haftwirkung zwischen Faser- und Wandmaterial zurückzuführen, so dass es schon bei geringen Faservolumina (geringer Druck der Fasern gegen die Wandung) zu einem genügenden Widerstandsmoment und damit zu einer ausreichenden Rotation des Fasergefüges kommt. Hierbei kommt es zur Bildung einer geschlosseneren Agglomeratoberfläche (5% geringerer Oberflächenstrukturindex). Der geringere Anteil an herausstehenden Fasern führt zu geringeren maximalen Feret-Durchmessern und so zu geringeren Kubizitäten. Da ab einem Füllgrad von etwa 55% das Fasermaterial einen ausreichend großen Druck auf die Rollgangswandungen ausübt, ist der Unterschied der Reibwiderstände des Wandungsbelages nicht mehr die entscheidende Einflussgröße. So weisen die betrachteten Faseragglomerateigenschaften unabhängig des Rollwandbelages nahezu deckungsgleiche Verläufe auf.

Die geringfügige Abweichung der maximalen Feret-Durchmesser bei einem Füllgrad > 55% kann darin begründet sein, dass das Agglomerat die weichere Gummiplatte elastisch verformt und so den Rollgang geringfügig weitet. Der Einfluss der Elastizität des Wandbelages wird in der Darstellung des Porositätsverlaufes der befeuchteten Faseragglomerate ebenfalls ersichtlich (siehe Abbildung 6-17).

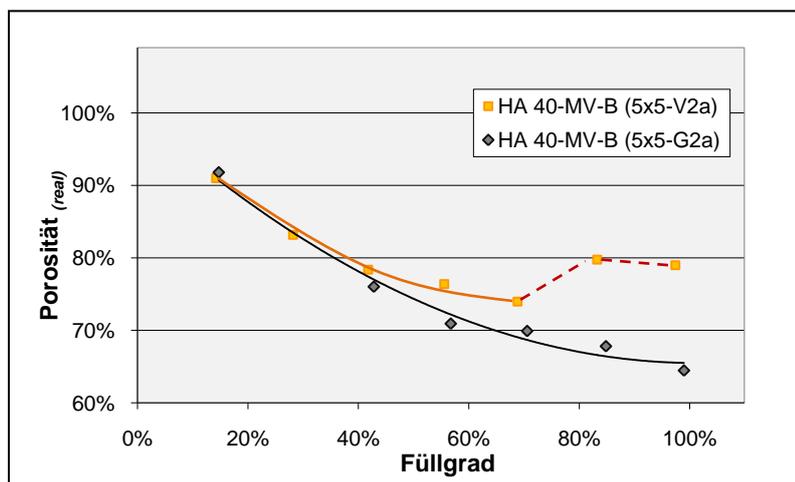


Abbildung 6-17 Rollgangsbelagsabhängiger Porositätsverlauf der Agglomeration befeuchteter Fasern

Während der Porositätsverlauf der befeuchteten Faseragglomerate im Rollgang mit der härteren Vulkollan-Platte nach dem Durchlaufen eines Porositätsminimums von etwa 74% (\cong Füllgrad 70%) deutliche Fehlstellen bzw. Risse in der Agglomeratstruktur aufweist (Zunahme der Porosität), stellt der Trendverlauf der Porosität der Agglomerate

des mit der Gummiplatte ausgekleideten Rollganges einen stetig fallenden Kurvenverlauf gegen einen Grenzwert von ca. 65% bei einem Füllgrad von 100% dar. Aufgrund einer ähnlichen Rissbildung bei der Überfüllung des Rollganges liegt hier der Schluss nahe, dass in dem mit der Gummiplatte ausgekleideten Rollgang den Agglomeraten ein größerer Raum zur Verfügung stand. Ein weiterer Ansatz des besseren Agglomerationsverhaltens mit dem weicheren Rollgangsbelag kann daran liegen, dass durch das Eindrücken des Agglomerates in den Wandungsbelag eine stärkere Walkbewegung in dessen innere Struktur induziert wurde und so eine dichtere Faserpackung hervorgerufen wurde (Skizze siehe Anhang).

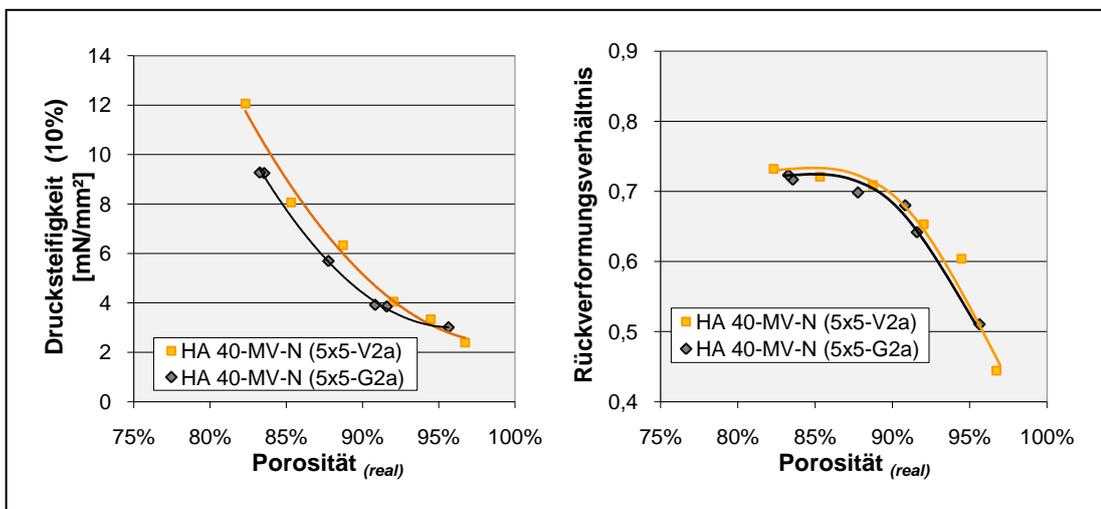


Abbildung 6-18 Festigkeitswerte der Belagsreihen (5x5-V2a) und (5x5-G2a)

Bei der Betrachtung der Festigkeitswerte beider Rollgangsauskleidungen werden nur geringe Abweichungen der Werte deutlich (siehe Abbildung 6-18). Aufgrund der gleichen Orientierung der Reibschlusswandungen und der fast deckungsgleichen Porositätsverläufe sollten die Festigkeitskennwerte der unterschiedlichen Auskleidungsmaterialien gleich sein. Vom theoretischen Ansatz eines stärkeren Walkens des Fasergefüges bei der weicheren Gummiplatten-Auskleidung wäre, entgegen der ermittelten Trendverläufe, eine höhere Druckfestigkeit zu erwarten gewesen. Die geringere Druckfestigkeit bei der weicheren Auskleidungsvariante kann zum einen auf Messungenauigkeiten zum anderen auf einen möglichen Faseraufschluss (Abnahme der Faserdicke) aufgrund einer höheren Walkeinwirkung auf das Fasergefüge zurückgeführt werden. Der Nachweis eines weiteren Faseraufschlusses innerhalb des Rollagglomerationsprozesses wurde über Versuchsreihen unterschiedlicher Rollstrecken geführt (siehe Unterkapitel 6.1.6).

6.1.3 Einfluss der Faserbefeuchtung auf relevante Agglomerateigenschaften

Die Faserfeuchte sowie die Oberflächenfeuchte des zu agglomerierenden Fasermaterials haben einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des erzeugten Agglomerates. So bewirkt eine Befeuchtung neben der schon dargestellten Beeinflussung der Makrogestalt (siehe Unterkapitel 6.1.1) eine stärkere Verdichtung des Fasergefüges, was eine Verschiebung der räumlichen Kennwerte sowie der Festigkeitswerte hervorruft. Ob diese Eigenschaftsverschiebungen von Vor- oder Nachteil sind, ist von dem jeweiligen Anwendungsgebiet abhängig. Die vorliegenden Kapillarkräfte haben neben dem Einfluss auf die Eigenschaften des Grünkörpers eine Auswirkung auf das Agglomerationsverhalten. Im Vergleich zum Agglomerationsprozess mit trockenen Fasermaterialien erhöht sich durch eine Faserbefeuchtung die Gleit- bzw. Haftreibung (siehe auch Abbildung 6-4), so dass ein Verschieben des Fasergefüges beim Walken innerhalb des Prozesses beeinträchtigt wird. Neben einer Erwärmung bei längeren Agglomerationszeiten wurde auch eine füllgradabhängige Rissbildung an den Grundseiten des Faseragglomerates beobachtet, auf die im späteren Verlauf näher eingegangen wird. Da es bei der Agglomeration zwischen zwei Reibschlusswänden unabhängig vom Feuchtezustand zur Bildung zylindrischer Makrogestalten kommt, wurde eine Einflussanalyse der Faserbefeuchtung am Beispiel der Rollgangsvariante (5x5-G2a) durchgeführt. In der Gegenüberstellung dieser Messkurvenverläufe werden die Einflüsse einer Befeuchtung auf die Kennwerte des getrockneten Faseragglomerates deutlich (siehe Abbildung 6-19).

Die Hintergründe der abnehmenden räumlichen Kennwerte des Faseragglomerates wie Feret-Durchmesser, Porosität, Oberflächenstrukturindex und Kubizität liegen zum einen in der Erweichung der Fasern (Minderung des Biegeverbandes) und zum anderen in den hervorgerufenen Kapillarkräften in den Zwickelbereichen sich berührender Fasern (siehe auch Kapitel 3). Somit wiesen die befeuchteten Agglomerate kaum Faserabspreizungen und zudem eine geringere Neigung zur Reexpansion auf. Bei einem Füllgrad von 99% stellt sich bei der befeuchteten Versuchsreihe ein räumlicher Reexpansionsfaktor von kleiner 3 ein, was einen mittleren Feret-Durchmesser von 8 mm und eine Porosität von 65% beinhaltet. Hingegen wies die Versuchsreihe der im Normzustand erzeugten Faseragglomerate mit einem Reexpansionsfaktor von 6 eine deutlich höhere Porosität (83%) auf.

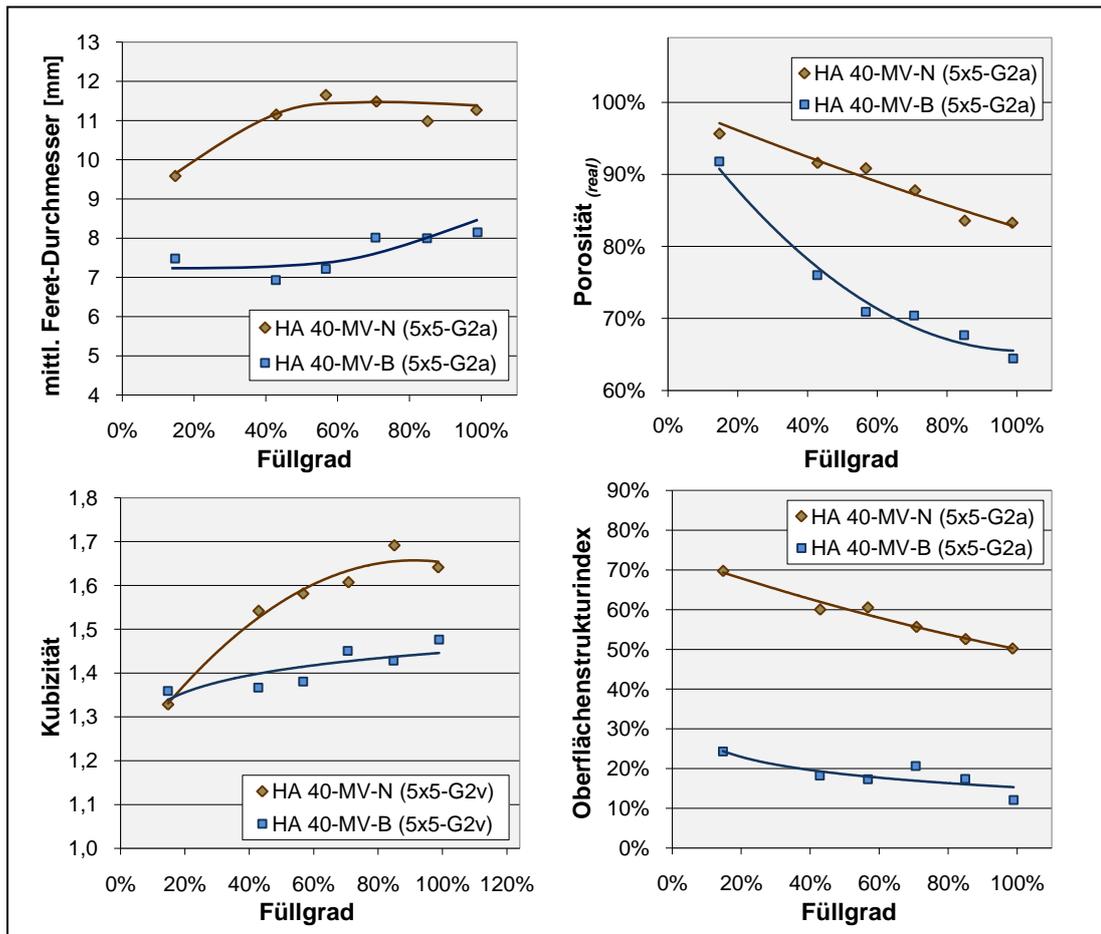


Abbildung 6-19 Gegenüberstellung feucht und im Normzustand erzeugter Faseragglomerate der Rollgangskonfiguration (5x5-G2a)

Bei dem räumlichen Reexpansionsfaktor bleibt zu beachten, dass die Ausdehnungen nach der Entspannung des Faseragglomerates in axialer und radialer Richtung des Agglomerates trotz quadratischen Rollgangsquerschnitt voneinander abweichen (siehe Abbildung 6-20). Dies gilt es, insbesondere bei der gezielten Erzeugung von geometrischen Produktabmessungen (Höhe sowie Durchmesser) zu beachten.

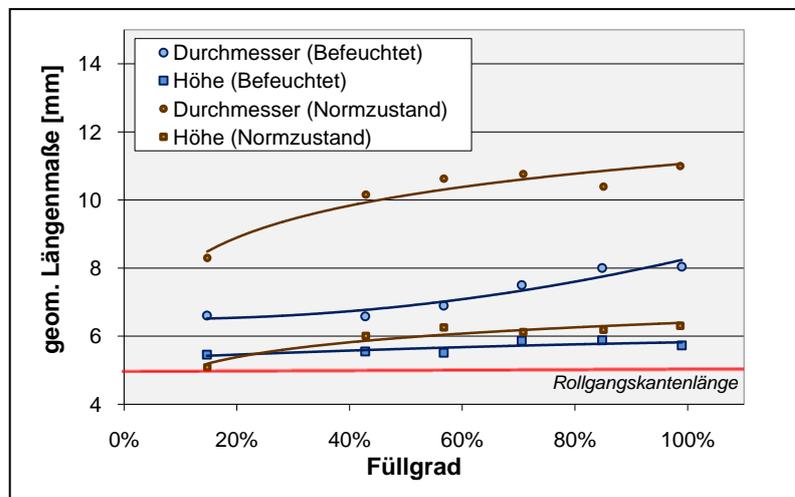


Abbildung 6-20 Geometrische Abmessung bei unterschiedlichem Feuchtezustand des Fasereduktes

Durch die unterschiedlich gewichtete Reexpansion nimmt der Agglomeratdurchmesser der nicht befeuchteten Versuchsreihe bei einem Füllgrad von 98% um 119,9% zu, wogegen die Agglomerathöhe nur um 26,1% ansteigt. Somit kommt es zu der Ausbildung einer nicht quadratischen Seitenansicht. Die Reexpansion des feucht hergestellten Faseragglomerates fällt mit 60,1% in radiale und 17,6% in axiale Richtung geringer aus. Im Mittel überstieg die radiale Reexpansion die axiale für trocken erzeugte Faseragglomerate um das 4,77-fache, für feuchterzeugte um das 3,28-fache.

Ein weiterer Feuchteinfluss wird beim Vergleich der Oberflächenstrukturindizes deutlich. Im Mittel nahm der Oberflächenstrukturindex um Zweidrittel ab. Der Wert der feucht erzeugten Faseragglomerate lag ab einem Füllgrad von 35% unterhalb von 20% (siehe Abbildung 6-19). Eine Neigung, sich mit benachbarten Faseragglomeraten zu verhaken, kann bei diesen Produkten nicht mehr festgestellt werden. Die Kubizitäten lagen über dem betrachteten Füllgradsbereich schwankend bei $1,431 \pm 5\%$. Ideale Rotationszylinder (Höhe = Durchmesser) weisen hingegen einen Wert von 1,414 auf. Der Hauptgrund der höheren Kubizität liegt in der nicht ideal kreisrunden Grundfläche des Faseragglomerates (siehe Abbildung 6-21) sowie in einer stärkeren Reexpansion in radialer Richtung. Eine Abweichung der Kubizität der Seitenansichten in negativer Richtung wurde durch abgerundete Kanten sowie bauchigen Seitenwände hervorgerufen (Kennwerte der Seitenansichten liegen unterhalb des Kurvenverlaufes eines idealen Rechteckes).

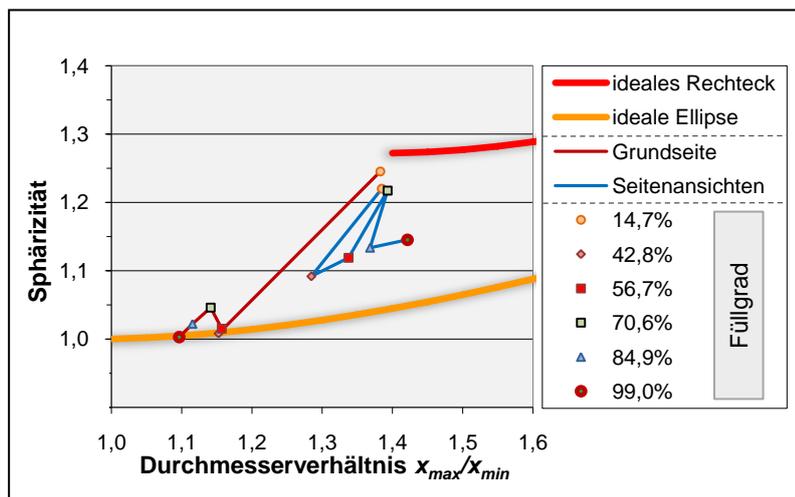


Abbildung 6-21 Geometrischer Verlauf der Projektionsflächen der befeuchteten Versuchsreihe HA 40-MV-B (5x5-G2a)

Nach Abtrocknen des Wassers wird neben den vorliegenden Formschlussbindungen eine weitere Strukturfestigkeit durch auskristallisierende, fasereigene Bindemittel wie Pektin hervorgerufen (Feststoffbrückenbindung). So ist nach einer Trocknung bei Normklima eine Steigerung der Drucksteifigkeit (10%ige Verformung) zu beobachten.

In Abhängigkeit vom Füllgrad stellt sich aufgrund des Porositätsverlaufes eine Grenzwertfunktion bei einen Wert von ca. 150 mN/mm^2 ein und weist somit bei einem Füllgrad von 100% eine 16,3-fache Drucksteifigkeit gegenüber den trocken erzeugten Faseragglomeraten auf (siehe Abbildung 6-22). Zudem besaßen die Agglomerate der befeuchteten Hanffasern ein höheres Rückverformungsverhältnis. Aufgrund der Wertestreueung und um ausschließen zu können, dass die Zunahme der Festigkeitskennwerte aufgrund einer Faserbefeuchtung nicht allein auf der Minderung der Porosität bei gleichem Füllgrad beruht, wurden die erzeugten Faseragglomerate in Porositätsklassen eingeteilt und deren Mittelwerte dem Kurvenverlauf der nicht befeuchteten Faseragglomerate gegenüber gestellt (siehe Abbildung 6-23).

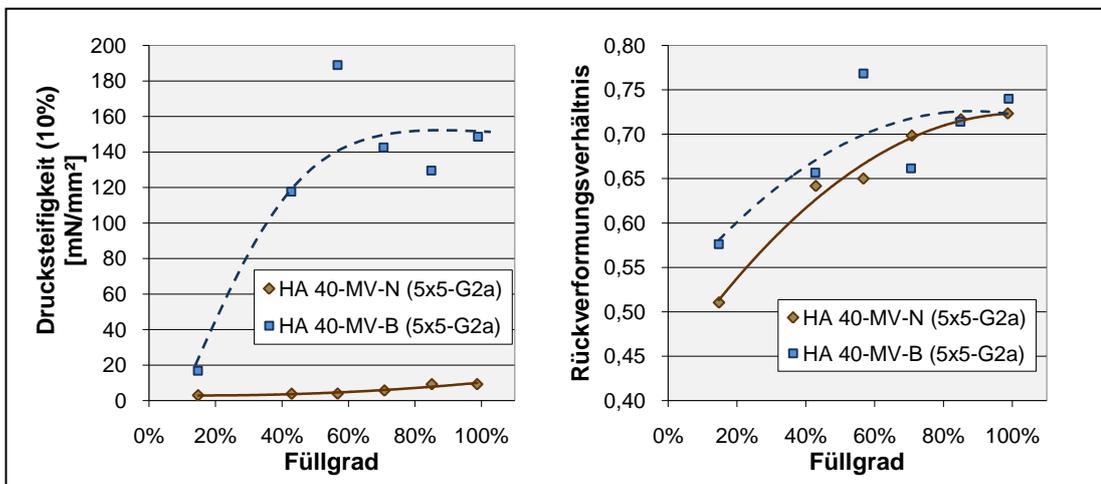


Abbildung 6-22 Festigkeitsverschiebung aufgrund der Faserbefeuchtung

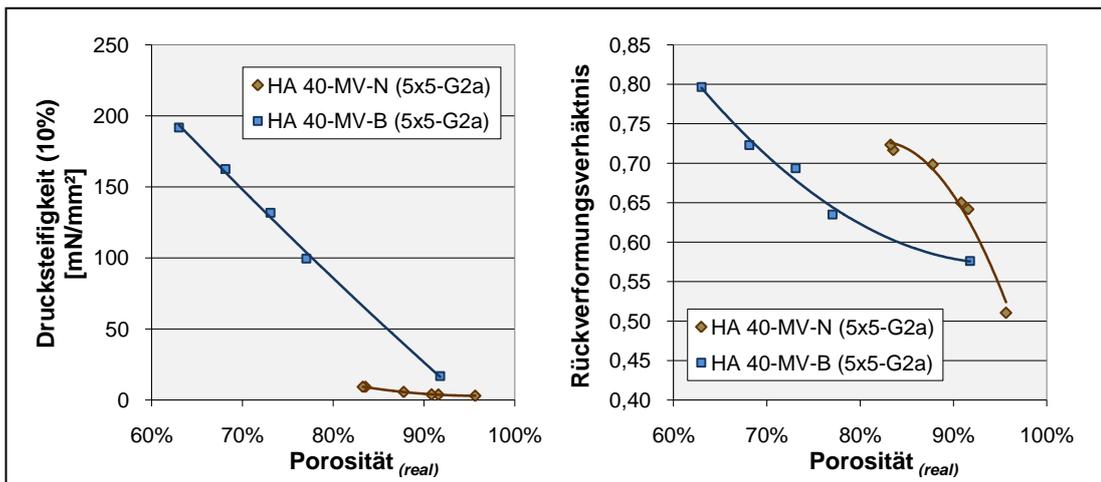


Abbildung 6-23 Festigkeitssteigerung aufgrund Feuchtagglomeration (gemittelte Porositätsklassen)

Wie in den Untersuchungen unterschiedlicher Reibschlussbeläge gezeigt wurde, sind die porositätsabhängigen Festigkeitskennwerte nahezu deckungsgleich. Im Fall der Befeuchtung des Fasermaterials lässt sich hingegen eine Steigerung der Druckfestigkeit

bei gleicher Agglomeratporosität feststellen. Dieser Festigkeitszuwachs beruht somit auf der Bildung von Feststoffbrücken in den Zwickelbereichen des Fasergefüges. Wie zu erwarten, wiesen die feucht erzeugten, drucksteiferen Faseragglomerate ein vergleichsweise geringeres Rückverformungsverhältnis auf. Während die im Normzustand hergestellten Faseragglomerate bei einem Füllgrad von 92% ein Rückverformungsverhältnis von 0,64 zeigten, lag das Verhältnis bei den feucht agglomerierten Körpern bei 0,58. Diese Werte entsprechen bei der stattgefundenen 10%igen Verformung einem plastischen Verformungsanteil von 36% bzw. 42%. Dieses bedeutet, dass die trocken-agglomerierten Faseragglomerate elastischer sind und nach einer Verformung zu einem höheren Prozentsatz ihre ursprüngliche Gestalt wieder annehmen.

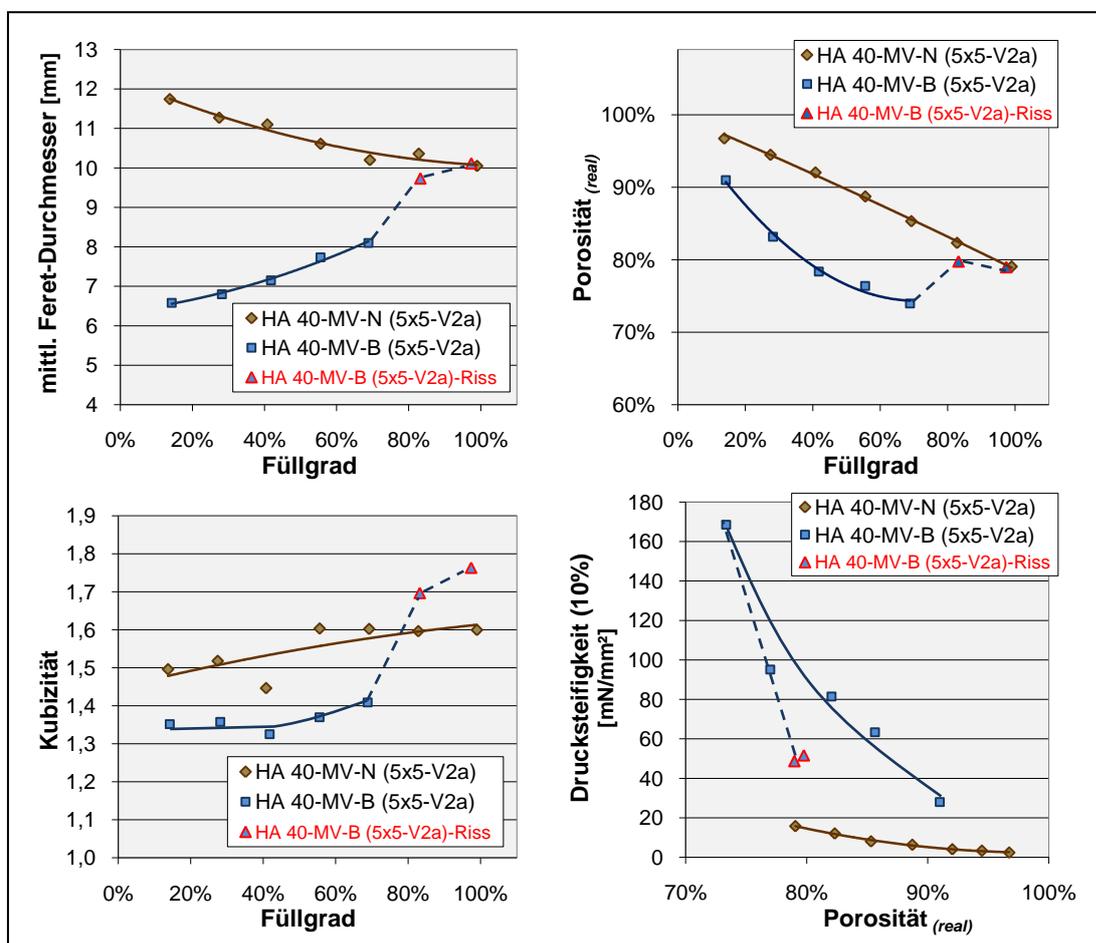


Abbildung 6-24 Auswirkungen der Rissbildung bei der Agglomeration feuchter Fasern

Abweichend zu dem Agglomerationsergebnis des mit der Gummiplatte Para ausgekleideten Rollganges ((5x5-G2a); siehe Abbildung 6-19), trat bei den Versuchsreihen mit der Vulkollan-Platte als Rollgangsbelag ((5x5-V2a); siehe Abbildung 6-24) eine Rissbildung der Agglomeratstruktur an den Grundseiten auf. Die Messwertkurven sind bis zum Einsetzen des Aufreißens vergleichbar. Bis zu einem Füllgrad von 69% zeigten die

Grundseiten des Faseragglomerates keine Auffälligkeiten. Die Faseragglomerate oberhalb eines Füllgrades von 83% wiesen hingegen eine deutliche Rissbildung auf, was auch anhand der Messwertverlaufskurven deutlich wird.

Aufgrund der entstandenen Risse kommt es zu einem Sprung der Werte der entsprechenden Charakteristika bis zur Angleichung an die Verlaufskurve der Faseragglomerate, die ohne die Zugabe von Wasser erzeugt wurden. Zur Bildung von Rissen kommt es, wenn das aufgebende Faservolumen nicht mehr in der Lage ist, im Rollgang um eine Achse zu rotieren, sondern sich im Rollgang in die Länge streckt. Somit wird keine ideale Rotation um eine Achse, sondern vielmehr eine entgegengesetzte Relativbewegung mit jeweiligem Umkehrpunkt in den Spitzen hervorgerufen. Dieses Verhalten kann sich im Verlauf der Rollstrecke relativieren, da durch das Walken des Faserkollektives das Gefüge soweit verdichtet wurde, dass eine ideale Rotation um ein Zentrum stattfand. Die anfänglich gebildeten Risse schließen sich, liegen dennoch als Störung der Struktur vor. Diese Art der Rissbildung kann mit einer, auf die letztendliche Rollgangsabmessung, konisch zulaufende Anfangsstrecke gemindert werden. Vorteil bei der Nutzung der Gummiplatte Para ist neben dem größeren Reibwiderstand die größere Dicke und die höhere Elastizität des Materials. So wird bei einer geringen Überfüllung am Anfang des Rollganges der Wandbelag eingedrückt, was bei der Vulkollan-Platte nur in deutlich geringerem Maße möglich ist.

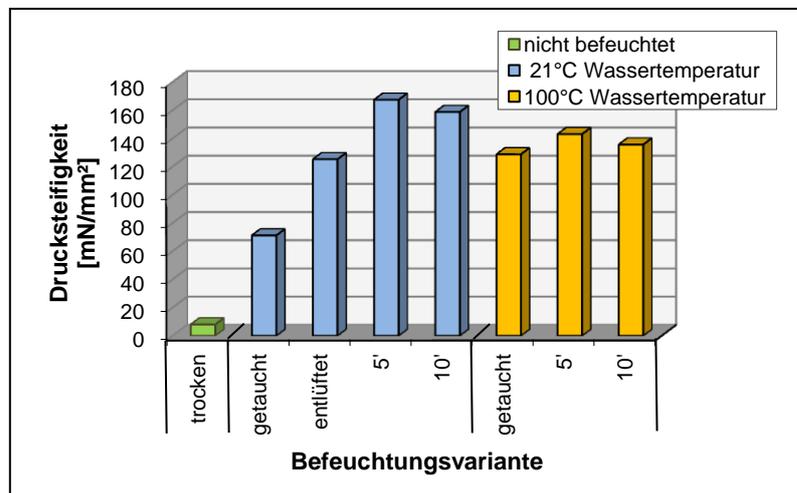


Abbildung 6-25 Befeuchtungsvarianten HA 40-100-FV (5x5-O2v)

In weiteren Versuchen zeigte sich, dass die Art und Weise der Befeuchtung einen weiteren Einfluss auf die Festigkeitswerte der Rollagglomerate besitzt (siehe Abbildung 6-25). So wiesen die Faseragglomerate beim kurzen Befeuchten der Hanffasern in 21°C warmem Wasser nur teilweise eine Benetzung der Faseroberfläche auf, so dass sich eine im Vergleich zu voll benetzten Faseroberflächen geringere Festigkeit einstellte

(71,3 mN/mm^2 bzw. 125,3 mN/mm^2). Durch gezieltes Entlüften des Faserkollektivs konnte diese Oberflächenbenetzung realisiert werden. Eine weitere Festigkeitssteigerung stellte sich durch eine Verlängerung der Einweichzeit ein. So betrug die Drucksteifigkeit nach einer fünfminütigen Befeuchtungszeit bei einem Füllgrad von 85% 167,5 mN/mm^2 . Nach einer Einweichzeit von 10 *min* hingegen nahm die Drucksteifigkeit wieder auf einen Wert von 158,8 mN/mm^2 ab, was auf ein Auswaschen der fasereigenen Bindemittel zurückzuführen ist.

Bei einer Befeuchtung des Fasermaterials in siedendem Wasser wurde schon bei einem kurzzeitigen Eintauchen eine weitestgehend vollständige Oberflächenbenetzung hervorgerufen, so dass die Drucksteifigkeit (124,8 mN/mm^2) entsprechend des Versuches in 21°C temperiertem Wasser mit zusätzlicher Entlüftung entsprach. Auch bei der Versuchsreihe mit siedendem Wasser zur Befeuchtung der Fasern stellte sich eine Festigkeitszunahme bei einer fünf- bzw. zehnmütigen Einweichphase ein. Diese lag mit einer Drucksteifigkeit von 143,1 mN/mm^2 bzw. 135,7 mN/mm^2 jedoch deutlich unterhalb der entsprechenden Werte in 21°C warmem Wasser, so dass wiederum von einer Auswaschung des fasereigenen Bindemittels ausgegangen werden kann. Die weiteren Kennwerte der einzelnen Faseragglomerate wiesen keine tendenziellen Abweichungen zueinander auf.

6.1.4 Faserlängeneinfluss

Die Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Faserlängen wurden mit einem Füllgrad von 85% in der Rollgangsvariante (5x5-G2a) durchgeführt. Für die Versuche wurde das Kalfaterband per Hand auf Längen 10, 20, 30, 40 sowie 50 *mm* geschnitten. Da das verwendete Kalfaterband im Grundzustand eine Faserlängenverteilung aufwies (siehe auch Kapitel 2.4) und dessen Faserorientierung nicht absolut parallelisiert vorlag, wiesen auch die Faserschnitte keine gleichmäßigen Längen auf (siehe Tabelle 6-4; Anhang).

Tabelle 6-4 Kennwerte der Faserlängen-Anzahlverteilung verschiedener Faserschnittlängen

Schnittlänge	Verteilungskennwerte			Faserlängenverhältniszahl Rollgangsvariante (5x5-G2a)
	Mittelwert	Medianwert	Maximalwert	
10 mm	10,21 mm	7,13 mm	34 mm	1,43
20 mm	14,63 mm	12,97 mm	39 mm	2,59
30 mm	18,98 mm	14,81 mm	58 mm	2,96
40 mm	25,29 mm	19,27 mm	65 mm	3,85
50 mm	27,75 mm	22,40 mm	66 mm	4,48

Für eine mögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Rollgangsabmessungen wird die Faserlänge (Medianwert) auf den sich einstellenden Durchmesser des Faseragglomerates (Rollgangsbreite bzw. -diagonale) normiert. Dieses Verhältnis wird im Weiteren als Faserlängenverhältniszahl bezeichnet.

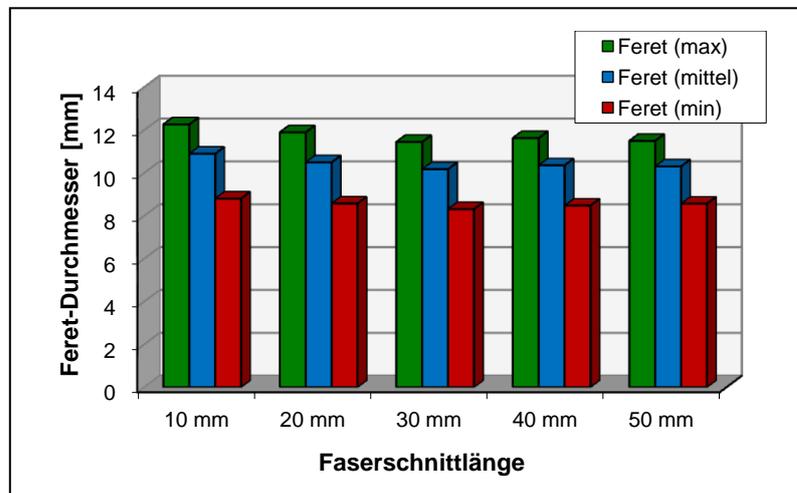


Abbildung 6-26 Durchmesser der Agglomerate unterschiedlicher Faserschnittlängen HA LV-100-N (5x5-G2a)

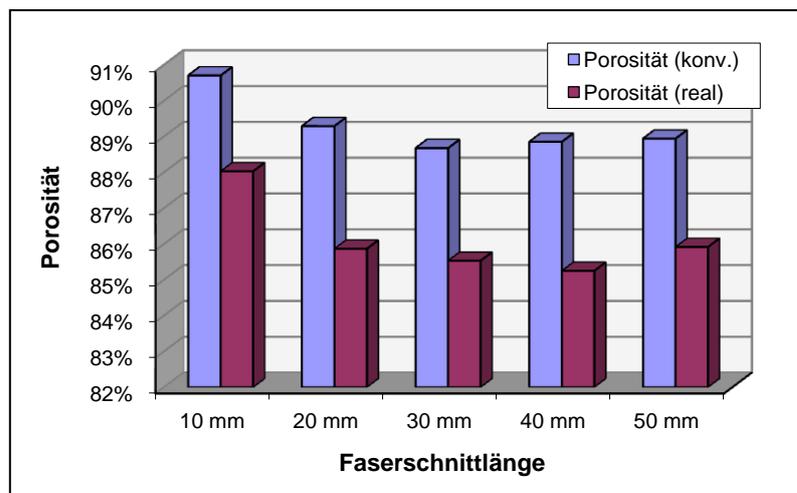


Abbildung 6-27 Faserschnittabhängige Porositäten HA LV-100-N (5x5 G2a)

Bei der Agglomeration der nicht befeuchteten Fasern zeigte sich eine Abnahme der Feret-Durchmesser sowie der Porositäten mit Zunahme der Faserschnittlänge im Bereich von 10 bis 50 mm (siehe Abbildung 6-26 und Abbildung 6-27). Während diese Wertminderungen bei Schnittlängen von 10 bis 30 mm eindeutig sind, fällt der Unterschied bei weiterer Zunahme der Schnittlänge geringer aus und liegt so im Unschärfebereich der Messwertabweichung. Die Ursache für die größeren räumlichen Ausmaße und die höhere Porosität der Agglomerate, bestehend aus kürzeren Faserlängen (10 und

20 mm Schnittlänge), liegt in der Abnahme des Hebelarmes begründet. Fasern gleicher Dicke besitzen denselben Biege­widerstand. Durch Erhöhung des Krafthebels (längere Fasern) reicht eine geringere Kraft aus, um eine Biegung der Faser zu bewirken bzw. diese in Biegung zu halten. Da dieses für die Versuchsreihen mit 10 und 20 mm Schnitt­längen nicht der Fall ist, kommt es zu einer stärkeren Entspannung der Fasern und somit zu einer Reexpansion des Faseragglomerates.

Bedingt durch die mit 88% relativ hohe Porosität wiesen die Agglomerate aus dem 10 mm Faserschnitt die geringste Drucksteifigkeit von $6,0 \text{ mN/mm}^2$ auf, hingegen lagen die weiteren Faserlängenvarianten um einen Wert von $8,3 \text{ mN/mm}^2 (\pm 3,1\%)$. Einen deutlicheren Einfluss besitzt die eingesetzte Faser- bzw. Schnittlänge auf die Zugfestigkeit der Agglomerate und somit auf das Auflöseverhalten. So erhöhen sich die benötigte Arbeit sowie die maximale Kraft zum Auseinanderziehen des einzelnen Faseragglomerates mit Zunahme der Faserlänge.

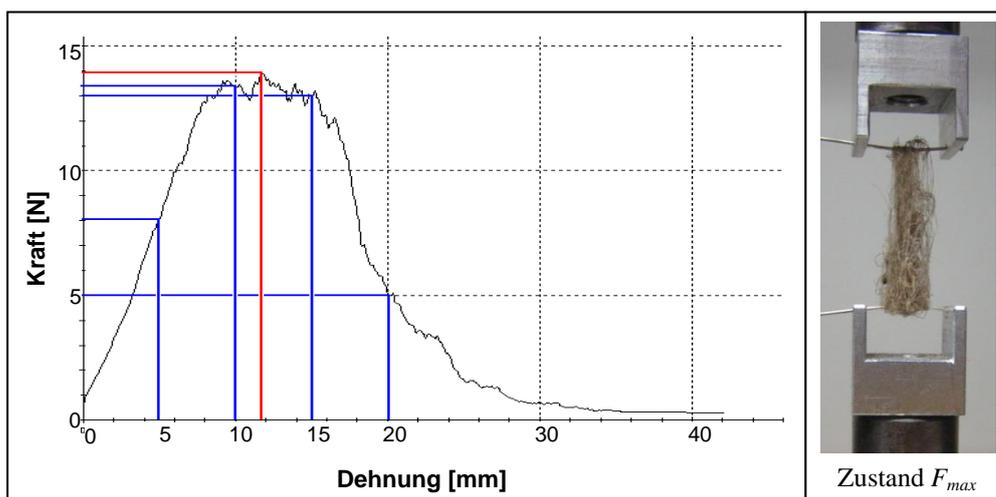


Abbildung 6-28 Verlauf des Zugversuches HA 50-100-N (5x5-G2a)

Während der Zugstrecke, vor Eintreten der maximalen Zugkraft, kommt es vornehmlich zu einer Streckung des Agglomerates und somit zu einer Verdichtung des Gefüges, was die Kontaktflächen zwischen den Fasern erhöht (siehe Abbildung 6-28). In dieser Phase kommt es zu einem nahezu linearen Anstieg der Widerstandskraft mit Zunahme der Dehnung. Im Kuppelbereich der Kraftverlaufskurve nimmt der Einfluss des Abgleitens der Fasern stetig zu bis es durch ein Gleichgewicht von Neubildung und Verlust der Faser-Faser-Kontaktflächen zu einem Maximum der Widerstandskraft kommt. Nach Überschreiten des Maximalwertes dominiert bei weiterer Zunahme der Zugstrecke das Abgleiten und Herausziehen einzelner Fasern, was zu einer stetigen Abnahme der Widerstandskraft führt.

Abgesehen von den Faseragglomeraten aus dem 10 mm Schnitt nimmt die maximale Widerstandskraft, die über die ganze Versuchsreihe gesehen auftrat, mit der Schnittlänge der Fasern annähernd linear zu (siehe Abbildung 6-29). Mit der Zunahme der eingebundenen Faserlänge nimmt auch die Zugstrecke zu, bei der die maximale Widerstandskraft des Agglomerates gegen das Auseinanderziehen vorliegt.

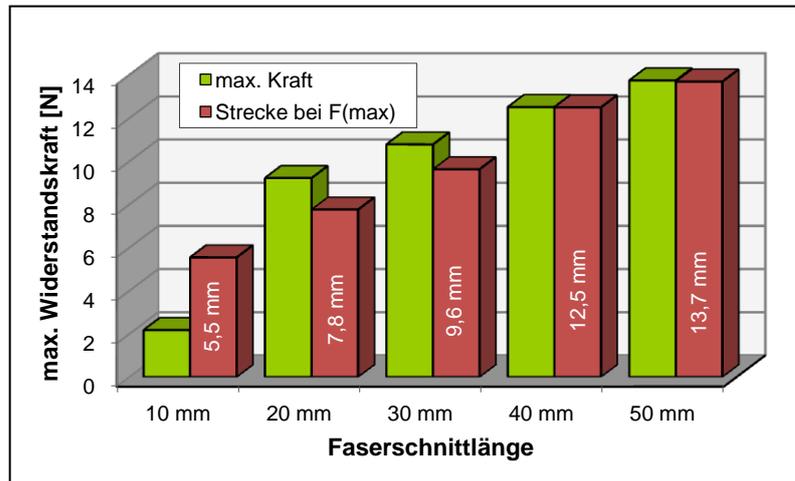


Abbildung 6-29 Gemessene maximal Kraft beim Auseinanderziehen untersuchter Faseragglomerate

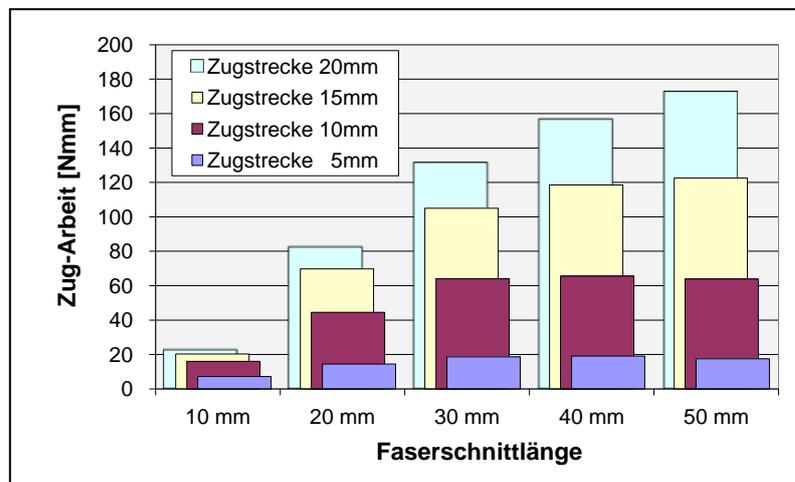


Abbildung 6-30 Benötigte Arbeit zum Auseinanderziehen trocken agglomerierter Fasern verschiedener Längen

Die erforderliche Arbeit zum Auseinanderziehen des Faseragglomerates wurde für vier zurückgelegte Zugstrecken in 5 mm Schrittingintervallen ermittelt (siehe Abbildung 6-30). Wie zu erwarten war, liegt die aufgewendete Arbeit der Faseragglomerate aus dem 10 mm Faserschnitt deutlich unterhalb der Arbeit, die für die Agglomerate größerer Faserlängen benötigt wurde. Da bei dieser Faserschnittlänge bereits bei einer Zugstrecke von 5 mm eine geringere Arbeit benötigt wurde, ist davon auszugehen, dass es

schon auf dieser Wegstrecke zu einem Herausziehen einzelner Fasern aus dem Gefüge kam. Anhand der Zugversuchsverläufe der Schnittreihen größerer Länge werden im Folgenden die Vorgänge im Gefüge des Faseragglomerates beschrieben.

Da die erforderliche Arbeit innerhalb des ersten Streckenintervalls (0-5 mm) der längeren Faserschnitte (20 bis 50 mm) bei mittleren 17,4 Nmm lag, kann davon ausgegangen werden, dass das Gefüge lediglich auseinandergezogen wurde, ohne dass es zum Abgleiten einzelner Fasern kam. Hierbei fand überwiegend eine Streckung des Agglomerates in Zugrichtung statt, wobei es zunehmend zu einem verstärkten Kontakt der einzelnen Fasern untereinander kam. Bedingt durch die größeren Reibflächen der Fasern im Agglomeratgefüge fällt die erforderliche Arbeit für das Zurücklegen des zweiten Streckenintervalls (5-10 mm) höher als die des ersten Streckenintervalls aus. Anhand der konstanten Werte des zweiten Intervalls der Messreihen des 30, 40 und 50 mm Faserschnittes wird deutlich, dass es bei den beschriebenen Versuchsreihen bis zu dieser Zugstrecke zu keinem nennenswerten Abgleiten (Herausziehen) der Fasern aus dem Gefüge kam. Hingegen wies die Messreihe des 20 mm Schnittes eine geringere erforderliche Arbeit auf. Dieses deutet auf eine Abnahme der Widerstandskraft hin, welche durch eine Minderung der inneren Kontaktflächen aufgrund des Herausziehens einzelner Fasern hervorgerufen wurde. Der Arbeitszuwachs, der innerhalb des dritten Streckenintervalls (10-15 mm) erforderlich ist, fällt zudem erneut geringer aus, was auf ein fortlaufendes Abgleiten von Fasern und so auf eine geringere Widerstandskraft zurückzuführen ist. Innerhalb der weiteren Zugstrecke nimmt die Kontaktfläche zwischen den Fasern stetig ab bis schließlich eine Trennung des Agglomerates in zwei Lager erfolgt. Dasselbe Verhalten der erforderlichen Arbeit der einzelnen Zugintervalle lässt sich auch bei den Messreihen größerer Faserschnittlängen beobachten. Hierbei wird erst bei einer größeren Zugstrecke ein Abgleiten der Fasern anhand einer geminderten Widerstandskraft gegen das Auseinanderziehen deutlich. Prinzipiell setzte die Trennung der Faseragglomerate aufgrund der Zugbeanspruchung etwa bei der Wegstrecke ein, die dem Medianwert der Faserlänge entsprach.

Allgemein wurde festgestellt, dass die gemessenen Widerstände gegen das Auseinanderziehen des Agglomeratgefüges neben den gebildeten Formschlussverbindungen vor allem auf den Reibwiderständen zwischen den einzelnen Fasern beruht. Diese wirken einem Abgleiten bzw. dem Herausziehen einzelner Fasern entgegen. Somit werden unterschiedliche Faserarten und Fasern, die durch verschiedene Herstellungsverfahren erzeugt wurden, bei gleicher Porosität und Faserlänge eine abweichende Widerstandskraft gegen das Auseinanderziehen aufweisen. Zudem kann die Zugabe oder Aktivierung von Bindemitteln eine weitere Steigerung der Festigkeit hervorrufen.

Durch die Befeuchtung der Fasern kommt es, wie schon im vorigen Abschnitt beschrieben, zu einer Bildung von Feststoffbrücken. Diese Feststoffbrücken behindern das Abgleiten der Fasern innerhalb des Agglomeratgefüges. Neben einer Erhöhung der Drucksteifigkeit bewirkt dies auch eine Steigerung der Widerstandskraft beim Auseinanderziehen der Faseragglomerate. Die maximalen Widerstandswerte liegen mehr als doppelt so hoch wie bei den trockenen agglomerierten Faseragglomeraten. Anhand der Abbildung 6-31 ist im Vergleich zu den trockenen agglomerierten Faseragglomeraten zu sehen, dass die Agglomerate bestehend aus dem 10 mm Schnittfasermaterial einen geringeren Abfall gegenüber denen des 20 mm Schnittes aufweisen.

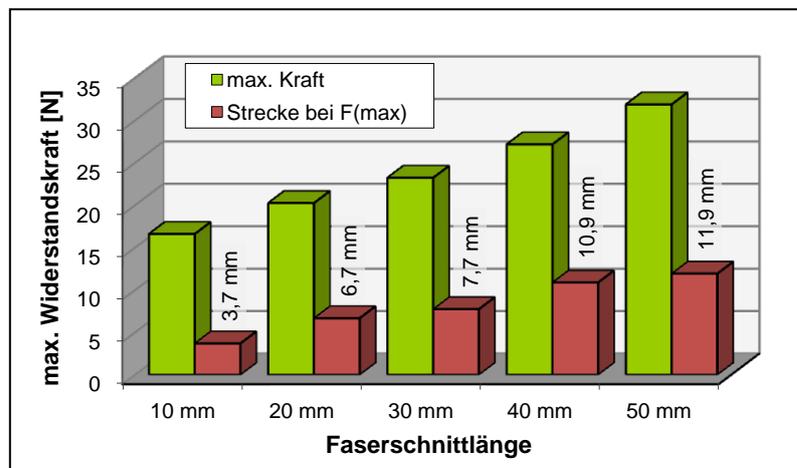


Abbildung 6-31 Maximale Zugkraft bis zur Agglomerattrennung bei feucht agglomerierten Körpern

Die feucht erzeugten Faseragglomerate weisen eine geringere Dehnung auf, bei der die maximale Zugkraft anliegt (z. B. 30 mm Faserschnitte: 7,7 mm (befeuchtet); 9,6 mm (trocken)). Bei dem Auseinanderziehen der feucht agglomerierten Fasern müssen neben der ersten Porositätsabnahme mit anschließendem Abgleiten der Fasern innerhalb des Gefüges vor allem die Feststoffbrücken aufgebrochen werden, um eine Bewegung innerhalb der Struktur im Faseragglomerat zu gewährleisten. Dieses wird anhand der Darstellung der aufgebrauchten Arbeit der einzelnen Zugstreckenintervalle deutlich (siehe Abbildung 6-32).

Hierbei erforderten alle Agglomerate zur Überwindung des ersten Zugintervalls nahezu den gleichen Arbeitsaufwand. Da die maximale Kraft bei den Agglomeraten aus Fasern des 10 mm langen Schnittes bei einer Zugstrecke von mittleren 3,7 mm auftrat (siehe Abbildung 6-31) ist davon auszugehen, dass es bei allen Agglomeratreihen innerhalb dieser Zugstrecke zu einem Bruch eines Großteils der Feststoffbrücken bzw. es zu einem Zerreißen verklebter Fasern kam. Da hierbei nicht alle Bindungen auf einmal

gelöst werden, kommt es bei einer Zugstreckenzunahme zum weiteren Aufbrechen der Feststoffbrücken bzw. zum Reißen vereinzelter Fasern (akustische Feststellung).

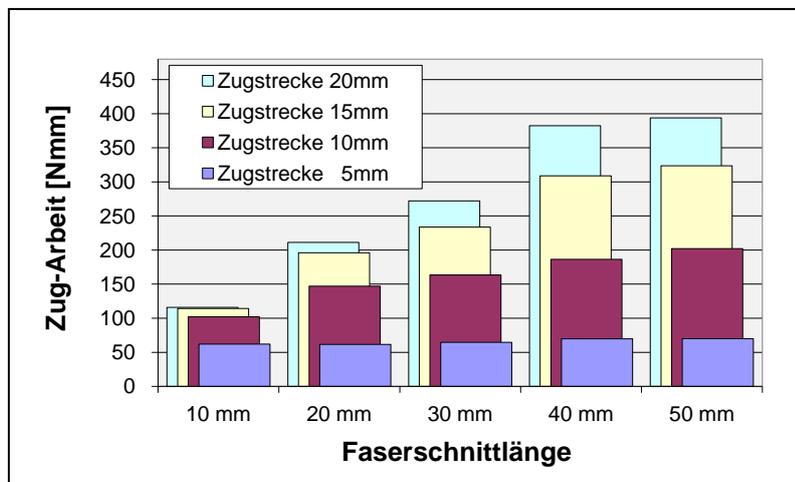


Abbildung 6-32 Benötigte Arbeit zum Auseinanderziehen von feucht erzeugten Faseragglomeraten

Die räumliche Ausdehnung sowie die hervorgerufene Porosität der feucht erzeugten Faseragglomerate unterschiedlicher Schnittlängen wiesen keine nennenswerten Abhängigkeiten von der Faserschnittlänge auf. Die Unterschiede aufgrund des kleineren Hebelarmes bei kürzeren Fasern wird bedingt durch die Kapillarwirkung der eingebrachten Flüssigkeit und der sich bei der Trocknung gebildeten Feststoffbrücken kompensiert, so dass keine bedeutungsvolle Abweichung der Reexpansionsneigung bei den einzelnen Versuchsprodukten nachgewiesen werden konnte.

6.1.5 Einfluss der Rollgangsabmessung

Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche kann die Größe des Faseragglomerates von entscheidender Bedeutung sein. Zur Darstellung der möglichen Einflüsse wurden die Ergebnisse dreier Rollgangsabmessungen mit quadratischem Querschnitt und den Seitenkanten 5 mm, 10 mm und 15 mm miteinander verglichen. Diese Untersuchungen wurden zum einen mit trockenen zum anderen mit befeuchteten Fasern durchgeführt. In beiden Fällen zeigt die Gegenüberstellung, dass es neben der zu erwartenden Vergrößerung der räumlichen Abmessungen (siehe Abbildung 6-33) zu weiteren Eigenschaftsverschiebungen kam (siehe Abbildung 6-34 bis Abbildung 6-36). Da es, wie im Unterkapitel 6.1.4 dargestellt, zu einer Beeinflussung des Agglomerationsergebnisses aufgrund unterschiedlicher Faserlängen kommt, wurden für eine fundiertere Aussage neben dem Faserschnitt von 40 mm entsprechend der Vergrößerung des Rollgangquerschnittes Faserschnitte von 80 bis 120 mm eingesetzt.

Bei der Rollgangserweiterung von 5x5 auf 10x10 mm kommt es durch die Verdopplung der Seitenkantenlänge zu einer Verachtfachung des Nutzvolumens. Bei der weiteren Vergrößerung auf 15x15 mm nimmt der Rollgang wieder um 5 mm je Kante zu, doch im Vergleich zum 10x10 mm Rollgang wird die Querschnittskante lediglich um das 1,5-fache länger, was eine Zunahme des Nutzvolumens um den Faktor 2,25 hervorruft. Entsprechend erfolgte eine Erhöhung des Faservolumens um diesen Faktor, um den Füllgrad der Messreihen konstant zu halten.

Der maximale Feret-Durchmesser des idealen Rotationszylinders beträgt das 1,414-fache der jeweiligen Kantenlänge (quadratischer Rollgangsquerschnitt). Die erzeugten maximalen Feret-Durchmesser (Raumdiagonale) liegen im Mittel über den betrachteten Füllgradsbereich bei einem Wert von 12,38 mm (5x5-G2a), 23,69 mm (10x10-G2a) bzw. 33,93 mm (15x15-G2a). Lediglich die Versuchsreihe des 5x5 mm Rollganges weist einen steigenden Durchmessererlauf mit Erhöhung des Füllgrades auf, was auf eine stärkere Reexpansionsneigung zurückzuführen ist. Die unterschiedlichen Faserschnittlängen der beiden größeren Rollgangsquerschnitte zeigten keine eindeutigen Abhängigkeiten auf (siehe Abbildung 6-33).

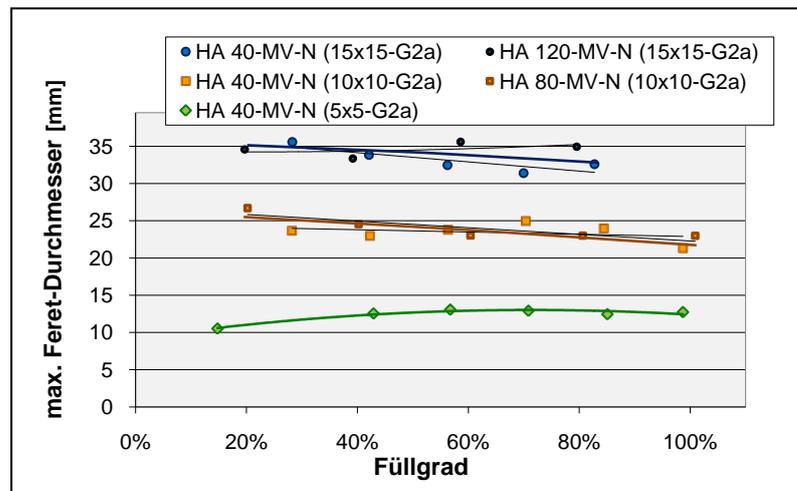


Abbildung 6-33 Verschiebung des Feret-Durchmessers aufgrund zunehmender Rollgangsabmessungen

Aufgrund der vorliegenden Kurvenverläufe und unter Vernachlässigung der Abweichung im Verlauf zunehmender Füllgrade lässt sich der maximale Feret-Durchmesser in Abhängigkeit von der Kantenlänge des Rollgangsquerschnittes mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,8% über die Gleichung 6-1 ermitteln.

$$\overline{x_{Fe,max}} \approx 77,877 - (0,1464 \cdot a_{RG} - 8,815)^2$$

Gleichung 6-1

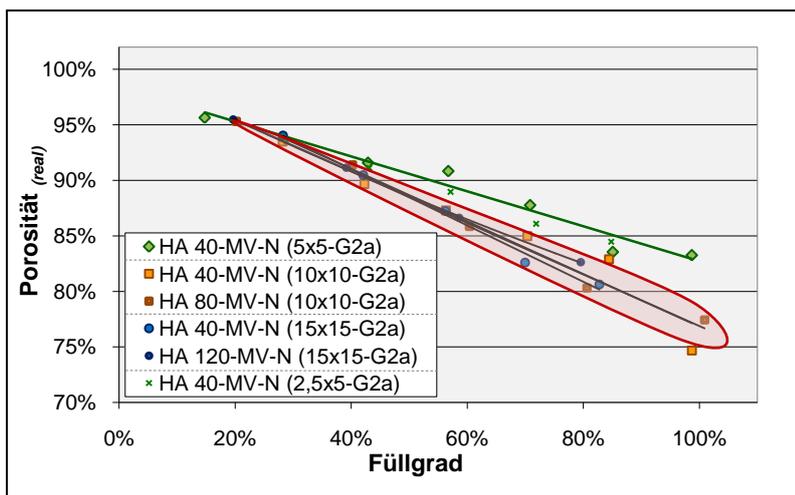


Abbildung 6-34 Porositätsverläufe der Agglomerate unterschiedlicher Rollgangsabmessungen

Entgegen der Erwartung kommt es in der Darstellung der Porositäten zu einer deutlichen Abweichung des Verlaufes der (5x5-G2a)-Reihe, wobei die Messwerte der weiteren Versuchsreihen innerhalb einer „Messwertwolke“ liegen, ohne das sich eine Abhängigkeit von den Rollgangsabmessungen oder von der Faserlängenverhältniszahl erkennen lässt (siehe Abbildung 6-34). Ein Grund für den geringeren Porositätsverlauf der Messreihe HA 40-MV-N (5x5-G2a) liegt in einem vergleichsweise stärkeren Reexpansionsverhalten des Faseragglomerates. Als Ursache hierfür wird die größere Biegebeanspruchung der Fasern aufgrund des geringeren Agglomeratsumfanges gesehen. Durch diesen geringeren Umfang muss die Faser für ein Einbinden in das Agglomerat stärker gebogen werden (kleinerer Biegeradius) als bei den Faseragglomeraten mit einem größeren Rotationsdurchmesser. So wiesen die eingebundenen Fasern eine höhere Spannung gegen die vorliegende Biegung auf.

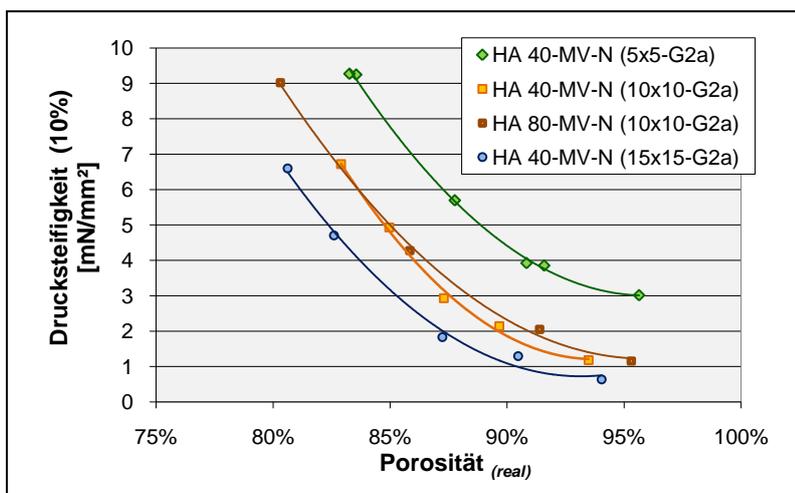


Abbildung 6-35 Drucksteifigkeiten der Faseragglomerate verschiedener Rollgangsgrößen

Diese Theorie der höheren Spannung des Fasermaterials innerhalb der Agglomerate hervorgerufen durch kleinere Biegeradien wird in der Darstellung der porositätsabhängigen Drucksteifigkeit bestätigt (siehe Abbildung 6-35). Mit Zunahme der Rollgangsabmessungen lässt sich eine Abnahme der Drucksteifigkeit bei der 10%igen Verformung feststellen. Hierbei zeigt sich, dass bei den Faseragglomeraten der Rollgänge $10 \times 10 \text{ mm}$ und $15 \times 15 \text{ mm}$ kein manifestierbarer Einfluss der Faserschnitlänge vorliegt.

Im Gegensatz zu den trocken erzeugten Faseragglomeraten war ein Faserlängeneinfluss auf die geometrischen Eigenschaften und Druckfestigkeiten bei dem Nassagglomertionsprozess nicht nachweisbar (siehe Unterkapitel 6.1.4). Ähnlich wie bei den trocken agglomerierten Versuchsreihen kommt es bei der Erweiterung der Abmessungen zu einer Vergrößerung des Faseragglomerates (siehe Abbildung 6-36). Hierbei nimmt der mittlere Feret-Durchmesser annähernd um den gleichen Faktor wie die Kantenlänge des Rollgangsquerschnittes zu.

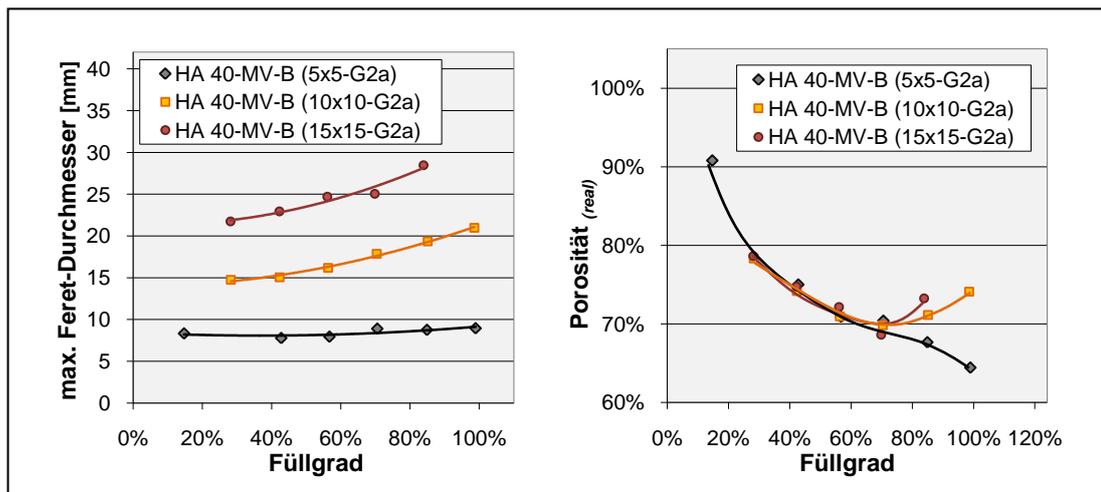


Abbildung 6-36 Eigenschaftsverschiebung durch unterschiedliche Rollgangsabmessung (befeuchtet)

Bei der Auswertung der Porosität in Abhängigkeit zum Füllgrad wird bei den Reihen im $10 \times 10 \text{ mm}$ und $15 \times 15 \text{ mm}$ Rollgang ab einem Füllgrad von ca. 70% der Einfluss von Rissbildungen deutlich. Während im Bereich geringerer Füllgrade die Porositätsverläufe nahezu identisch sind, kommt es ab diesem kritischen Füllgrad zu einem Wiederanstieg der Porositäten. Aufgrund der Beobachtung des Einflusses unterschiedlich weicher Reibschlusswandungen ist es wahrscheinlich, dass das Kompensationsvermögen der Wandung bei größeren Rollgangsabmessungen nicht ausreicht, so dass im Anfangsbereich der Rollstrecke keine zentrale Rotationsachse des aufgegebenen Fasergefüges möglich ist und so die Bildung von Fehlstellen induziert wird.

6.1.6 Eigenschaftsverschiebung aufgrund von Rollstreckenvariationen

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, genügt zur Bildung der Hanffaseragglomerate ein Anlagenumlauf im Rollagglomerationsteller ($s_{Roll,1} \approx 1.126 \text{ mm}$), um ein formstabiles Agglomerat zu bilden. Zudem besitzt die zurückgelegte Rollstrecke eine Beeinflussungsmöglichkeit der charakteristischen Eigenschaften des erzeugten Faseragglomerates. Während die geometrische Makrogestalt der Agglomerate unterschiedlicher Füllgrade keine Änderungen bei der Verlängerung der Rollstrecke aufwies, zeigte sich eine Abhängigkeit der weiteren Parameter wie dem mittleren Feret-Durchmesser, dem Oberflächenstrukturindex, der Porosität sowie der Drucksteifigkeit. Zur Darstellung der Einflussverläufe mit zunehmender Rollstrecke wurde die Klein-Versuchsreihe HA 40-100-N (5x5-V3)-RV herangezogen, wobei die Agglomerate jeweils 1, 2, 3, 5, 10 und 20 Anlagenumläufe zurücklegten (siehe Abbildung 6-37).

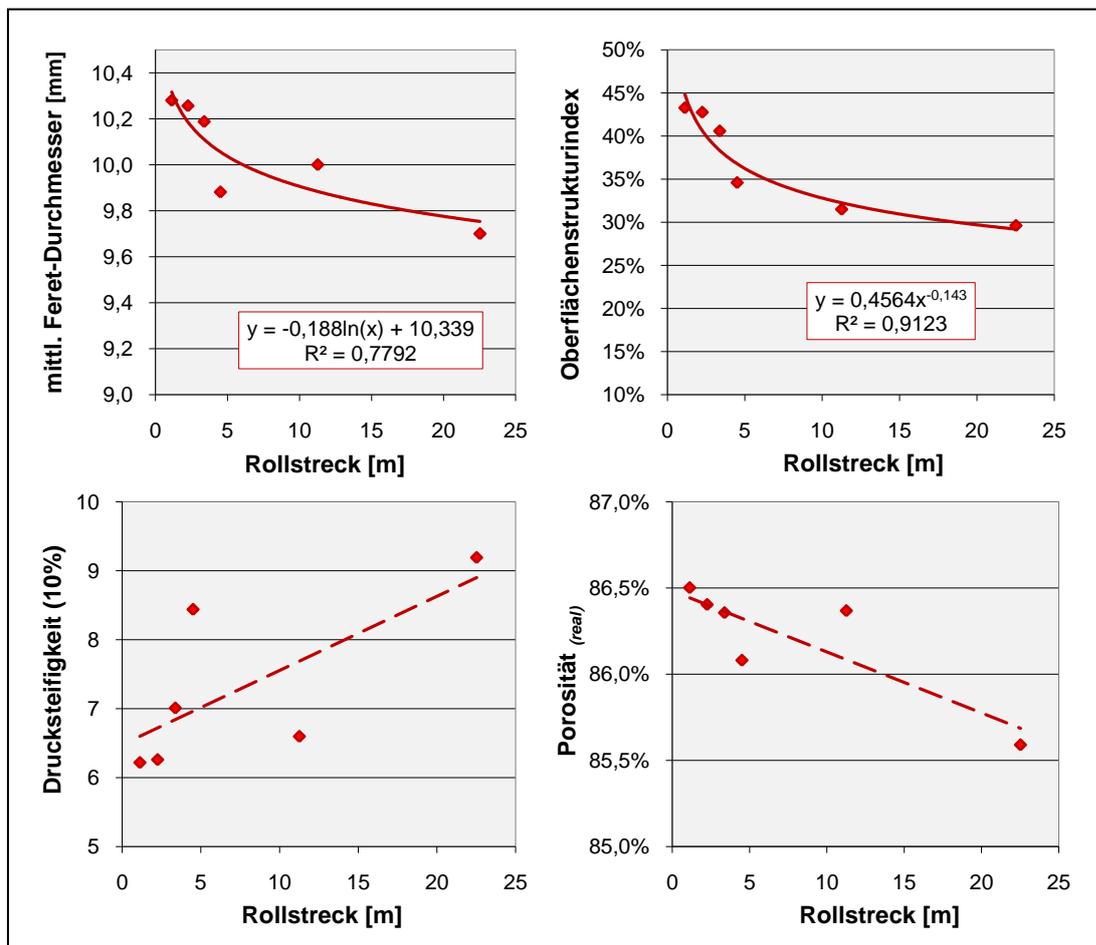


Abbildung 6-37 Einfluss der mittleren Rollstrecke HA 40-100-N (5x5-V3)-RV

Während sich aus den Messwerten der Feret-Durchmesser sowie des Oberflächenstrukturindex mit Rollstreckenverlängerung abnehmende Kurvenverläufe ermitteln ließen, können bei der Drucksteifigkeit sowie Porosität aufgrund der Streuung lediglich stei-

gende bzw. fallende Trendverläufe dargestellt werden. Der Hintergrund der Verschiebung der Messwerte ist neben der höheren Wahrscheinlichkeit eines Verhakens der Fasern aufgrund des öfteren Umwälzens des Gefüges bei einem möglichen Faseraufschluss zu suchen. Durch das wechsallastige Biegen der Fasern kann es so zu einer Verfeinerung der Faserdicke und teils auch zur Bildung kürzerer Faserfragmente kommen.

Eine mögliche Schädigung der Fasern durch permanente, wechselseitige Biegebelastung konnte in einem *Sinus-Dauerbiegeversuch* nachgewiesen werden. Nach 1000 Biegezyklen zeigten sich in mikroskopischen Betrachtungen der beanspruchten Stelle eine Aufspaltung der Faser (bzw. „Faserbündel“) in seine Unterstrukturen (Elementarfaser) (siehe Abbildung 6-38).

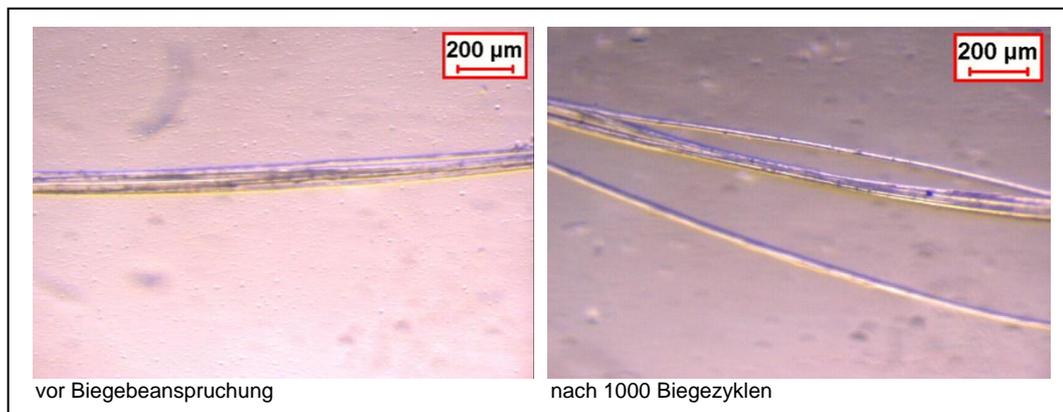


Abbildung 6-38 Vergleich einer Hanffaser vor und nach dem Dauerbiegeversuch

Dieser Dauerbiegeversuch dient lediglich als Indiz für eine mögliche Schädigung der Faserstruktur durch permanente Beanspruchung. Zu beachten bleibt, dass das Fasermaterial innerhalb des Agglomerationsprozesses nicht so erheblichen Belastungen ausgesetzt wird, da der Biegewinkel abgerundet und nicht, wie beim Dauerbiegeversuch, rechtwinklig ist. Zudem ist das Vorliegen einer wechsallastigen Beanspruchung innerhalb des Rollprozesses an ein und derselben Stelle fragwürdig. Um dennoch eine Aussage treffen zu können, ob durch den Rollagglomerationsprozess ein weiterer Aufschluss der Faserstruktur stattfindet, wurden Untersuchungen mittels AirFlow-Prinzips für Agglomerate unterschiedlicher Rollstrecken durchgeführt. Aus anlagentechnischen Gründen wurden hierfür Faseragglomerate der Untersuchungsreihe *HA 100-2250-N (15x15-G2a)* herangezogen, um eine ausreichende Füllung der Prüfkammer zu garantieren. In Anlehnung an die Empfehlung von *Otto et. al.* [R.O.'69] betrug die Porosität in der Prüfkammer 78,9%, was einem Füllgrad im Rollgang von ca. 60% entsprach.

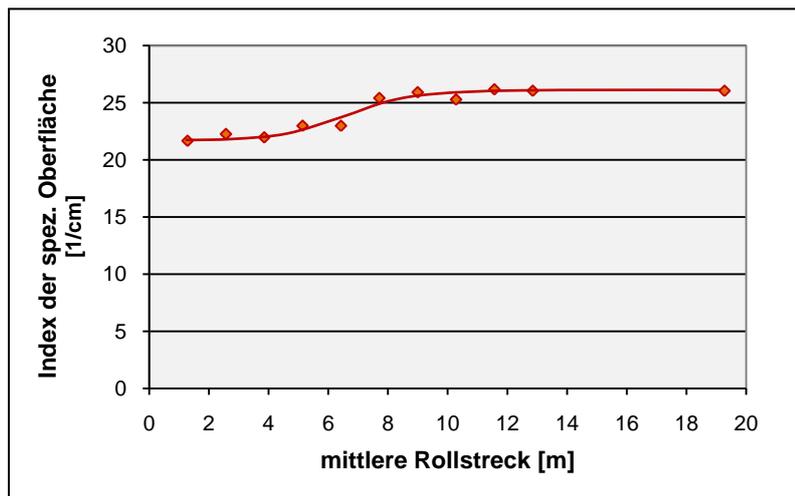


Abbildung 6-39 Nachweis eines Faseraufschlusses mittels AirFlow
HA 100-2250-N (15x15-G2a)

An Hand der Untersuchung lässt sich ersehen, dass es mit der Verlängerung der Rollstrecke zu einem weiteren Faseraufschluss kam. Dieser Aufschluss macht sich ab einer mittleren Rollstrecke von 4 m durch einen Anstieg des Index der spezifischen Oberfläche ersichtlich. Ab einer Rollstrecke von 8 m stagniert dieser Anstieg in einem konstanten Wert. Die Zunahme des Index der spez. Oberfläche und so auch die reale Oberfläche der Faser steigt hierbei um den Faktor 1,18 an. Dieser entspricht bei der Annahme eines kreisrunden Faserquerschnittes eine Dickenabnahme von 8,5%.

6.1.7 Möglichkeiten von Rollgangsverjüngungen und weiteren Einbauten

Um die Möglichkeiten sowie Auswirkungen einer Rollgangsverjüngung zu untersuchen, wurde eine Reihe von Kurzversuchsreihen durchgeführt. Hierbei wurden in unterschiedlichen Rollstreckenbereichen Verjüngungen in Form von keilförmigen Einsätzen erzeugt. Diese Einengung des Rollganges wurde im weiteren Verlauf der Rollstrecke konstant gehalten. Hierbei zeigten sich keine Unterschiede der erzeugten Agglomerate bei Verjüngungen über den Verlauf des ersten, zweiten oder dritten Viertels der Rollstrecke. Die Notwendigkeit für eine Verjüngung kann eine verbesserte Faseraufgabe durch einen erweiterten Anlaufbereich des Rollganges im Bereich der Zufuhröffnung sein. Vor allem bei höheren Faserfüllgraden sowie der Erfordernis kleiner Rollgangsquerschnitte kann dies von Vorteil sein, um eine ideale Rotationsachse im Anfangsbereich des Rollganges zu bewirken und so die Bildung von Rissen im Agglomerat zu vermeiden.

Während eine Agglomeration in einem konstanten 2,5x5 mm Rollgang nicht erfolgreich war, ließen sich durch eine kontinuierliche Verjüngung der Rollgangshöhe (axiale Verjüngung) von 5x5 mm auf 2,5x5 mm störungsfreie Faseragglomerate erzeugen.

Diese axiale Verjüngung fand im ersten Drittel der Rollstrecke statt, während im weiteren Verlauf die Rollgangsabmessungen konstant blieben. Neben der erfolgreichen Agglomeratbildung stellt sich eine weitere Beeinflussung charakteristischer Kennwerte ein (siehe Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41).

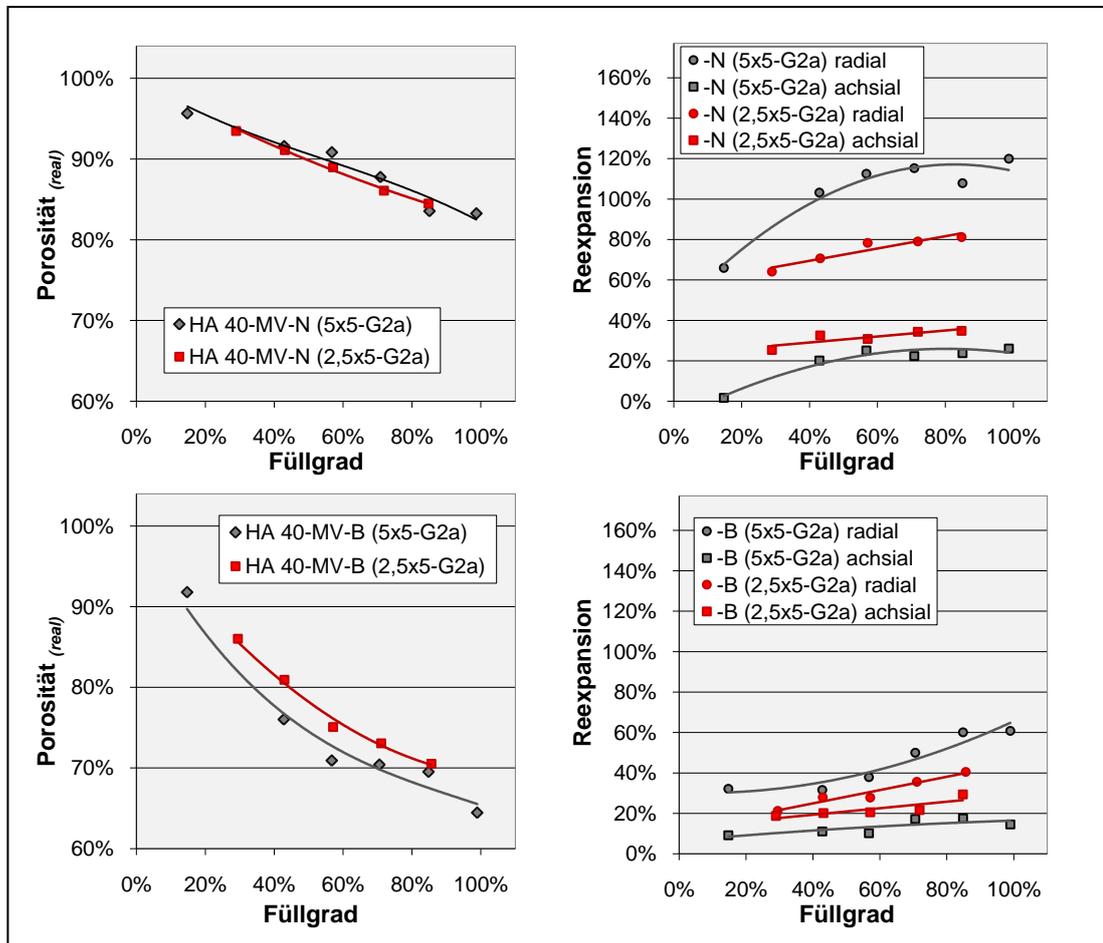


Abbildung 6-40 Auswirkung einer Rollgangsverjüngung auf die Agglomerateigenschaften

Trotz der nahezu identischen Porositätsverläufe der Faseragglomeratreihen ohne wie auch mit zusätzlicher Wasserzufuhr stellt sich eine Abweichung des Reexpansionsverhaltens der Agglomeratachsen ein. Während die Reexpansion der Faseragglomerate mit axialer Rollgangsverjüngung in radialer Richtung abnimmt, steigt die Reexpansion in axialer Richtung an. Innerhalb der Verjüngungstrecke kommt es aufgrund der Verschiebung des Agglomeratgefüges in axialer Richtung zu einer weiteren Relativbewegung der Fasern zueinander, was zur Zunahme der Formschlussbindungen führt und so die Reexpansion herabsetzt. Dem entgegen wirkt in axialer Agglomeratrichtung das durch die Abnahme des Biegeradius der Fasern angestiegene Widerstandsmoment, was zu einer Zunahme der Reexpansionsneigung in axialer Rich-

tung führt. Bei der Agglomeration befeuchteter Hanffasern bewirkt dieses Verhalten zudem eine nachweisliche Zunahme der Porosität aufgrund der Verjüngungsstrecke.

Die sich einstellende Zunahme der Drucksteifigkeit bei beiden Feuchtezuständen des Eduktmaterials (siehe Abbildung 6-41) lässt sich neben der im Rollgang stattfindenden axialen Verdichtung, auf die geringere Agglomerathöhe bei gleicher Faserlängenverteilung zurückführen (siehe auch Unterkapitel 6.1.4 und 6.1.5). Somit kommt es zu einem geringeren Biegeradius und so zu einer höheren Vorspannung des Fasermaterials in axialer Richtung.

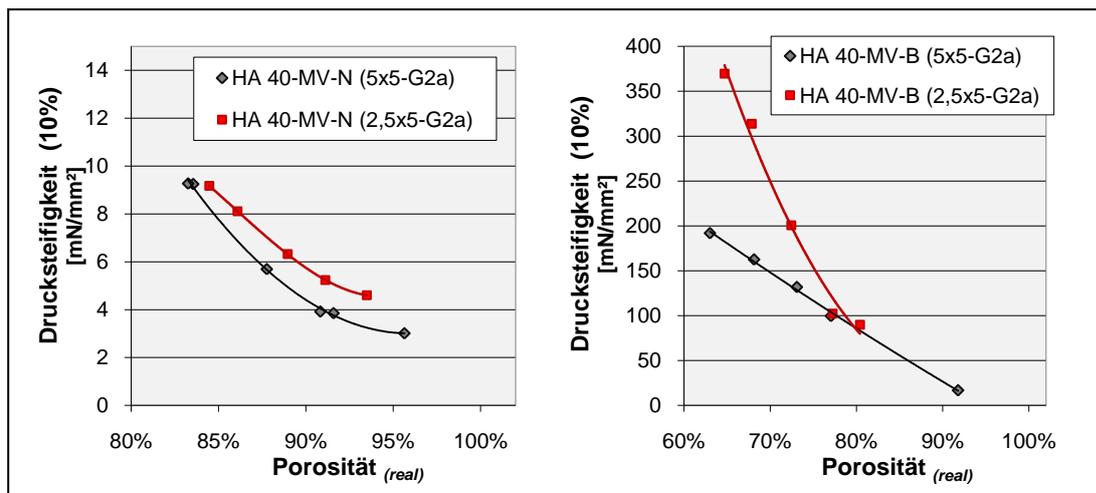


Abbildung 6-41 Einfluss der Rollgangsverjüngung auf die Festigkeit des Agglomerates

Durch den Einsatz weiterer Einbauten, wie beispielsweise den Störeinheiten, können gezielte Widerstandsmomente innerhalb des Rollganges erzeugt werden. Hierdurch lassen sich, wie im Unterkapitel 6.1.1 dargestellt, kugelhähnliche Faseragglomerate erzeugen. Bei der Aufgabe großer Faservolumina kam es zu Stauungen an den starren Störeinheiten. Weitere Untersuchungen mit flexiblen Störeinheiten minderten das Problem bei einer Agglomeration von Fasern im Normzustand. Für einen gezielten Einsatz ist somit die Größe der Störeinheiten dem Füllgrad und den Fasereigenschaften anzupassen.

Bei den befeuchteten Fasermaterialien war der Einsatz von Störeinheiten an der Schlupfwandung nicht möglich, da das nasse Faseragglomerat einen zu großen Widerstand gegen das Verschieben des inneren Gefüges aufwies. Um dennoch eine gezielte Rotation in unterschiedliche Achsen zu indizieren, wäre ein wechselnder Reibwiderstand des Belages der Wandungen denkbar.

6.1.8 Potentialabschätzung weiterer Fasermaterialien

Zur Abschätzung des Potentials der Rollagglomeration beim Einsatz weiterer Fasermaterialien, vornehmlich Naturfasern wie auch Chemiefasern, wurden Versuche mit unterschiedlichen Eduktmaterialien durchgeführt. Hierbei kamen neben den heimischen Flachs-, Rohhanf- und Holzfasern sowie den exotischen Kokos- und Sisalfasern auch Chemiefasern in Form von Viskose- und Polypropylenfasern zum Einsatz (siehe Tabelle 6-5; Fotos siehe Anhang). Des Weiteren wurden die Möglichkeiten untersucht, die aus einer Faserkombination aus Flachs- und Polypropylenfasern entstehen. Über die gebräuchlichen Fasermaterialien hinaus wurde zudem die Bildung von Agglomeraten aus Seegrass untersucht.

Tabelle 6-5 Versuchsmatrix der Agglomerationsversuche verschiedener Fasermaterialien

Material	Faserlänge (Median)	Feuchtezustand	Rollgang
Flachsfaser „LI“	35 mm	N; B	(5x5-G2a); (5x5-V3‘)
Rohhanffaser „RHA“	Gewölle	N; B	(5x5-G2a); (15x15-G2a)
PMT Kiefer „KI“		N	(2,5x5-G2a)
PMT Fichte „FI“		N	(2,5x5-G2a)
PP-Faser „PP“		N; B	(5x5-G2a)
PP/LI-Fasern „PP/LI“		N	(5x5-V3‘)
Kokosfaser „KO“	Gewölle	N; B	(15x15-G2a)
Sisalfaser „SI“	100 mm	N; B	(15x15-G2a)
Seegrass „SEE“	Gewölle	N; B	(15x15-G2a)

Vom Grundprinzip des Agglomerationsprozesses lassen sich alle hier untersuchten Fasermaterialien zu einem Formgebilde vereinen. Jedoch wiesen die äußere und innere Struktur Unterschiede auf. Es wurde ersichtlich, dass die Fasereigenschaften vor allem die Biegesteifigkeit in Verbindung mit der Faserlänge und -dicke Einflüsse auf die Agglomeratbildung haben. So zeigte sich, dass Fasern mit einem höheren Biege-widerstand lediglich bei einer Faserlängenverhältniszahl $\ll 1$ (Verhältnis von Faserlängen zu Rotationsdurchmesser) zu homogenen Agglomeratstrukturen führen (PMT Kiefer- und PMT Fichte-Fasern). Bei Faserlängenverhältnissen $\gg 1$ und einer hohen Biegesteifigkeit wie bei den betrachteten Sisalfasern entstanden grobstrukturierte hohle Gebilde. Zudem wiesen die Faseragglomerate aus steiferen Fasermaterialien häufig aus dem Agglomerat herausragende Faserelemente auf, was zu einem erhöhten Oberflächenindex führte. Ein weiterer Einfluss der deutlich wurde, ist eine größere Reexpansion der Agglomerate und somit teilweise der Verlust der erzeugten Geometrie. Dieses zeigte sich auch bei dem Einsatz von Fasermaterialien mit glatteren Oberflächen (PP- und

Viskosefasern). Allerdings ließen sich mit den starkverzweigten Rohhanffasern formstabile geschlossene Agglomerate herstellen.

Bei dem Versuch Hanffasern mit einem Schäbenanteil zu agglomerieren, zeigte sich, dass dieser Anteil in das Rollagglomerat mit eingebunden wird, so lange diese eine geringere Länge als die Rollgangsbreite aufwies. Es lässt sich vermuten, dass für den Anteil an Schäben oder anderen Fremdbestandteilen im Fasermaterial Grenzwerte für Größe und Volumenanteil existieren, was jedoch nicht in dieser Arbeit nachgewiesen wurde.

Die Befeuchtung der Fasern mit Wasser zeigte bei den untersuchten exotischen- und Chemiefasern keine signifikante Wirkung. Dies liegt darin begründet, dass es zum einen aufgrund der geringen Benetzbarkeit zu keinen ausreichenden Kapillarkräften kommt zum anderen wird die Struktur der Faser durch die Wasserzugabe in der Kürze der Zeit nicht flexibler und somit nicht biegsamer. So wiesen die Grünagglomerate beispielsweise aus PP- und Viskosefasern nach der Nassagglomeration die gleichen geometrischen Werte wie die trocken erzeugten auf. Auch nach der Trocknung waren keine weiteren Festigkeitszunahmen nachweisbar, da es nicht wie bei den Naturfasern zu einem Auskristallisieren von angelösten Bindestoffen und somit nicht zur Bildung von Feststoffbrücken kommt.

6.2 Experimentelle Untersuchungen im Eirich-Intensivmischer

Bereits in einer vorangegangenen Forschungsarbeit [T.S.'00] wurden Untersuchungen zur Aufbauagglomeration von Flachsfasern im Eirich-Intensivmischer durchgeführt. Hierbei wurde ein zweistufiges Verfahren bestehend aus Mischagglomerator und Pelletierteller zur Abrundung der Agglomerate verwendet. Eine Einkürzung des Fasermaterials (Längen $< 1\text{ mm}$) fand innerhalb verschiedener Mühleinheiten statt. Als Bindemittel kam Wasser zum Einsatz, wobei das Verhältnis von Wasser zu Fasermaterial 7:2 entsprach. Innerhalb des Mischagglomerators wurde ein Sternwirbler mit 2500 min^{-1} als Agitationsorgan eingesetzt.

Bei den hier erstellten Versuchsreihen wurde untersucht, inwieweit eine Agglomeration von vergleichsweise längeren Naturfasern innerhalb eines Mischagglomerators im Hinblick auf das Agglomerationsprodukt zielführend ist. Zudem wurde eine Herabsetzung des Energieeintrages sowie der zugeführten Wassermenge, da diese einen erhöhten Trocknungsaufwand (Energiebedarf) mit sich bringt, als wünschenswert angesehen. Als Einsatzgebiet der hergestellten Produkte wird aufgrund der erzeugten Größe und der geschlossenen Oberflächenstruktur vorzugsweise die Nutzung in der Kunststofftechnik

gesehen. Somit wird als angestrebte Agglomeratgröße der Bereich zwischen 3 und 6 mm gesehen.

In den folgenden Versuchsreihen der Aufbauagglomeration kam der in Kapitel 4 dargestellte Eirich-Intensivmischer mit entsprechendem Sternwirbler als Agitationsorgan zum Einsatz. Das Fasermaterial (überwiegend Flachfasern) wurde in einer Schneidmühle mit unterschiedlichen Lochblecheinsätzen nach den Erkenntnissen von Dörre [B.D.'96] vorab eingekürzt. Durch die Zerkleinerung in der Schneidmühle kam es neben der Längeneinkürzung zu einer Abnahme der Faserdicke (siehe Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6 Charakteristische Größen der zerkleinerten Flachfasern

Durchmesser der Lochblechöffnung	Faserlänge [µm]		Faserdicke [µm]
	Median	Spannweite	
2 mm	23	10 - 200	0,25 - 1,0
4 mm	34	20 - 10.000	0,25 - 1,0
6 mm	35	20 - 20.000	0,25 - 1,5
10 mm	37	20 - 20.000	1,00 - 20

Bei allen Versuchen wurde dem Agglomerationsprozess im Eirich-Intensivmischer Wasser als Bindemittel zugegeben. Neben den Untersuchungen mit unterschiedlich zerkleinertem Fasermaterial wurden Versuche bei abweichender Drehzahl sowie mehrstufige Prozesse durchgeführt (siehe auch Anhang). Die Betitelungen der Versuchsreihen entsprechen der in der Tabelle 6-7 aufgeführten Nomenklatur.

Tabelle 6-7 Nomenklatur der Versuchsreihen im Eirich-Intensivmischer

A-L-M-F (St-N)-SV			
A	Art des Fasermaterials	HA	Hanffaser
		LI	Flachsfaser
L	Lochgröße des Lochbleches	[mm]	
M	Masse des Fasermaterials	[g]	
F	Zugegebene Wassermenge	[g]	
St	Agglomerationsstufen	1St	Einstufig
		2St^{1/3}	Zweistufig- 33,3 Ma-% 1St
		2St^{2/3}	Zweistufig- 66,6 Ma-% 1St
N	Drehzahl des Agitationsorgans	[min ⁻¹]	
SV	sonstige Variationen	TV	Trocknungsvariation
		P	Produktionsnahe Fahrweise

6.2.1 Allgemeine Erkenntnisse der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien

Aufgrund der in dem Prozess zugeführten mechanischen Energie (Topfrotation und Agitationsorgan) wird durch die hervorgerufene Stoß- und Reibeinwirkung auf die Agglomerate und Fasern thermische Energie erzeugt. Dies führt zu einer Erwärmung des Aufgabegutes bzw. der gebildeten Faseragglomerate. Nach einer Prozesszeit von 25 min wies das Agglomeratkollektiv eine Temperatur von 54°C auf, wobei der massive Edelstahltopf zudem thermische Energie speicherte und an die Umgebung abgab.

Wie bei klassischen Aufbauagglomerationsverfahren von Schüttgütern stellt sich auch bei der Herstellung der Faseragglomerate eine Größenverteilung ein. Anlagenspezifisch verblieben in den einzelnen Versuchsreihen durchschnittlich 4,6% des Aufgabematerials als Wand- und Bodenbelag sowie unterhalb des Sternwirlers im Mischer. Der überwiegende Massenanteil der gebildeten Agglomerate lag bei der Referenzversuchsreihe LI 6-300-600 (1St-900) mit 62,6 Ma-% im Bereich < 3,15 mm (siehe Abbildung 6-42). Auf die angestrebte Produktklasse (Fraktionen: 3,15 mm, 4 mm und 5 mm) entfielen in Summe 36,8 Ma-%.

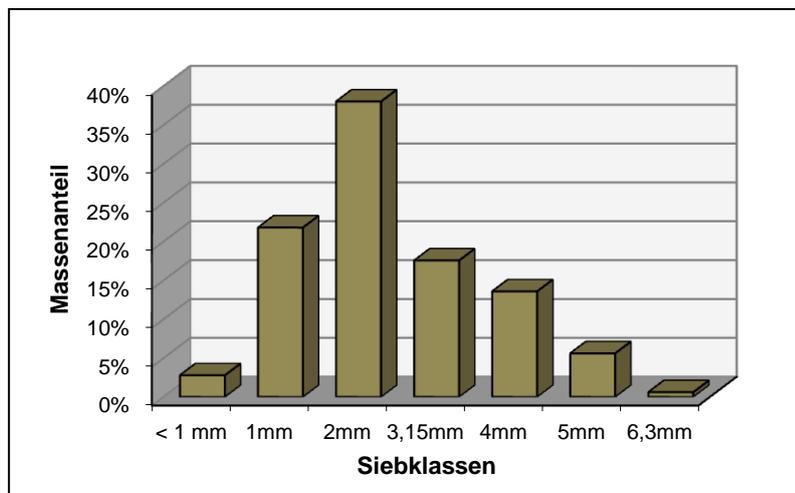


Abbildung 6-42 Massenanteil der einzelnen Siebklassen LI 6-300-600 (1St-900)

Innerhalb dieser gebildeten Siebfraktion wiesen die erzeugten Agglomerate entgegen der klassischen Aufbauagglomeration von Schüttgütern (Kubizität der Partikel gegen 1), unterschiedliche Makrogestalten auf (siehe Abbildung 6-43). In der Fraktionsklasse < 1 mm fanden sich neben den Startkeimen auch nicht in die Agglomerate eingebundene, strohige Faserelemente wieder. Diese Elemente sind meist nicht flexibel genug, um sich der Wölbung der Agglomerate anzupassen, um so eine feste Bindung mit diesen einzugehen. Die Makrogestalten der Faseragglomerate wiesen bis einschließlich der

2 mm-Fraktion eine spitzzulaufende, längliche Struktur auf. In der 3,15 mm-Fraktion lagen abgerundete Ellipsoide vor, die durch weitere Faseranlagerungen ihre Makrogestalt weiter in Richtung einer kugelähnlichen Struktur verschoben.



Abbildung 6-43 Partikelgrößen und -formverlauf der Siebklassen LI 6-300-600 (1St-900)

Die Größe der Agglomerate folgt der Volumenzunahme der eingebundenen Fasern (siehe Abbildung 6-44). Jedoch traten innerhalb der einzelnen Siebfraktionen Streuungen der Messwerte auf, die mit der Größenzunahme der Agglomerate abnahm. So wies die 1 mm-Fraktion einen Varianzkoeffizienten von 36,25% auf. Hingegen lag der Varianzkoeffizient für die 6,3 mm-Fraktion bei 12,34%. Diese Varianz zieht sich als Streuung durch alle weiteren Kennwerte.

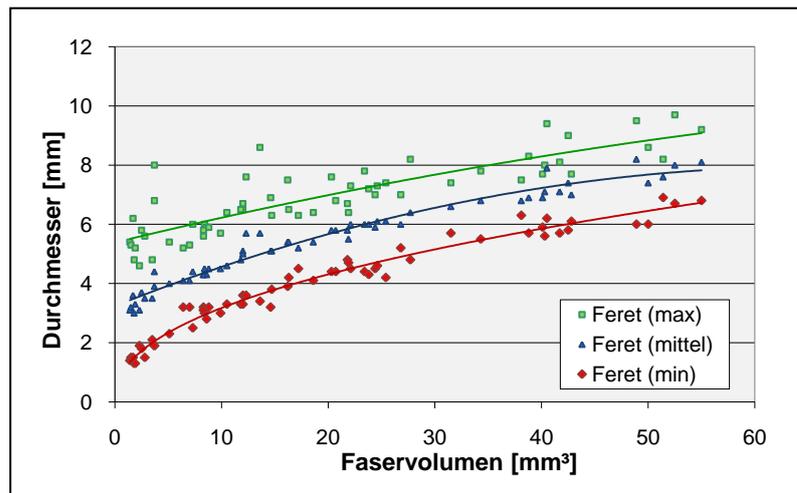


Abbildung 6-44 Agglomeratdurchmesser bei zunehmendem Faservolumen LI 6-300-600 (1St-900)

Die Verschiebung der Makrogestalt von länglichen zu kugeligen Geometrien lässt sich neben einer subjektiven Beschreibung in den Darstellungen der Längen-Breiten-

Verhältnisse sowie der $SPHT^2$ -Werte der Projektionsschatten in der Abbildung 6-45 verdeutlichen. Mit Zunahme der in das Agglomerat eingebundenen Faservolumina nimmt das Verhältnis von Länge zu Breite des Projektionsschattens ab und strebt gegen den Wert 1.

Da die Agglomerate bis zur Partikelfraktion 3,15 mm deutliche elliptische Geometrien aufwiesen, zeigen die Messwerte der verschiedenen Ansichten (Grund- und Seitenansicht) größere Abweichungen als bei Agglomeraten größerer Siebklassen. Beim Vergleich zeigt sich, dass die Seitenansicht der Körper bis 3,15 mm deutlich oberhalb des Kurvenverlaufes einer idealen Ellipse liegt. Die Projektionsflächen der Seitenansichten weisen ab der 4 mm-Fraktion Werte ähnlich einer Ellipse auf, die sich der einer Kreisform nähert ($x_{max}/x_{min} < 1,5$). Bei der Betrachtung der Grundseite des Körpers ist lediglich der Wert der < 1 mm-Fraktion abweichend von einer kreisähnlichen Projektionsfläche. Hieraus lässt sich schließen, dass das Anlagern von Fasern bis zu einer gewissen Agglomeratgröße überwiegend bei der Rotation um die Längsachse erfolgt und dass es infolge der Stoßeinwirkungen auf das Faseragglomerat zu einer Abrundung der spitzverlaufenden Enden kam.

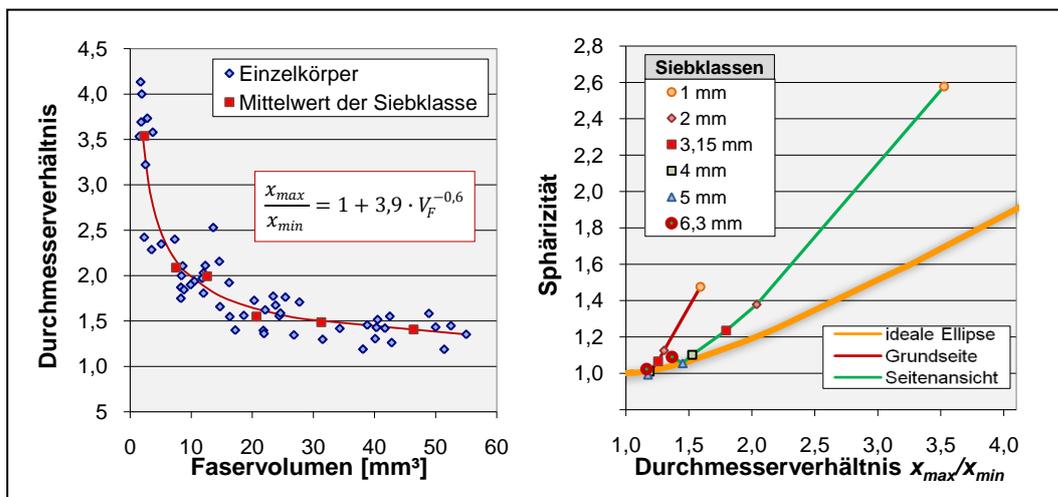


Abbildung 6-45 Geometrieverläufe der Projektionsflächen

LI 6-300-600 (ISt-900)

Eine Erklärung für dieses gegenüber der Aufbauagglomeration von Schüttgütern abweichende Verhalten liegt in der länglichen Gestalt des Fasermaterials. Während bei der Agglomeration von kubischen Partikeln die Orientierung des Nachbarpartikels keine Relevanz bezüglich der Bildungswahrscheinlichkeit von Startkeimen besitzt, spielt diese Orientierung bei der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien eine entscheidende Rolle. Des Weiteren besitzt der Biege widerstand des Fasermaterials (Biegesteifigkeit, Faserdicke) einen entscheidenden Einfluss auf die fortlaufende Agglomeration. Während kubische Partikel einer anliegenden Kraft (durch Rollbewegung bzw. Stoß-

und Pralleinwirkung) eine im Vergleich geringe Angriffsfläche bietet, weisen Fasermaterialien aufgrund ihrer Länge einen Hebelarm auf, an dem die Kraft angreifen kann und die Faser vom Agglomerat wieder entfernt (siehe Abbildung 6-46).

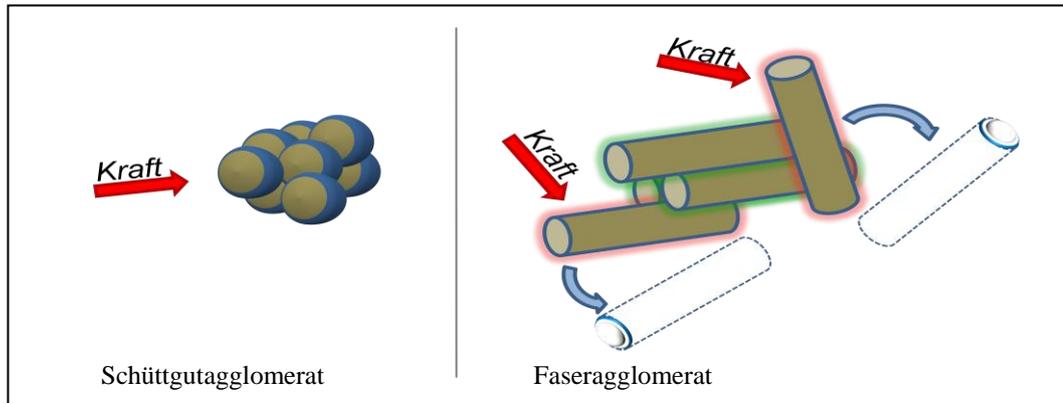


Abbildung 6-46 Festigkeiten der Keim- und Anfangsstrukturen der Aufbauagglomeration

Somit können sich die Fasern bis zu einer gewissen Agglomeratgröße (abhängig von der Faserlänge und dessen Biegesteifigkeit) nur parallel zu der bestehenden Längsorientierung anhaften (siehe Abbildung 6-47). Zudem wird durch diese Parallelorientierung der Fasern vornehmlich ein Abrollen um diese Agglomeratlingsachse begünstigt.

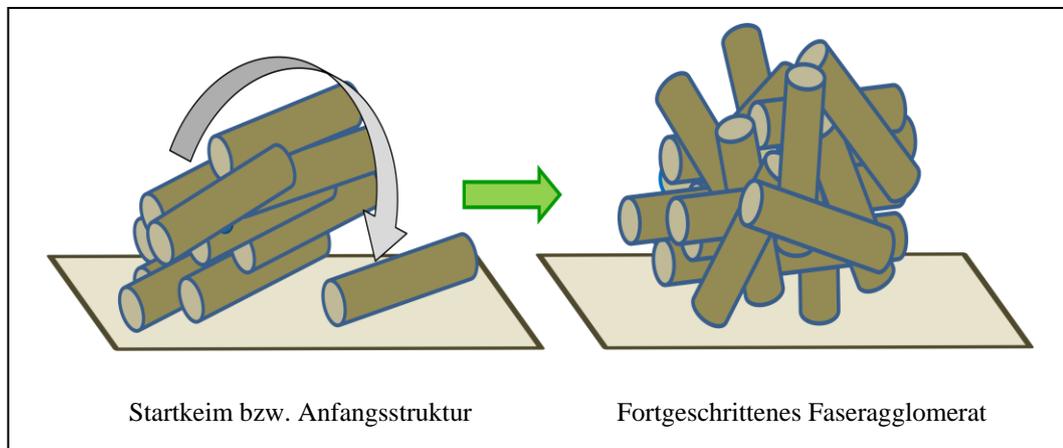


Abbildung 6-47 Theoretischer Ansatz des fortlaufenden Agglomeratwachstums

Mit zunehmender Agglomeratgröße und somit steigender Kontaktlänge der Faserpartikel am Agglomerat nehmen die wirkenden Haftkräfte zu. Überschreitet diese einen faserlängen- und biegesteifigkeitsabhängigen Wert, wird die Faser aufgrund der Abrollbewegung gebogen und an das Agglomerat angebunden. Je größer die Biegesteifigkeit der Fasern ist, desto größer muss das Verhältnis von Agglomeratdurchmesser zu Faserlänge sein, um ein Anhaften der Faser an der Agglomeratoberfläche zu gewährleisten. Durch diese Queranbindung von Fasermaterialien beginnt das Agglomerat sich von der

langgestreckten, nadeligen Form über die elliptische hin zu einer kugelähnlichen Makrogestalt zu entwickeln. Unterstützt wird diese Formwandlung zudem durch die Stoßeinwirkungen, die die Enden der länglichen Agglomerate abrunden.

Durch die auf das Agglomerat einwirkenden Kräfte, hervorgerufen durch die Abrollbewegungen sowie Stoßeinwirkungen, werden abstehende Fasern je nach Länge und Biegesteifigkeit an die Agglomeratoberfläche angelegt oder vom Agglomerat wieder entfernt. Dieses Verhalten ist auch bei der Fraktion $< 1 \text{ mm}$ zu sehen, wo sich neben den Startkeimen strohige Bestandteile mit höheren Biegesteifigkeiten anreichern. Hingegen liegen nach Abschluss des Agglomerationsprozesses (25 min) keine feineren Fasern mehr frei vor.

Ein weiteres Indiz für diesen Ablauf der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien wird in der Darstellung des Porositätsverlaufes mit Zunahme der Agglomeratgröße deutlich (siehe Abbildung 6-48). Während kubische Schüttgüter bei der Aufbauagglomeration mit größer werdendem Agglomeratdurchmesser geringere Porositäten aufweisen, stellt sich bei dem Einsatz von Fasermaterialien ein gegenläufiges Verhalten ein. Dieser Agglomerationsvorgang über die parallelen Fasern im Startkeim hin zu der stochastischen Orientierung bei fortgeschrittenem Agglomerationsstadium ist auch der Hintergrund für die Porositätszunahme bei größeren Agglomeraten.

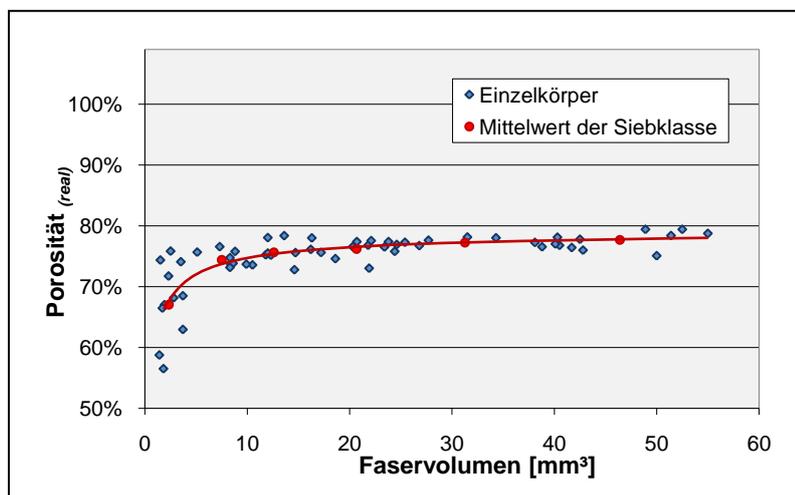


Abbildung 6-48 Porositätsverlauf in Abhängigkeit vom Faservolumen
LI 6-300-600 (1St-900)

Während die Startkeime aufgrund der parallelen Orientierung der Fasern eine hohe Packungsdichte aufweisen, kommt es durch das fortlaufende stochastische Anbinden von Fasern zu Kreuzungspunkten der Fasern und so zu einem Porositätsanstieg. Eine fortlaufende Verdichtung durch Verschiebungen des inneren Gefüges wie bei der Auf-

bauagglomeration von Schüttgütern ist im Bereich parallelorientierter Fasern denkbar. Eine stochastische Orientierung relativ langer Fasern ist jedoch nur bei verhältnismäßig flexiblen Materialien wahrscheinlich, da der Biege­widerstand des Fasermaterials einer weiteren Verdichtung des Gefüges entgegenwirkt.

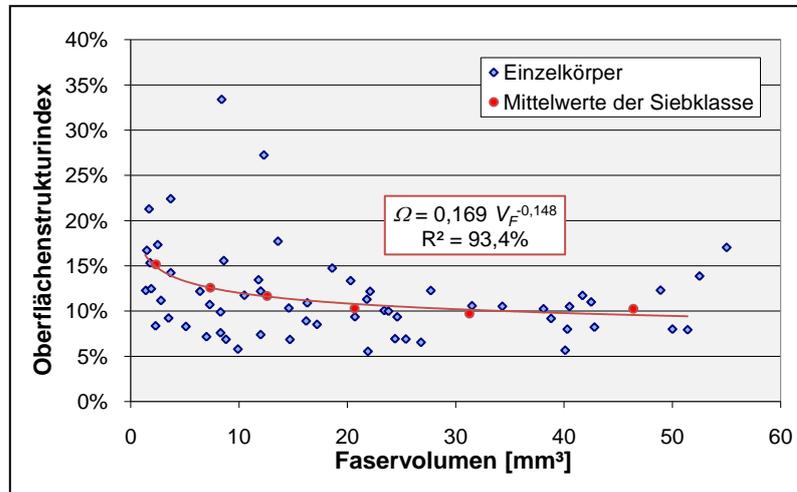


Abbildung 6-49 Oberflächenstrukturindex der Aufbauagglomerate LI 6-300-600 (1St-900)

Das flächige Anschmiegen der einzelnen Faser an die Agglomeratoberfläche bzw. dessen Glättung mit größer werdenden Faseragglomeraten wird innerhalb der Darstellung des Verlaufes des Oberflächenstrukturindex in Abhängigkeit von der Agglomeratgröße bzw. vom Faservolumen ersichtlich (siehe Abbildung 6-49). Hierbei weisen die Faseragglomerate aus dem Eirich-Intensivmischer generell geringe Oberflächenstrukturindizes auf. Der mittlere Oberflächenstrukturindex kleinerer Agglomerate (1 mm-Fraktion) liegt bei 15%. Mit zunehmendem eingebundenen Faservolumen bzw. Zunahme der Agglomeratgröße nimmt der Oberflächenstrukturindex ab und liegt für die Siebklassen größer 3,15 mm bei einem Mittelwert von etwa 10%.

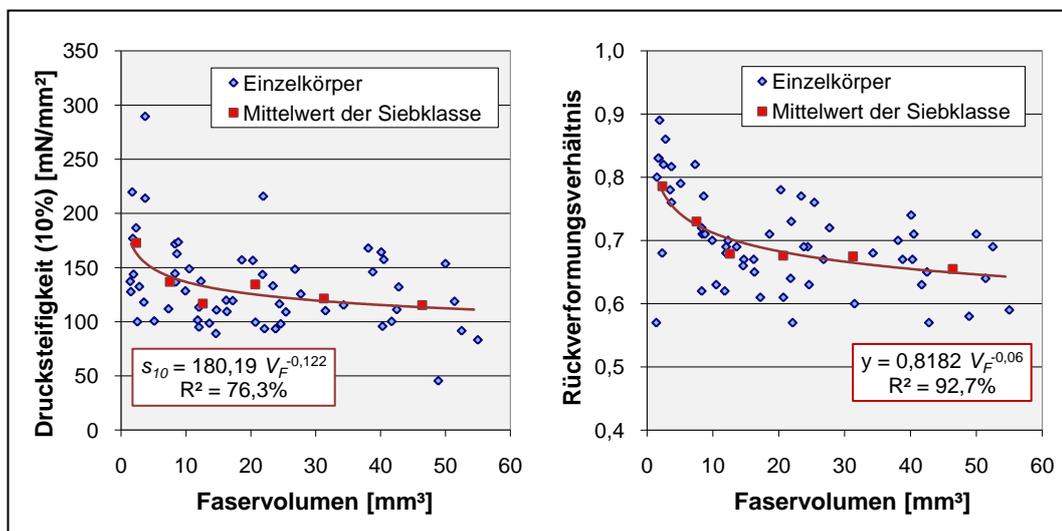


Abbildung 6-50 Verläufe der Festigkeitskennwerte

LI 6-300-600 (1St-900)

Die Festigkeitskennwerte der Faser-Aufbauagglomerate weisen, wie aufgrund der Porositätsverläufe zu erwarten war, einen fallenden Trendverlauf auf (siehe Abbildung 6-50). Mit zunehmendem Faservolumen bzw. ansteigender Porosität nimmt die Drucksteifigkeit ab. Die Produkt-Fractionen (Siebklassen 3,15 bis 5 mm) wiesen im Mittel bei einer 10%igen Verformung eine Drucksteifigkeit von 125 mN/mm^2 auf. Das Rückverformungsverhältnis lag in diesem Bereich im Mittel bei 0,68.

6.2.2 Drehzahlabhängige Agglomerationserfolge

Wie in den Vorbetrachtungen dargestellt, hat die in den Prozess zugeführte Energie einen entscheidenden Einfluss auf die Produkteigenschaften. Für die Darstellung dieser Abhängigkeit wurde der Sternwirbler mit einer Drehzahl von 900 min^{-1} sowie mit 1500 min^{-1} betrieben. Schon die visuelle Betrachtung der Mesogestalt zeigt, dass die Drehzahlsteigerung des Rührwerkzeuges einen erheblichen Einfluss auf den Agglomerationsprozess und die so erzeugten Faseragglomerate hat (siehe Abbildung 6-51). Beim Vergleich der gebildeten Agglomerate der beiden Drehzahleinstellungen zeigten sich in den unteren Siebklassen identische Formen. Mit Zunahme der Partikelgröße stellten sich dementsprechend deutliche Unterschiede in der Agglomeratstruktur ein. Die subjektive Betrachtung der von außen sichtbaren Agglomeratstrukturen lässt den Schluss zu, dass es bei der Versuchsreihe mit 1500 min^{-1} im Agglomerationsverlauf ab der 2 mm-Fraktion zunehmend zu einer Koaleszens schon gebildeter Agglomerate kam. Somit wurde statt einer geschlossenen, eine zerklüftete Oberflächenstruktur gebildet.

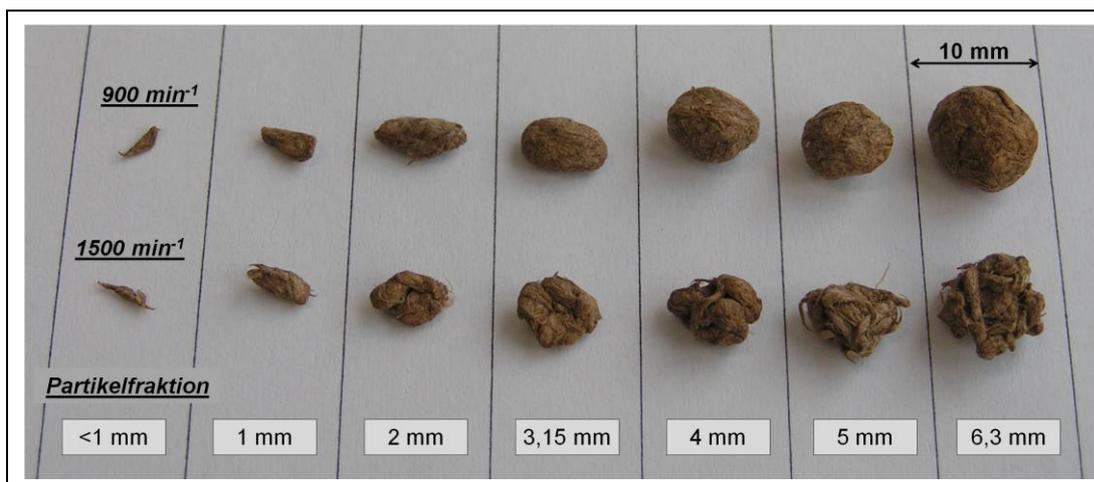


Abbildung 6-51 Mesostrukturabweichungen aufgrund von Drehzahlvariation LI 6-300-600 (ISt-DV)

Die Neigung zur Koaleszens wird in der höheren Wahrscheinlichkeit des Agglomeratzusammenstoßes, insbesondere in der erhöhten Prallenergie gesehen. Durch die höhere Energie beim Zusammenstoß zweier oder mehrerer Agglomerate kommt es

zunehmend zu einer Deformation und so zu einer Abflachung der Kontaktflächen. Bei dieser partiellen Verdichtung wird das Wasser, was die Zwischenräume der Kontaktstelle ausfüllt, verdrängt und tritt an der Agglomeratoberfläche aus.

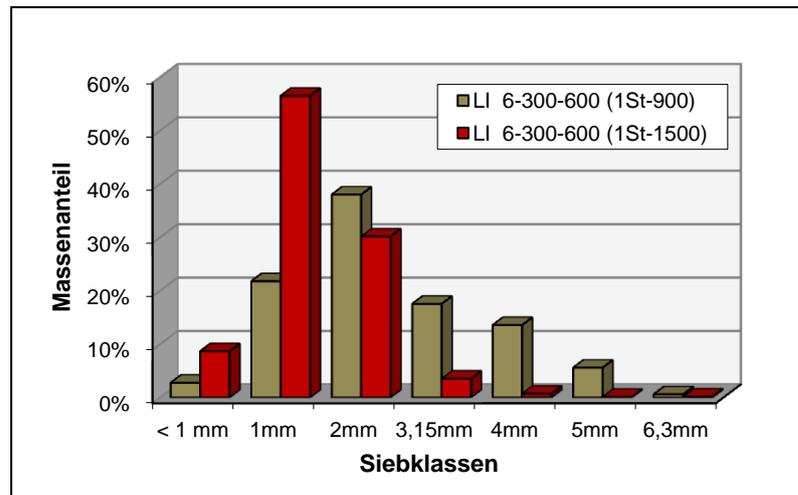


Abbildung 6-52 Wirblerdrehzahlabhängige Massenanteile

Aufgrund der Flüssigkeitssättigung und der vergrößerten Kontaktfläche reichen nun die Kapillarkräfte aus, das Anlagern kleinerer Agglomerate zu ermöglichen. Jedoch neigen die so gebildeten Verbindungen durch Einwirkung von mechanischer Energie sowie durch Abtrocknung des Wassers zum Zerfall in ihre Unterstrukturen. Durch diesen Zerfall lag der Massenanteil der Siebkategorie von 1 mm mit höherem Energieeintrag bei 56,5 Ma-% während die Produktklasse lediglich einen Anteil von 4,4 Ma-% besaß (siehe Abbildung 6-52).

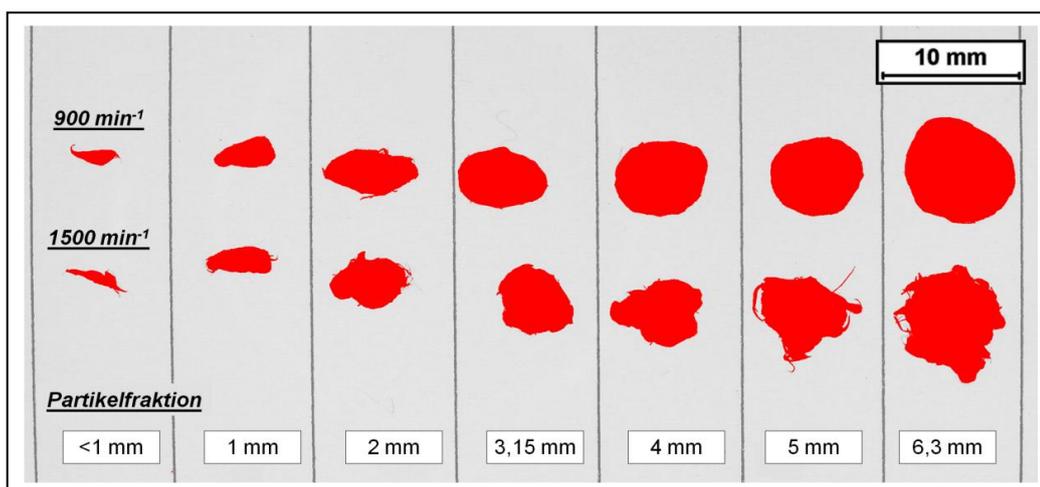


Abbildung 6-53 Projektionsschatten bei 900 und 1500 min⁻¹ LI 6-300-600 (1St-DV)

Neben der stärkeren Gewichtung der kleineren Agglomerate und der geringeren Agglomeratfestigkeit stellt die zerklüftete Oberflächenstruktur die Möglichkeiten von Transport, Lagerung und Dosierung in Frage. Im Vergleich zu den mit geringerer Dreh-

zahl hergestellten Faseragglomeraten ist die Oberflächenstruktur unregelmäßiger und besitzt somit eine größere Neigung, sich mit angrenzenden Agglomeraten zu verhaken (siehe Abbildung 6-53 und Abbildung 6-54).

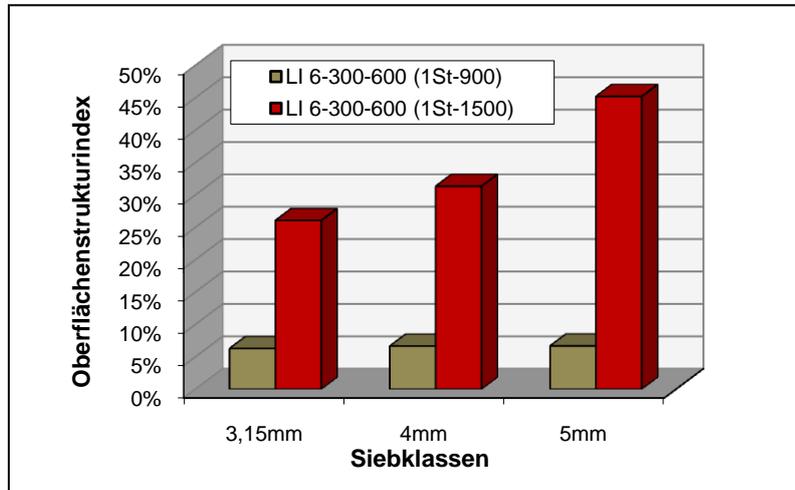


Abbildung 6-54 Oberflächenstrukturzunahme bei höherem Energieeintrag

Während der Oberflächenstrukturindex bei der Versuchsreihe mit geringerem Energieeintrag bei ca. 5% über die Produktklassen konstant bleibt, ist bei höherem Energieeintrag eine Zunahme des Oberflächenstrukturindex der höheren Siebklassen zu verzeichnen. Da die Unterstrukturen der größeren Agglomerate die gleiche Größe besitzen, nimmt somit aufgrund der höheren Anzahl von Unterstrukturen an der Oberfläche der Oberflächenstrukturindex zu.

6.2.3 Auswirkung der Faserlängenverteilung

Anhand der durchgeführten Untersuchungen mit Fasermaterialien, die durch Verwendung unterschiedlicher Schneidmühlbleche (Maschenweiten 2, 4, 6 und 10 mm) zerkleinert wurden, konnten keine wesentlichen Änderungen der Faseragglomerateigenschaften festgestellt werden. Mögliche Verschiebungen von Kurvenverläufen der Abmessungen sowie der Kennwerte für Gestalt und Festigkeit liegen in allen Fraktionsklassen im Streubereich der Referenzreihe *LI 6-300-600 (1St-900)*. Eine eindeutige Definition von möglichen Einflüssen der Faserlängen ist somit in den hier betrachteten Bereichen nicht gegeben.

6.2.4 Gegenüberstellung ein- und zweistufiger Prozess

Während das Nachschalten einer zweiten Stufe bei der Versuchsreihe LI 6-300-600 (2St-1500) keine entscheidende Verbesserung des Agglomerationsergebnisses brachte (siehe Anhang), zeigte sich bei den Versuchsreihen mit 900 min^{-1} des Sternwirlers ein deutlicher Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung sowie auf die weiteren charakteristischen Messwerte. Da die Stufungsvarianten $2St^{1/3}$ und $2St^{2/3}$ (33,3 Ma-% bzw. 66,6 Ma-% des einstufigen Prozesses als Basismaterial in zweiter Stufe massenergänzend aufagglomeriert) keine signifikanten Unterschiede aufwiesen (siehe Abbildung 6-55), wird im weiteren Verlauf die Stufenbetrachtung anhand der Stufungsvariante $2St^{1/3}$ fortgeführt.

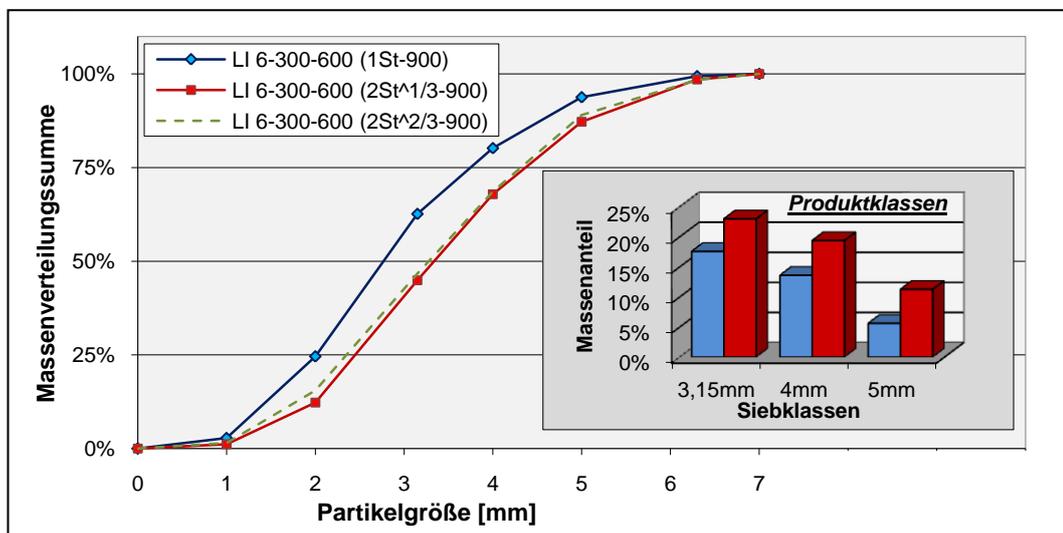


Abbildung 6-55 Massenverteilung eines ein- und zweistufigen Agglomerationsprozesses

Durch die Zugabe von weiterem Fasermaterial sowie entsprechender Wassermenge zu den in der ersten Stufe gebildeten Agglomeraten erfolgt eine Verschiebung der Massenverteilung in Richtung größerer Partikel (siehe Abbildung 6-55). Durch diese Verschiebung wird die angestrebte Produktklasse von 53,8 Ma-% gebildet. Der Anteil des Überkorns (Partikel > Produktklasse) stieg von 0,6 auf 1,5 Ma-%. Auch wenn sich der Anteil der Partikelgrößen kleiner 2 mm in Summe von 24,3 Ma-% bei der einstufigen, auf 12,3 Ma-% bei der zweistufigen Fahrweise nahezu halbierte, kann nicht davon ausgegangen werden, dass das in der zweiten Stufe zugeführte Fasermaterial ausschließlich zum Wachstum der bestehenden Agglomerate diene. Durch die Gegenüberstellung der theoretischen Partikelanzahlen der einzelnen Agglomeratklassen wird ersichtlich, dass es zu einer Zunahme der theoretischen Partikelanzahl in allen Siebklassen kam (siehe Abbildung 6-56).

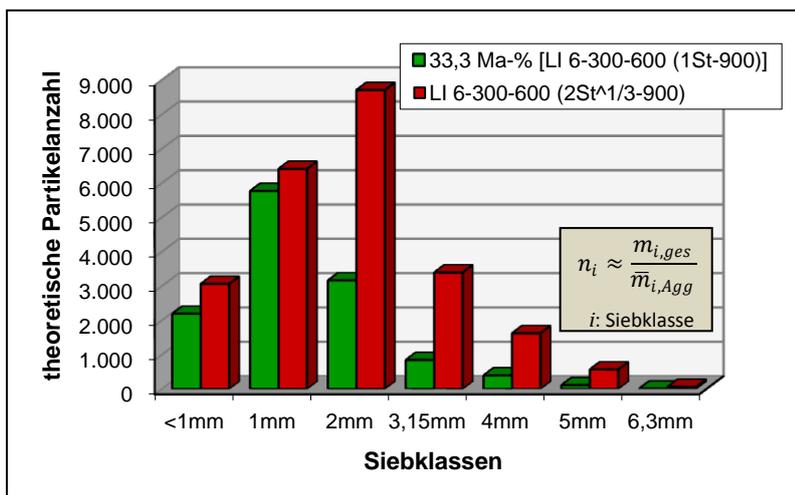


Abbildung 6-56 Theoretische Partikelzahl vor und nach der zweiten Stufe

Neben dem starken Anstieg der Partikelanzahlen in den Klassen oberhalb 2 mm sind auch Zunahmen in den Klassen unterhalb 2 mm zu sehen. Die Differenz der Startkeime vor und nach der zweiten Stufe können jedoch nicht als der Anteil der neu gebildeten Startkeime gesehen werden, da sich diese durch weiteres Wachstum auch in höheren Partikelklassen wiederfinden können.

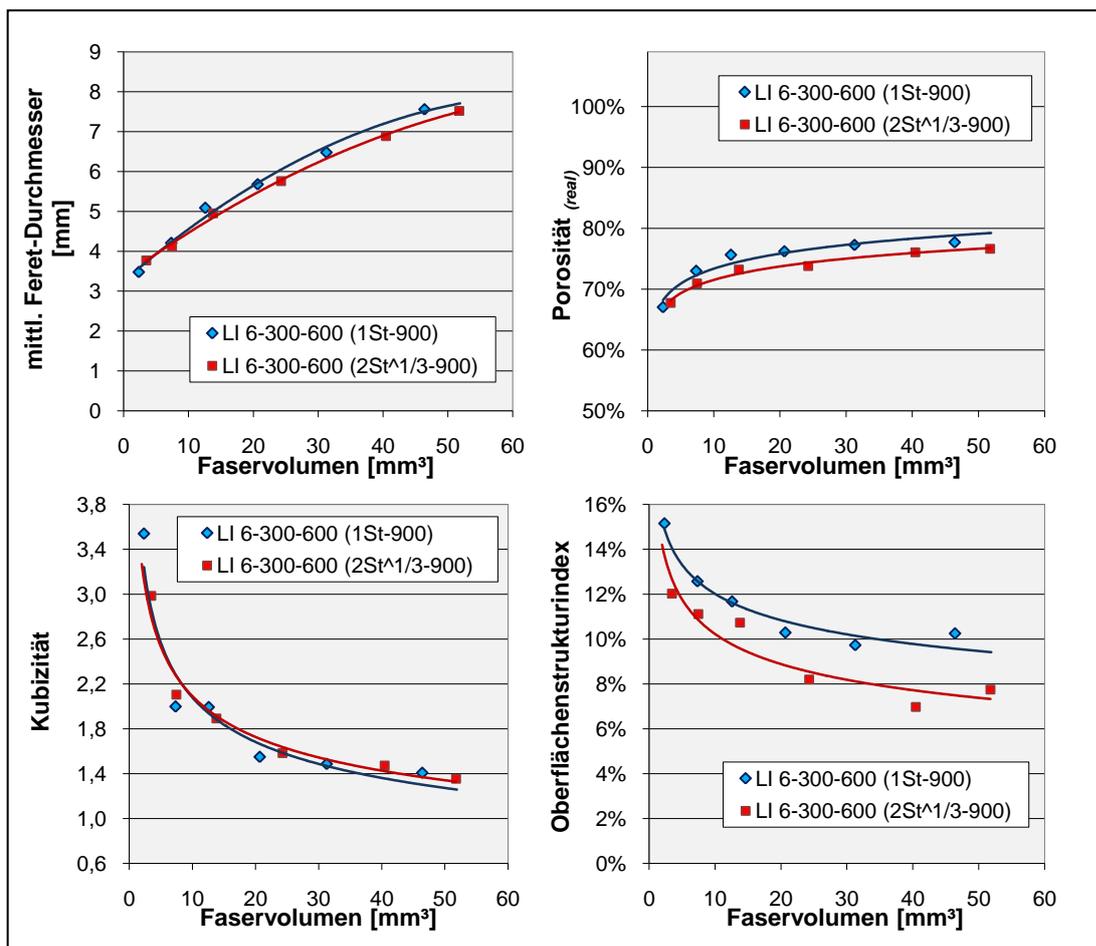


Abbildung 6-57 Verschiebung der Eigenschaftsverläufe durch eine 2. Prozessstufe

Die Verschiebungen der weiteren charakteristischen Größen fallen im Vergleich zur Massenverteilung der Partikelgrößen geringer aus. Aufgrund einer stärkeren Verdichtung des Agglomeratgefüges durch das Nachschalten einer zweiten Stufe nimmt die Porosität und somit auch der mittlere Feret-Durchmesser bei gleichem eingebundenen Faservolumen ab (siehe Abbildung 6-57). Des Weiteren wiesen die Agglomerate der zweiten Stufe über den gesamten Partikelgrößenverlauf eine glattere Oberflächenstruktur auf. Mit Abnahme der Porosität kommt es zudem zu einer Zunahme der Drucksteifigkeit aufgrund des dichteren Gefüges (siehe Abbildung 6-58).

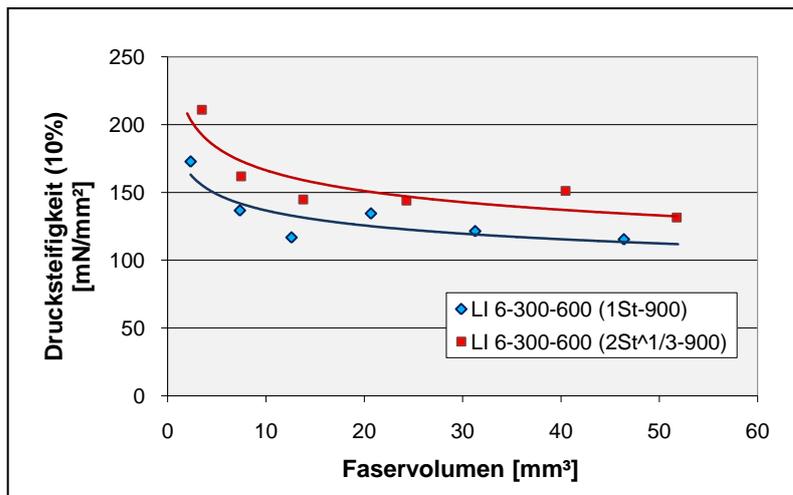


Abbildung 6-58 Drucksteifigkeit des ein- und zweistufigen Prozesses

6.2.5 Auswirkungen der Agglomerationszeit

Durch eine Verlängerung der Verweilzeit innerhalb des Agglomerationsprozesses steigt die Wahrscheinlichkeit der Anlagerung des Aufgabematerials an den gebildeten Startkeimen. Somit kommt es durch eine längere Agglomerationszeit zu einer Verschiebung der Verteilungssummenkurve hin zur größeren Partikelfraktion (siehe Abbildung 6-59).

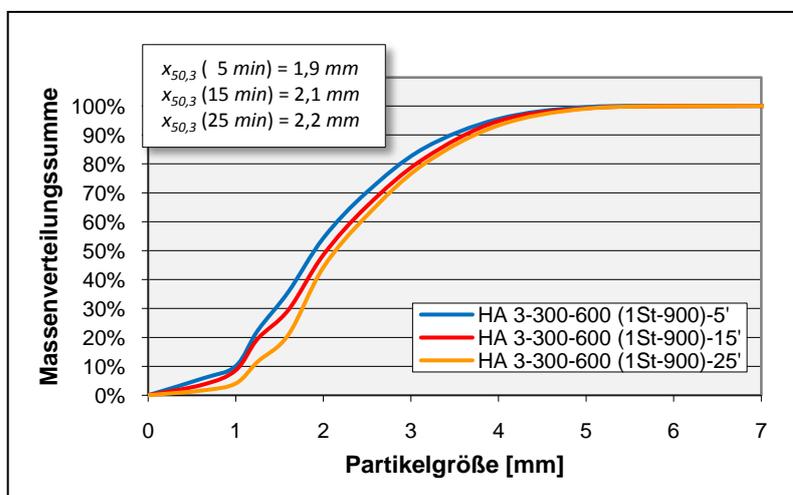


Abbildung 6-59 Massenverteilungsdichte unterschiedlicher Agglomerationszeiten

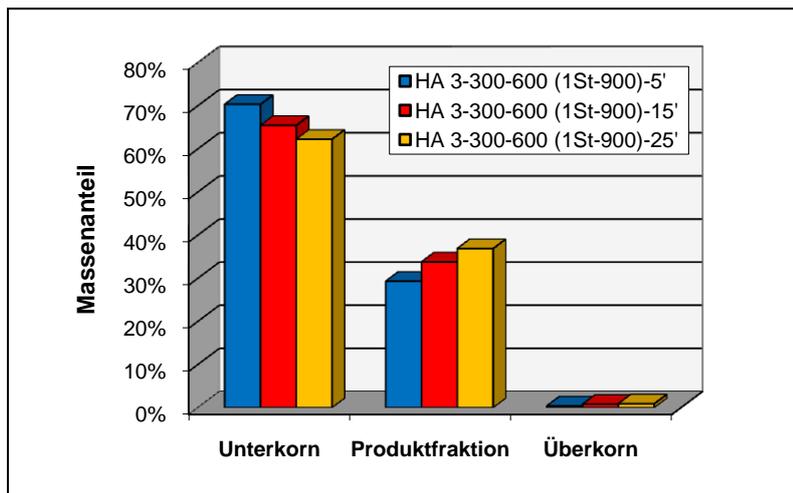


Abbildung 6-60 Massenanteile der Fraktion bei unterschiedlichen Verweilzeiten im Intensivmischer

So nimmt neben dem Medianwert der Massenverteilungssumme „ $x_{50,3}$ “ auch der Massenanteil der Faseragglomerate in der Produktfraktion zu (siehe Abbildung 6-60). Zudem wird durch die längere Verweilzeit bzw. durch den gesteigerten Energieeintrag eine höhere Verdichtung des Agglomeratgefüges hervorgerufen. Diese Verdichtungswirkung wird in der Gegenüberstellung der Porositäten der Produktfraktionen der unterschiedlichen Agglomerationszeiten ersichtlich (siehe Abbildung 6-61). So kann die Verweilzeit im Intensivmischer als eine Regelgröße der sich einstellenden Porosität bei vergleichbarer Agglomeratgröße herangezogen werden.

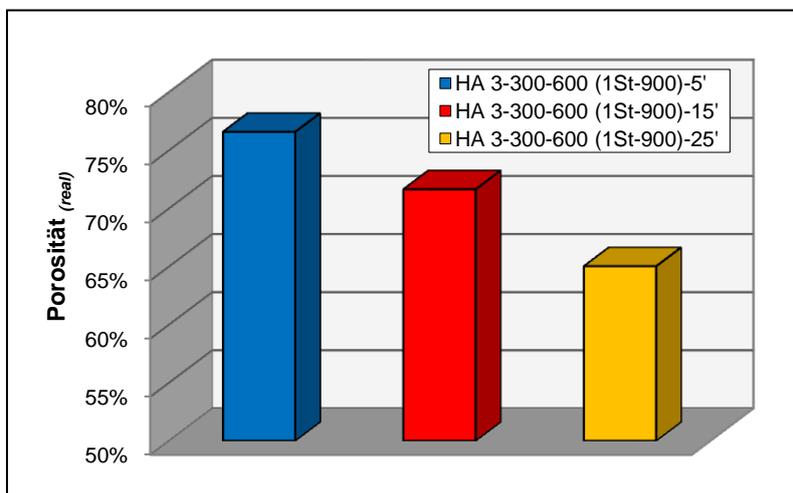


Abbildung 6-61 Porositäten der Produktfraktion bei unterschiedlichen Verweilzeiten im Intensivmischer

6.3 Einfluss der Trocknungsvariation auf die Festigkeit

Wie innerhalb des Kapitels 3 „Grundprozesse der Faseragglomeration“ theoretisch dargestellt wurde, hat die Trocknungsgeschwindigkeit eine Auswirkung auf die Größe und Stabilität der gebildeten kristallinen Feststoffbrücken und somit auch einen entscheidenden Einfluss auf die Druckfestigkeit des Agglomerates. Zur analytischen Bewertung des Festigkeitsunterschiedes bei verschiedenen Trocknungsbedingungen wurde die 5 mm-Fraktion der Versuchsreihe HA 6-300-600 (1St-900)-PN herangezogen. Zum Vergleich der unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften wurde zudem die Druckfestigkeit des Grünkörpers aufgenommen, um so die Festigkeitszunahme bei der Trocknung darzustellen (siehe Abbildung 6-62).

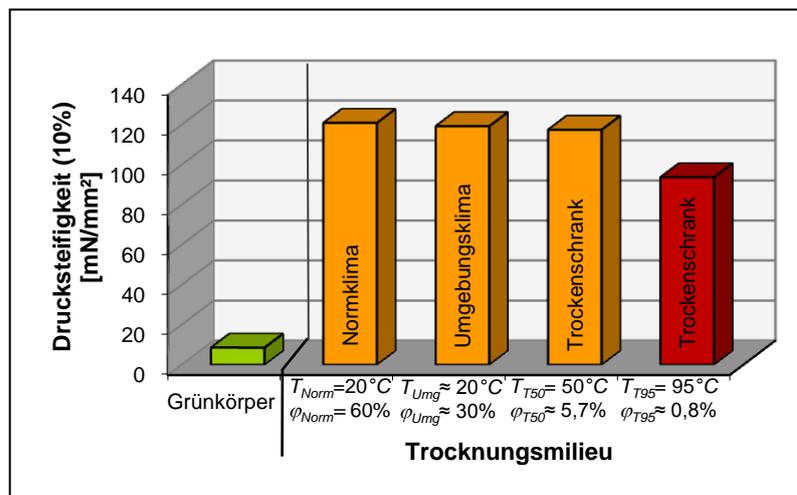


Abbildung 6-62 Trocknungsvariantenabhängige Festigkeit
5 mm-Fraktion HA 6-300-600 (1St-900)-PN

In der Gegenüberstellung der Festigkeitswerte des Grünkörpers zu den getrockneten Faseragglomeraten ist ein deutlicher Festigkeitszuwachs im Mittel um den Faktor 14 zu sehen (ausgenommen Trockenschrank bei 95°C). Somit ist es eindeutig, dass es beim Abtrocknen der Feuchte zur Bildung von Feststoffbrücken kommt, die die Stabilität des Faseragglomerates erhöhen.

Entgegen der Erwartungen aus den theoretischen Grundlagen kommt es zu einer Festigkeitsabnahme bei höheren Temperaturen bzw. höheren Trocknungsgeschwindigkeiten. Während die Abnahme der Druckfestigkeit in Bezug auf den Normklimawert (120,88 mN/mm²) bei Umgebungsbedingungen um 1,3% und im Trockenschrank bei 50°C um 2,8% als gering anzusehen ist, wird die Abnahme bei der Trocknung im Trockenschrank bei 95°C um 22,5% eindeutig. Die Unterschiede zwischen den Trocknungen im Norm- und Umgebungsklima sowie bei 50°C sind zu gering, um eine weitere Diskussion anzustreben, da diese Abnahmen im Streubereich der Massen- und

somit Porositätsabweichungen liegen. Bei der höheren Trocknungstemperatur von 95°C mit einer gemittelten relativen Feuchte von 0,8% konnte die Frage der Festigkeitsabnahme nicht geklärt werden. Eine mögliche Schädigung des Fasermaterials bzw. thermische Umsetzung von Bestandteilen kann aufgrund einer *NIR-Spektroskopie* weitestgehend ausgeschlossen werden, da im Kurvenverlauf der wellenlängenabhängigen Intensität keine signifikanten Abweichungen zur unbehandelten Hanffaser sowie zu den bei anderen Milieus getrockneten Faseragglomeraten festzustellen waren (siehe Abbildung 6-63; siehe auch Anlage).

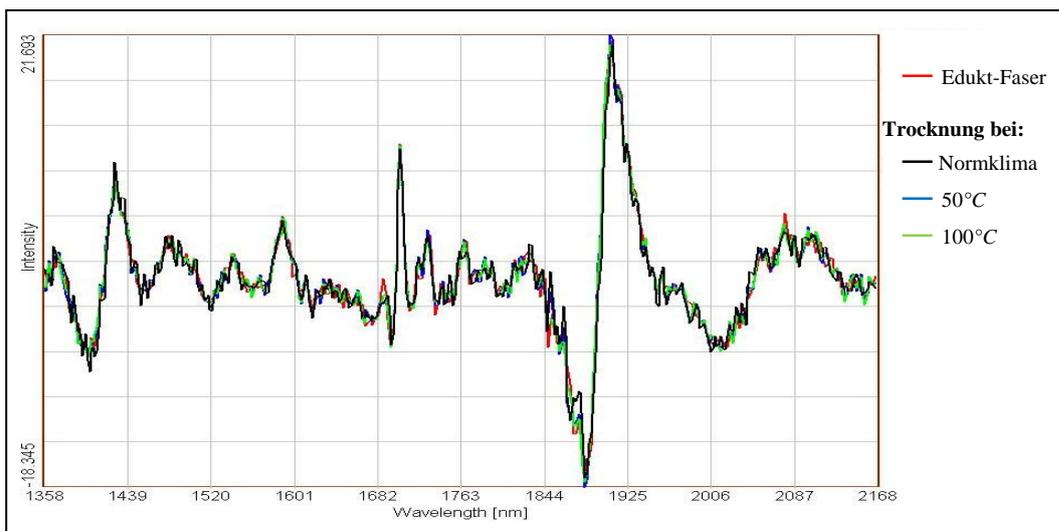


Abbildung 6-63 NIR-Spektroskopie (2. Ableitung des Intensitätsverlaufes) unterschiedlich getrockneter Hanffaseragglomerate

Die geringen Abweichungen des Intensitätsverlaufes werden zum einen in unterschiedlichen Materialpackungsdichten zum anderen in den leicht unterschiedlich gewölbten, kugeligen Makrogestalten der einzelnen Faseragglomerate gesehen. Hierdurch können geringe Zu- bzw. Abnahmen der Intensität in einzelnen Punkten auftreten. Jedoch ist keine eindeutige Verschiebung des Intensitätsverlaufes und somit keine signifikante Faserzerstörung zu erkennen.

Eine weitere Ursache der Abnahme der Drucksteifigkeit bei einer höheren Trocknungsgeschwindigkeit kann darin liegen, dass sich eine Kruste mit einer geringen Dampfdurchlässigkeit an der Agglomeratoberfläche bildet. Durch den im Inneren des Faseragglomerates aufgrund der Milieutemperatur vorherrschenden, im Vergleich höheren Dampfdruck, kann es zur Bildung von Rissen in der äußeren Schicht kommen und so die Druckfestigkeit des Agglomerates mindern.

6.4 Diskussion der Faseragglomerationsprozesse

Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass beide Verfahren (Roll- sowie Aufbauagglomeration) zur Agglomeration von Fasermaterialien geeignet sind. Zur Abschätzung des Potentials dieser Verfahren wurden Kurzversuche der Faseragglomeration durch Pressverfahren (Ring- sowie Flachmatrizenpresse; Anlagenbeschreibung siehe Anhang) durchgeführt und für einen subjektiven Vergleich der Prozesse sowie der Produkte herangezogen.

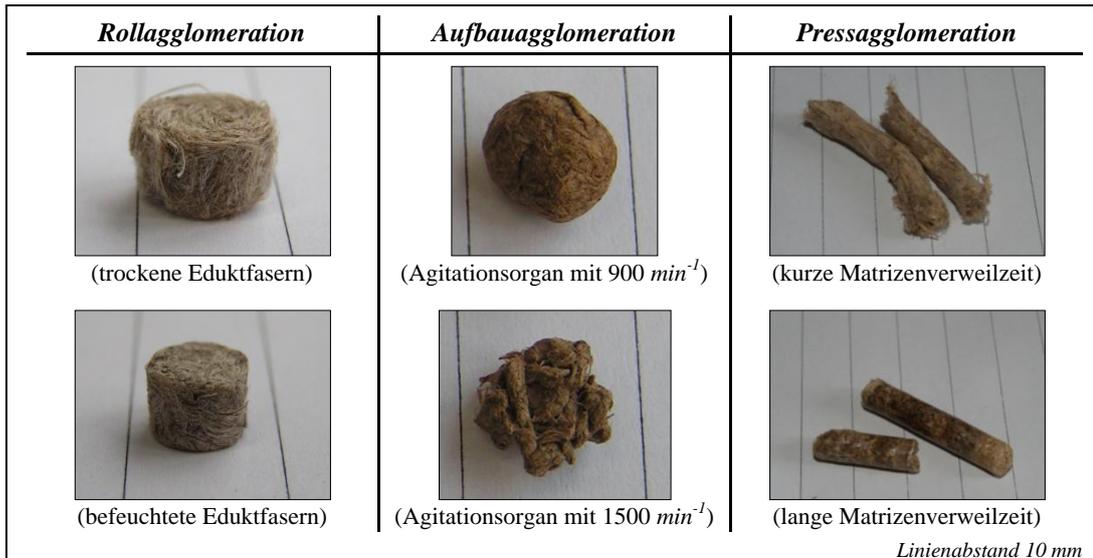


Abbildung 6-64 Beispielhafte Produktgegenüberstellung der einzelnen Agglomerationsverfahren

Bei den Verfahren der Press- sowie der Rollagglomeration kann durch anlagentechnische Gestaltung Einfluss auf die geometrische Gestalt der Faseragglomerate genommen werden. Da die Matrizenpressen ohne Abscherhobel betrieben wurden, bildeten sich unterschiedlich lange Faseragglomerate aus. Bei der betrachteten diskontinuierlichen Mischagglomeration stellte sich bei allen Versuchen eine Größenverteilung der Faseragglomerate ein. Diese Verteilung konnte durch eine Zweistufigkeit in Richtung größerer Agglomerate verschoben werden. Die Agglomeratgröße bei der Rollagglomeration folgt in erster Linie dem Rollgangsquerschnitt. Des Weiteren kann durch Variation des Füllgrades bzw. zugeführten Faservolumens sowie der Faserfeuchte das Reexpansionsverhalten beeinflusst werden. Die unterschiedlichen Geometrien (zylindrisch, doppelkeglig, kugelhähnlich) der Rollagglomerate können durch die Orientierung der Reibschlusswandungen gezielt hervorgerufen werden. Hierbei kommt es zu einer abweichenden Strukturausbildung des Fasergefüges. So lässt sich bei zylindrischen Rollagglomeraten eine zentrierte Torsionsstruktur erkennen. Bei den doppelkeglichen Rollagglomeraten hingegen zeigte sich vor allem bei den aus trockenen Fasern erzeugten Agglomeraten eine Verzwirbelung der Enden. Es bleibt zu klären, inwieweit die

Makrogestalt sowie die Struktur des Fasergefüges einen Vor- bzw. Nachteil auf mögliche Anwendungszwecke haben.

Die geringste Porosität bzw. höchste Scheindichte lässt sich mit der Pressagglomeration erzielen, was jedoch eine große mechanische sowie thermische Einwirkung auf das Fasermaterial hervorruft (bis zu 110°C). Durch die Zugabe von Wasser und/oder eines weiteren Schlupfmittels sowie durch Erhöhung des Faservolumenstromes besteht die Möglichkeit, diese Einflüsse aufgrund einer Verkürzung der Verweilzeit in der Matrize herabzusetzen. Dies führt zu einer Minderung der Scheindichte sowie zu einer Erhöhung des Oberflächenindex besonders im Bereich der Enden. Die größte Bandbreite der erzeugten Porositäten wiesen die Faseragglomerate der Rollagglomeration auf. Insbesondere über den Feuchtezustand der Fasern sowie über den Füllgrad konnte gezielt Einfluss auf die Porosität genommen werden. Die Faseragglomerate der Aufbauagglomeration wiesen eine agglomeratgrößenabhängige Porosität auf (Porositätszunahme mit Größenzunahme). Bei einer Drehzahl von 1500 min^{-1} des Agitationsorgans kam es zur Bildung von deutlich zerklüfteteren Agglomeraten (im Gegensatz zu 900 min^{-1}), was eine Abnahme der Agglomeratfestigkeit bewirkte. Mit der Verkürzung der Verweilzeit konnte hingegen in Kurzversuchen eine Porositätssteigerung der Produktfraktion nachgewiesen werden.

Neben der Zunahme der Porosität bei den Versuchen der Aufbauagglomeration mit erhöhter Drehzahl des Agitationsorgans zeigte sich zudem eine deutliche Zunahme der Unregelmäßigkeit der Oberfläche bzw. eine Zunahme des Oberflächenstrukturindex. Die Pressagglomerate weisen generell eine relativ glatte Mantelfläche auf (Stirnseiten teilweise ausgefranst), was durch eine erhöhte thermische Einwirkung noch begünstigt wird. Den höchsten Oberflächenstrukturindex weisen die Faseragglomerate der Rollagglomeration bei der Verarbeitung von trockenen Fasern auf. Mit Zugabe von Wasser stellen sich Körperoberflächen ein (siehe Abbildung 6-64), die vergleichbare Oberflächenstrukturindizes wie die der anderen beiden Verfahren besitzen. Ein weiterer Gesichtspunkt speziell im Hinblick auf eine Durchströmung des Agglomerates sowie auf eine mögliche Zugänglichkeit der inneren Oberfläche ist die Durchlässigkeit bzw. Porosität der Agglomeratoberfläche. Bei einer subjektiven Betrachtung dieser Oberflächen der einzelnen Faseragglomerate (siehe Abbildung 6-65) wird ersichtlich, dass bei der Pressagglomeration eine geschlossene Oberfläche vorliegt.

Dies ist auch bei den Körpern der Aufbauagglomeration (900 min^{-1}) der Fall. Hervorgehoben wurde dies durch die relativ feinen Fasern, welche zur Ausbildung einer engmaschigen Oberflächenstruktur führen, deren Zwischenräume zudem von dem auskristallisierten Bindemittel verschlossen werden. Lediglich bei den Rollagglomeraten ist bei

beiden Varianten des Feuchtezustandes der eingetragenen Fasern eine offene Oberflächenstruktur zu sehen. Durch den Füllgrad sowie durch unterschiedlich dicke und biegsame Fasermaterialien kann hierauf Einfluss genommen werden, was die Untersuchungen mit verschiedenen Fasermaterialien erkennen ließen. Prinzipiell zeigte sich bei allen Versuchsreihen eine Abhängigkeit der Festigkeitswerte von der Porosität des jeweiligen Faseragglomerats. Zudem kommt es durch die Zugabe von Wasser, was ein Anlösen der fasereigenen Bindemittel bewirkt, zu einem deutlichen Festigkeitszuwachs.

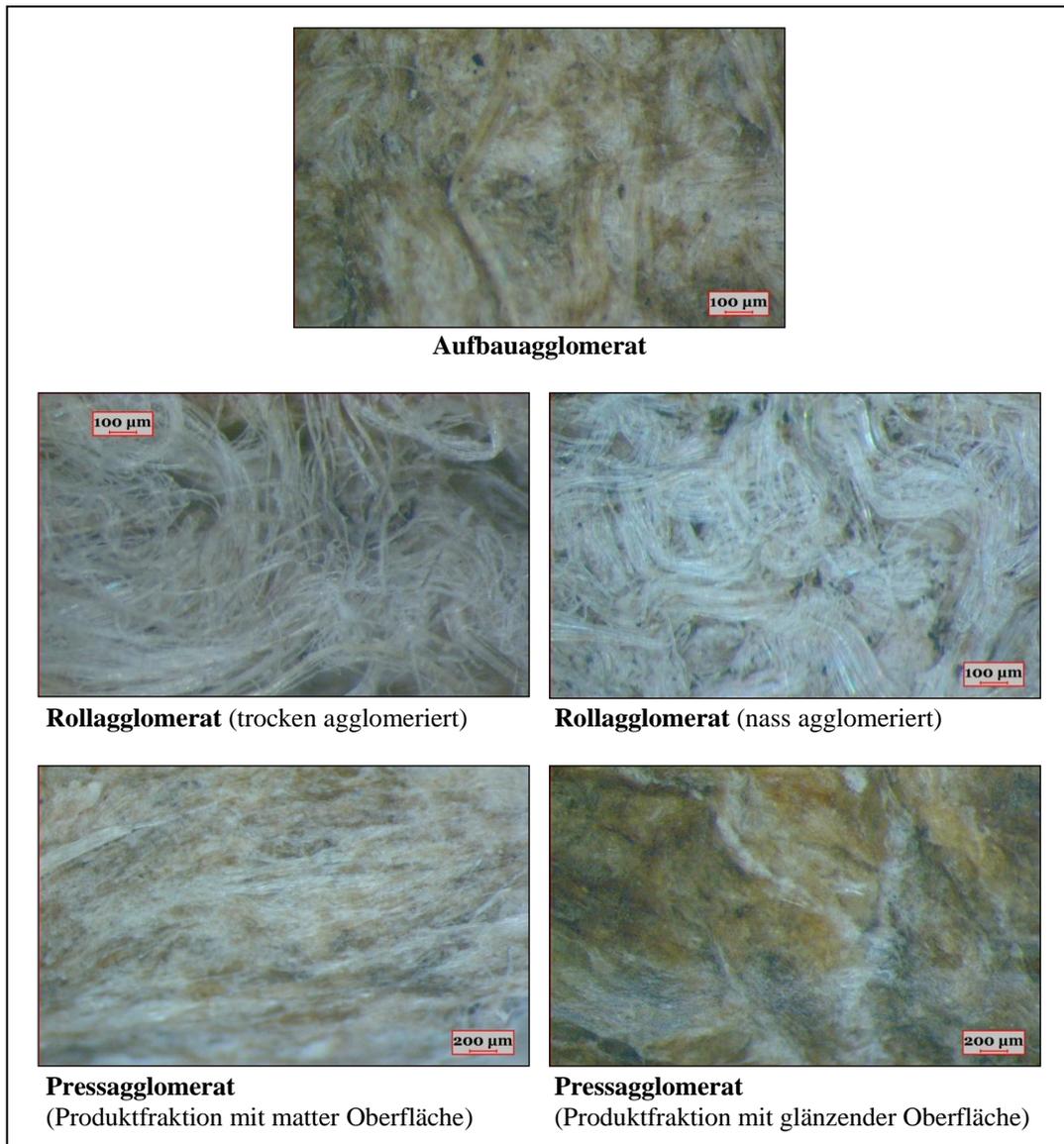


Abbildung 6-65 Oberflächenbetrachtung der Agglomerate unterschiedlicher Produktionsverfahren

Durch die stochastische Zerkleinerung des Fasermaterials innerhalb der untersuchten Matrizenpresse ist es schwer, eine gezielte Faserlänge in das Agglomerat einzubinden. Da es bei der Aufbau- und Rollagglomeration zu keiner wesentlichen Faserzerkleinerung durch den Prozess kommt, kann über eine vorgeschaltete Faserkonditionierung die

eingebundene Faserlänge zielgerichtet eingekürzt werden. Während bei der Faseragglomeration eine breite Spanne von Faserlängen agglomeriert werden kann, ist diese bei der untersuchten Aufbauagglomeration begrenzt.

Tabelle 6-8 Abhängigkeitstrend der Agglomerateigenschaften mit steigendem Einflussparameter

<i>Einfluss durch Zunahme</i>		<i>Agglomerateigenschaften</i>						
		Abmessung	Kubizität	Oberflächenstrukturindex	Porosität	Drucksteifigkeit	Rückverformung	Zugfestigkeit
Füllgrad	N/B	↗	↘...↗	↘	↘...→	↗	↘	↗
weicherer Wandbelag	N/B	↘	↘	↘	→	→	→	k. A.
Befeuchtung		↘	↘	↘	↘	↗	↘	↗
Faserlänge	N	↘...→	→	↘	↘...→	→	→	↗...→
	B	→	→	→	→	→	→	↗...→
Rollgangsabmessung	N	↗	→	→	↘...→	↘	↗	k. A.
	B	↗	→	→	→	→	→	k. A.
Rollstrecke	N	↘	↘	↘	↘	↗	↘	k. A.
Rollgangsverjüngung	N	↘	optional		→	↗	k. A.	k. A.
	B	↘	optional		↗	↗	k. A.	k. A.
Schlussfolgerung aus Variation des Fasermaterials								
Biege widerstand		↗	k. A.	↗	↗	k. A.	k. A.	k. A.
Faserdicke		↗	k. A.	↗	↗	k. A.	k. A.	k. A.
Faserrauheit		↘	k. A.	↘	↘	↗	k. A.	↗

<i>Abhängigkeitsverlauf</i>	
stetig zunehmend	↗
zunehmend bis konstant	↗...→
konstant	→
abnehmend bis konstant	↘...→
stetig abnehmend	↘

Bei einer Gegenüberstellung dieser drei Verfahren weist die Rollagglomeration die größte Produktpannweite (bezüglich der Agglomerateigenschaften) auf. So können Faseragglomerate unterschiedlicher Geometrie und Größe sowie Porosität und Oberflächenstruktur erzeugt werden. Zudem erlaubt das Verfahren eine gute Einflussnahme auf die Festigkeitskennwerte (siehe Tabelle 6-8). Über die unterschiedlichen Anlagenparameter lassen sich die Agglomerateigenschaften innerhalb begrenzter Bereiche regeln. Hingegen weist die Pressagglomeration als Stand der Technik einen höheren Durchsatz auf, was derzeit ein entscheidender Vorteil ist.

Kapitel 7

Gestaltung möglicher Technikumsanlagen

7 Gestaltung möglicher Technikumsanlagen

Die Untersuchungen der möglichen Roll- sowie der Aufbauagglomeration von Fasermaterialien wurden bisher in labortechnischen Anlagen durchgeführt. Um eine Schlussfolgerung von den ermittelten Eigenschaften des Einzelkörpers auf das Verhalten im Agglomeratkollektiv ziehen zu können, werden anwendungsorientierte Untersuchungen angestrebt. Hierfür ist eine Steigerung der Produktivität erforderlich, welche durch eine Teilautomatisierung sowie durch ein Scaleup bzw. durch Parallelisieren der Agglomerationseinheit erreicht werden soll.

Für die erste Generation von Technikumsanlagen wird ein Produktmassenstrom von 5 kg/h angestrebt. Prinzipiell besteht die Hauptprozesslinie neben der Agglomerationseinheit aus einem Klassier- sowie optional aus einem Trocknungs- bzw. einem Kühlungsprozess. Bei den betrachteten Agglomerationsprozessen, bei denen für die Bildung Wasser oder eine andere Flüssigkeit als Bindemittel hinzugegeben wird, ist zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung die Trocknung der Produkte wichtig. Für diesen Zweck ist ein im Gegenstrom betriebener Konvektionstrockner mit nachgeschaltetem Kondensator und Staubabscheider angedacht. Die Auslegung dieser Trocknungseinheit muss vorab anhand von Trocknungsversuchen des betreffenden Agglomeratkollektivs erfolgen, da die Trocknungsparameter neben der vorab zugeführten Wassermenge vor allem von den äußeren und inneren Porositäten des Faseragglomerates beeinflusst werden. Das innerhalb des Kondensators anfallende Wasser kann in die Agglomerationseinheit zurückgeführt werden. Die optionale Notwendigkeit der Klassiereinheit sowie eines möglichen weiteren Sortierprozesses (z. B. Verkohlungsgrad bei Pressagglomeraten) ist von den Anforderungen des späteren Anwendungsgebietes abhängig. Die Abtrennung des Unter- und Überkorns kann innerhalb einer Prozessstufe beispielsweise in einem Trommel- oder Taumelsieb erfolgen. Die mögliche Vorbehandlungsstrecke des eingesetzten Fasermaterials wie Ballenöffner, Förderer etc. wird in den Darstellungen der Grundfließbilder nicht aufgenommen.

Faseragglomeration mittels Rollagglomeration

Aufgrund des definierten Prozessraumes weisen die Faseragglomerate des Tellerrollagglomerators eine relativ geringe Streuung der erzeugten Größe auf. Hingegen kann es aufgrund von Varianzen in dem aufgebenden Faservolumen zu Abweichungen in der sich einstellenden Porosität des Agglomerates sowie deren Masse kommen. Somit ist eine Klassierung des Produktstromes bei einer optimierten Faserzufuhr nicht erforderlich (siehe Abbildung 7-1). Je nachdem, in welchem Maße die herangezogene Faserzufuhreinheit Streuungen im aufgegebenen Faservolumen erzeugt, ist eine gravimetrische

Sortierung beispielsweise per Windsichter vorzunehmen. Im Vergleich zur Aufbauagglomeration sowie zur Pressagglomeration ist der anlagentechnische Aufwand der Rollagglomeration geringer. Für die Erfüllung des angestrebten Produktvolumenstromes sind jedoch noch Weiterentwicklungen sowie Modifikationen der Rollagglomerationseinheit erforderlich.

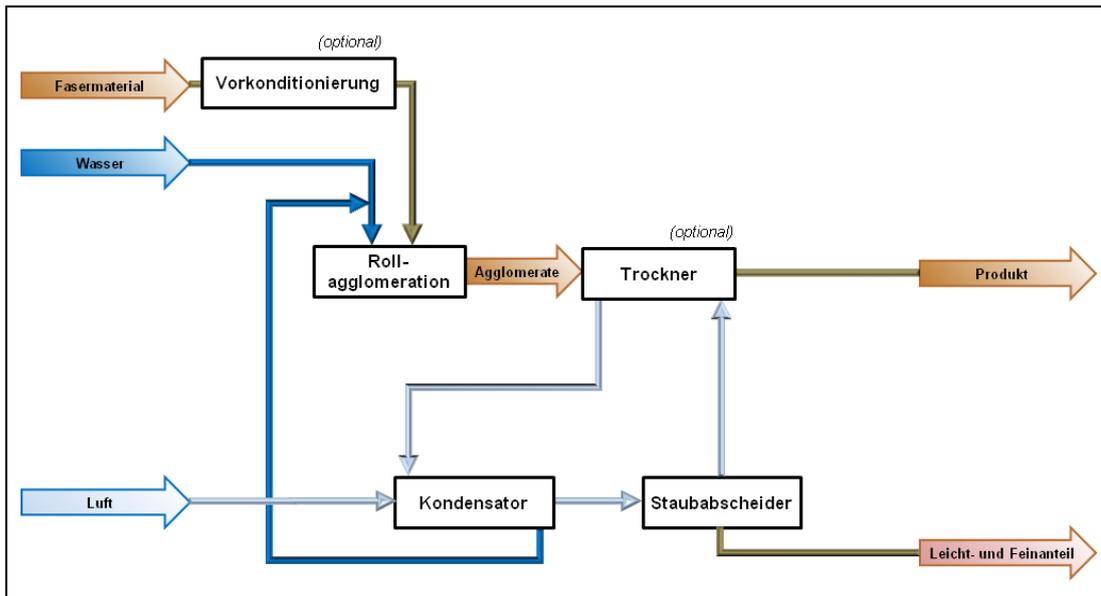


Abbildung 7-1 Grundfließbild einer möglichen Rollagglomerationanlage

In Hinblick auf die Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffen wird ein maximaler Feret-Durchmesser von 6 mm angestrebt. Des Weiteren wird eine geringe Kubizität, Porosität sowie ein geringer Oberflächenstrukturindex bezüglich des Dosier-, Lager- und Transportverhaltens bevorzugt. Diese Anforderungen machen eine Befeuchtung des Fasermaterials erforderlich. Um eine geeignete Zufuhr des Fasermaterials in den Rollgang zu gewährleisten, wird eine Verjüngung des Rollganges vorgesehen. Aufgrund der durchgeführten Untersuchung wird die Herstellung eines zylindrischen Faseragglomerates ($h_{\text{Agg}}=d_{\text{Agg}}=4,25\text{ mm}$) mittels axialer Reibschlusswandung angestrebt.

In Bezug auf das Reexpansionsverhalten bei verjüngtem Rollgang beträgt die erforderliche Rollgangshöhe $3,5\text{ mm}$ bei einer Rollgangsbreite von 3 mm . Somit wird dem Agglomerationsprozess ein Nutzvolumen von $24,74\text{ mm}^3$ pro Rollgang zur Verfügung gestellt. Bei einem Füllgrad von 100% und einer Faserdichte von $1,45\text{ g/cm}^3$ (Hanffaser) ergibt sich eine Agglomeratmasse von $32,3\text{ mg}$. Für die Produktion des angestrebten Volumens von 5 kg/h ist somit ohne Berücksichtigung von Rüstzeiten die Herstellung von 43 Faseragglomeraten pro Sekunde erforderlich. Da die Optimierung der Faserzu-

fuhreinheit des Rollagglomerators noch aussteht, wird zunächst mit einer Produktionsrate von $1,075 \text{ sec}^{-1}$ pro Rollgang gerechnet, was eine Parallelisierung von 40 Rollgängen erforderlich macht. Bei einem Abstand der Agglomerate im Rollgang zueinander von 100 mm beträgt die Anlagendrehzahl $5,13 \text{ min}^{-1}$. Dieser Abstand wird aufgrund kurzzeitiger Agglomeratsverklebung im Rollgang vorgesehen. Bei Anlagen mit einem geringen Spaltmaß sinkt das Risiko der Faserverklebung, so dass eine Verringerung des Abstandes und damit eine Erhöhung der Produktivität vorgenommen werden kann. Der erzeugte Produktmassenstrom ist ebenfalls von der Rollgangsabmessung und dem Füllgrad abhängig.

Zur Parallelisierung des Prozesses können eine Mehrzahl von Rollagglomerationstellern auf einer Antriebsachse als Tellerpaket angeordnet werden (siehe Abbildung 7-2). Das Funktionsprinzip des mehrstöckigen Rollagglomerators ist mit dem des einfachen (siehe auch Kapitel 4) identisch. Das Tellerpaket besteht aus einer Rotor- und einer ihn tangential umschließenden Statoreinheit, welche sich aus Segmentteilen (axiale Rollgangsbegrenzung) und Ringen bzw. Scheiben (radiale Rollgangsbegrenzung) zusammensetzt. Die jeweiligen Bauteile der Rotor- und der Statoreinheit sind miteinander verschraubt, was einen Austausch sowie die Variation der Rollgangsabmessungen ermöglichen. Gegebenenfalls können in den Segmentteilen des Rotors bzw. Stators Nuten zur Führung des an ihn stoßenden Statorringes bzw. Rotorscheibe eingearbeitet werden.

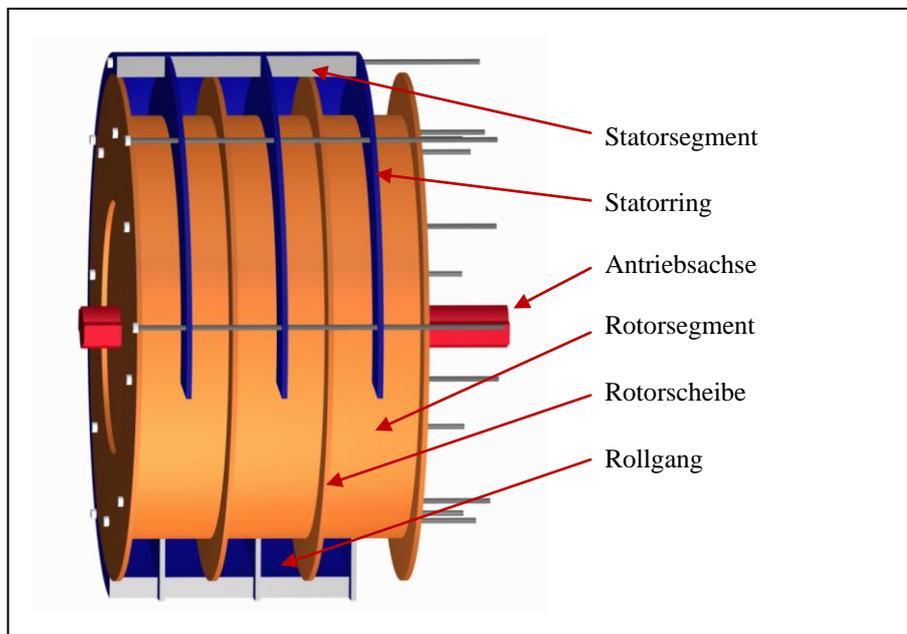


Abbildung 7-2 Aufbau eines liegenden mehrstöckigen Rollagglomerationstellers

Ein weiterer wichtiger Schritt für die Bereitstellung einer produktionsorientierten Technikumsanlage ist eine automatisierte Faserzufuhr. Liegt ein schüttfähiges Kurzfasermaterial vor, kann die Aufgabe in den Rollgang über eine Schneckenförderung erfolgen (siehe Abbildung 7-3). Um eine Verteilung des Aufgabegutes über den gesamten Rollgang zu vermeiden, ist der Einsatz eines Sperrschottes (siehe auch Kapitel 4) erforderlich. Dieses staut die aufgegebene Fasermasse und öffnet den Rollgang kurzzeitig, wenn die gewünschte Fasermasse in den Rollgang aufgegeben wurde.

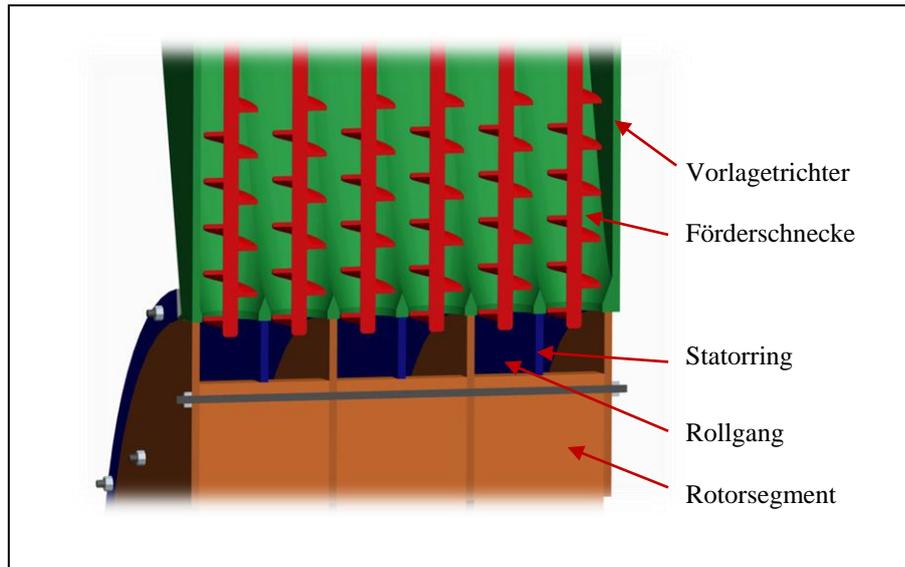


Abbildung 7-3 Faserzufuhr mittels Förderschnecken (Schnitt)

Besitzt das Fasermaterial aufgrund der Faserlänge das Problem sich um die Schnecken-einheiten zu wickeln, ist dieser Lösungsansatz der Faserzufuhr nicht nutzbar. Um dennoch eine Zufuhr längerer Fasermaterialien zu ermöglichen, ist der Einsatz von Reiß-scheiben möglich (siehe Abbildung 7-4) [J.P.'06]. Die Reißscheibe weist einen oder mehrere Reißzähne auf, deren Geometrie an den Rollgang, das Fasermaterial und an das angestrebte Faservolumen, welches pro Agglomerat eingebunden werden soll, ange-passt ist. Während der Reißzahn durch die Vorlage des Fasermaterials geführt wird, kommt es zu einem Herausziehen von Faserkollektiven aus dem Vorlagegefüge. Ein Verhaken des Fasermaterials am Reißzahn ist in den Fällen möglich, wo die Faser nahezu mittig erfasst wird und an beiden Enden der Faser der gleiche Widerstand gegen das Herausziehen vorliegt. Durch unterschiedlich tiefe Einbuchtungen des Zahnprofils kann das Faservolumen, welches in den Rollgang aufgegeben wird, begrenzt werden. Zur Vermeidung eines Umschlingens von Fasermaterial um die Reißscheibe, muss der Radius der Reißscheibe mindestens der halben Faserlänge entsprechen. Da es bei Fasern mit rauen sowie mit verzweigten Oberflächen zu Formschlussbindungen untereinander

kommen kann (Bildung von zusammenhängenden Faserkollektiven größerer Länge), ist das Verhältnis von Reißscheibenradius zur Faserlänge zu erhöhen.

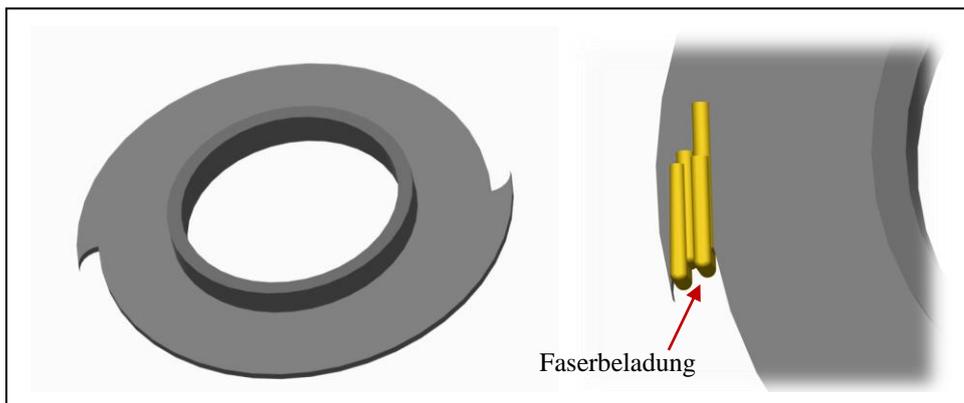


Abbildung 7-4 Zwei-Zahn-Reißscheibe

Der mit den Fasern beladene Reißzahn wird durch eine Öffnung im Statorsegment in den Rollgang geführt (siehe Abbildung 7-5). Hierbei muss der Reißzahn so ausgerichtet werden, dass es zum Kontakt von Fasermaterial und der entsprechenden Rotorscheibe kommt. Dadurch, dass die Rotorscheibe eine höhere Rotationsgeschwindigkeit als die Reißscheibe aufweist, wird das Faserkollektiv aus dem Reißzahn entnommen. Je tiefer der konkave Bereich des Reißzahnes ist desto höher muss die vorherrschende Geschwindigkeitsdifferenz sein, um eine Entnahme des Faserkollektives sicherzustellen.

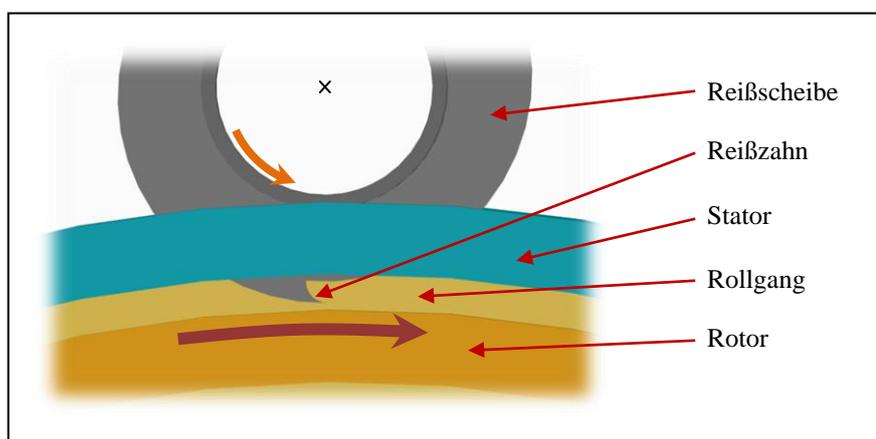


Abbildung 7-5 Schnitt durch Rollgang mit Reißscheibe als Faserzuführorgan

Bei der Nutzung von Reißscheiben zur Beschickung von mehrstöckigen Rollagglomerationstellern mit Fasermaterialien lassen sich die einzelnen Reißscheiben als Reißwalzen zusammenfassen. Hierbei ist es von Vorteil, wenn die Reißzahnreihen einen Versatz zueinander aufweisen, um Belastungsspitzen auf die entsprechende Antriebseinheit zu vermeiden (siehe Abbildung 7-6).

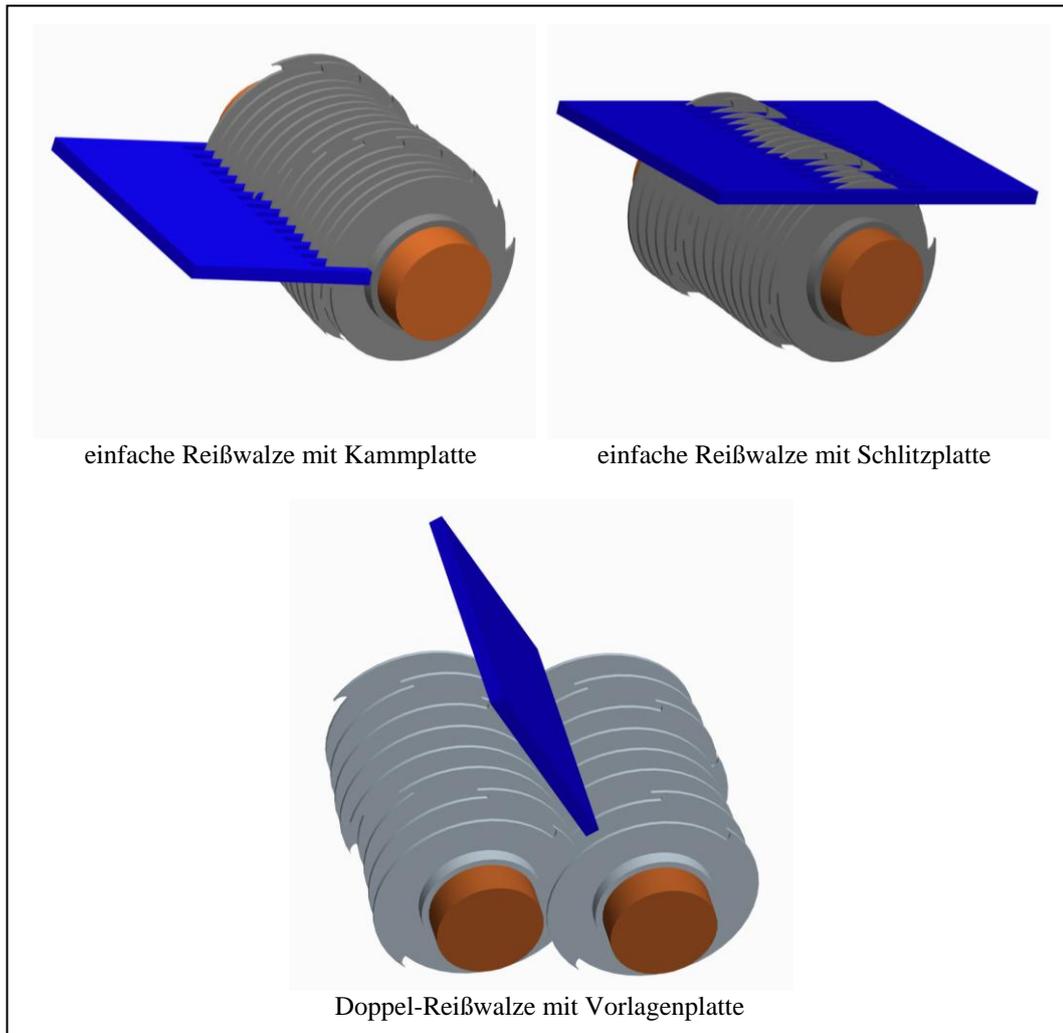


Abbildung 7-6 Gestaltungsmöglichkeiten von Reißscheibenpaketen

Für die Fixierung der Fasermaterialvorlage bestehen bislang drei Lösungsansätze, welche skizzenhaft in der Abbildung 7-6 dargestellt sind. Sowohl bei dem Einsatz von Kamm- als auch bei Schlitzplatten kommt es zu einer Faseranreicherung auf den Plattenstegen. Eine Minderung dieses Verhaltens konnte durch einen Versatz der Reißzahnreihen erzielt, jedoch nicht gänzlich vermieden werden. Vorteile verspricht hier der Einsatz einer Doppel-Reißwalze. Auch ein Einsatz einer Bürstenwalze als Zufuhreinheit einer Reißwalze scheint zielführend. Hierbei werden zu große Faserkollektive, welche sich auf der ersten Reiß- bzw. Bürstenwalze befinden, durch die Reißscheiben der zweiten Walze in kleinere Faserkollektive aufgeteilt und in die Rollgänge eingetragen.

Ein entscheidender Vorteil der Verwendung von Reißscheiben zur Faserzufuhr in den Rollagglomerationsteller ist, dass das Fasermaterial keiner weiteren Aufbereitung bedarf und durch die Reißscheiben direkt Fasern aus einem Faserballen in den Rollgang eingetragen werden können [J.P.'06]. Dem steht jedoch das stochastische Erfassen von Faserkollektiven als Nachteil gegenüber. So weisen die erfassten Faserkollektive unter-

schiedliche Massen auf, was je nach weiterem Verwendungszweck ein Nachschalten eines Sortierprozesses erforderlich macht. Desweiteren kommt es vor, dass sich nach dem Durchlauf des Reißzahnes durch die Faservorlage keine Fasermasse an diesem verhaftet. Somit wird die Produktivität des Rollagglomerationstellers herabgesetzt.

Weist das Eduktmaterial eine für den späteren Verwendungszweck des Agglomerates zu große Faserlänge auf, ist eine Einkürzung der Fasern erforderlich. Zur Erzeugung von schüttfähigen Fasermaterialien kann auf die Verwendung von Zerkleinerungseinheiten (z. B. Schneidmühlen) zurückgegriffen werden. Die Zufuhr erfolgt in diesem Fall über die oben dargestellte Förderschnecke. Eine Möglichkeit der Erzeugung von Faserkollektiven größerer Länge für die Zufuhr in den Rollgang liegt in dem Einsatz von integrierten Faserablängungseinheiten des Zuführorganes (siehe Abbildung 7-7).

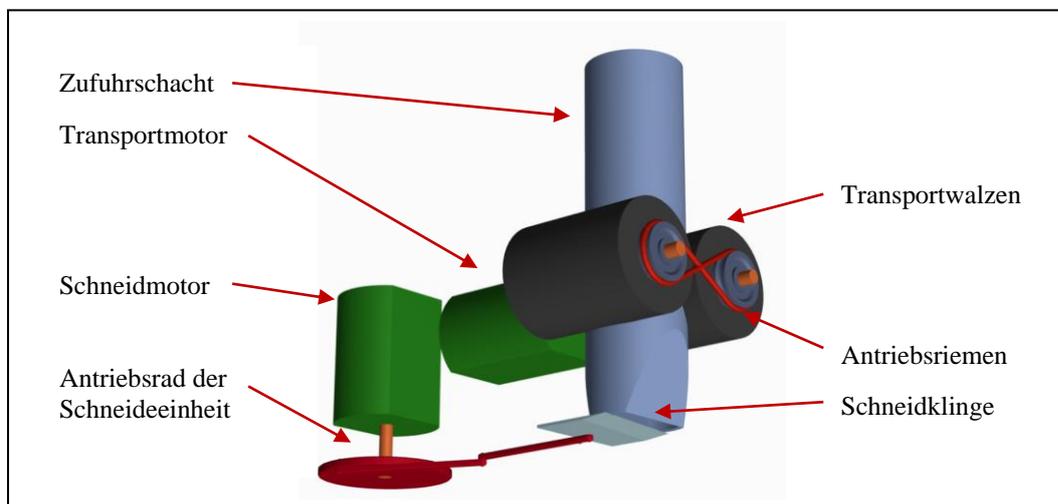


Abbildung 7-7 Faserzufuhr mit integrierter Faserablängung für Labor-Versuchseinheit

Für die Faseraufgabe mittels der dargestellten integrierten Faserablängungseinheit ist die Faservorlage in Form eines strangförmigen Fasergeleges erforderlich. Hierbei ist es jedoch nicht von Bedeutung, dass die Fasern eine absolute Parallelität aufweisen. Aus diesem Grund reicht für die Vorlage ein einfach kardiertes Faserflor, welches der Länge nach in Streifen geschnitten wurde. Die längenspezifische Fasermasse bzw. das Faservolumen bildet in Abhängigkeit zur eingestellten Schnittlänge der Faserablängungseinheit das aufgebende Faservolumen. Der über den Kardierprozess erzeugte Faserstrang wird durch den Zufuhrschacht mittels der gegenläufigen Transportwalzen in den Rollgang unterhalb der Schneidlinie eingeführt. Nach Erreichen der gewünschten Schnittlänge kommt es durch den Vorschub der Schneidklinge zur Ablängung des Faserstranges. Die Schneidklinge weist vorzugsweise eine angeschrägte Schneide auf. Inwieweit eine zusätzliche Schneide an der gegenüberliegenden Schachtwandung einen Vorteil bringt, muss in ersten Versuchen überprüft werden. Optional kann diese Schnei-

de gezackt sein. Hierdurch wird die Lage des Faserstranges während des Schnittes fixiert.

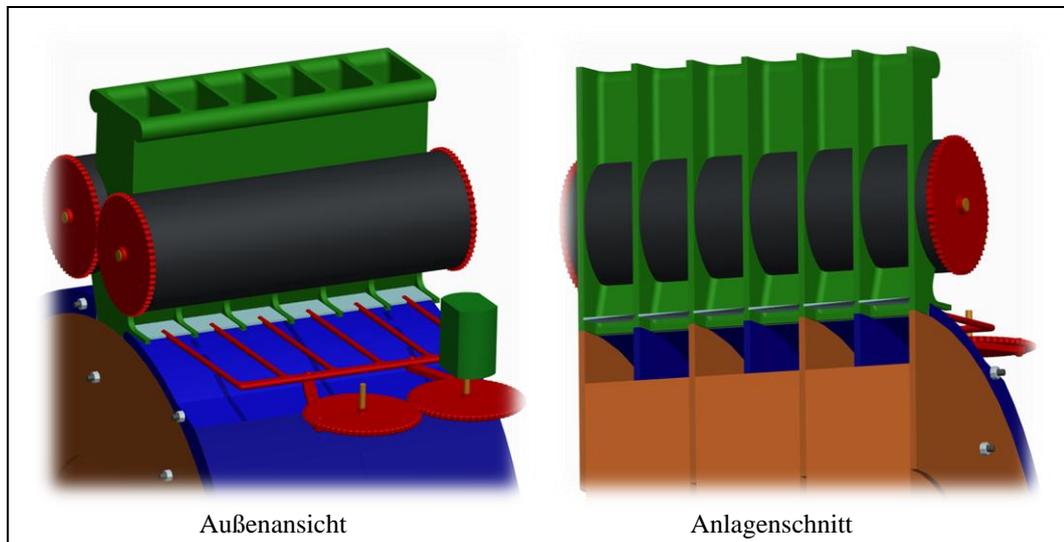


Abbildung 7-8 Faserzufuhr mit integrierter Faserablängung eines 6-stöckigen Rollagglomerationstellers

Die Anlagenvariante in der Abbildung 7-8 zeigt die Gestaltung einer Faserzufuhr mit integrierter Faserablängung in einen sechsstöckigen Rollagglomerationsteller. In dieser Auslegungsvariante ist das Prinzip von synchron geführten Schneidklingen dargestellt. Zur Minderung der Lastspitzen des Antriebes der Schneideinheit kann ein zeitversetzter Schnitt der einzelnen Zufuhrschächte von Vorteil sein.

Wie bei der Verwendung von Transportschnecken kann auch bei Nutzung der Zufuhreinrichtung mit integrierter Faserablängung je nach Gleichmäßigkeit des erzeugten Faserstranges auf einen nachgeschalteten Sortierprozess verzichtet werden. Ein weiterer Vorteil ist die variabel erzeugbare Faserlänge, welche sich über die Prozesssteuerung des Schnittintervalls in Abhängigkeit auf die Transportwalzendrehzahl einstellen lässt. Der entscheidende Nachteil dieser Zufuhreinheit ist ein Abnehmen der Klingenschärfe aufgrund des Betriebes sowie die komplexere Bauweise.

Aufgrund dieser Ansätze wurde eine Patentanmeldung bezüglich des Verfahrens und Vorrichtung zur kontinuierlichen Herstellung von Faserpellets eingereicht. Diese Anmeldung entspricht der im Bau befindlichen Technikumsanlage der Rollagglomeration (siehe Abbildung 7-9), welche aus einem 20-fachen Tellerpaket mit einem Rollgangsquerschnitt von $5 \times 5 \text{ mm}$ besteht.

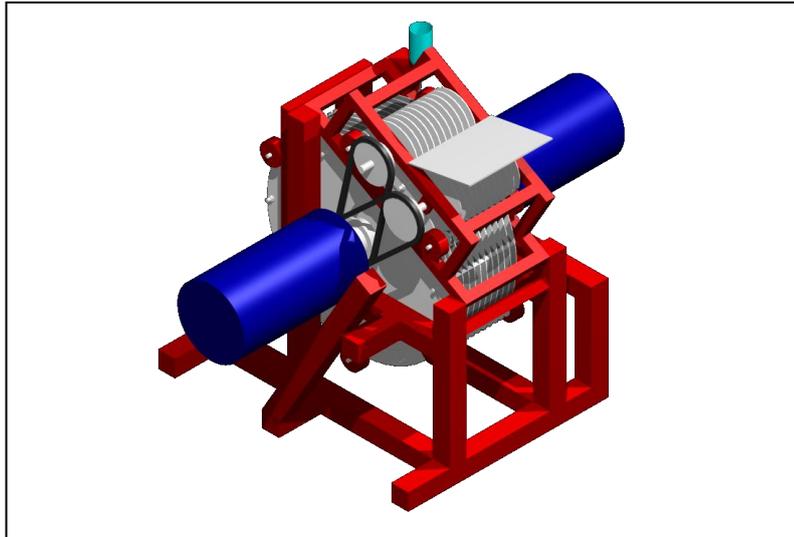


Abbildung 7-9 20-stöckiger Rollagglomerationsteller mit Reißscheibenspeisung [J.P.'06]

Innerhalb dieser Anlage wurde für die automatisierte Zufuhr des Fasermaterials der Einsatz der beschriebenen Doppel-Reißwalzen vorgesehen, da die Faserentnahme aus Faserballen angestrebt wird. Eine Umrüstung auf die weiteren Reißwalzenprinzipien ist für weitergehende Untersuchungen problemlos möglich.

Technikumsanlage der Mischagglomeration

Da es bei der Aufbauagglomeration des Fasermaterials innerhalb des Intensivmischers zur Erzeugung einer dispersen Größenverteilung kommt, müssen Klassierstufen in das Verfahren integriert werden, um das gewünschte Partikelgrößenspektrum zu erzeugen. Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, ist die Mischagglomeration auf bestehende Agglomerate mit einer weiteren Bildung von Startkeimen zielführend. Bei der produktionsnahen Mischagglomeration wird lediglich die Produktfraktion aus dem Prozess ausgeschleust. Die vorliegende Unterkornfraktion (Partikel < Produktfraktion) sowie Überkornfraktion (Partikel > Produktfraktion) werden in einem ein- oder mehrstufigen Prozess abgetrennt und in den Agglomerationsprozess zurückgeführt (siehe Abbildung 7-10). Um den Anlagenfüllgrad konstant zu halten, muss dem Prozess weiteres Fasermaterial sowie Wasser in dem Maße zugegeben werden wie Produkte aus dem Prozess entnommen werden. Hierbei erfolgt die Rückführung der Überkornfraktion über die Zerkleinerungseinheit des Fasermaterials.

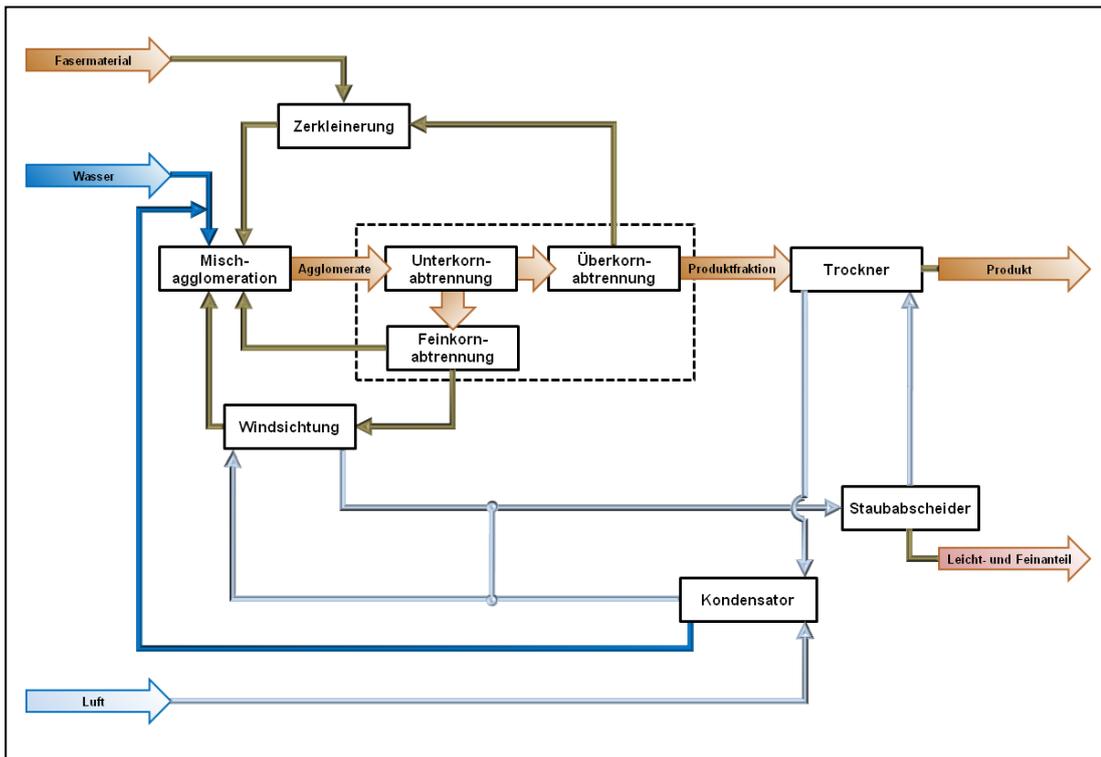


Abbildung 7-10 Grundfließbild einer möglichen Aufbauagglomerationsanlage

Je nach eingesetztem Fasermaterial können vor allem in der Unterkornfraktion nicht agglomerierbare Bestandteile wie Schäben und Stroh von Fremdpflanzen (z. B. Gräsern) sein. Damit diese sich bei einer Rückführung der kleineren Agglomerate in den Agglomerationsprozess nicht in dem Prozesskreislauf anreichern, ist es denkbar, diese spezifisch leichteren Fremdbestandteile beispielweise mittels Windsichter auszutragen. Um zum einen den Feststoffmassenstrom sowie den benötigten Luftvolumenstrom gering zu halten, wäre es sinnvoll, innerhalb der Unterkornabtrennung einen weiteren Trennschnitt zu setzen und lediglich die stroh- und schäbenanteiltragende Feinkornfraktion durch eine Prozesseinheit zu führen. Über diese Verschaltung der Grundoperationen kann eine weitestgehend reststofffreie Faseragglomeratproduktion gewährleistet werden. Im Vorfeld der Umsetzung einer solchen Anlage sollte geklärt werden, ob es kostentechnisch sinnvoll bzw. wirtschaftlicher ist, einen Faserverlust hinzunehmen und die Feinkornfraktion ($< 1\text{ mm}$) des Unterkornes komplett aus dem Prozess auszuführen. Der für einen eventuell eingesetzten Windsichter benötigte Luftvolumenstrom kann aus dem Ansaugstrom eines möglichen Konvektionstrockners der Produkttrocknung entnommen werden. Wie der Luftstrom kann auch der Wasserstrom (Kondensatstrom der Trocknerabluft) recycelt in den Agglomerationsprozess zurückgeführt werden.

Bezüglich der Agglomeration im Kollektiv ist ein Scale-Up von Aufbauagglomerations innerhalb von Intensivmischern auf theoretischem Wege nicht möglich, da es aufgrund einer Vergrößerung des Nutzvolumens zu Abweichungen des Energieeintrages

kommen kann. Dieses Verhalten macht weitere Versuche mit entsprechend größeren Nutzvolumina notwendig, um den Prozess zu optimieren.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen ergibt sich für den verwendeten Eirich-Intensivmischer (Nutzvolumen: 5 l, Faserverlust: 4,6 Ma-%) bei einer Agglomerationszeit von 15 min, zuzüglich 5 min Rüstzeit, und einem Anteil der angestrebten Produktklasse von 53,8 Ma-% ein Produktstrom von 0,462 kg/h. Im Hinblick auf eine Technikumsanlage mit angestrebten 5 kg/h würde dies eine Parallelisierung von 11 Anlagen erfordern. Statt der hohen Parallelisierung ist aus Sicht der Investitionskosten der Einsatz einer Anlage mit einem größeren Nutzvolumen zielführender. Im Vorfeld bleibt jedoch zu überprüfen, inwieweit die im Intensivmischer mit 5 l Nutzvolumen gewonnenen Erkenntnisse übertragbar sind.

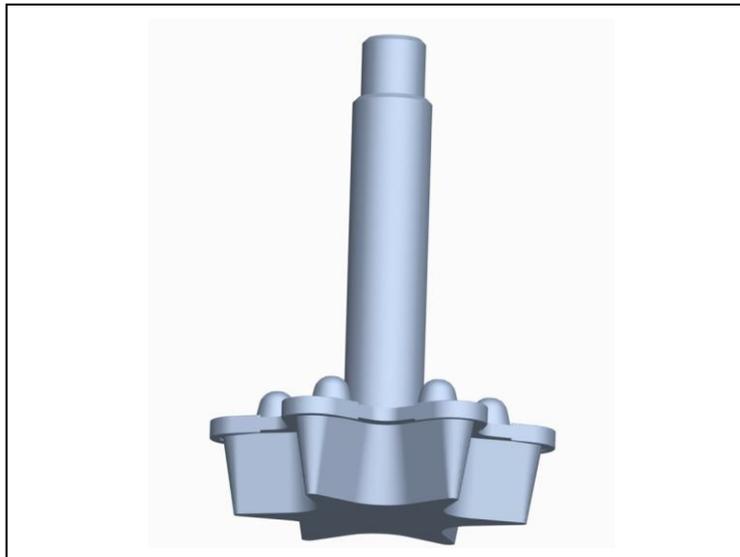


Abbildung 7-11 Mögliche Optimierungsvarianten des Sternwirblers

Zur Minderung des nicht agglomerierten Faservolumens kann neben einer Verkleinerung des Abstandes zwischen dem Mischbehälter und dem stationären Wandabstreifer eine überarbeitete Gestalt der Wirblereinheit dienlich sein. Vor allem zwischen den unteren Dornenfortsätzen des Sternwirblers zeigte sich eine Ansammlung von Fasern. Da aus diesem Grund bei den durchgeführten Untersuchungen kein Durchwandern des unteren Bereiches der Wirblereinheit von Agglomeraten stattfand, sollte ein Schließen dieses Raumes keine Beeinflussung auf des Agglomerationsverhalten mit sich bringen (siehe Abbildung 7-11).

Kapitel 8

Ausblick

8 Ausblick

Das Hauptziel weiterer Untersuchungen ist die Umsetzung der nachgewiesenen Machbarkeit der Agglomeration mittels Roll- sowie Aufbauagglomerationsprozessen innerhalb der in Kapitel 7 betrachteten Technikumsanlagen, deren Produktionsvolumen die Charakterisierung der Schüttguteigenschaften sowie weiterer anwendungsrelevanter Versuche gewährleistet.

Zur Realisierung dieser Ziele ist für die Produktionssteigerung der **Rollagglomeration** zunächst die Umsetzung der automatisierten Faserzufuhr der mehrstöckigen Anlage weiterzuführen (siehe Abbildung 8-1). Hierbei sollte eine möglichst enge Verteilung der aufgegebenen Fasermassen angestrebt werden, um die Notwendigkeit eines nachgeschalteten Klassierprozesses zu vermeiden. Zudem bildet die Störanfälligkeit der Zufuhreinheit sowie des Übergabepunktes zum Rollagglomerationsteller einen wichtigen Gesichtspunkt bei der Umsetzung dieser neuen Technologie. So müssen die eventuellen Einflüsse sowie die Möglichkeiten der Zufuhr unterschiedlicher Fasermaterialien (v. a. Art, Länge und Biege­widerstand) der verschiedenen Zufuhreinheiten festgestellt werden. Speziell die Faserportionierung aus einem Faserballen bzw. Fasergelege mittels Reißscheibenpaketen bedarf einer Überprüfung der Einsetzbarkeit in Hinblick auf die Anforderungen der möglichst eng verteilten, zugeführten Fasermassen. Hierzu zählt auch die Wahrscheinlichkeit des Ergreifens von Fasermaterialien bei unterschiedlichen Gestaltungsvarianten der Reißscheibenpakete. Der Anlagenbau eines 20-stöckigen Agglomerationstellers sowie die Faserzufuhrvariante durch Reißscheibenpakete stehen kurz vor der Fertigstellung.

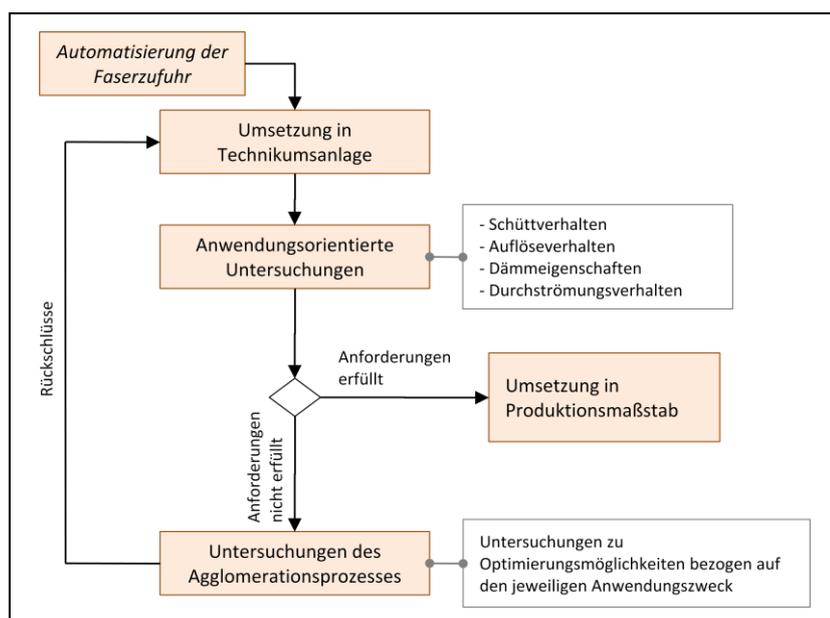


Abbildung 8-1 Weiteres Vorgehen der Umsetzung der Rollagglomeration

Anhand der Faseragglomerate dieser Technikumsanlage des Rollagglomerationsprozesses lassen sich die weitergehenden Untersuchungen bezüglich des Schüttverhaltens und der anwendungsrelevanten Produkteigenschaften durchführen. Beispielhafte Charakterisierungsmethoden der einzelnen Kennwerte sind in der Tabelle 8-1 aufgeführt.

Tabelle 8-1 Beispielhafte Charakterisierungsansätze der Faseragglomerate im Kollektiv

Eigenschaften	Normierungsschriften	DIN-Schrift mit Bezug auf
Schüttvolumen	DIN CEN/TS 15103	Feste Biobrennstoffe
Fließverhalten	DIN EN 933-6	Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - <i>Fließkoeffizienten</i>
Kriechverhalten	DIN EN 1606	Dämmstoffe für das Bauwesen
Dämmwirkung	DIN EN 13170 DIN EN 13171	Dämmstoffe für Gebäude - <i>extrudierter Kork</i> Dämmstoffe für Gebäude - <i>Holzfasern</i>
Abriebsfestigkeit	DIN CEN/TS 15210-1	Feste Biobrennstoffe - <i>mech. Festigkeit „Pellets“</i>

Im Falle nicht zufriedenstellender Kennwerte kann anhand des in dieser Arbeit gegründeten Wissenstandes Einfluss auf den Produktionsprozess und so auf die Eigenschaften der Faseragglomerate genommen werden (siehe Abbildung 8-1). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit weitere anlagen- und betriebstechnische Modifikationen vor der Umsetzung im mehrstöckigen Agglomerationsteller innerhalb der Laboreinheit zu untersuchen. So können weitergehend unterschiedliche Fasermaterialien mittels bestehender Laboreinheit versuchsweise agglomeriert werden.

Wie schon im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde, ist für eine Produktionssteigerung der **Aufbauagglomeration** mittels Intensivmischers der Einsatz einer Anlage mit einem größeren Nutzvolumen erforderlich. Da ein Scale-Up dieses Verfahrens auf mathematischem Wege nicht möglich ist, bleibt die Übertragbarkeit bisheriger Untersuchungen zu überprüfen. Für eine spätere großtechnische Umsetzung sind entsprechende diskontinuierliche Intensivmischeranlagen mit einem Nutzvolumen von bis 12.000 l (Bsp. Firma *Eirich*) am Markt etabliert, so dass auch diese Art der Faseragglomeration großtechnisch realisierbar scheint und weiter untersucht werden sollte.

Mittels des bestehenden Eirich-Intensivmischers kann des Weiteren zum Ausbau der gewonnenen Grundlagen der Faseragglomerationseinflüsse eine erweiterte Versuchsmatrix aus einer Kombination unterschiedlicher Einflussparameter untersucht werden. Die klassische Aufbauagglomeration weist beispielsweise ein Einflusswechselfpiel von Partikelgröße, Bindemittelmenge und dessen Viskosität auf. Zudem zeigten auch die

bislang durchgeführten Versuche der Faseragglomeration auf eine solche Beeinflussung hin.

Weitere Forschungsbereiche zur Untersuchung der Agglomerationsprozesse von Fasermaterialien liegen in der Betrachtung und Analyse der faserchemischen Hintergründe bzw. Abläufe. Auch Agglomerationsversuche mit eng definierten Fasereigenschaften wie Länge und Dicke mit gleichmäßigen sowie definierten Biegeeigenschaften sind notwendig. Damit kann eine mathematische Modellierung des Einflussverhaltens auf die einzelnen Agglomerationscharakteristika vorgenommen werden. Es ist denkbar, über eine gezielte Fasermodifikation einen direkten Einfluss auf die Eigenschaften der Faseragglomerate auszuüben.

Kapitel 9

Zusammenfassung

9 Zusammenfassung

Fasermaterialien begleiten die Menschheit schon seit Jahrtausenden durch die Geschichte. Hierbei fanden sie ihre Verwendung in textilen sowie technischen Anwendungen. Die Marktanteile der unterschiedlichen Faserarten erfuhren dabei stets Höhen und Tiefen. Durch das derzeitig erhöhte Umweltbewusstsein und steigende Rohölpreise wurde das Wachstum des Naturfaserfasermarktes erneut angekurbelt. In den technischen Bereichen ist dies vor allem in der Dämmstoff-, Verbundwerkstoff- und Fluidaufbereitungstechnik erkennbar.

Als problematisch für die technische Nutzung erwiesen sich insbesondere die schlechten Schüttguteigenschaften der Fasermaterialien. So kommt es durch Nesterbildungen zu erschwerten Bedingungen für eine geregelte Zuführung sowie Dosierung des Materials in die unterschiedlichen Anwendungsbereiche. Als Lösungsansatz für eine dosierte Zufuhr wird neben der Erzeugung von Längen- und Flächengebilden (Bänder, Flore, Vliese) meist der Weg über die Erzeugung von Schüttgütern in Form von Agglomeraten bzw. Granulaten gewählt. Da die unterschiedlichen Fasereigenschaften entscheidend für die Nutzung in den Anwendungsgebieten ist, muss bei den Aufbereitungsverfahren auf eine Faserschonung geachtet werden. Zudem besitzen die Fasereigenschaften wie beispielsweise die Länge, Durchmesser, Biegegegenstand, Feuchte und Oberflächenstruktur sowie chemische und thermische Eigenschaften einen Einfluss auf das Agglomerationsverhalten. Dieser Hintergrund machte eine Charakterisierung des Fasermaterials für eine gute Reproduzierbarkeit der Untersuchungen erforderlich. Überwiegend kamen in den durchgeführten Versuchen der Roll- und Aufbauagglomeration sowie in dem vergleichenden Prozess der Pressagglomeration heimische Hanf- sowie Flachsfasern zum Einsatz.

Da die Fasermaterialien ein abweichendes Verhalten gegenüber den klassischen Schüttgütern aufweisen, wurde eine weiterführende Definition der „Faseragglomeration“ geschaffen. Diese schließt neben den klassischen Agglomerationsverfahren auch innovative bzw. auf die Anforderungen angepasste Verfahren sowie Prozesse der textilen Faseraufbereitung mit ein. Bei der Faseragglomeration liegt eine hohe Gewichtung der Bindemechanismen in den Formschlussbindungen. Des Weiteren sind die Bindekräfte aufgrund von vorliegender Oberflächenflüssigkeit sowie durch sich bei der Trocknung bildender Feststoffbrücken bei Nassagglomeration von Naturfasern entscheidend. In speziellen Fällen kann auch eine Bindung der Einzelfaser auf Feststoffbrücken beruhen, welche durch Ansmelz- bzw. Sinterprozesse hervorgerufen werden.

Im Rahmen der durchgeführten Laborversuche kamen zwei unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von Faseragglomeraten zum Einsatz. Zum einen die Rollagglomeration mittels eines eigens konstruierten Rollagglomerationstellers nach dem Funktionsprinzip der Patentierung DE 103 58 245 B4 zum anderen eine Aufbauagglomeration in einem Intensivmischer der Firma *Eirich*. Für die Untersuchungen beider Faseragglomerationsverfahren wurde bei der Wahl sowie der Gestaltung der Versuchsanlagen neben der Betriebsstabilität auf die Möglichkeiten der Variation unterschiedlicher Anlagenparameter sowie Fasereigenschaften geachtet. So konnten unter anderem Variationen der Faserlänge, die Einflüsse der Wasserzufuhr sowie des Energieeintrages und der Verweilzeit wie auch weitere Anlagengestaltungen beispielsweise der Einsatz unterschiedlicher Agitationsorgane im Intensivmischer sowie Rollgangsabmessungen, -auskleidungen und -einbauten des Rollagglomerationstellers untersucht werden.

Aufgrund der länglichen Gestalt des Fasermaterials wurde neben einem im Vergleich zur Schüttgutaufbereitung abweichenden Agglomerationsablauf eine andersartige Gestalt der Agglomerate festgestellt. So kommt es agglomerationsabhängig zum Herausragen einzelner Fasern aus dem Agglomeratgefüge. Zudem gleicht die innere Struktur eher einer stochastischen Gitterstruktur im freien Raum als einem Porenverlauf in einem Feststoff. Diese Eigenschaftsabweichungen machten ein Hinterfragen, Überprüfen sowie eine Modifikation der Analyseverfahren erforderlich. Hierbei fand des Weiteren eine Adaption der Vorgehensweisen unterschiedlicher bestehender Normierungsschriften statt, welche der Bestimmung gleicher Charakteristika ähnlicher Strukturen (bezogen auf ihre Eigenschaften) dienen. Als Hauptmerkmale des Faseragglomerates bei der Einzelcharakterisierung wurden die Masse bzw. das eingebundene Faservolumen, die äußeren Abmessungen, die Porosität, sowie die Zug- und Druckfestigkeit betrachtet. Darüber hinaus wurde zur Bewertung der Oberfläche ein Kennwert „Oberflächenstrukturindex“ hergeleitet. Bei den Charakterisierungsansätzen musste vor allem darauf geachtet werden, dass die Faseragglomerate unterschiedliche geometrische Gestalten aufwiesen. Zudem zeigten die Faseragglomerate bei der Aufbau- wie auch bei der Rollagglomeration abweichende Gestalten mit verschiedenen Agglomeratmassen auf, was auch innerhalb einzelner Versuchsreihen festzustellen war. Bei der Selektierung und Herleitung der Analyseverfahren wurde somit darauf geachtet, dass das herangezogene Analyseverfahren eine Charakterisierung und Bewertung aller Agglomerate einer Versuchsreihe gewährleisten

Die Untersuchungen zeigten, dass sowohl das Verfahren der Rollagglomeration wie auch der Aufbauagglomeration im Intensivmischer geeignet sind, um Faseragglomerate mit gleichmäßigen Formen zu erzeugen. Während die Makrogestalt der Aufbauagglomeration

merate elliptische bis kugelige Formen aufwiesen, ließen sich mit der Rollagglomeration über die Wahl der Orientierung der Reibschlusswandungen neben kugelähnlichen Formen auch Doppelkegel sowie Zylinder herstellen. Auch die Feuchte hat durch die Beeinflussung der Reexpansionsneigung einen Einfluss auf die erzeugte Makrogestalt. So brachten feucht erzeugte Faseragglomerate eine klarere bzw. idealere geometrische Makrogestalt hervor. Des Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass über unterschiedliche Wege die charakteristischen Eigenschaften des Faseragglomerates beeinflusst werden können.

Bei der Rollagglomeration zeigten sich, insbesondere durch die Befeuchtung des aufgegebenen Fasermaterials Vorteile in der Herstellung von kompakten, stabilen, rieselfähigen Schüttgütern. So führte die geminderte Reexpansionsneigung zu einer Senkung der Porosität bzw. zu einer Zunahme der Scheindichte. Durch diese geringere Porosität sowie die Ausbildung von Feststoffbrücken in Zwickelbereichen sich berührender Fasern kam es zu einer deutlichen Steigerung der Festigkeitskennwerte (Druck- und Zugfestigkeit sowie Rückverformungen). Zudem wurde durch die Kapillarkräfte ein Abstreifen von Einzelfasern an der Agglomeratperipherie verhindert, was auch nach einer Trocknung durch die kristallinen Feststoffbrücken anhielt. Die Zugfestigkeit des Faseragglomerates konnte zudem durch die Länge der eingebrachten Fasern beeinflusst werden. So stieg mit Zunahme der Faserlänge der Widerstand gegen das Auseinanderziehen an.

Der Rissbildung, die bei der Rollagglomeration befeuchteter Fasermaterialien mit Füllgraden $> 70\%$ auftraten, konnte durch die Verwendung eines elastischeren Reibschlussbelages entgegengewirkt werden. So war es möglich, auch bei einem Füllgrad von 100% eine gleichmäßige innere Struktur zu erzeugen. Über eine Anpassung des Rollgangsquerschnitts sowie durch das Anbringen von Einbauten und Rollgangsverjüngungsstrecken war es möglich, neben kleinen Faseragglomeraten (Einsatz in Verbundwerkstofftechnik) auch Agglomerate mit einer größeren Abmessung (Einsatz in Fluidaufbereitungstechnik) herzustellen. Aufgrund der Beeinflussungsmöglichkeiten wurden Porositäten zwischen nahezu 98% (Kugeln mit Hohlstruktur) und 65% erzeugt. Hierbei wiesen die Oberflächenstrukturen Werte zwischen 70% und 12% auf. In abschließenden Versuchen konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass das Rollagglomerationsverfahren auch in der Lage ist, weitere Faserarten wie Sisal- und Kokosfasern sowie Chemiefasern in Form von Polypropylen- und Viskosefasern zu agglomerieren. Darüber hinaus zeigte sich auch die Möglichkeit der Agglomeration von Kombinationen aus Natur- und Chemiefasern (Flachs- und Polypropylen). Derartige Agglomerate

versprechen gute Aussichten der direkten Weiterverarbeitung innerhalb der gängigen Spritzgussverfahren der Kunststoffindustrie.

Zu den betrachteten Hauptparametern der Aufbauagglomeration von Naturfasern mittels Intensivmischer zählte der Energieeintrag, die Faserlänge, die Prozessstufenzahl, Wasserzugabe sowie die Agglomerationszeit. So zeigte sich bei den Versuchen mit 1500 min^{-1} die Neigung zur Koagulation der Startkeime. Hingegen wurden bei 900 min^{-1} gleichmäßige, geschlossene Faseragglomerateoberflächen geschaffen, welche keiner weiteren Nachbehandlung in Pelletiertellern zur Abrundung bedurften. Im Gegensatz zu der Aufbauagglomeration von Schüttgütern war mit Zunahme der Agglomeratgröße eine Zunahme der Porosität zu beobachten, welche auf den Agglomerationsablauf und der Abrollwahrscheinlichkeit von Fasern zurückzuführen war. Aufgrund der Nassagglomeration bildeten sich geschlossene Oberflächen ohne Faserabspleizungen. Über eine Stufung des Prozesses konnte erfolgreich auf die Größenverteilung der Faseragglomerate eingegriffen werden. So lagen bei einem zweistufigen Prozess $53,8 \text{ Ma-\%}$ im Bereich der angestrebten Produktgröße von $3,15$ bis 6 mm . Durch größere Verweilzeiten der Faseragglomerate innerhalb des Intensivmischers konnte die Porosität und somit die Festigkeit reguliert werden.

Ein weiterer Einfluss auf die Festigkeiten der Faseragglomerate zeigte sich durch unterschiedliche Trocknungsmilieus. So werden nach Literaturangaben bei einer schnellen Trocknung überwiegend größere instabile Kristalle gebildet, welche eine geringere Festigkeit aufweisen. Dieses Verhalten konnte auch bei der Trocknung der Faseragglomerate nachgewiesen werden. So besaßen die Faseragglomerate mit einer höheren Trocknungsgeschwindigkeit geringere Festigkeiten.

Für die Realisierung eines größeren Produktionsvolumens wurden neben der dafür erforderlichen Weiterentwicklung der Agglomerationseinheit Gesamtanlagen mit zugehörigen Grundfließbildern der kompletten Technikumsanlagen erstellt. Insbesondere im Bereich der Prozessparallelisierung der Rollagglomeration kam es zu zahlreichen Weiterentwicklungen, die die gewonnenen Erkenntnisse umsetzen. Hierbei erwiesen sich drei unterschiedliche automatisierte Faserzufuhrorgane als zielführend. Über diese unterschiedlichen Zuführeinheiten soll es möglich sein, die Fasermaterialien verschiedener Vorlagenformen in den Agglomerationsprozess einzubringen. Mittels dieses gesteigerten Produktionsvolumen (vorerst 5 kg/h) können in weiterführenden Versuchen die Eigenschaften der Faseragglomerate im Kollektiv (Schüttguteigenschaften) sowie anwendungsorientierte Untersuchungen (z. B. Extruderversuche) durchgeführt werden.

Kapitel 10

Verzeichnisse

10 Verzeichnisse

10.1 Literaturverzeichnis

[Vorname.Nachname. 'Jahreszahl]

- [A.H.'26] Herzog, A.:
„Die Unterscheidung der Flachs- und Hanffaser“
Verlag von Julius Springer, Berlin (1926)
- [A.S.'00] Schenek, A.:
Naturfaserlexikon
Deutscher Fachverlag, Frankfurt a. M. (2000)
- [B.D.'96] Dörre, B.:
„Aufbereitung und Verwertung nachwachsender Rohstoffe, insbesondere der Faserpflanzen Flachs und Hanf“
Diplomarbeit, BTU-Cottbus (1996)
- [B.K.'85] Kaye, B. H.; Leblanc, J. E. ; Abbot, P. :
Particle Characterization - Nr. 2
„Fractal Description of the Structure of Fresh and Eroded Aluminium Shot Fineparticles“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1985) S. 56 - 61
- [B.K.'87] Kaye, B. H.; Clark, G. G.; Leblanc, J. E. ; Trottier, R. A.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 4
„Image Analysis Procedures for Characterizing the Fractal Dimension of Fineparticles“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1987) S. 63 - 66
- [B.K.'93] Kaye, B. H.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 10
„Applied Fractal Geometry and the Fineparticle Specialist“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1993) S. 99 - 110
- [BUWAL'93] Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft:
Schriftreihe Umwelt, Nr. 204 - Luft
„Abluftreinigung mit Biofiltern und Biowäschern“
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern (1993)
- [C.L.'94] Lee, C.-T.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 11
„Application of Fractal Geometry in Quantitative Characterization of Aerosol Morphology“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1994) S. 436 - 441
- [C.S.'00] Sörensen, C.:
„Wärmedämmstoffe im Vergleich“
Umweltinstitut München e.V., München (2000)
- [E.H.'02] Hering, E.; Martin, R.; Stroher, M.:
Physik für Ingenieure
„Schwingungen und Wellen“
Springer-Verlag, Berlin (2002) S. 343 - 382
- [E.K.'00] Kleinhansel, E.; Reumann, R.-D.:
Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungsstechnik
„Faserprüfung“
Springer-Verlag, Berlin (2000) S. 127 - 244

- [E.S.'03] Schmidt, E.:
Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 2
„Trennprozesse - Filtration“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2003) S. 904 - 932
- [E.S.'94] Schlötel, E.:
Handbuch Qualitätsmanagement
„Auswertungsverfahren“
Carl Hanser Verlag, München-Wien (1994) S. 275 - 300
- [E.W.'81] Wagner, E.:
„Die textilen Rohstoffe (Natur- und Chemiefaserstoffe)“
Dr. Spohr-Verlag/Deutscher Fachverlag, Frankfurt/M. (1981)
S. 1 - 79, 184 - 186, 227 - 229, 235 - 248
- [F.C.'40] Crescini, F.:
Der Züchter
„Formen von Hanf (*Cannabis sativa* L.)“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1940) S. 105 - 115
- [F.M.'02] Munder, F.; Füll, Ch.; Hempel, H.:
Tagungsband: Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern
„Ergebnisse einer neuen Technologie für die Verarbeitung von Hanf, Flachs
und Öllein“
Herausgeber: Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam (2002)
- [F.T.'38] Tobler, F.:
„Deutsche Faserpflanzen und Pflanzenfasern“
J. F. Lehmanns Verlag, München-Berlin (1938)
- [F.W.'03] Wöll, F.; Kleinebudde, P.:
Chemie Ingenieur Technik 75, Nr. 11
„Charakterisierung der Porosität von Schülpen: Stanzmethode und NIRS-
Methode“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2003) S. 1756 - 1759
- [FLZ'06] Internet-Firmendarstellung:
Faser Logistik Zentrum Schwarza GmbH
www.flz.jakwerth.com (04.05.2006)
- [FNR'06] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
„Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow (2006)
- [G.B.'93] Brown, G. J.; Miles, N. J.; Hall, S. T.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 10
„Fractal Characterization of Pulverised Materials“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1993) S. 1 - 6
- [G.C.'06] Cesutti, G.; Schneider, T.; Blum, C.:
Marktanalyse – Nachwachsende Rohstoffe
„Baumaterialien, Dämmprodukte und Möbel“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow (2006) S. 501 - 548
- [G.H.'00] Heinze, G.:
„Handbuch der Agglomerationstechnik“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2000) S. 1 - 170

- [G.W.'05] Wallot, G.:
„Evaluierung des neuen bildanalytischen Messverfahrens „FiberScan“ zur Ermittlung faserlängenbezogener Kennwerte von Bastfasern“
Diplomarbeit, BTU-Cottbus (2005)
- [H.B.'85] Bademer, H.; Albrecht, M.; Kraut, A.:
Particle Characterization, Nr. 2
„On Using Fourier Series in Characterizing Particle Shape“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1985) S. 98 - 103
- [H.H.'97] Hanselka, H.:
Hochleistungsverbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
„Neue Produkte aus der pflanzlichen Faser“
Branchendialog, Mainz (1997)
- [H.K.'02] König, H.; Müller, P.:
„Wärmedämmung“
Verbraucherzentrale Bundesverband e.V., Berlin (2002)
- [H.R.'70] Rumpf, H.:
Chemie Ingenieur Technik (42), Nr. 8
„Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten“
Verlag Chemie, Weinheim (1977) S. 538 - 540
- [H.R.'90] Rumpf, H.:
„Particle Technology“
Chapman and Hall, London (1990) S. 8 - 15
- [H.S.'03-a] Schubert, H.; Liepe, F.; Schönert, K.:
Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1
„Mechanische Grundvorgänge und Mikroprozesse“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2003) S. 101 - 269
- [H.S.'03-b] Schubert, H.:
Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1
„Agglomerationsprozesse“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2003) S. 432 - 498
- [H.S.'55] Schönefeld, H.:
„Bastfasern“
Fachbuchverlag, Leipzig (1955)
- [H.S.'74] Schubert, H.:
Chemie Ingenieur Technik (46), Nr. 8
„Haftung zwischen Feststoffpartikeln aufgrund von Flüssigkeitsbrücken“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (1974) S. 333
- [H.S.'75] Schubert, H.:
Chemie Ingenieur Technik (47), Nr. 3
„Über Grenzflächenvorgänge in der Agglomerationstechnik“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (1975) S. 86 - 94
- [H.S.'89] Schubert, H.:
Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band 1
„Kennzeichnung von Körnerkollektiven“
WEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1989) S. 21 - 46
- [H.S.'90] Schubert, H.; Heidenreich, E.; Liepe, F.; Neeße, T.:
„Mechanische Verfahrenstechnik“
Deutscher Verlag für Grundstofftechnik, Leipzig (1990) S. 16 - 71

- [Hock'07] Internet-Firmendarstellung:
Hock GmbH & Co. KG
www.thermo-hanf.de (18.02.2007)
- [J.B.'05] Breitel, J.:
IVW Schriftenreihe, Band 52
„Zur presstechnischen Verarbeitung naturfaserverstärkter Thermoplaste“
Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern (2005)
- [J.M.'06] Müssig, J.; Hoffmeister, Ch.; Schneider, T.:
Marktanalyse - Nachwachsende Rohstoffe
„Faserverbundwerkstoffe und Formteile“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow (2006) S. 425 - 461
- [J.M.'93] Marchesi, J. J.:
„Handbuch der Fotografie, Band 1“
Verlag Photographie, Schaffhausen (1993) S. 224 - 235
- [J.P.'05] Perwin, J.:
„Entwicklung einer Technikumsanlage für die Agglomeration von Naturfasern“
Studienarbeit, BTU Cottbus (2006)
- [K.F.'02] Fischer, K. M.; Hübner, K.; Schulz, R.:
Gasreinigung und Luftreinhaltung (Hrsg.: Görner, K.; Hübner, K.)
„Schadgasabscheider - Biologische Verfahren“
Springer-Verlag, Berlin (2002) S. F73 - F77
- [K.G.'97] Gotoh, K.:
Powder Technology Handbook
„Particle Shape Characterization“
Marcel Dekker Inc., New York (1997) S. 43 - 55
- [K.H.'02] Hübner, K.; Schmidt, P. Schulz, R.; Wigger, H.:
Gasreinigung und Luftreinhaltung (Hrsg.: Görner, K.; Hübner, K.)
„Gasreinigungsverfahren - Partikelabscheidung“
Springer-Verlag, Berlin (2002) S. F2 - F41
- [K.H.'81] Hermes, K.; Kesten, U.:
Chemie Ingenieur Technik 53, Nr. 10
„Die Bildanalyse als modernes Verfahren der Partikelmesstechnik“
Verlag Chemie GmbH, Weinheim (1981) S. 780 - 786
- [K.M.'01] Mieck, K.-P.:
„Eigenschaften und Verarbeitungstechnik naturfaserverstärkter Composites“
Workshop „Naturfaserverstärkte Kunststoffe“, Wien (2001)
- [Kahl'08] Internet-Firmendarstellung:
Amandus Kahl GmbH & Co. KG
www.akahl.de (30.07.2008)
- [LMIS'03] Leica Microsystems Imaging Solutions Ltd.
Betriebsanleitung: Leica QWin V3
Cambridge/GB/ (2003)
- [M.C.'08] Carus, M.; Gahle, Ch.; Pendarovski, C.; Vogt, D.; Ortmann, S.;
Grotenhermen, F.; Breuer, T.; Schmidt, Ch.:
Gülzower Fachgespräche, Band 26
„Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-
Werkstoffen (Deutschland und EU)“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Hürth (2008)

- [M.F.'95] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.:
„Faserverbundbauweise - Fasern und Matrices“
Springer-Verlag, Berlin (1995) S. 155 - 197
- [M.F.'96] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.:
„Faserverbundbauweise - Halbzeuge und Bauweisen“
Springer-Verlag, Berlin (1996) S. 24 - 105
- [M.G.'53] Menzel, Göpfert:
„Flachs und Hanf“
Fachbuchverlag, Leipzig (1953)
- [M.J.'06] Müssig, J.; Hoffmeister, Ch.; Schneider, T.:
Marktanalyse -Nachwachsende Rohstoffe
„Faserverbundwerkstoffe und Formteile“
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow (2006) S. 425 - 461
- [M.K.'04] Karus, M.:
Fachkongress Naturfaserverstärkter Kunststoffe:
„Marktüberblick Naturfasern und naturfaserverstärkte Werkstoffe -
erstmalige Vorstellung der Erhebungen 2003“
Fachkongress Naturfaserverstärkter Kunststoffe, Hürth (2004)
- [M.K.'06] Kraus, M.; Ortmann, S.; Vogt, D.; Müssig, J.:
„Naturfaserverstärkte Kunststoffe“
Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe, Gülzow (2006)
- [M.N.'01] Nagel, M.:
„Zur inneren Morphogenese von Flocken mittels Clusteranalyse“
Shaker Verlag, Aachen (2001)
- [M.S.'94] Stieß, M.:
„Mechanische Verfahrenstechnik 2“
Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (1994) S. 182 - 224
- [M.U.'89] Usteri, M.; Leuenberger, H.:
Chemie Ingenieur Technik (61), Nr. 3
„Agglomerierverfahren pharmazeutischer Grundstoffe, insbesondere binäre
Mischungen, im Schnellmischer“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (1989) S. 254 - 255
- [M.Z.'05] Zlatev, M.:
„Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer
Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik“
Dissertation, TU Freiberg (2005)
- [Malvern'08] Internet-Firmendarstellung:
Malvern Instruments Ltd.
www.malvern.de (05.04.2008)
- [MGE'06] Internet-Firmendarstellung:
Maschinenfabrik Gustav Eirich
www.eirich.com (01.04.2006)
- [N.C.'73] Claussen, N.; Petzow, G.:
Zeitschrift für Werkstofftechnik (4), Nr. 3
„Kugelherstellung durch Pulveragglomeration“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1973) S. 148 - 156

- [N-FibreB'08] Internet-Datenbanksystem:
M-Base Engineering+Software GmbH
www.n-fibrebase.net (17.04.2008)
- [O.P.'06] Pritzkow, O.:
„Untersuchungen zum Um- und Durchströmungsverhalten von einzelnen Agglomeratstrukturen“
Dissertation, BTU Cottbus (2006)
- [R.C.'05] Cartner, R.M.; Yan, Y.:
Journal of Physic -Series 15
„Measurement of particle shape using digital imaging techniques“
IOP Publishing Ltd. (2005) S. 177 - 182
- [R.O.'69] Otto, R.; Rohs, W.:
Textilindustrie (71), Nr. 5
„Objektive Bestimmung der Feinheit von Bastfasern durch Messung im Luftstrom“
Zeitschrift, Mönchengladbach (1969) S. 344 - 353
- [R.P.'02] Pecenka, R.; Fürll, Ch.:
Tagungsband: Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern
„Effiziente Reinigung von Hanf- und Flachsfasern nach dem Prallaufschluss“
Herausgeber: Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam (2002)
- [R.P.'03] Polke, R.; Schäfer, M.; Scholz, N.:
Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1
„Charakterisierung disperser Systeme“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2003) S. 7 - 100
- [R.P.'08] Pecenka, R.:
„Optimierung der Reinigung von Hanffasern auf Kammschütteln“
Dissertation, BTU Cottbus (2008)
- [R.P.'79] Polke, R.; Hermann, W.; Sommer, K.:
Chemie Ingenieur Technik (51)
„Charakterisierung von Agglomeraten“
Verlag Chemie, Weinheim (1979) S. 283 - 288
- [R.R.'00-a] Reumann, R.-D; Kleinhansl, E.:
Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik
„Grundlagen“
Springerverlag, Berlin (2000) S. 1 - 56
- [R.R.'00-b] Reumann, R.-D.:
Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik
„Mechanische Formänderungsverhalten textiler Materialien“
Springerverlag, Berlin (2000) S. 57 - 126
- [RETSCH'05] Internet-Firmendarstellung:
Retsch GmbH
www.retsch.de (05.04.2005)
- [S.H.'03] Hildebrandt, S.:
„Untersuchungen zur Agglomeration von Fasermaterial nachwachsender Rohstoffe für den Einsatz in innovativen Anwendungen am Beispiel der naturfaserverstärkten Kunststoffe“
Diplomarbeit, BTU Cottbus (2003)

- [S.H.'04] Hildebrandt, S.; Ay, P.:
Forum der Forschung, Heft 17
*„Rollagglomeration und Wickelverfahren - Durchbruch in der
Langfaseraufbereitung nachwachsender Rohstoffe“*
Eigenverlag, BTU-Cottbus (2004) S. 106 - 111
- [S.H.'05] Hildebrandt, S.; Ay, P.; Gusovius, H.J.:
19. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren
*„Neuartige Verfahren zur angepassten Agglomeration von Naturfasern für
den Einsatz in Verbundwerkstoffen“*
Chemnitz (2005)
- [S.O.'02] Odenwald, S.:
„Eigenschaften und Umformungsverhalten naturfaserverstärkter Kunststoffe“
Dissertation, TU Chemnitz (2002)
- [S.R.'91] Rumpf, H.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 9
„Characterization of the Structure of Agglomerate Particles“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1992) S. 19 - 27
- [SUT'06] Internet-Firmendarstellung:
Svoboda Umformtechnik GmbH
www.sut.co.at (04.05.2006)
- [T.A.'01] Aurich, T.:
*„Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von
flachfaserverstärktem Polypropylen“*
Dissertation, TU Chemnitz (2001)
- [T.R.'03] Reußmann, T.:
*„Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Langfasergranulat mit
Naturfaserverstärkung“*
Dissertation, TU Chemnitz (2003)
- [T.R.'99] Reußmann, T.; Mieck, K.-P.:
Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde
*„Verfahrensentwicklung zur Herstellung von Langfasergranulaten aus
Stapelfasermischungen“*
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (1999) S. 59 - 64
- [T.S.'00] Schawaller, T.:
„Untersuchungen zum Pelletierverhalten von Flachsfasern“
Studienarbeit, BTU Cottbus (2000)
- [T.S.'95] Schlösser, T. P.; Flöster, T.; Gayer, U.:
„Naturfaserverstärkte Kunststoffe für die automobiltechnische Anwendung“
Daimler Benz, Ulm (1995)
- [TITK'05] Internet-Firmendarstellung:
Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung
www.titk.de (01.04.2005)
- [U.R.'91] Riebel, U.; Kofler, V.; Löffler, F.:
Particle & Particle System Characterization - Nr. 8
„Shape Characterization of Crystals and Cristal Agglomerates“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1991) S. 48 - 54

- [U.S.'04] Stark, U.; Müller, A.:
Ratgeber Abbruch & Recycling 2004
„Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen - schnelle und effektive Methode zur Beurteilung“
Stein-Verlag, Baden-Baden (2004) S. 78 - 84
- [V.K.'91] Kofler, V.; Riebel, U.; Löffler, F.:
Chemie Ingenieur Technik 63, Nr. 2
„Einsatz der quantitativen Formanalyse zur Beschreibung von Kristall-Agglomeration“
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1991) S. 140 - 142
- [V.P.'04] Preuß, V.:
Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt, Nr. 9 (Hrsg.: Koch, R.)
„Entwicklung eines biochemischen Verfahrens zur Aufbereitung von sulfatiger Wässer am Beispiel der Entsäuerung schwefelsaurer Tagebauseen“
Eigenverlag der Lehrstuhls Wassertechnik und Siedlungswasserbau der BTU, Cottbus (2004)
- [W.B.'93] Berger, W.; Bobeth, W.; Fischer, P.; Mally, A.:
„Textile Faserstoffe“
Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (1993) S. 1 - 14; 89 - 115; 231 - 252
- [W.K.'05] Kempt, W.:
„Persönliches Gespräch“
ERMAFA Kunststofftechnik, Chemnitz (27.05.2005)
- [W.L.'95] Leupold, W.; Andrié, M.; Große, G.; Nickel, H.:
Mathematik - ein Studienbuch für Ingenieure, Band 2
„Unendliche Reihen“
Fachbuchverlag, Leipzig (1995) S. 12 - 74
- [W.P.'02] Pietsch, W.:
„Agglomeration Processes“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2002)
- [W.P.'02-b] Pietsch, W.:
Chemie Ingenieur Technik (74)
„Systematische Entwicklung von Verfahren zur Kornvergrößerung durch Agglomeration“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2002) S. 1517 - 1530
- [W.P.'05] Pietsch, W.:
„Agglomeration in Industry“
WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2005) S. 7 - 58; 459 - 478
- [W.P.'90] Pietsch, W.:
„Size Enlargement by Agglomeration“
John Wiley & Sons, New York (1990) S.19 - 416
- [W.W.'06] Walaszek, W.:
„Untersuchungen zu Strukturbildungsphänomenen in der Pelletierungsflockung in Abhängigkeit von der Prozessführung im Hinblick auf die Optimierung der Feststoffkonditionierung“
Dissertation, BTU Cottbus, 2006
- [Y.K.'97] Kousaka, Y.; Endo, Y.:
Powder Technology Handbook
„Particle Characterization and Measurement“
Marcel Dekker, Inc., New York (1997) S. 3 - 72

Verwendete Patent- und Offenlegungsschriften

- DE 103.54.848 B4 Brandenburgische Technische Universität, Cottbus
Ay, P.; Hildebrandt, S.; Gusovius, H.-J.:
Patentschrift: „*Verfahren und Einrichtung zur Herstellung von pelletartigen Körpern aus ungebundenen Fasern*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 29.09.2005
- DE 103 58 245 B4 Brandenburgische Technische Universität, Cottbus
Ay, P.; Glaser, C.; Hildebrandt, S.; Müller-Fehn, S.:
Offenlegungsschrift: „*Verfahren und Einrichtung zur Herstellung kugelförmiger Gebilde aus portionierten Fasermengen*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 14.09.2006
- DE 299 20 772 U1 Faser Logistik Zentrum Schwarza GmbH
Jakwerth, G.:
Gebrauchsmuster: „*Granulat und Vorrichtung zu seiner Herstellung*“
Bekanntmachung im Patentblatt: 06.04.2000
- DE 197 56 126 C2 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung
Mieck, K.-P.; Reußmann, T.; Bayer, R.:
Patentschrift: „*Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Kunststoffzeugnissen durch Plastifizierung von Hybrid-Faserbändern auf Schneckenmaschinen*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 02.05.2002
- DE 197 11 247 C2 Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoffforschung
Mieck, K.-P.; Reußmann, T.:
Patentschrift: „*Verfahren zur Herstellung von Langfasergranulaten auf Basis von Faserband*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 02.05.2002
- DE 197 37 014 A1 Möller Plast
Hesch, R.:
Offenlegungsschrift: „*Langfaser-Schaumverbund*“
Offenlegungstag: 04.03.1999
- DE 197 36 526 A1 Meingast, R.:
Offenlegungsschrift: „*Baustoffmischung aus ungebranntem Lehm und/oder Ton*“
Offenlegungstag: 25.02.1999
- DE 199 18 166 B4 Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam
Hempel, H.; Fürll, Ch.:
Patentschrift: „*Vorrichtung zur Gewinnung von Kurzfasern*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 01.06.2006
- EP 1 424 179 A2 Svoboda, B.:
EU Patentanmeldung: „*Langfasergranulat*“
Anmeldetag: 06.11.2003
- WO/2005/051622 Brandenburgische Technische Universität, Cottbus
Ay, P.; Hildebrandt, S.; Gusovius, H.-J.:
Patentschrift: „*Method and Device for the Production of Pellet-Type Bodies Made of Unbound Fibres*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 09.06.2005

- WO/2005/056172 Brandenburgische Technische Universität, Cottbus
Ay, P.; Glaser, C.; Hildebrandt, S.; Müller-Fehn, S.:
Offenlegungsschrift: „*Method and Device for Production Spherical
Forms from Fibre Portions*“
Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 13.06.2005
- DE 10 2005 055 825 BASF AG, Ludwigshafen
A1 Schäfer, M.; Etmüller, J.; Ziegler, S.; Reindel, K.:
„*Vorrichtung und Verfahren für die automatische Bestimmung der
individuellen dreidimensionalen Partikelform*“
Offenlegungstag: 24.05.2007

Verwendete Normschriften

- DIN ISO 2076 Textilien:
„*Chemiefasern*“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (2001)
- DIN 52272-1 Prüfung von Mineralfaser-Dämmstoffen:
„*Druckprüfung - Ermittlung der Druckspannung und Druckfestigkeit*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1982)
- DIN 53206-1 Teilchengrößenanalyse:
„*Grundbegriffe*“
Deutscher Normen Ausschuss: Beuth Verlag, Berlin (1972)
- DIN 53800-1 Textilien:
„*Bestimmung der Handelsmasse - Bestimmung der Trockenmasse durch
Trocknen im Heißluftstrom*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2003)
- DIN 53804-1 Statistische Auswertung:
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2002)
- DIN 53808-1 Prüfung von Textilien:
„*Längenbestimmung an Spinnfasern*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2003)
- DIN 53810 Prüfung von Textilien:
„*Feinheit von Spinnfasern*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1981)
- DIN 53811 Prüfung von Textilien:
„*Faserdurchmesser-Messung*“
Deutscher Normenausschuss: Beuth Verlag, Berlin (1970)
- DIN 53835-1 Prüfung von Textilien:
„*Prüfung des zugelastischen Verhaltens - Grundlagen*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1987)
- DIN 53835-3 Prüfung von Textilien:
„*Prüfung des zugelastischen Verhaltens - Garne und Zwirne aus
Elastrofasern, einmalige Zugbeanspruchung zwischen konstanten
Dehngrenzen*“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1987)

- DIN 53843-1 Prüfung von Textilien:
„Knoten-Zugversuch an einfachen Garnen und Zwirnen“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1976)
- DIN 53843-2 Prüfung von Textilien:
„Schlingenversuch an Spinnfasern“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1988)
- DIN 53864 Prüfung von Textilien:
„Bestimmung der Biegesteifigkeit“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1978)
- DIN 53923 Prüfung von Textilien:
„Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens von textilen
Flächengebilden“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1978)
- DIN 53941 Prüfung von Textilien (Entwurf):
„Bestimmung des Micronaire-Wertes von Baumwollfasern“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (2007)
- DIN 60000 Textilien:
„Grundbegriffe“
Deutscher Normen Ausschuss: Beuth Verlag, Berlin (1969)
- DIN 60001-1 Textile Faserstoffe:
„Naturfasern und Kurzzeichen“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (2001)
- DIN 60001-2 Textile Faserstoffe:
„Faser- und Herstellungsformen“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (1990)
- DIN 60905-1 Tex-System:
„Grundlagen“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1985)
- DIN 60905-3 Tex-System:
„Rundungen errechneter Feinheiten“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1985)
- DIN 66160 Messen disperser Systeme:
„Begriffe“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1992)
- DIN EN 12751 Textilien:
„Probenahme von Fasern, Garnen und textilen Flächengebilden für
Prüfungen“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1999)
- DIN EN 13183-1 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz:
„Bestimmung durch Darrverfahren“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (2002)
- DIN EN 14704-1 Bestimmung der Elastizität von textilen Fasergebilden:
„Streifenprüfung“
Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (2005)
- DIN EN 1605 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen:
„Bestimmung der Verformung bei definierten Druck- und
Temperaturbeanspruchungen“
Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1997)

-
- DIN EN 1606 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen:
„Beurteilung der Oberflächeneigenschaften“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2002)
- DIN EN 933-6 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen:
„Bestimmung des Verhaltens bei Druckbelastung“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1996)
- DIN EN 826 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen:
„Bestimmung des Verhaltens bei Druckbelastung“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (1996)
- DIN EN ISO 139 Textilien:
„Normklimate für Probenvorbereitung und Prüfung“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2005)
- DIN EN ISO 604 Kunststoffe:
„Bestimmung von Druckeigenschaften“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2003)
- DIN ISO 7743 Elastomere oder thermoplastische Elastomere:
„Bestimmung des Druckverformungs-Verhaltens“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2006)
- DIN ISO 9276-1 Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen:
„Grafische Darstellungen“
 Deutsches Institut für Normung: Beuth Verlag, Berlin (2004)
- DIN EN 933-4 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen:
„Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl“
 Deutsches Institut für Normen: Beuth Verlag, Berlin (1999)
- EN ISO 1856 Weich-elastische polymere Schaumstoffe
„Bestimmung des Druckverformungsrestes“
 Europäisches Komitee für Normung; Beuth Verlag, Berlin (2000)

Weitere Literaturquellen / Nachschlagewerke

- Hering, E.; Martin, R.; Stroher, M.:
 Physik für Ingenieure
 Springer-Verlag, Berlin (2002)
- Schnegelsberg, G.:
 Handbuch der Faser - Theorie und Systematik der Faser
 Deutscher Fachverlag, Frankfurt/M. (1999)
- Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.:
 Taschenbuch der Mathematik
 BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig (1987)

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Absatzmärkte von Hanf- und Flachs-Kurzfasern in der EU 2006	3
Abbildung 1-2	Naturfasermasseneinsatz für NFK in der deutschen Automobilindustrie.....	4
Abbildung 1-3	Dämmstoffmarktzusammensetzung in Deutschland 2003	6
Abbildung 2-1	Gliederung von Naturfasern	14
Abbildung 2-2	Faserunterstrukturen eines Faserpflanzenstängels	14
Abbildung 2-3	Mikroskopische Betrachtung einer Hanffaser	15
Abbildung 2-4	Grundprinzip der klassischen Fasergewinnung.....	16
Abbildung 2-5	Maschinenlinie zur Naturfasergewinnung des ATB	16
Abbildung 2-6	Gliederung der Chemiefasern	17
Abbildung 2-7	Herstellungsformen von Chemiefasern	18
Abbildung 2-8	Ein-Pinzetten-Verfahren	19
Abbildung 2-9	Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Feinheit	21
Abbildung 2-10	Kräuselung eines PP-Faser-Kollektivs (6,7dTex).....	22
Abbildung 2-11	Faserdicken-Verteilung für eingesetzte Naturfasermaterialien	23
Abbildung 2-12	Faserlängenverteilung des Hanf-Kalfaterbandes	23
Abbildung 3-1	Gliederung der klassischen Agglomerationsverfahren	26
Abbildung 3-2	Faseragglomerationsverfahren	27
Abbildung 3-3	Bindungsmodell durch freibewegliche Flüssigkeiten	29
Abbildung 3-4	Zweistufiger Fasergranulator des FLZ.....	36
Abbildung 3-5	Pull-Drill-Verfahren der TITK	38
Abbildung 3-6	Beschichtungs- und Kalibrierungsdüse.....	38
Abbildung 3-7	Schematische Darstellung der Wickelverfahrensanlage	40
Abbildung 3-8	Wickelvorgang des Wickelverfahrens	40
Abbildung 3-9	Gestalt von Wickelgranulate	41
Abbildung 3-10	Schematische Darstellung eines Rollagglomerationstellers	43
Abbildung 3-11	Schematische Darstellung eines Bandrollagglomerators	43
Abbildung 3-12	Rollagglomerate aus Rohhanffasern	44
Abbildung 4-1	Darstellung des Eirich-Intensivmischers.....	48
Abbildung 4-2	Gesamtanlage des Rollagglomerationstellers	51
Abbildung 4-3	Schnitt durch den Kern des Rollagglomerationstellers	52
Abbildung 4-4	Querschnitt des Rollgangs (3 Reibschlusswandungen mit Störeinheit).....	52
Abbildung 4-5	Ausschnittsdarstellung des Zufuhr- und Auswurfbereichs.....	53
Abbildung 5-1	Projektionsflächenerfassung eines elliptischen Zylinders.....	58
Abbildung 5-2	Umwandlung der realen Projektionsfläche zum digitalen Binärbild	59
Abbildung 5-3	Verwendetes Photogrammetriesystem	61
Abbildung 5-4	Detektion der Projektionsschatten.....	62
Abbildung 5-5	Kissenförmige Verzeichnung der Fotokamera.....	63

Abbildung 5-6	Auswirkung von Abstandsvariation und Linsenverzerrung	63
Abbildung 5-7	Messwertabweichungen bei der Messung von Normkugeln	64
Abbildung 5-8	Verschiebung der Makrogestalt aufgrund Faservolumenzunahme	66
Abbildung 5-9	Fehlmessung bei Verwendung des Feret-Durchmessers	67
Abbildung 5-12	Projektionsflächen idealer Geometrien gleicher geometrischer Abmessung.....	70
Abbildung 5-13	Volumenabweichung zwischen Körpern idealer Makrogestalt gegenüber der Berechnung mit gemittelter geometriespezifischen Volumenkonstante	72
Abbildung 5-14	Sphärizitätsverläufe in Anhängigkeit des Feret-Durchmesserhältnisses	76
Abbildung 5-15	Zirkelschlagverfahren zur Ermittlung der fraktalen Dimension	78
Abbildung 5-16	Beispielhafter Kurvenverlauf der sehnenslängenabhängigen Polygonumfangslinie	79
Abbildung 5-17	Umfangslinien Verlaufsdarstellung über Radius-Winkel-Verfahren	80
Abbildung 5-18	Fourier-Analyse Messumlaufskurve mittels 15 harmonischer Schwingungen.....	81
Abbildung 5-19	Projektionsschatten und konvexe Hülle eines konkaven Objektes	83
Abbildung 5-20	Herleitung der Umfangsstruktur mittels Radius-Winkel-Verfahren.....	83
Abbildung 5-21	Detektierter Schnitt eines Rollagglomerates aus Polypropylenfasern	86
Abbildung 5-22	Anlagenfahrweise der Druckfestigkeitsprüfung	90
Abbildung 5-23	Anlagenfahrweise für Zugversuche	92
Abbildung 6-1	Wassergehalt beispielhafter Fasermaterialien in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte.....	98
Abbildung 6-2	Darstellung Versuchsreihen im Rollagglomerationsteller	100
Abbildung 6-3	Feuchteinstellung mittels Tauchbefeuchtung im siedenden Wasser	101
Abbildung 6-4	Gleitkonstanten von Hanffasern auf unterschiedlichen Belagsmaterialien ...	103
Abbildung 6-5	Einfluss des Füllgrades auf die äußere Makrogestalt.....	105
Abbildung 6-6	Sphärizitätsverlauf bei Füllgradvariationen HA 40-MV-N (5x5-V3')	106
Abbildung 6-7	Füllgradabhängiger Oberflächenstrukturindex HA 40-MV-N (5x5-V3')	106
Abbildung 6-8	Füllgradabhängiger Agglomeratdurchmesser HA 40-MV-N (5x5-V3').....	107
Abbildung 6-9	Varianzkoeffizient des Feret-Durchmessers	107
Abbildung 6-10	Füllgradabhängiger Porositätsverlauf HA 40-MV-N (5x5-V3')	108
Abbildung 6-11	Verläufe mittlerer Feret-Durchmesser unterschiedlicher Rollgangsauskleidungen	109
Abbildung 6-12	Oberflächenstrukturindizes untersuchter Rollgangsauskleidungen	110
Abbildung 6-13	Projektionsflächenäquivalenter Kreisdurchmesser der Reihen mit zwei und drei Reibschlusswandungen.....	111
Abbildung 6-14	Porosität der Faseragglomerate bei verschiedenen Reibschlussvarianten unter Normbedingungen	111
Abbildung 6-15	Porositätsverlauf verschiedener Reibschlussvariationen befeuchteter Fasern.....	112

Abbildung 6-16	Verschiebung der Agglomerateigenschaften aufgrund unterschiedlicher Wandbeläge.....	113
Abbildung 6-17	Rollgangsbelagsabhängiger Porositätsverlauf der Agglomeration befeuchteter Fasern	114
Abbildung 6-18	Festigkeitswerte der Belagsreihen (5x5-V2a) und (5x5-G2a)	115
Abbildung 6-19	Gegenüberstellung feucht und im Normzustand erzeugter Faseragglomerate der Rollgangskonfiguration (5x5-G2a).....	117
Abbildung 6-20	Geometrische Abmessung bei unterschiedlichem Feuchtezustand des Faserproduktes.....	117
Abbildung 6-21	Geometrischer Verlauf der Projektionsflächen der befeuchteten Versuchsreihe HA 40-MV-B (5x5-G2a).....	118
Abbildung 6-22	Festigkeitsverschiebung aufgrund der Faserbefeuchtung	119
Abbildung 6-23	Festigkeitssteigerung aufgrund Feuchtagglomeration	119
Abbildung 6-24	Auswirkungen der Rissbildung bei der Agglomeration feuchter Fasern	120
Abbildung 6-25	Befeuchtungsvarianten HA 40-100-FV (5x5-O2v).....	121
Abbildung 6-26	Durchmesser der Agglomerate unterschiedlicher Faserschnittlängen HA LV-100-N (5x5-G2a)	123
Abbildung 6-27	Faserschnittabhängige Porositäten HA LV-100-N (5x5 G2a)	123
Abbildung 6-28	Verlauf des Zugversuches HA 50-100-N (5x5-G2a)	124
Abbildung 6-29	Gemessene maximal Kraft beim Auseinanderziehen untersuchter Faseragglomerate	125
Abbildung 6-30	Benötigte Arbeit zum Auseinanderziehen trocken agglomerierter Fasern verschiedener Längen	125
Abbildung 6-31	Maximale Zugkraft bis zur Agglomerattrennung bei feucht agglomerierten Körpern	127
Abbildung 6-32	Benötigte Arbeit zum Auseinanderziehen von feucht erzeugten Faseragglomeraten	128
Abbildung 6-33	Verschiebung des Feret-Durchmessers aufgrund zunehmender Rollgangsabmessungen	129
Abbildung 6-34	Porositätsverläufe der Agglomerate unterschiedlicher Rollgangsabmessungen.....	130
Abbildung 6-35	Drucksteifigkeiten der Faseragglomerate verschiedener Rollgangsgrößen ..	130
Abbildung 6-36	Eigenschaftsverschiebung durch unterschiedliche Rollgangsabmessung (befeuchtet)	131
Abbildung 6-37	Einfluss der mittleren Rollstrecke HA 40-100-N (5x5-V3`)-RV.....	132
Abbildung 6-38	Vergleich einer Hanffaser vor und nach dem Dauerbiegeversuch.....	133
Abbildung 6-39	Nachweis eines Faseraufschlusses mittels AirFlow.....	134
Abbildung 6-40	Auswirkung einer Rollgangsverjüngung auf die Agglomerateigenschaften.	135
Abbildung 6-41	Einfluss der Rollgangsverjüngung auf die Festigkeit des Agglomerates.....	136
Abbildung 6-42	Massenanteil der einzelnen Siebklassen LI 6-300-600 (1St-900).....	140
Abbildung 6-43	Partikelgrößen und -formverlauf der Siebklassen LI 6-300-600 (1St-900).	141

Abbildung 6-44	Agglomeratdurchmesser bei zunehmendem Faser-volumen LI 6-300-600 (1St-900).....	141
Abbildung 6-45	Geometrieverläufe der Projektionsflächen LI 6-300-600 (1St-900).....	142
Abbildung 6-46	Festigkeiten der Keim- und Anfangsstrukturen der Aufbauagglomeration ...	143
Abbildung 6-47	Theoretischer Ansatz des fortlaufenden Agglomeratwachstums	143
Abbildung 6-48	Porositätsverlauf in Abhängigkeit vom Faservolumen LI 6-300-600 (1St-900).....	144
Abbildung 6-49	Oberflächenstrukturindex der Aufbauagglomerate LI 6-300-600 (1St-900) .	145
Abbildung 6-50	Verläufe der Festigkeitskennwerte LI 6-300-600 (1St-900).....	145
Abbildung 6-51	Mesostrukturabweichungen aufgrund von Drehzahlvariation LI 6-300- 600 (1St-DV)	146
Abbildung 6-52	Wirblerdrehzahlabhängige Massenanteile	147
Abbildung 6-53	Projektionsschatten bei 900 und 1500 min ⁻¹ LI 6-300-600 (1St-DV).....	147
Abbildung 6-54	Oberflächenstrukturzunahme bei höherem Energieeintrag.....	148
Abbildung 6-55	Massenverteilung eines ein- und zweistufigen Agglomerationsprozesses	149
Abbildung 6-56	Theoretische Partikelzahl vor und nach der zweiten Stufe	150
Abbildung 6-57	Verschiebung der Eigenschaftsverläufe durch eine 2. Prozessstufe	150
Abbildung 6-58	Drucksteifigkeit des ein- und zweistufigen Prozesses	151
Abbildung 6-59	Massenverteilungsdichte unterschiedlicher Agglomerationszeiten	151
Abbildung 6-60	Massenanteile der Fraktion bei unterschiedlichen Verweilzeiten im Intensivmischer.....	152
Abbildung 6-61	Porositäten der Produktfraktion bei unterschiedlichen Verweilzeiten im Intensivmischer.....	152
Abbildung 6-62	Trocknungsvariantenabhängige Festigkeit 5 mm-Fraktion HA 6-300-600 (1St-900)-PN	153
Abbildung 6-63	NIR-Spektroskopie (2. Ableitung des Intensitätsverlaufes) unterschiedlich getrockneter Hanffaseragglomerate.....	154
Abbildung 6-64	Beispielhafte Produktgegenüberstellung der einzelnen Agglomerationsverfahren	155
Abbildung 6-65	Oberflächenbetrachtung der Agglomerate unterschiedlicher Produktionsverfahren.....	157
Abbildung 7-1	Grundfließbild einer möglichen Rollagglomerationanlage.....	161
Abbildung 7-2	Aufbau eines liegenden mehrstöckigen Rollagglomerationstellers	162
Abbildung 7-3	Faserzufuhr mittels Förderschnecken (Schnitt)	163
Abbildung 7-4	Zwei-Zahn-Reißscheibe	164
Abbildung 7-5	Schnitt durch Rollgang mit Reißscheibe als Faserzuführorgan	164
Abbildung 7-6	Gestaltungsmöglichkeiten von Reißscheibenpaketen.....	165
Abbildung 7-7	Faserzufuhr mit integrierter Faserablängung für Labor-Versuchseinheit.....	166
Abbildung 7-8	Faserzufuhr mit integrierter Faserablängung eines 6-stöckigen Rollagglomerationstellers	167
Abbildung 7-9	20-stöckiger Rollagglomerationsteller mit Reißscheibenspeisung	168

Abbildung 7-10 Grundfließbild einer möglichen Aufbauagglomerationsanlage 169
Abbildung 7-11 Mögliche Optimierungsvarianten des Sternwirblers 170
Abbildung 8-1 Weiteres Vorgehen der Umsetzung der Rollagglomeration 172

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Faseragglomerationsanforderungen in Bezug auf die betrachteten Verwendungszwecke 9
Tabelle 2-1 Vergleich allgemeiner Fasereigenschaften 13
Tabelle 2-2 Chemische Zusammensetzung ausgewählter Pflanzenfasern 15
Tabelle 2-3 Charakteristische Werte eingesetzter Fasermaterialien im Ausgangszustand 24
Tabelle 3-1 Bindemechanismen der Agglomeration 28
Tabelle 4-1 Variationsmöglichkeiten des Agglomerationsprozesses im Eirich-Intensivmischer 49
Tabelle 4-2 Variationsmöglichkeiten des Agglomerationsprozesses im Rollagglomerationsteller 54
Tabelle 5-1 Mindestanforderungen der optischen Analyse 62
Tabelle 5-2 Messwert-Korrekturgleichungen der Agglomeratcharakteristika 64
Tabelle 5-4 Darstellung der verwendeten Grundformen 65
Tabelle 5-5 Geometriespezifische Konstanten 69
Tabelle 5-6 Zusammengefasste geometriespezifische Volumenkonstanten 71
Tabelle 5-7 beispielhafte Sphärizitätsberechnungen von zweidimensionalen Projektionsflächen 75
Tabelle 5-8 Parameter der Druckfestigkeitsmessung 89
Tabelle 5-9 Parameter der Zugfestigkeitsmessung 92
Tabelle 6-1 Ermittlung des Nutzvolumens unterschiedlicher Rollgangsvariationen 99
Tabelle 6-2 Nomenklatur der Versuchsreihen der Rollagglomeration 100
Tabelle 6-3 Einfluss der Rollgangsauskleidung auf die Faseragglomeratgeometrie 104
Tabelle 6-4 Kennwerte der Faserlängen-Anzahlverteilung verschiedener Faserschnittlängen 122
Tabelle 6-5 Versuchsmatrix der Agglomerationsversuche verschiedener Fasermaterialien 137
Tabelle 6-6 Charakteristische Größen der zerkleinerten Flachfasern 139
Tabelle 6-7 Nomenklatur der Versuchsreihen im Eirich-Intensivmischer 139
Tabelle 6-8 Abhängigkeitstrend der Agglomerateigenschaften mit steigendem Einflussparameter 158
Tabelle 8-1 Beispielhafte Charakterisierungsansätze der Faseragglomerate im Kollektiv ... 173

10.4 Symbolverzeichnis

Symbole

a, b, c	geometrische Abmessungen
A_0	Ausgangsquerschnitt
$A_0; A_k; B_0;$	Fourier-Koeffizienten
A_p	Pixelfläche
a_p	Kantenlänge des Pixel
a_R	Kantenlänge der Rasterung
$A_{rel.R}$	relative Rasterfläche
a_{RG}	Kantenlänge des Rollgangsquerschnittes
c	spezifische Wärmekapazität
d	Dicke
D	fraktale Dimension
E_S	Druck-Elastizitätsmodul
F	Kraft
$F_1; F_2$	Formfaktoren
h_i	relative Häufigkeit
h_P	Stärke der Compoundplatte
k_A	geometrische Flächenkonstante
k_V	geometrische Volumenkonstante
l	Länge
$L(\lambda)$	Länge des Polygonzuges
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
n	Anzahl
N	Stützstellen
$n_{p,min}$	Mindestpixelanzahl
p	<i>Knud Thomson</i> Konstante
P_f	Projektionsfläche
P_u	Umfang der Projektionsfläche
\dot{Q}	Volumenstrom
r	Radius
R_ε	Rückverformungsverhältnis
S	Sättigungsgrad

S_a	äußere Oberfläche
$SPHT^2$	Sphärizität
$SPHT_{Index}$	Sphärizitätsindex
$s_{Roll,a}$	Rollstrecke eines Anlagenumlaufes
T	Temperatur
t	Zeit
tT	Faserfeinheit; Titer Tex
u	Drehzahl
V	Volumen
V_{Nutz}	Nutzvolumen
w	Klassenbreite
W	Arbeit
x	Feret-Durchmesser
x, y, z	Koordinaten
x_{pf}	Durchmesser einer Kugel mit gleicher Projektionsfläche
x_s	Durchmesser der oberflächengleichen Kugel
z	Wickelgrad
ε	Porosität
ε_i	Stauchung
λ	Sehnenlänge des Zirkelschlages
ρ	Materialdichte
σ	Druckspannung
φ	Winkel
χ	Verhältnis von Länge zu Breite einer Projektionsfläche
ω	Feuchte
Ω_{Pu}	Umfangsstrukturindex
Ω_S	Oberflächenstrukturindex
ψ_{Kub}	Kubizität
ψ_{Wadell}	Sphärizität nach Wadell
ϕ	Füllgrad

Indizes

<i>Agg</i>	Agglomerat
<i>dk</i>	doppelkeglig
<i>ell</i>	elliptisch
<i>F</i>	Faser
<i>ges</i>	Gesamt
<i>H</i>	Hohlräume
<i>i; j; k</i>	Laufvariablen; Laufindex
<i>k</i>	kugelig
<i>konv</i>	konvexer Körper
<i>N</i>	normiert
<i>r</i>	Rest
<i>real</i>	Realer Körper
<i>RG</i>	Rollgang
<i>s_R</i>	Rollstrecke
<i>V</i>	Vorkraft
<i>x; y; z</i>	Orientierung im Koordinatensystem
<i>z</i>	zylindrisch

Anhang

A.1 Zu Einleitung und Zielstellung

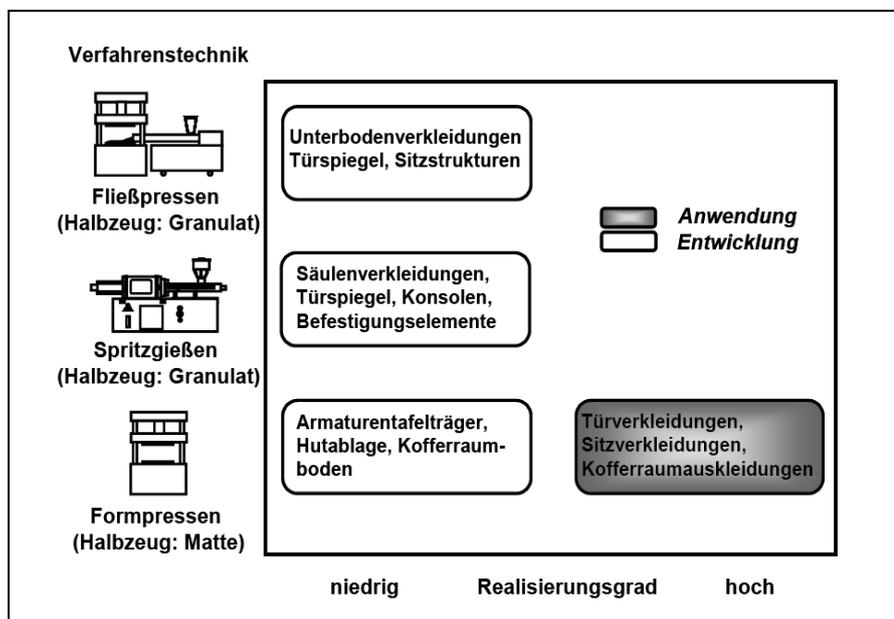


Abbildung A.1-1 Herstellungsverfahren von NFK

[T.R. '03]

A.2 Zu Fasermaterialien

Tabelle A.2-1 Relative Häufigkeit der Anzahlverteilung unterschiedliche Faserschnittlängen

Faserlänge	Faserschnittlänge				
	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
5	28,86%	21,29%	14,48%	12,11%	11,70%
10	49,71%	19,31%	18,55%	17,30%	15,25%
15	13,71%	15,84%	17,65%	11,42%	8,16%
20	4,86%	36,14%	8,60%	10,73%	10,64%
25	2,29%	5,45%	16,74%	4,84%	8,87%
30	0,00%	0,99%	19,46%	5,19%	5,67%
35	0,57%	0,50%	0,90%	5,54%	8,16%
40	0,00%	0,50%	1,81%	16,96%	5,67%
45	0,00%	0,00%	0,45%	11,42%	3,90%
50	0,00%	0,00%	0,45%	2,42%	15,60%
55	0,00%	0,00%	0,00%	0,69%	4,61%
60	0,00%	0,00%	0,90%	0,69%	0,35%
65	0,00%	0,00%	0,00%	0,35%	1,06%
70	0,00%	0,00%	0,00%	0,35%	0,35%

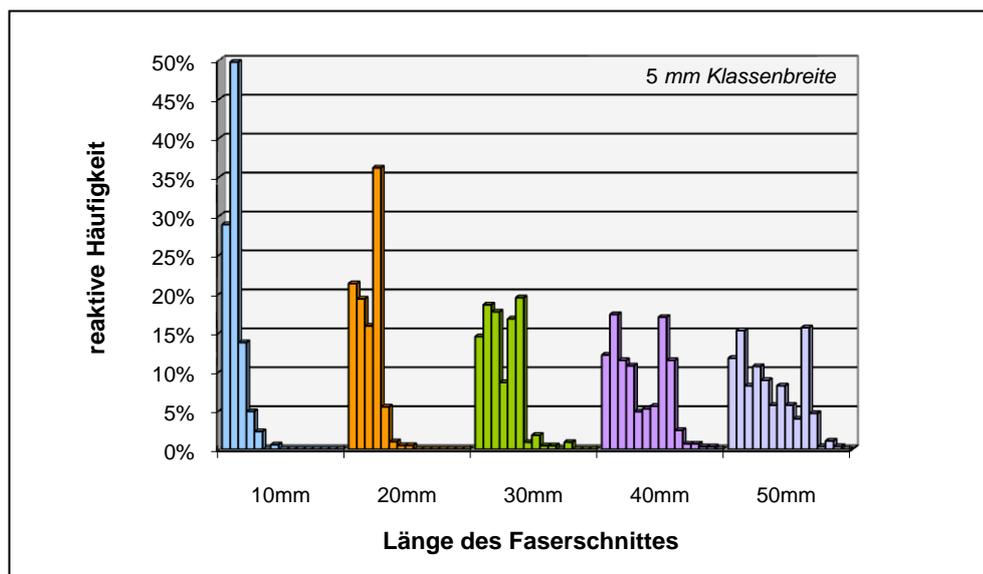


Abbildung A.2-1 Relative Häufigkeit der Anzahlverteilung unterschiedliche Faserschnittlängen

A.3 Zu Grundprozesse der Faseragglomeration

Zitate zur Definition klassischer Agglomerationsverfahren

Stieß:

„Mechanische Verfahrenstechnik 2“

„Agglomerieren als Oberbegriff für die Verfahren der mechanischen Kornvergrößerung meint das Zusammenlagern und Aneinanderbinden von feindispersen festen Partikeln zu größeren Teilchenverbänden, den Agglomeraten.“ [M.S. '94] S. 182

Pietsch:

„Systematische Entwicklung von Verfahren zur Kornvergrößerung durch Agglomerieren“

„Die Kornvergrößerung durch Agglomerieren als technische Anwendung des Naturphänomens Agglomeration, dem unkontrollierten oder erwünschten Zusammenhaften von Feststoffpartikeln, ist spätestens seit den richtungsweisenden Veröffentlichungen von Rumpf 1958 als eines der Grundverfahren der mechanischen Verfahrenstechnik erkannt.“ [W.P. '02-b] S. 1517

Schubert:

„Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik – Agglomerationsprozesse“

„Indem aus feineren festen Partikeln durch das Wirksamachen von Bindekräften größere erzeugt werden, stellt die Agglomeration die Umkehrung der Zerkleinerung dar, wobei im Allgemeinen spezifische technologische Zielstellungen verfolgt werden.“

[H.S. '03-b] S. 433

„Es sei noch bemerkt, dass in verschiedenen Ausrüstungen, die anderen Prozessgruppen zuzuordnen sind, Agglomerationseffekte im Sinne einer Prozessintegration auftreten und genutzt werden.“ [H.S.'03-b] S. 434

Polke; Schäfer; Scholz:

„Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik - Eigenschaften disperser Systeme“

„Von der lockeren Flocke über das durch Van-Der-Waals- oder Kapillarkräfte gebundene Agglomerate bis hin zum durch Feststoffbrücken oder Versinterung gebundene Aggregate, das bis zu einem kompakten Festkörper verdichtet sein kann, sind hier zahlreiche Ausprägungen möglich. In der Reihenfolge Flocke-Agglomerat-Aggregat-Festkörper nehmen die Porosität in der Regel ab und Festigkeit zu.“ [R.P.'03] S. 22

A.4 Zu Eingesetzte Versuchsanlagen

	Einsatzgebiet	Schneidzerkleinerung
	Aufgabegut	weich, mittelhart, zäh, elastisch, faserig
	Aufgabekorngröße	max. 60 x 80 mm
	Endfeinheit	0,25 - 20 mm
	Durchsatz	0,2 - 50 kg/h
	Rotor	6-Scheiben-Rotor
	Antriebsleistung	1500 W
	Motordrehzahl bei 50 Hz (60 Hz)	niedertourig: 695 min ⁻¹ (835 min ⁻¹) hohtourig: 1390 min ⁻¹ (1690 min ⁻¹)

Abbildung A.4-1 Schneidmühle SM 2000 der Firma RETSCH

[RETSCH'08]

A.5 Zu Charakterisierungs- und Bewertungsansätze der Faseragglomerate

A.5.1 Weitere Bildaufnahmesysteme

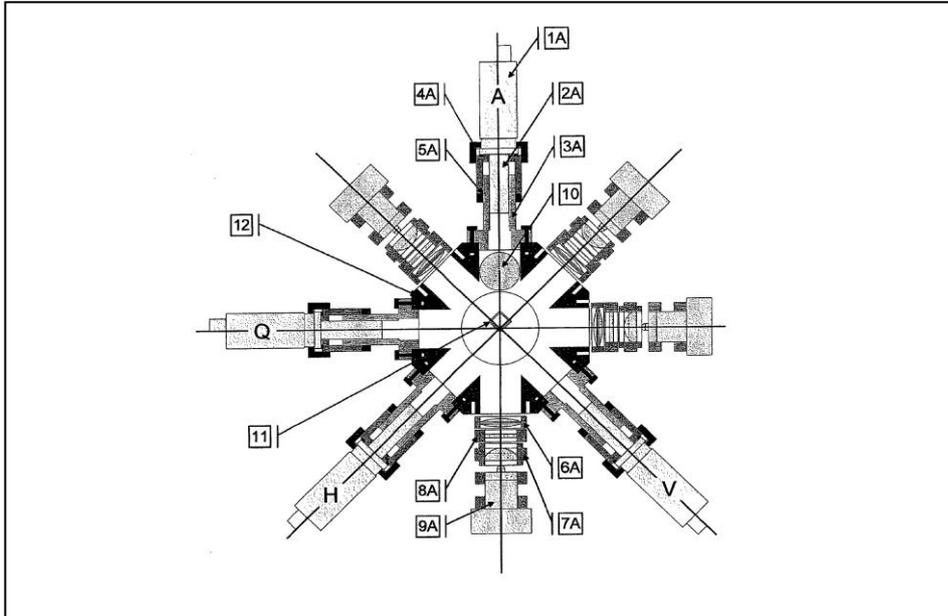


Abbildung A.5-1 3-D-Bildanalyse der BASF SE

[DE 10 2005 055 825 A1]

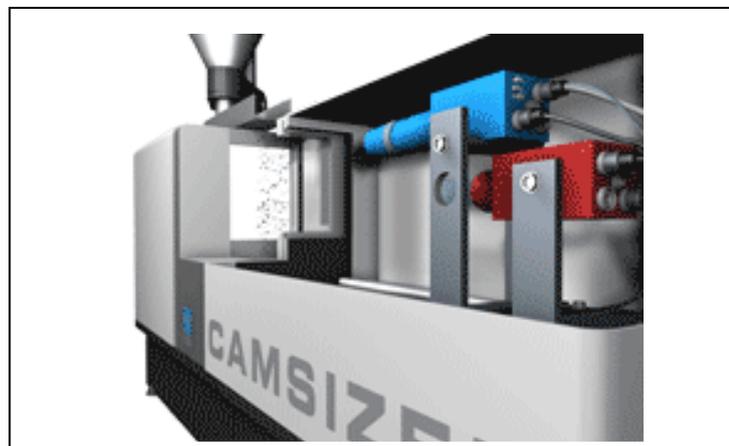


Abbildung A.5-2 CAMSIZER der Firma RETSCH [RETSCH'08]

A.5.2 Berechnung von Körpergeometrien basierend auf deren Projektionsschatten

Tabelle A.5-1 Berechnung von geometrischen Flächen

	Fläche	Umfang
Kreis	$A_K = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot a^2$	$U_K = \pi \cdot a$
Ellipse	$A_{Ell} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot b$	$U_{Ell} \approx \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (a + b) - \sqrt{a \cdot b} \right)$
Rechteck	$A_{Re} = a \cdot b$	$U_{Re} = 2 \cdot (a + b)$
Rhombus	$A_{Rho} = \frac{1}{4} \cdot e \cdot f$	$U_{Rho} = 4 \cdot a$

Kugelähnliche Makrogestalt

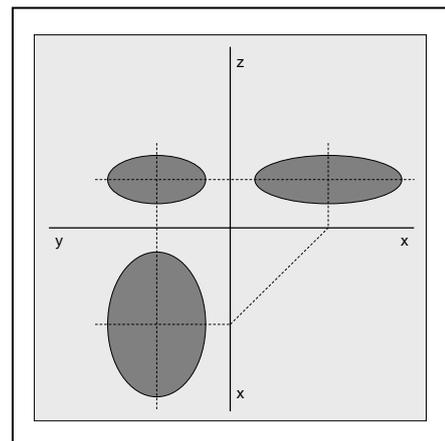
Projektionsflächen:

Die Projektionsflächen eines triaxialen Ellipsoids beinhalten drei Ellipsen unterschiedlicher Abmessungen (x_x, x_y, x_z).

$$Pf_{x-y} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_y$$

$$Pf_{y-z} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_y \cdot x_z$$

$$Pf_{x-z} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_z$$



Oberfläche:

Nach dem Theorem von Cauchy gilt für konvexe Oberflächen:

$$S = 4 \cdot \overline{Pf}$$

Diese Formelherleitung bezieht sich bei der Herleitung offensichtlich auf kreisförmige Projektionsflächen bzw. kugelförmige Körper.

$$S_{Kugel} = \pi \cdot \bar{x}^2$$

$$S_{Kugel} = 4 \cdot \overline{Pf}_{Kugel}$$

$$\overline{Pf}_{Kugel} = A_{Kreis} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \bar{x}^2$$

$$\bar{x}^2 = \frac{4}{\pi} \cdot \overline{Pf}_{Kugel}$$

Um eine geringere Abweichung bei nicht exakt kugelförmigen Gebilden zu erlangen, wird wie schon erwähnt von triaxialen Körpern ausgegangen. Als Näherungsform mit

einem relativen Fehler von 1,061% wird die Berechnungsform nach Knud Thomson herangezogen.

$$S_{t-Ell} = 4 \cdot \pi \cdot \sqrt[p]{\frac{(r_x \cdot r_y)^p + (r_x \cdot r_z)^p + (r_y \cdot r_z)^p}{3}} \quad (p \approx 1,6075)$$

$$S_{t-Ell} = \pi \cdot \sqrt[p]{\frac{1}{3} \cdot (x_x \cdot x_y)^p + (x_x \cdot x_z)^p + (x_y \cdot x_z)^p}$$

Wird nun die Formel für den Flächeninhalt einer Ellipse (siehe oben) nach dem Durchmesserpaar der Projektionsebene umgestellt und in die Oberflächengleichung für tri-axiale Ellipsoide eingesetzt, so kommt man auf folgende Abhängigkeit der Oberfläche von den Projektionsflächen.

$$\begin{aligned} S_{Ell} &= \pi \cdot \sqrt[p]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot Pf_{x-y}\right)^p + \left(\frac{4}{\pi} \cdot Pf_{x-z}\right)^p + \left(\frac{4}{\pi} \cdot Pf_{y-z}\right)^p} \\ &= 4 \cdot \sqrt[p]{\frac{1}{3} \cdot \left[(Pf_{x-y})^p + (Pf_{x-z})^p + (Pf_{y-z})^p \right]} \end{aligned}$$

Allgemein lässt sich schreiben:

$$\begin{aligned} S_{Ell} &= 4 \cdot \sqrt[p]{\frac{1}{n} \cdot \sum_i^n Pf_i^p} \\ S_{Ell} &= 4 \cdot \sqrt[p]{Pf^p} \end{aligned}$$

Volumen:

Die Berechnung der Volumina triaxialer Ellipsoide wird in Abhängigkeit der Durchmesser nach der nachstehenden Gleichung ermittelt.

$$V_{Ell} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_y \cdot x_z$$

Das Produkt aus den drei Durchmessern lässt sich über folgende Schritte herleiten. Hierbei wird wie schon bei der Herleitung der Oberfläche die Durchmesserabhängigkeit durch die Abhängigkeit von den Projektionsflächen ersetzt.

$$\begin{aligned}\sqrt{Pf_{x-y} \cdot Pf_{x-z} \cdot Pf_{y-z}} &= \sqrt{\left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_y\right) \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_z\right) \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_y \cdot x_z\right)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{16} \cdot \pi^3 \cdot (x_x \cdot x_y \cdot x_z)} \\ x_x \cdot x_y \cdot x_z &= 8 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi^3} \cdot Pf_{x-y} \cdot Pf_{x-z} \cdot Pf_{y-z}}\end{aligned}$$

Eingesetzt in die Grundberechnung zur Ermittlung der Volumina von triaxialen Ellipsoiden ergibt sich:

$$V_{Ell} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot Pf_{x-y} \cdot Pf_{x-z} \cdot Pf_{y-z}}$$

Allgemein folgt daraus:

$$V_{Ell} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \cdot \left(\prod_{i=1}^n Pf_i\right)^{\frac{3}{2n}}$$

Sphärizität:

Die Sphärizität ist ein geometriebezogener Formfaktor. In den meisten Literaturstellen wird die Sphärizität nach Wadell „ Ψ_{Wa} “ zitiert (u. a. Schubert). Nach der alten DIN 66141 findet ein Kornfaktor φ Verwendung, welcher dem reziproken Wert der Sphärizität nach Wadell und somit dem Heywoodfaktor „ φ_{Hey} “ entspricht [U.S.'04].

$$\Psi_{Wa} = \left(\frac{x_{v\ddot{a}}}{x_{s\ddot{a}}}\right)^2 \quad \text{bzw.} \quad \varphi_{Hey} = \left(\frac{x_{s\ddot{a}}}{x_{v\ddot{a}}}\right)^2$$

Für den Heywoodfaktor gilt unter Einbeziehung der obigen Herleitungen der entsprechende äquivalente Kugeldurchmesser:

$$\varphi_{Hey, Ell} = \frac{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Pf_i^p\right)^{\frac{1}{p}}}{\left(\prod_{i=1}^n Pf_i\right)^{\frac{1}{n}}}$$

mit $p \approx 1,6075$

Zylindrische Makrogestalt

Agglomerate mit einer zylindrischen Makrogestalt lassen sich geometrisch gut erfassen, da ihre Geometrie eindeutig ist. Die charakteristischen Abmessungen lassen sich aus den Projektionsflächen ohne großen Aufwand ermitteln, da diese innerhalb der Projektionsflächen in stabiler Lage entnehmbar sind.

Aufgrund höherer Faservolumina kann es wie bei den Agglomeraten mit einer kugelförmigen Makrogestalt dazu kommen, dass statt eines kreisrunden Axialquerschnittes ein elliptischer entsteht. Um diesen Fall ebenfalls abzudecken, wird von dieser Abweichung ausgegangen, da diese ebenfalls Kreisquerschnitte mit einschließt.

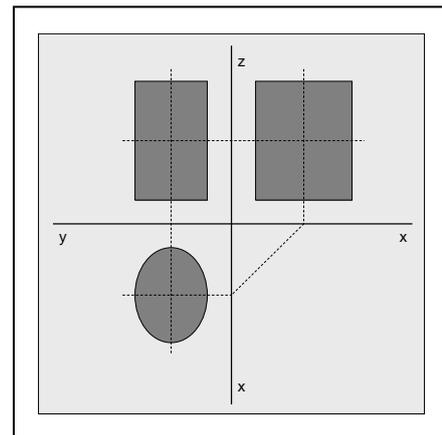
Projektionsflächen:

In den Projektionsflächen sind zwei Geometrien zu finden. Zum einen rechteckige zum anderen elliptische Flächen. Prinzipiell reichen für die Auswertung zwei Projektionsflächen aus. Eine stellt die Bodenansicht, die andere die Seitenansicht dar.

$$Pf_{x-y} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot x_x \cdot x_y$$

$$Pf_{x-z} = x_x \cdot h = x_x \cdot x_z$$

$$Pf_{y-z} = x_y \cdot h = x_y \cdot x_z$$



Oberfläche:

Die Oberfläche setzt sich wie bei Kreiszyklindern aus der Mantelfläche und der doppelten Bodenfläche zusammen.

$$\text{Oberfläche} = 2 \cdot \text{Ellipsenfläche} + \text{Zylinderhöhe} \cdot \text{Ellipsenumfang}$$

$$S_{\text{zyl}} = 2 \cdot Pf_{\text{Boden}} + h \cdot Pu_{\text{Boden}}$$

Die Ermittlung der Höhe des Zylinders wird wieder in Abhängigkeit von den Projektionsflächen ermittelt.

$$h = \frac{\overline{Pf_{\text{Seite}}}}{\bar{x}} \quad \text{mit} \quad \bar{x} = \sqrt{\frac{4 \cdot Pf_{\text{Boden}}}{\pi}}$$

$$h = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\overline{Pf}_{Seite}}{\sqrt{Pf_{Boden}}}$$

Daraus folgt:

$$S_{zyl} = 2 \cdot Pf_{Boden} + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\overline{Pf}_{Seite}}{\sqrt{Pf_{Boden}}} \cdot Pu_{Boden}$$

Volumen:

Volumen = Ellipsenfläche · Zylinderhöhe

$$\begin{aligned} V_{zyl} &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\overline{Pf}_{Seite}}{\sqrt{Pf_{Boden}}} \cdot Pf_{Boden} \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \overline{Pf}_{Seite} \cdot \sqrt{Pf_{Boden}} \end{aligned}$$

Sphärizität:

$$\varphi_{Hey,zyl} = \frac{2}{\sqrt[3]{9}} \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{Pf_{Boden}^2}{\overline{Pf}_{Seite}^2}} + \sqrt[6]{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{\overline{Pf}_{Seite}^2 \cdot Pu_{Boden}^6}{Pf_{Boden}^5}} \right]$$

Doppelkeglige Makrogestalt

Oberfläche:

Die Oberfläche eines Körpers mit einer symmetrischen doppelkegligen Makrogestalt entspricht der zweifachen Mantelfläche „ A_M “ des einfachen Kegels.

$$\begin{aligned} S_{dk} &= 2 \cdot A_{M,Kegel} = \pi \cdot d \cdot s \\ \text{mit } s &= \frac{\overline{Pu}_{Seite}}{4} \quad \text{und} \quad \pi \cdot d = Pu_{Boden} \end{aligned}$$

$$S_{dk} = \frac{1}{4} \cdot \overline{Pu}_{Seite} \cdot Pu_{Boden}$$

Volumen:

Das Volumen eines Doppelkegels entspricht dem zweifachen Volumen des einzelnen Kegels.

$$V_{dk} = 2 \cdot V_{Kegel} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h$$

mit $h = \frac{\overline{P}f_{Seite}}{d}$ und $\pi \cdot d = Pu_{Boden}$

$$V_{dk} = \frac{1}{6} \cdot Pu_{Boden} \cdot \overline{P}f_{Seite}$$

Sphärizität:

$$\rho_{Hey,dk} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{Pu_{Boden}}{\pi \cdot \overline{P}f_{Seite}^2} \cdot \overline{Pu}_{Seite}}$$

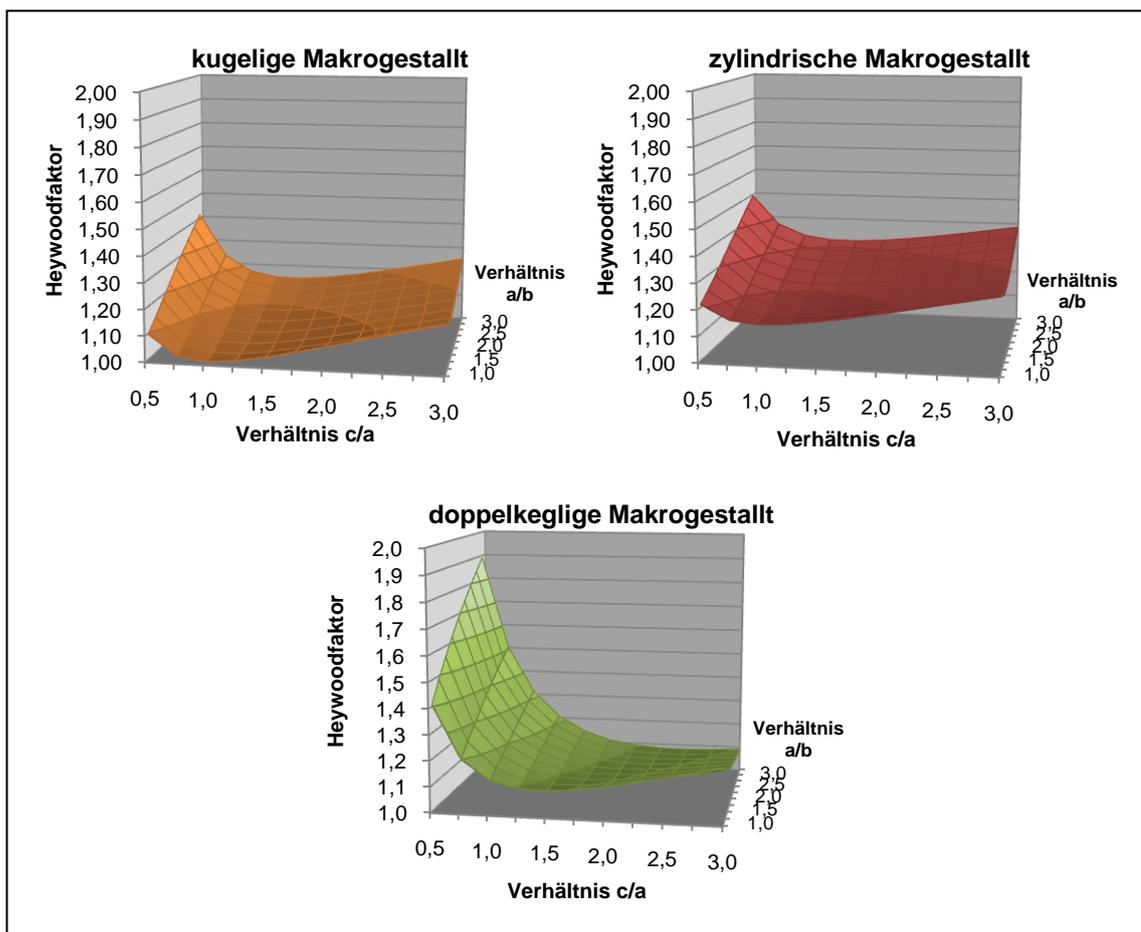


Abbildung A.5-3 Heywoodfaktoren der Geometrien mit elliptischen Grundseiten

A.5.3 Unterscheidungsformen der Makrogestalt

Hierbei handelt es sich um eine qualitative Beschreibung der Gestalt, welche überwiegend visuell vorgenommen wird. Unterschieden wird hierbei nach DIN 60000 in Gebildeformen:

- ungeformte Gebilde
- linienförmige Gebilde
- flächenförmige Gebilde
- Körpergebilde

Die Abgrenzung der einzelnen Gebildeformen ist teils fließend und wurde aufgrund mangelnder Definitionen in der vorliegenden Literatur anhand einer eigens durchgeführten Umfrage (100 Befragte nach subjektiver Empfindung geometrischer Gebilde) festgelegt. Hiernach lässt sich eine Abgrenzung der Gestaltformen wie in Tabelle aufgeführt vornehmen.

Tabelle A.5-2 Abmessungsabhängige Gebildeformerteilung

Gebildeart	Länge : Höhe	Breite : Höhe
<i>linienförmig</i>	> 6:1	≤ 2:1
<i>flächenförmig</i>	> 6:1	> 2:1
<i>Körper</i>	≤ 6:1	≤ 6:1

Länge ≥ Breite ≥ Höhe

A.5.4 Fraktaldimension von Linien

Der Zusammenhang aus äußerer Oberfläche „ S_a “ und Projektionsfläche „ $\overline{P_f}$ “ eines konvexen Körpers lässt sich nach dem Theorem von *Cauchy* durch Gleichsetzen des äquivalenten Durchmessers einer oberflächengleichen Kugel „ x_s “ zum Mittelwert der kreisflächenäquivalenten Durchmesser seiner Projektionsschatten „ \bar{x}_{pf} “ darstellen [H.R. '90].

$$x_s = \bar{x}_{pf}$$

Gleichung 11-1

Unter Annahme einer Kugelform folgt:

$$S_a = 4 \cdot \overline{P_f}$$

Gleichung 11-2

Zur Überprüfung dieses Theorems für die in dieser Arbeit betrachteten Faseragglomerate wurden vereinfacht ideale Rotationskörper der Grundformen (Zylinder, Ellipsoid und Doppelkegel) mit unterschiedlichen Abmessungsverhältnissen von Durchmesser zu Länge (1:0,25 bis 1:2) berechnet und den realen Oberflächenwerten gegenübergestellt (siehe Abbildung). Vor allem bei flachen, linsenförmigen Körpern sowie bei allen Zylindern zeigte sich ein teils erheblicher Fehlerwert (Zylinder (1:0,25) \cong 27%). Überraschenderweise wurde auch für Ellipsoide bei linsenförmiger Makrogestalt (1:0,25) eine Abweichung von über 12% festgestellt.

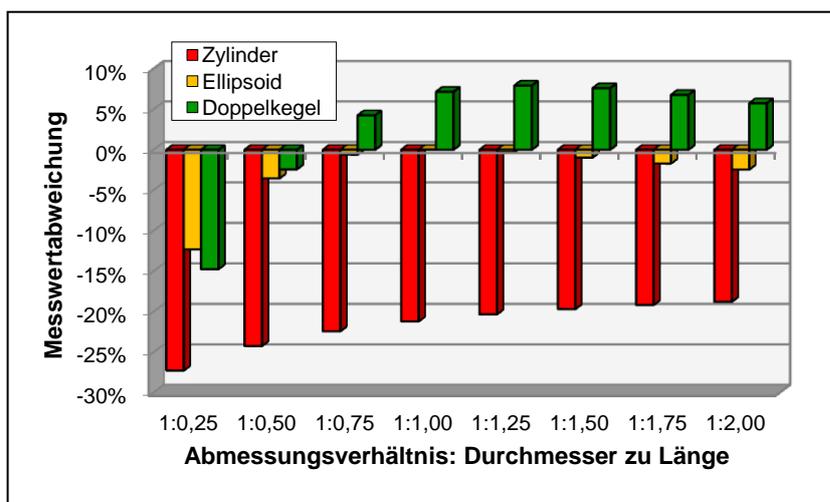


Abbildung A.5-4 Fehlerwerte der Oberflächenberechnung nach Cauchy-Theorem für ideale Rotationskörper

Zur besseren Anpassung der Formel wurde im ersten Schritt statt einer Kugel als Referenzkörper ein Ellipsoid herangezogen, um so eine bessere Übereinstimmung bei der Berechnung gestreckter und gestauchter Körper zu erreichen. Unter Verwendung der Näherungsform von *Knud Thomson* zur Ermittlung der Oberfläche triaxialer Ellipsoide folgt mit $p \approx 1,6075$:

$$S_a = 4 \cdot \sqrt[p]{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P f_i^p}$$

Gleichung 11-3

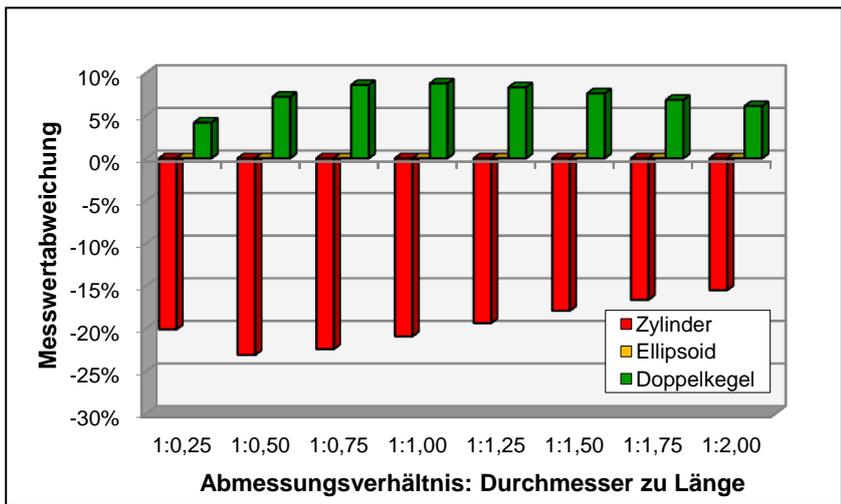


Abbildung A.5-5 Fehlerwert der Oberflächenberechnung nach ellipsoid bezogenem Cauchy-Theorem für ideale Rotationskörper

A.5.5 Fraktaldimension von Linien

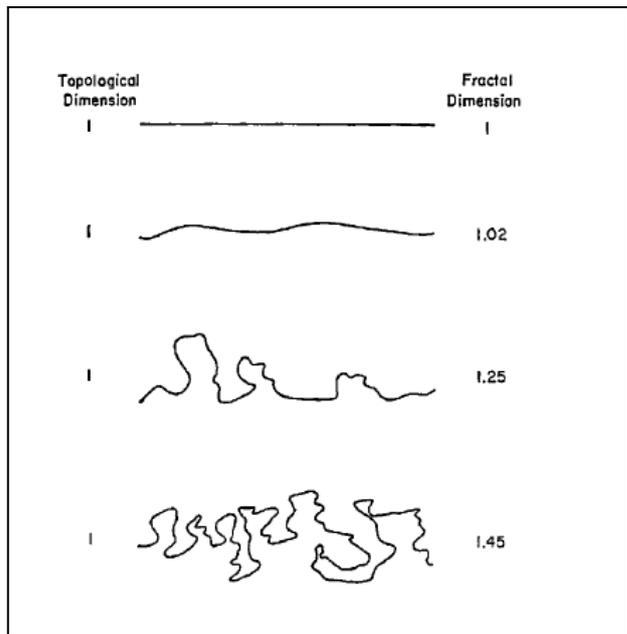


Abbildung A.5-6 Fraktaltheorie von Linien [B.K'93]

A.5.6 NIR-Spektroskopie

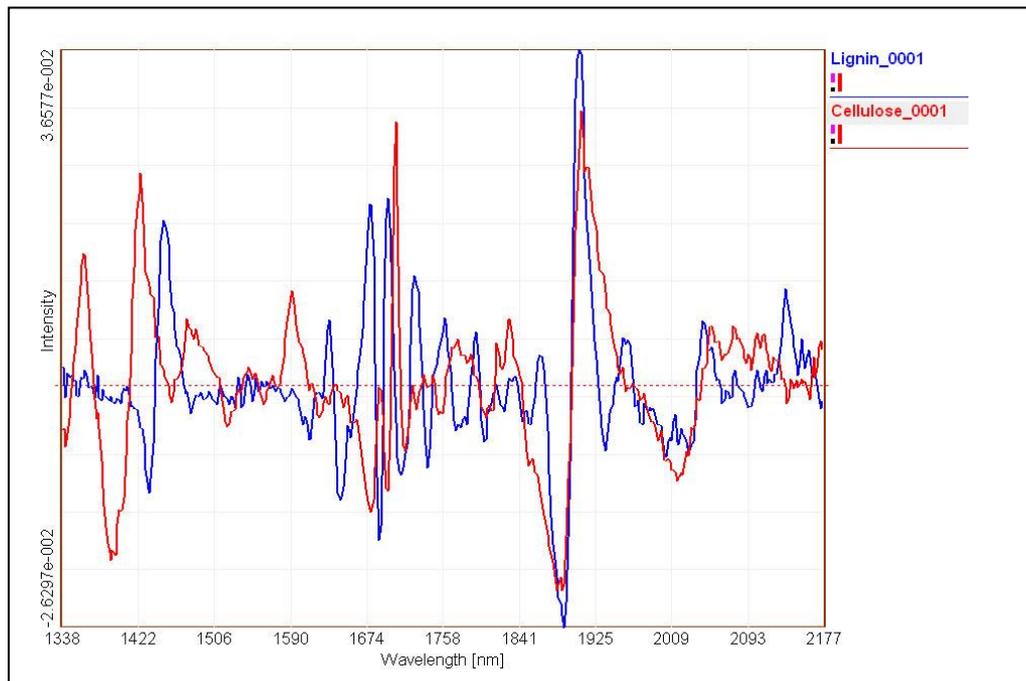


Abbildung A.5-7 Intensitätsverläufe reiner Cellulose sowie Lignin

A.6 Zu Experimentelle Untersuchungen

A.6.1 Versuchsstrukturen

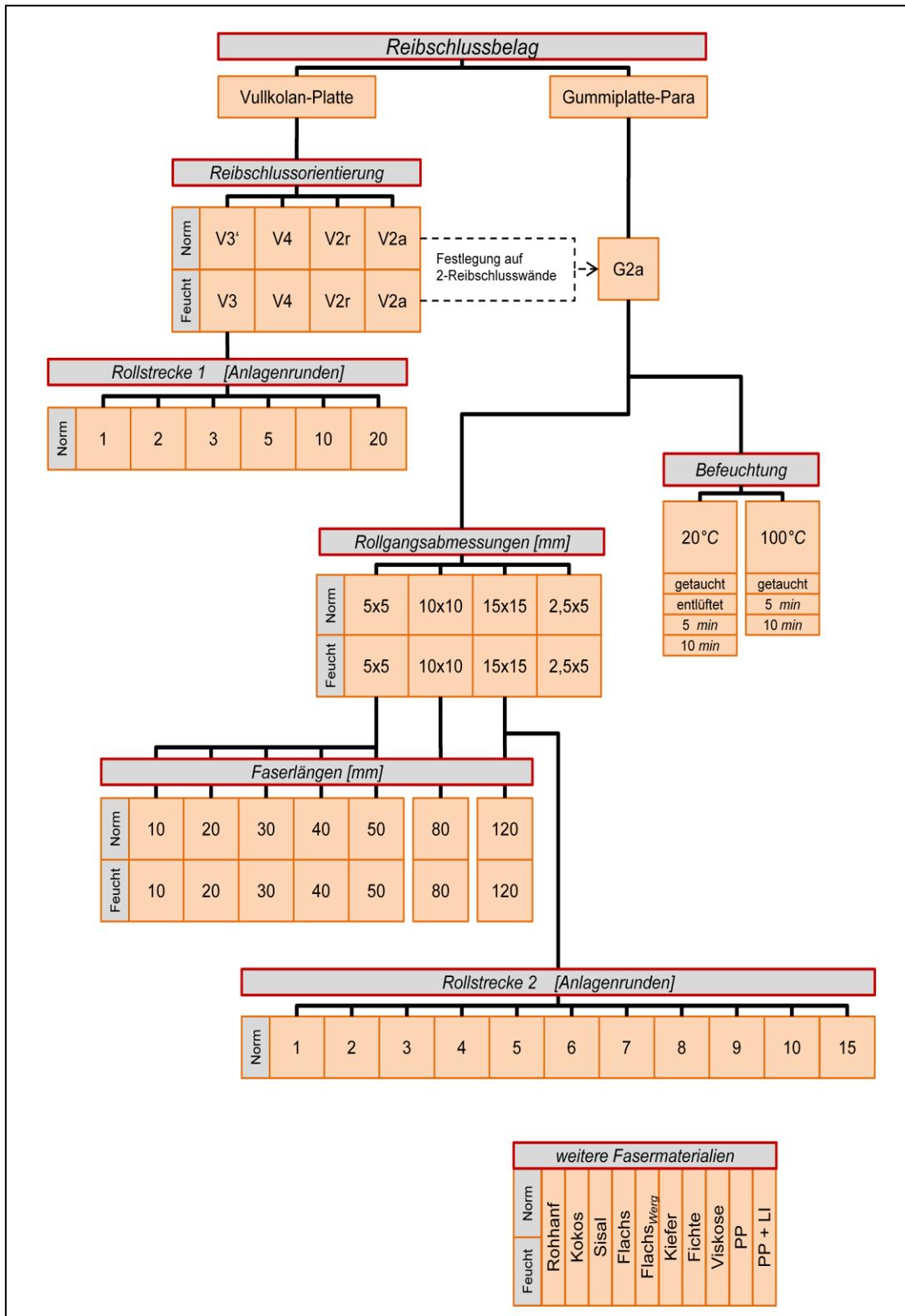


Abbildung A.6-1 Gesamter Versuchsstrukturbaum der Rollagglomeration

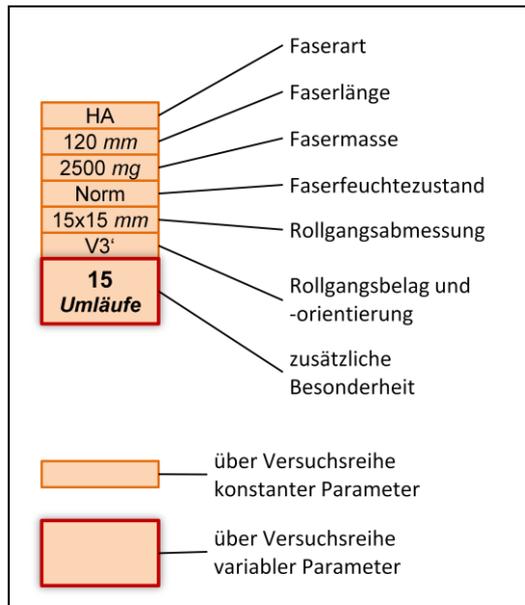


Abbildung A.6-2 Darstellung der Versuchsparameter als Strukturbaum

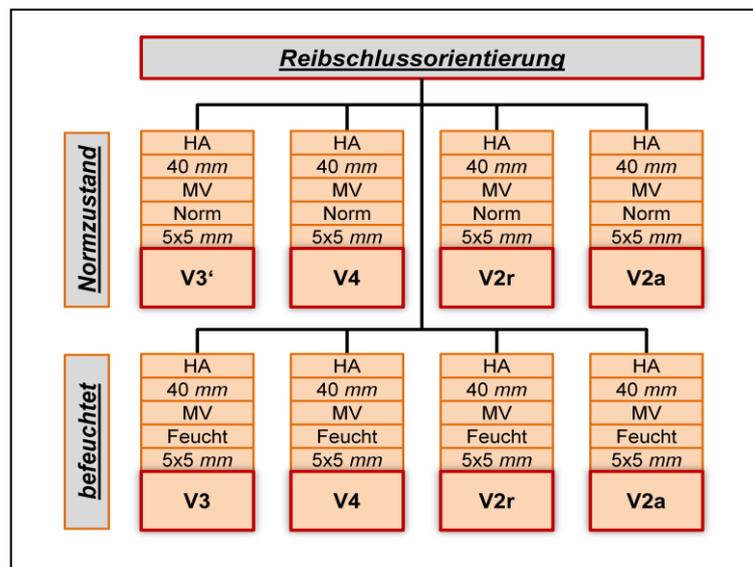


Abbildung A.6-3 Gliederung der Reibschlussuntersuchungen

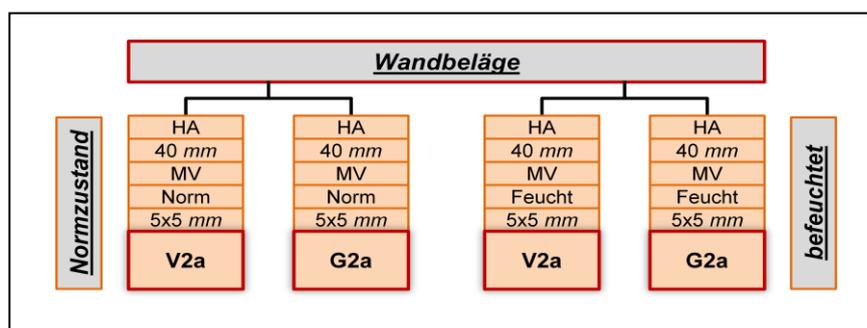


Abbildung A.6-4 Untersuchungen verschiedener Wandbeläge

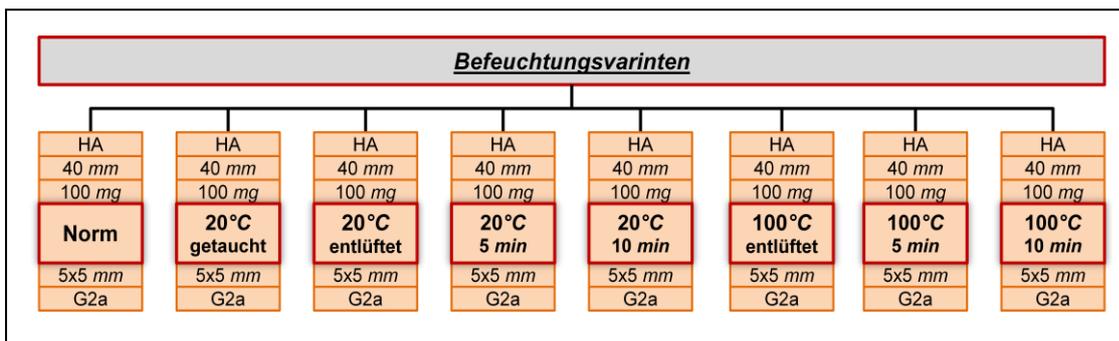


Abbildung A.6-5 Untersuchungen der Befeuchtungsvariation

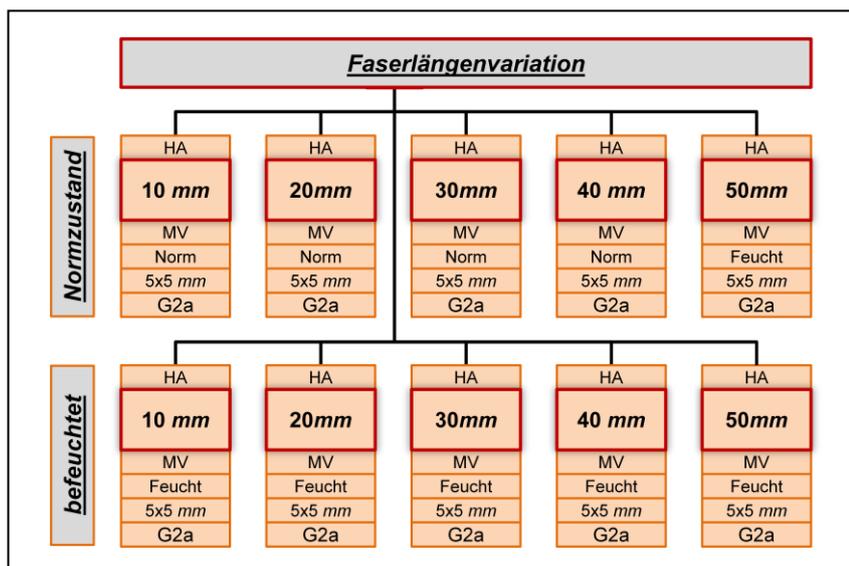


Abbildung A.6-6 Untersuchungen zur Faserlängenvariation

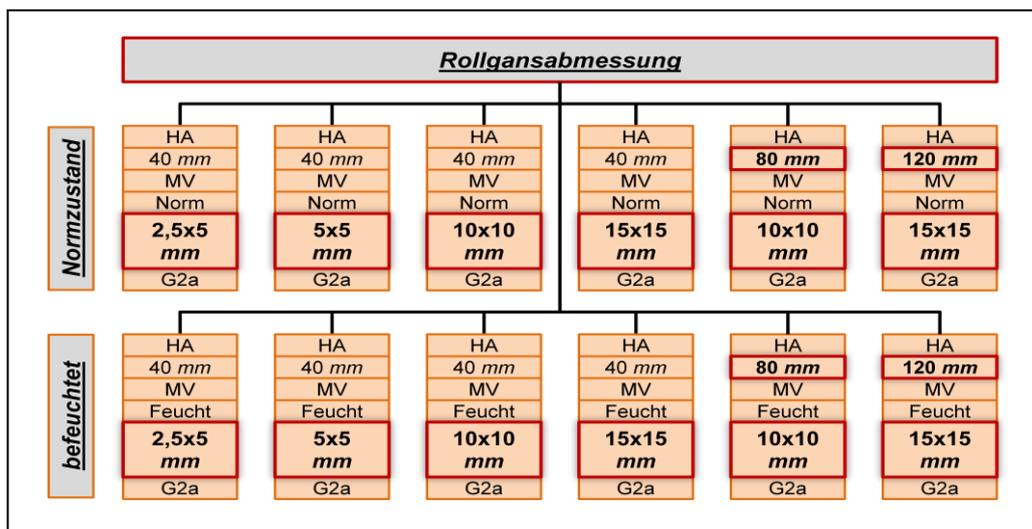


Abbildung A.6-7 Variationen der Rollgangsabmessungen

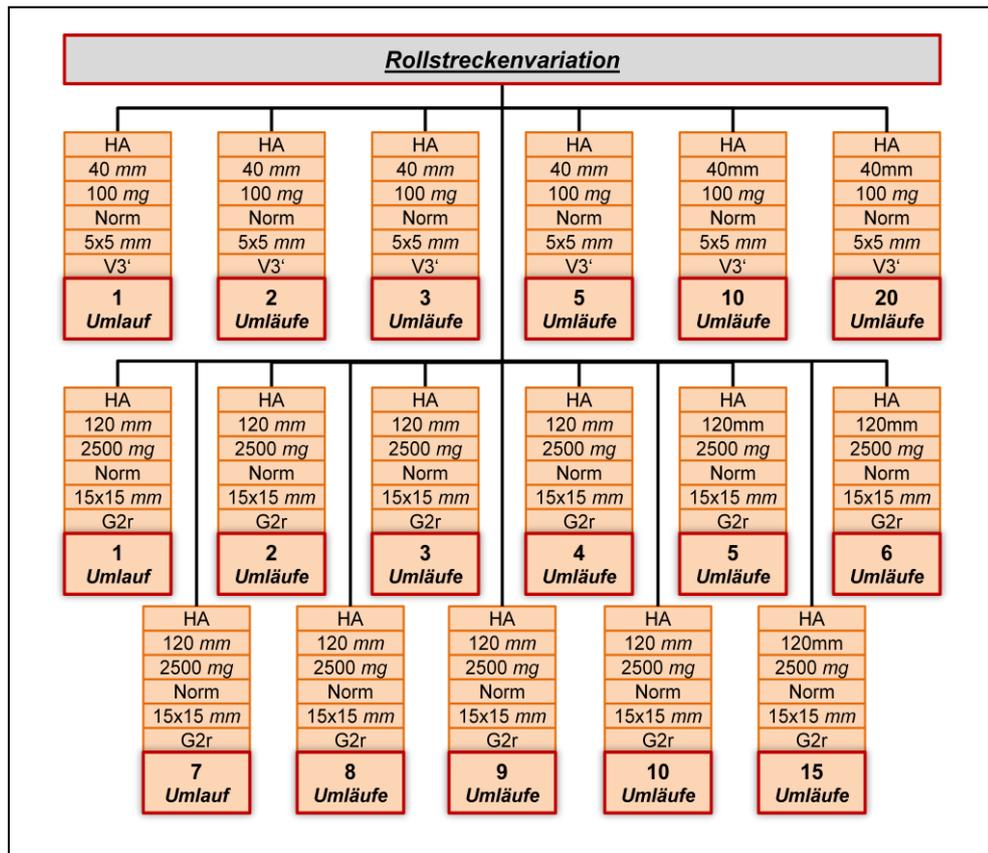


Abbildung A.6-8 Einflussuntersuchungen der Rollstrecke

A.6.2 Verdrillungseffekte der Rollagglomeration



Abbildung A.6-9 Rollagglomerate unterschiedlicher Füllgrade (zweifarbige PP-Faser)

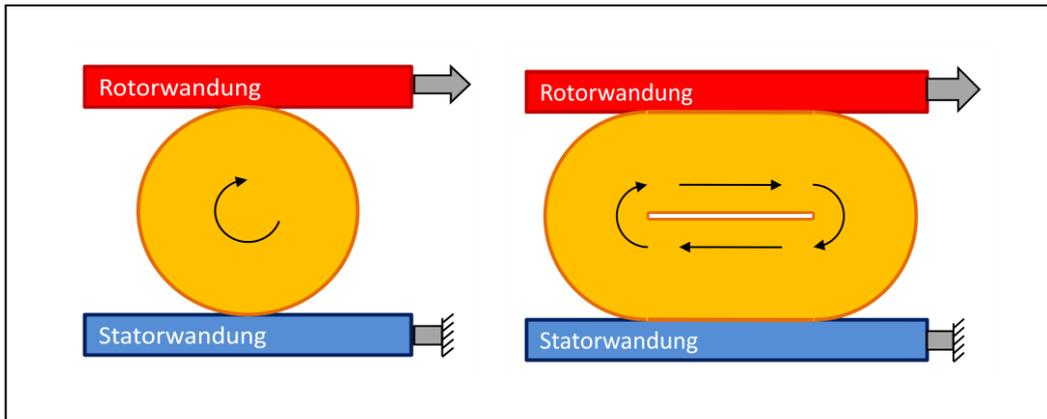


Abbildung A.6-10 Rissbildung bei hohem Füllgrad des Rollganges

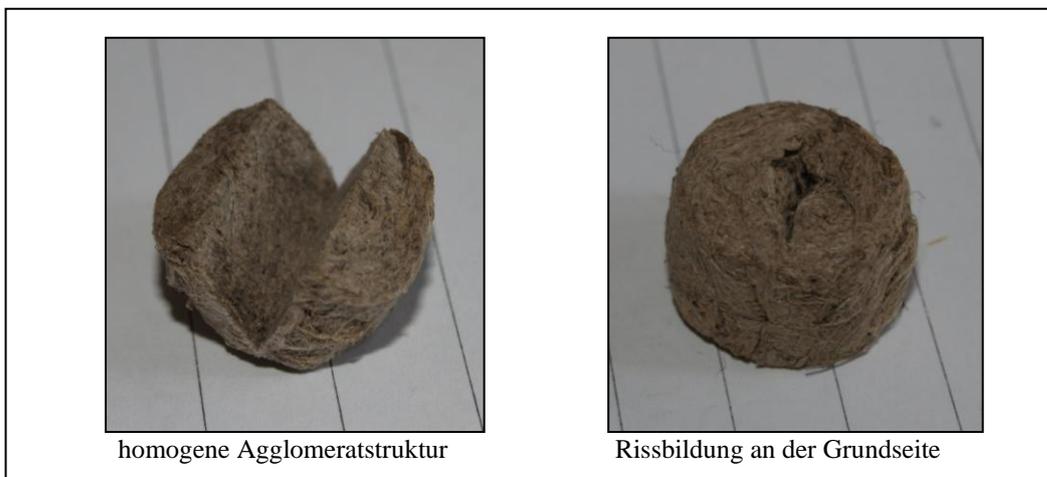


Abbildung A.6-11 Agglomeratstrukturen aufgrund Füllgrade des Füllgradeinflusses

A.6.3 Rollagglomerate aus unterschiedlichen Materialien

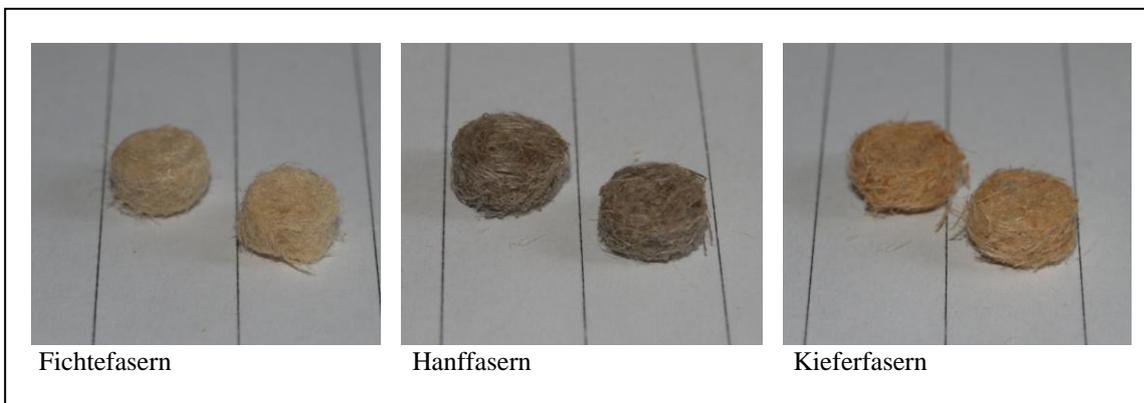


Abbildung A.6-13 Rollagglomerate unterschiedlicher, trockener Materialien (2,5x5 G2a)



Abbildung A.6-12 Rollagglomerate unterschiedlicher, feuchter Materialien (15x15 G2a)

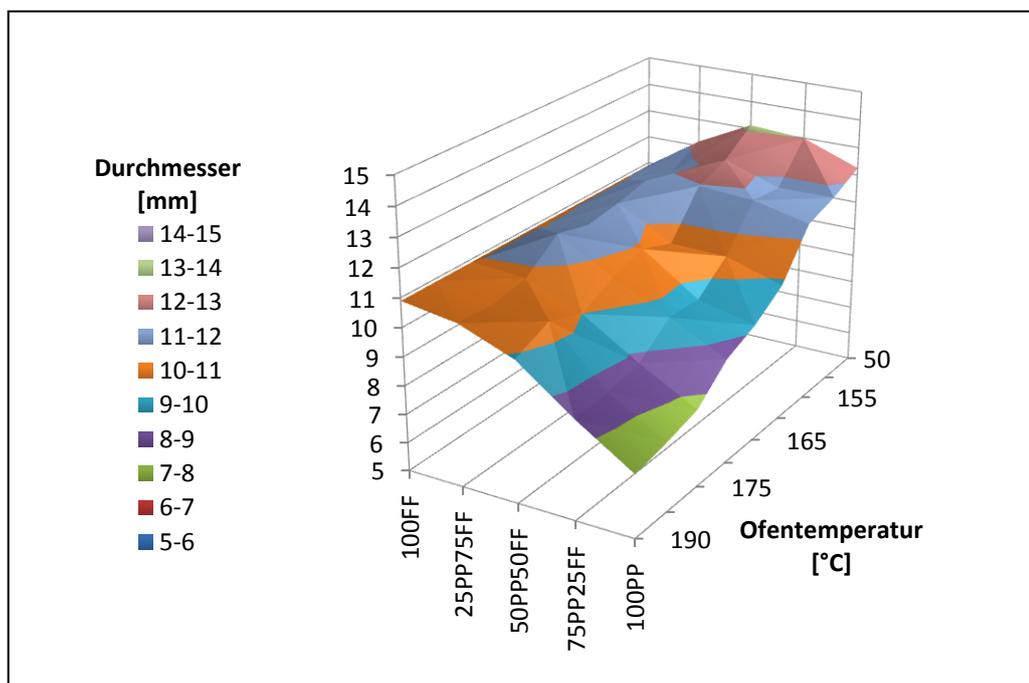


Abbildung A.6-13 Einfluss von Wärmeeinwirkung auf Mischagglomerate aus Natur- und Polypropylenfasern [S.H.'03]

A.6.4 Agglomerationsversuche im Eirich-Intensivmischer

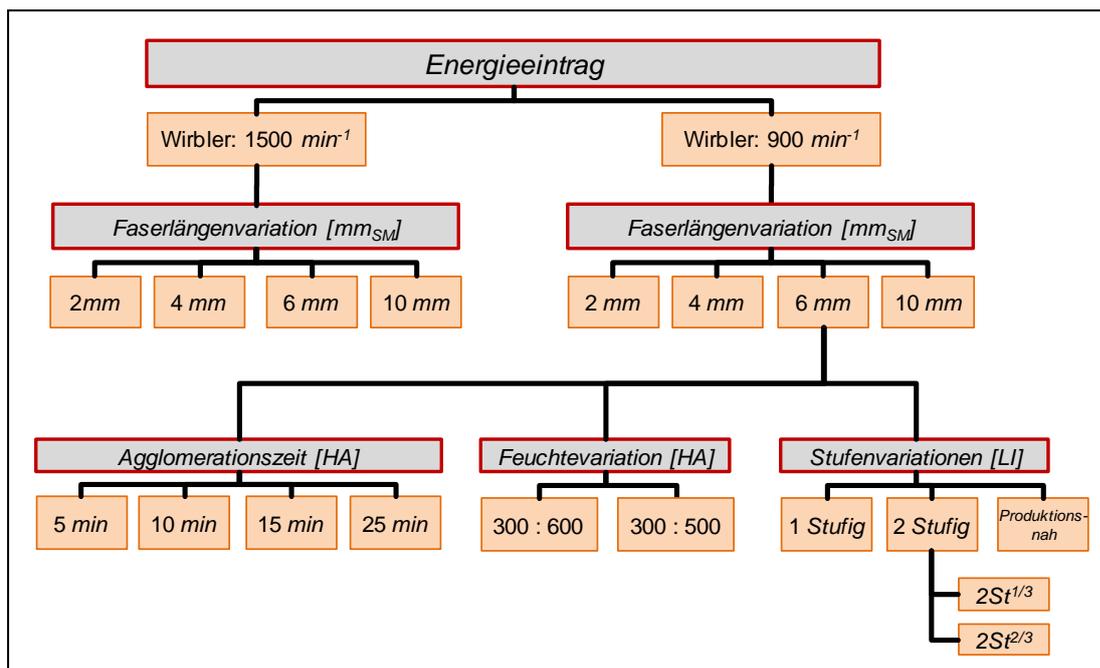


Abbildung A.6-14 Gesamter Versuchsstrukturbaum der Aufbauagglomerationsuntersuchungen

Tabelle A.6-1 Gesamter Versuchsstrukturbaum der Aufbauagglomerationsuntersuchungen

Versuchsreihe	Faseraufgabe [g]	Wasserszugabe [g]	Wirblerdrehzahl [min ⁻¹]	Prozesszeit [min]
Faserlängeneinfluss (hoher Energieeintrag)				
LI 2-300-600 (1St-1500)	300	600	1500	25
LI 4-300-600 (1St-1500)	300	600	1500	25
LI 6-300-600 (1St-1500)	300	600	1500	25
LI 10-300-600 (1St-1500)	300	600	1500	25
Zwei Stufen (hoher Energieeintrag)				
LI 6-300-600 (2St ^{1/3} -1500)	300/100	600/200	1500	25/25
Faserlängeneinfluss (geringer Energieeintrag)				
LI 2-300-600 (1St-900)	300	600	900	25
LI 4-300-600 (1St-900)	300	600	900	25
LI 6-300-600 (1St-900)	300	600	900	25
LI 10-300-600 (1St-900)	300	600	900	25
Verhältnis der zweiten Stufe				
LI 6-300-600 (2St ^{1/3} -900)	300/100	600/200	900	25/25
LI 6-300-600 (2St ^{2/3} -900)	300/200	600/400	900	25/25
Produktionsnaher Prozess				
HA 6-300-600 (PN-900)	300/±74,4	600/±148,8	900	25/25

Stufendarstellung: 1.Stufe/2.Stufe
 konstante Werte: Feuchtegrad: 2 g_{Wasser}/g_{Faser}
 Füllgrad: 100%
 Behälterdrehzahl: 42 min⁻¹

A.6.5 Pressagglomeration

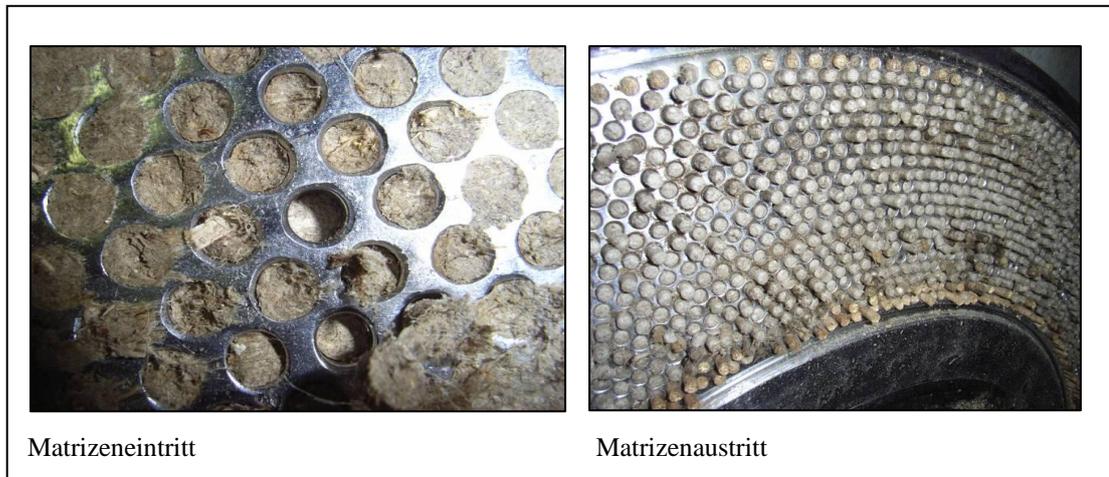


Abbildung A.6-15 Fotografie der eingesetzten Ringmatrizen



Abbildung A.6-16 Flachmatrizenpresse [Kahl'08]

A.7 Messwerttabellen der Mittelwerte

A.7.1 Rollagglomerationsversuche

HA 40-MV-N (5x5-V3)	Mittelwerte der Agglomeratklassen											
	5	10	20	25	40	50	60	80	100	120	150	
ideale Rotationsvolumen (Kugel)	94,03 mm ³											
Füllgrad f_I	4,0%	7,8%	14,9%	18,9%	29,5%	36,8%	44,1%	58,8%	73,2%	87,5%	(112%)	
Fasermasse [mg]	5,50	10,90	20,50	25,80	40,30	50,11	60,15	80,15	99,75	119,20	153,00	
Faservolumen [mm ³]	3,73	7,34	14,04	17,79	27,75	34,56	41,44	55,31	68,79	82,27	105,20	
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	698,31	1377,25	2627,38	3330,46	5193,43	6468,14	7756,27	10352,02	12874,19	15398,94	19684,30	
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	494,94	428,55	385,66	392,80	439,86	454,37	488,69	468,31	566,74	612,31	796,30	
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	304,58	280,56	255,97	259,53	280,01	285,98	300,02	291,88	331,29	350,02	418,90	
Porosität (konv.) f_I	99,0%	98,1%	96,2%	95,3%	93,6%	92,3%	91,3%	88,0%	87,5%	86,4%	86,3%	
Porosität (real) f_I	98,1%	96,9%	94,8%	93,8%	91,9%	90,6%	89,8%	86,0%	85,4%	84,0%	83,5%	
Feret (min) [mm]	8,00	7,81	8,00	8,15	8,54	8,79	8,91	8,83	9,32	9,32	9,80	
Feret (max) [mm]	11,16	10,71	9,99	9,91	10,23	10,24	10,50	10,38	11,16	11,66	13,00	
Feret (mittel) [mm]	9,63	9,36	9,01	9,05	9,44	9,54	9,77	9,64	10,28	10,58	11,60	
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,65	1,63	1,37	1,32	1,29	1,26	1,27	1,26	1,29	1,35	1,45	
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,03	1,03	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	
Oberflächenstrukturindex f_I	0,74	0,68	0,62	0,61	0,55	0,54	0,48	0,45	0,43	0,47	0,43	
Oberflächenfaktor f_I	3,86	3,15	2,66	2,60	2,27	2,22	1,96	1,85	1,81	1,91	1,75	
Widerstandskraft (10%) [N]			0,15	0,18	0,25	0,28	0,32	0,46	0,47	0,68	0,64	
Druck-E-Modul [mN/mm ²]			0,04	0,03	0,05	0,04	0,07	0,07	0,17	0,07	0,05	
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]			2,92	3,40	4,18	4,46	4,88	7,19	6,39	8,89	6,71	
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,36	1,36	1,24	1,23	1,21	1,18	1,19	1,19	1,21	1,27	1,42	
Seitenansicht1 x_{max}/x_{min}	1,41	1,46	1,26	1,21	1,20	1,16	1,19	1,20	1,21	1,30	1,34	
Seitenansicht2 x_{max}/x_{min}	1,38	1,32	1,25	1,21	1,18	1,16	1,16	1,13	1,17	1,19	1,21	
Grundseite SPHT ²	1,89	1,60	1,29	1,24	1,18	1,14	1,12	1,10	1,12	1,14	1,12	
Seitenansicht1 SPHT ²	1,75	1,61	1,26	1,23	1,18	1,15	1,13	1,13	1,12	1,15	1,13	
Seitenansicht2 SPHT ²	1,85	1,33	1,21	1,19	1,16	1,12	1,11	1,10	1,13	1,12	1,10	

HA 40-MV-B (5x5-V3)		Mittelwerte der Agglomeratklassen						
		10	20	40	60	80	100	120
ideale Rotationsvolumen	<i>(Doppelkegel)</i>	92,56 mm ³						
Füllgrad	[]	7,9%	15,1%	30,1%	44,8%	59,7%	74,2%	88,5%
Fasermasse	[mg]	10,70	20,40	40,40	60,30	80,20	99,60	119,17
Faservolumen	[mm ³]	7,35	14,00	27,89	41,50	55,29	68,64	81,93
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	1377,25	2624,16	5218,60	7767,88	10344,28	12847,09	15336,58
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	113,86	139,96	159,05	167,59	207,86	258,31	297,38
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	118,91	136,33	148,44	153,69	177,35	205,29	226,08
Porosität (konv.)	[]	0,93	0,90	0,82	0,75	0,73	0,73	0,72
Porosität (real)	[]	0,93	0,89	0,81	0,73	0,71	0,71	0,70
Feret (min)	[mm]	5,47	6,04	6,27	6,39	6,81	7,42	7,87
Feret (max)	[mm]	6,46	6,91	7,48	7,53	8,14	8,82	9,38
Feret (mittel)	[mm]	5,96	6,47	6,81	6,94	7,54	8,15	8,62
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,25	1,21	1,27	1,23	1,27	1,27	1,30
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Oberflächenstrukturindex	[]	0,14	0,13	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
Oberflächenfaktor	[]	1,16	1,14	1,11	1,10	1,11	1,12	1,11
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,24	0,51	1,44	2,75	3,35	4,00	3,71
Druck-E-Modul	[mN/mm ²]	17,36	28,32	71,26	125,72	134,45	126,26	101,73
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,15	1,12	1,08	1,11	1,13	1,12	1,12
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,19	1,16	1,24	1,21	1,24	1,23	1,23
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,21	1,16	1,26	1,21	1,22	1,23	1,23
Grundseite	SPHT ²	0,93	0,96	0,96	0,97	1,00	1,01	1,02
Seitenansicht1	SPHT ²	0,96	0,99	1,01	1,01	1,05	1,07	1,07
Seitenansicht2	SPHT ²	0,95	0,98	1,01	1,00	1,04	1,05	1,06

HA 40-MV-N (5x5-V4)		Mittelwerte der Agglomeratklassen						
		10	20	40	60	80	100	120
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Doppelkegel)</i>	92,56 mm ³						
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	7,7%	15,1%	30,0%	44,8%	59,5%	74,1%	89,2%
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	10,30	20,30	40,10	60,17	80,00	99,60	119,90
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	7,15	13,95	27,79	41,43	55,08	68,55	82,58
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	1335,96	2612,51	5199,24	7757,53	10309,42	12827,71	15455,74
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	511,88	334,72	721,69	510,18	470,65	492,34	557,06
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	318,83	246,85	430,09	333,47	312,14	321,40	354,99
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	98,3%	95,7%	95,6%	91,5%	87,9%	85,9%	85,1%
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	96,8%	93,7%	91,1%	86,3%	82,2%	80,7%	79,0%
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	8,46	7,55	8,71	8,35	8,32	8,60	8,63
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	11,79	10,58	14,69	12,85	12,39	12,46	13,32
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	10,21	9,02	11,84	10,55	10,25	10,42	10,93
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,59	1,64	2,06	1,83	1,74	1,65	1,83
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,06	1,06	1,11	1,08	1,07	1,07	1,09
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	69,0%	59,3%	58,4%	54,4%	49,4%	47,6%	49,3%
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	3,30	2,48	2,47	2,22	2,00	1,92	1,98
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	<i>[N]</i>	0,13	0,18	0,24	0,33	0,46	0,49	0,67
<i>Druck-E-Modul</i>	<i>[mN/mm²]</i>	7,82	7,64	6,23	7,96	10,52	9,66	11,70
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,33	1,17	1,28	1,26	1,18	1,14	1,13
<i>Seitenansicht1</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,44	1,45	1,87	1,71	1,62	1,59	1,72
<i>Seitenansicht2</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,40	1,59	1,90	1,66	1,68	1,62	1,79
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,78	1,17	1,32	1,21	1,11	1,10	1,08
<i>Seitenansicht1</i>	<i>SPHT²</i>	1,63	1,44	2,15	1,67	1,48	1,36	1,44
<i>Seitenansicht2</i>	<i>SPHT²</i>	1,75	1,36	2,20	1,57	1,48	1,36	1,43

HA 40-MV-B (5x5-V4)		Mittelwerte der Agglomeratklassen						
		10	20	40	60	80	100	120
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Doppelkegel)</i>	92,56 mm ³						
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	7,7%	15,1%	29,6%	45,0%	59,5%	73,6%	88,6%
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	10,40	20,30	39,70	60,30	80,00	98,80	119,17
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	7,17	14,01	27,42	41,61	55,11	68,08	82,05
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	1342,41	2622,85	5130,82	7789,83	10317,17	12739,93	15355,92
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	145,83	166,74	180,17	201,58	194,15	230,64	287,02
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	140,97	153,84	161,39	173,23	169,55	190,50	220,85
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	95,0%	91,5%	84,5%	78,6%	71,5%	70,4%	71,2%
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	93,5%	89,8%	82,2%	75,9%	67,9%	67,1%	67,7%
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	5,57	6,12	6,44	6,70	6,62	7,00	7,50
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	7,55	8,00	7,93	8,15	8,02	8,51	9,27
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	6,60	6,97	7,11	7,41	7,34	7,83	8,43
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,57	1,45	1,33	1,30	1,29	1,33	1,38
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	36,6%	19,8%	15,8%	15,6%	13,8%	13,5%	15,1%
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	1,64	1,26	1,19	1,19	1,16	1,16	1,18
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	<i>[N]</i>	0,19	0,42	1,34	2,20	4,05	4,93	4,59
<i>Druck-E-Modul</i>	<i>[mN/mm²]</i>	16,42	22,51	61,93	94,64	175,65	169,50	129,03
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,36	1,13	1,10	1,14	1,12	1,15	1,19
<i>Seitenansicht1</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,30	1,40	1,31	1,26	1,28	1,24	1,23
<i>Seitenansicht2</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,42	1,40	1,29	1,27	1,25	1,28	1,31
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,14	0,98	0,99	1,00	0,99	1,01	1,04
<i>Seitenansicht1</i>	<i>SPHT²</i>	1,14	1,12	1,09	1,05	1,07	1,07	1,08
<i>Seitenansicht2</i>	<i>SPHT²</i>	1,11	1,14	1,08	1,07	1,05	1,05	1,09

HA 40-MV-N (5x5-V2r)		Mittelwerte der Agglomeratklassen							
		10	20	40	60	80	100	120	140
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)		98,17 mm ³							
Füllgrad	[]	7,1%	13,7%	26,5%	41,3%	55,5%	69,0%	83,8%	101,4%
Fasermasse	[mg]	10,30	19,70	37,70	59,00	79,10	98,20	117,50	138,20
Faservolumen	[mm ³]	7,00	13,48	26,04	40,55	54,53	67,73	80,89	95,35
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	1307,54	2523,47	4872,68	7592,32	10207,45	12676,70	15142,07	17846,25
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	954,87	1162,90	922,65	937,56	951,45	824,33	725,83	720,61
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	494,66	568,89	485,61	492,18	493,67	452,87	415,13	415,61
Porosität (konv.)	[]	99,2%	98,7%	97,1%	95,5%	93,7%	91,6%	88,5%	86,6%
Porosität (real)	[]	98,2%	97,2%	95,5%	93,3%	90,7%	88,6%	85,4%	83,0%
Feret (min)	[mm]	9,89	10,26	10,53	10,55	10,29	9,82	9,42	9,28
Feret (max)	[mm]	13,69	14,91	12,98	13,05	13,19	12,74	12,02	12,10
Feret (mittel)	[mm]	11,85	12,72	11,82	11,89	11,86	11,42	10,91	10,89
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,59	1,66	1,34	1,37	1,43	1,48	1,42	1,50
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,08	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex	[]	78,1%	74,3%	68,9%	65,5%	62,0%	55,1%	49,9%	51,3%
Oberflächenfaktor	[]	4,59	3,96	3,26	2,93	2,69	2,26	2,04	2,08
- Basis-Druckprüfung -									
Detektierte L0	[mm]	3,40	5,11	5,99	6,40	6,12	6,28	6,35	6,42
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,12	0,14	0,17	0,21	0,26	0,29	0,33	0,41
Arbeit (Belastung)	[Nmm]					0,10	0,11	0,13	0,15
Restverformung	[]	8,0%	6,4%	5,0%	4,5%	3,7%	3,6%	3,5%	3,3%
Rückverformungsverhältnis	[]	0,20	0,36	0,50	0,55	0,63	0,64	0,65	0,67
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	1,91	1,96	2,10	2,41	3,05	3,27	3,92	4,77
Druck-E-Modul	[mN/mm ²]	5,81	3,92	3,55	3,81	5,03	5,23	6,24	7,46
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,37	1,51	1,21	1,23	1,22	1,19	1,18	1,19
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,39	1,49	1,31	1,28	1,32	1,41	1,36	1,37
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,38	1,36	1,18	1,22	1,30	1,32	1,32	1,38
Grundseite	SPHT ²	1,82	1,85	1,30	1,31	1,26	1,19	1,14	1,20
Seitenansicht1	SPHT ²	1,80	1,84	1,43	1,34	1,38	1,30	1,25	1,18
Seitenansicht2	SPHT ²	1,78	1,71	1,37	1,36	1,50	1,31	1,20	1,20

HA 40-MV-B (5x5-V2r)	Mittelwerte der Agglomeratklassen						
	10	20	40	60	80	100	120
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	98,17 mm ³						
Füllgrad []	7,4%	14,2%	28,1%	42,1%	55,3%	68,4%	83,7%
Fasermasse [mg]	10,60	20,30	40,10	60,00	78,90	97,33	118,00
Faservolumen [mm ³]	7,25	13,91	27,63	41,34	54,31	67,13	81,28
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	1356,61	2604,77	5170,84	7738,91	10166,15	12563,56	15210,18
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	192,67	206,83	202,91	245,91	249,58	282,97	364,69
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	171,45	180,24	177,48	201,49	203,71	220,96	262,19
Porosität (konv.) []	95,7%	93,1%	86,3%	82,9%	78,1%	75,6%	76,9%
Porosität (real) []	94,4%	91,7%	84,0%	79,2%	74,3%	71,0%	72,6%
Feret (min) [mm]	5,50	5,97	5,83	6,23	6,32	6,49	7,31
Feret (max) [mm]	7,71	7,70	7,58	8,23	8,22	8,62	9,49
Feret (mittel) [mm]	6,66	6,93	6,87	7,40	7,43	7,74	8,54
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,57	1,47	1,47	1,49	1,46	1,50	1,48
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,08	1,07	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07
Oberflächenstrukturindex []	38,9%	36,2%	15,6%	21,5%	17,0%	18,0%	19,8%
Oberflächenfaktor []	1,70	1,63	1,19	1,29	1,21	1,23	1,26
- Basis-Druckprüfung -							
Detektierte L0 [mm]	4,29	4,98	4,81	5,09	5,17	5,15	6,26
Widerstandskraft (10%) [N]	0,26	0,50	1,55	1,95	2,67	3,29	2,85
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,08	0,15	0,36	0,42	0,57	0,68	0,78
Restverformung []	5,1%	3,9%	3,3%	3,4%	3,2%	3,4%	3,2%
Rückverformungsverhältnis []	0,49	0,61	0,67	0,66	0,69	0,66	0,69
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	8,63	13,48	41,34	47,90	62,74	71,67	53,73
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	20,10	28,23	87,01	95,91	122,12	139,90	92,93
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,42	1,22	1,11	1,13	1,10	1,13	1,16
Seitenansicht1 x_{max}/x_{min}	1,50	1,38	1,45	1,45	1,42	1,44	1,38
Seitenansicht2 x_{max}/x_{min}	1,26	1,30	1,40	1,43	1,42	1,48	1,40
Grundseite SPHT ²	1,28	1,07	0,99	1,04	1,01	1,02	1,04
Seitenansicht1 SPHT ²	1,29	1,11	1,10	1,15	1,12	1,13	1,16
Seitenansicht2 SPHT ²	1,06	1,07	1,07	1,14	1,10	1,15	1,13

HA 40-MV-N (5x5-V2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen							
		20	40	60	80	100	120	140	160
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	98,17 mm ³							
Füllgrad	[]	13,7%	27,5%	40,8%	55,6%	69,2%	82,8%	99,0%	116,0%
Fasermasse	[mg]	19,60	39,10	58,10	79,30	98,70	118,00	138,40	158,00
Faservolumen	[mm ³]	13,49	26,95	40,05	54,57	67,98	81,29	95,49	109,03
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	2526,04	5043,03	7496,83	10213,90	12721,85	15214,37	17872,07	20404,57
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	902,08	829,46	764,08	678,87	601,82	633,80	571,76	554,43
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	479,67	447,76	431,02	397,15	367,37	379,11	355,19	349,05
Porosität (konv.)	[]	98,4%	96,3%	94,6%	91,7%	88,5%	86,6%	83,2%	80,2%
Porosität (real)	[]	96,7%	94,5%	92,0%	88,7%	85,3%	82,3%	79,1%	74,8%
Feret (min)	[mm]	9,97	9,48	9,65	8,69	8,34	8,48	8,17	7,88
Feret (max)	[mm]	13,37	12,84	12,24	11,97	11,46	11,63	11,21	11,22
Feret (mittel)	[mm]	11,74	11,27	11,10	10,61	10,20	10,36	10,05	9,92
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,50	1,52	1,45	1,60	1,60	1,60	1,60	1,67
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex	[]	72,9%	65,5%	61,1%	55,7%	43,6%	45,7%	38,5%	37,3%
Oberflächenfaktor	[]	3,76	2,99	2,62	2,30	1,80	1,90	1,64	1,60
- Basis-Druckprüfung -									
Detektierte L ₀	[mm]	4,95	5,96	6,13	6,07	6,12	6,15	6,17	6,12
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,16	0,25	0,32	0,49	0,61	0,90	1,19	2,20
Arbeit (Belastung)	[Nmm]	0,06	0,10	0,12	0,15	0,18	0,24	0,34	0,51
Restverformung	[]	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Rückverformungsverhältnis	[]	0,44	0,60	0,65	0,71	0,72	0,73	0,75	0,79
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	2,39	3,34	4,05	6,33	8,06	12,07	15,79	30,60
Druck-E-Modul	[mN/mm ²]	4,85	5,62	6,63	10,47	13,19	19,73	25,63	50,14
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,30	1,29	1,17	1,20	1,19	1,18	1,19	1,27
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,31	1,44	1,33	1,55	1,58	1,58	1,56	1,67
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,42	1,35	1,32	1,44	1,41	1,42	1,43	1,38
Grundseite	SPHT ²	1,71	1,36	1,27	1,20	1,16	1,16	1,10	1,13
Seitenansicht1	SPHT ²	1,62	1,42	1,41	1,27	1,25	1,31	1,23	1,28
Seitenansicht2	SPHT ²	1,79	1,38	1,32	1,29	1,20	1,25	1,20	1,17

HA 40-MV-B (5x5-V2a)	Mittelwerte der Agglomeratklassen						
	20	40	60	80	100	120	140
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	98,17 mm ³						
Füllgrad []	14,2%	28,2%	41,8%	55,5%	68,8%	83,2%	97,4%
Fasermasse [mg]	20,17	40,17	59,50	79,00	98,00	118,33	138,50
Faservolumen [mm ³]	13,97	27,65	41,02	54,52	67,57	81,72	95,62
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	2611,67	5180,30	7677,97	10207,87	12647,45	15297,80	17894,43
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	181,23	197,65	224,95	275,88	315,03	520,58	583,12
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	166,18	175,47	191,07	218,13	238,18	335,87	362,35
Porosität (konv.) []	92,3%	85,8%	81,4%	79,8%	77,9%	84,1%	83,5%
Porosität (real) []	91,0%	83,2%	78,4%	76,4%	74,0%	79,8%	79,0%
Feret (min) [mm]	5,90	6,00	6,35	6,77	6,95	7,63	7,85
Feret (max) [mm]	7,15	7,45	7,77	8,53	8,88	11,17	11,68
Feret (mittel) [mm]	6,58	6,80	7,15	7,73	8,10	9,73	10,12
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,35	1,36	1,33	1,37	1,41	1,70	1,76
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex []	20,7%	19,0%	13,1%	14,5%	18,6%	26,2%	30,1%
Oberflächenfaktor []	1,26	1,24	1,15	1,17	1,23	1,36	1,44
- Basis-Druckprüfung -							
Detektierte L0 [mm]	5,47	5,63	5,84	6,02	6,10	6,20	6,18
Widerstandskraft (10%) [N]	0,84	2,56	4,02	4,03	5,28	3,49	3,77
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,25	0,74	1,06	1,15	1,18	1,03	0,98
Restverformung []	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
Rückverformungsverhältnis []	0,63	0,66	0,71	0,64	0,71	0,74	0,72
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	27,98	81,00	116,54	97,71	116,39	51,68	48,77
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	51,35	146,05	204,03	165,64	193,56	85,42	79,42
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,10	1,11	1,12	1,13	1,18	1,40	1,40
Seitenansicht1 x_{max}/x_{min}	1,26	1,29	1,29	1,32	1,37	1,65	1,74
Seitenansicht2 x_{max}/x_{min}	1,27	1,32	1,28	1,33	1,31	1,36	1,37
Grundseite SPHT ²	0,95	0,97	0,97	1,00	1,03	1,15	1,15
Seitenansicht1 SPHT ²	1,07	1,10	1,10	1,12	1,13	1,24	1,26
Seitenansicht2 SPHT ²	1,09	1,10	1,10	1,13	1,12	1,18	1,18

HA 40-MV-N (5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklasse					
		20	40	60	80	100	120
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	98,17 mm ³					
<i>Füllgrad</i>	[]	14,8%	42,9%	56,7%	70,8%	85,1%	98,7%
<i>Fasermasse</i>	[mg]	21,00	61,17	80,83	100,67	121,00	140,33
<i>Faservolumen</i>	[mm ³]	14,50	42,12	55,70	69,53	83,52	96,88
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	[mm ²]	2712,78	7884,48	10425,15	13013,15	15629,13	18131,08
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	[mm]	498,17	802,38	889,53	843,03	758,88	822,97
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	[mm]	322,68	437,58	476,43	460,17	429,12	449,52
<i>Porosität (konv.)</i>	[]	97,0%	93,9%	93,5%	91,6%	88,3%	87,2%
<i>Porosität (real)</i>	[]	95,6%	91,6%	90,8%	87,8%	83,6%	83,3%
<i>Feret (min)</i>	[mm]	8,52	9,40	9,73	9,45	8,98	9,03
<i>Feret (max)</i>	[mm]	10,52	12,55	13,07	12,92	12,45	12,73
<i>Feret (mittel)</i>	[mm]	9,58	11,15	11,65	11,48	10,98	11,27
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	[mm]	1,33	1,54	1,58	1,61	1,69	1,64
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	[mm]	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	[]	69,7%	60,0%	60,5%	55,6%	52,6%	50,2%
<i>Oberflächenfaktor</i>	[]	3,31	2,58	2,56	2,27	2,20	2,07
- Basis-Druckprüfung -							
<i>Detektierte L0</i>	[mm]	5,08	6,01	6,26	6,12	6,19	6,31
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	[N]	0,16	0,29	0,34	0,51	0,74	0,79
<i>Arbeit (Belastung)</i>	[Nmm]	0,07	0,10	0,12	0,15	0,20	0,22
<i>Restverformung</i>	[]	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	[]	0,51	0,64	0,68	0,70	0,72	0,72
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	[mN/mm ²]	3,01	3,85	3,92	5,70	9,25	9,27
<i>Druck-E-Modul</i>	[mN/mm ²]	5,93	6,40	6,31	9,35	15,24	14,97
- Stempel-Druckprüfung -							
<i>Detektierte L0</i>	[mm]	1,20	2,16	2,47	5,52	2,68	2,79
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	[N]	0,11	0,15	0,16	0,33	0,28	0,23
<i>Arbeit (-belastung)</i>	[Nmm]	0,01	0,03	0,03	0,11	0,05	0,05
<i>Restverformung</i>	[]	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	[]	-0,03	0,39	0,48	0,62	0,64	0,59
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	[mN/mm ²]	1,96	1,96	1,88	3,72	3,35	2,58
<i>Druck-E-Modul</i>	[mN/mm ²]	18,75	8,85	7,64	6,73	12,72	9,29
<i>Grundseite</i>	x_{max}/x_{min}	1,23	1,22	1,19	1,21	1,23	1,17
<i>Seitenansicht1</i>	x_{max}/x_{min}	1,23	1,41	1,51	1,54	1,61	1,60
<i>Seitenansicht2</i>	x_{max}/x_{min}	1,24	1,39	1,40	1,40	1,40	1,53
<i>Grundseite</i>	SPHT ²	1,34	1,20	1,23	1,22	1,28	1,14
<i>Seitenansicht1</i>	SPHT ²	1,28	1,36	1,34	1,34	1,34	1,28
<i>Seitenansicht2</i>	SPHT ²	1,30	1,30	1,31	1,39	1,28	1,29

HA 40-MV-B (5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklasse					
		20	40	60	80	100	120
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	98,17					
Füllgrad	[]	14,7%	42,8%	56,7%	70,6%	84,8%	99,0%
Fasermasse	[mg]	21,17	60,83	81,00	100,33	120,67	141,00
Faservolumen	[mm ³]	14,43	42,00	55,68	69,27	83,27	97,15
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	2706,32	7860,82	10420,87	12965,85	15581,82	18182,72
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	257,35	209,47	231,02	310,05	344,30	323,38
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	210,10	181,88	193,82	235,72	251,22	242,18
Porosität (konv.)	[]	93,9%	79,7%	75,8%	76,4%	74,6%	69,8%
Porosität (real)	[]	91,8%	76,0%	70,9%	70,4%	69,5%	64,5%
Feret (min)	[mm]	6,22	6,10	6,25	6,85	7,12	6,88
Feret (max)	[mm]	8,63	7,58	7,95	8,90	9,10	8,95
Feret (mittel)	[mm]	7,48	6,93	7,22	8,02	8,30	8,15
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,67	1,35	1,37	1,50	1,43	1,48
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,08	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06
Oberflächenstrukturindex	[]	24,3%	18,2%	17,3%	20,6%	20,0%	12,1%
Oberflächenfaktor	[]	1,34	1,25	1,21	1,27	1,26	1,14
- Basis-Druckprüfung -							
Detektierte L0	[mm]	5,46	5,55	5,51	5,86	5,88	5,73
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,56	3,92	7,02	5,90	5,50	7,42
Arbeit (Belastung)	[Nmm]	0,16	1,04	1,74	1,37	1,21	1,71
Restverformung	[]	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Rückverformungsverhältnis	[]	0,58	0,66	0,77	0,66	0,70	0,74
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	16,83	117,64	188,91	142,57	114,75	148,59
Druck-E-Modul	[mN/mm ³]	31,68	212,16	344,04	252,99	199,78	263,62
- Stempel-Druckprüfung -							
Detektierte L0	[mm]	5,02	5,40	5,42	5,59	5,62	5,50
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,40	4,23	5,85	6,06	6,23	8,18
Arbeit (-belastung)	[Nmm]	0,12	1,11	1,50	1,62	1,59	2,22
Restverformung	[]	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rückverformungsverhältnis	[]	0,59	0,79	0,81	0,78	0,77	0,83
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	11,69	125,72	157,89	143,94	129,61	162,40
Druck-E-Modul	[mN/mm ³]	23,07	233,36	293,06	262,10	232,62	296,69
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,38	1,15	1,16	1,14	1,13	1,10
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,40	1,27	1,33	1,40	1,37	1,43
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,37	1,30	1,34	1,38	1,35	1,42
Grundseite	SPHT ²	1,25	1,01	1,02	1,05	1,03	1,00
Seitenansicht1	SPHT ²	1,29	1,09	1,12	1,24	1,16	1,15
Seitenansicht2	SPHT ²	1,15	1,09	1,12	1,19	1,17	1,14

HA LV-100-N (5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklasse					Faserschnitt
		10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	98,17 mm ³					
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	67,4%	68,5%	68,4%	69,2%	68,2%	
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	96,00	97,50	97,30	98,60	97,00	
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	66,13	67,23	67,13	67,89	66,94	
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	12378,54	12582,47	12563,11	12705,07	12526,98	
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	737,81	666,50	601,59	633,80	628,47	
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	420,11	389,33	366,50	379,11	376,19	
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	90,7%	89,3%	88,7%	88,9%	88,9%	
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	88,0%	85,9%	85,5%	85,2%	85,9%	
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	8,81	8,58	8,32	8,48	8,57	
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	12,27	11,90	11,45	11,63	11,50	
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	10,90	10,50	10,18	10,36	10,31	
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,63	1,59	1,56	1,60	1,58	
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,07	1,06	1,06	1,07	1,06	
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	48,2%	42,9%	43,9%	45,7%	41,6%	
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	1,95	1,78	1,80	1,90	1,75	
- Basis-Druckprüfung -							
<i>Detektierte L0</i>	<i>[mm]</i>	5,97	6,06	6,09	6,13	6,08	
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	<i>[N]</i>	0,53	0,65	0,62	0,61	0,61	
<i>Arbeit (Belastung)</i>	<i>[Nmm]</i>						
<i>Restverformung</i>	<i>[]</i>	3,1%	2,6%	2,6%	2,7%	2,7%	
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	<i>[]</i>	0,69	0,74	0,74	0,73	0,74	
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	<i>[mN/mm²]</i>	6,01	8,55	8,41	8,02	8,04	
<i>Druck-E-Modul</i>	<i>[mN/mm³]</i>	10,11	14,16	13,90	13,11	13,23	
- Zugversuch -							
<i>Max. Kraft</i>	<i>[N]</i>	2,17	9,22	10,78	12,51	13,74	
<i>Arbeit 5mm</i>	<i>[Nmm]</i>	7,234	14,494	18,596	19,058	17,507	
<i>Arbeit 10mm</i>	<i>[Nmm]</i>	16,015	44,530	64,048	65,606	63,852	
<i>Arbeit 15mm</i>	<i>[Nmm]</i>	20,268	69,786	104,963	118,551	122,502	
<i>Arbeit 20mm</i>	<i>[Nmm]</i>	22,589	82,196	131,100	156,083	172,270	
<i>Arbeit ges</i>	<i>[Nmm]</i>	22,589	82,196	131,100	156,083	172,270	

HA LV-100-B (5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklasse					Faserschnitt
		10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	98,17 mm ³					
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	70,6%	70,8%	71,7%	70,3%	71,7%	
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	98,50	98,70	99,90	98,00	99,80	
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	67,78	68,01	68,84	67,53	68,79	
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	12687,02	12728,33	12883,22	12640,57	12872,89	
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	309,19	316,34	357,65	304,86	282,22	
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	235,14	239,66	259,44	233,03	221,92	
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	77,6%	77,4%	80,4%	77,4%	75,4%	
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	71,2%	71,2%	75,3%	73,1%	70,4%	
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	6,73	6,94	7,22	6,83	6,64	
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	8,89	9,00	9,48	8,84	8,57	
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	8,01	8,10	8,49	8,00	7,76	
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,46	1,43	1,47	1,42	1,39	
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	21,5%	17,8%	24,5%	19,3%	15,6%	
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	1,29	1,23	1,34	1,24	1,19	
- Basis-Druckprüfung -							
<i>Detektierte L0</i>	<i>[mm]</i>	5,62	5,81	6,03	5,98	5,74	
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	<i>[N]</i>	7,75	7,56	5,78	5,60	8,12	
<i>Arbeit (Belastung)</i>	<i>[Nmm]</i>	1,77	1,78	1,38	1,32	1,98	
<i>Restverformung</i>	<i>[]</i>	2,3%	2,6%	2,6%	2,7%	2,1%	
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	<i>[]</i>	0,77	0,74	0,74	0,73	0,79	
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	<i>[mN/mm²]</i>	180,74	176,82	118,72	124,82	189,29	
<i>Druck-E-Modul</i>	<i>[mN/mm³]</i>	324,27	308,81	197,58	212,61	331,20	
- Zugversuch -							
<i>Max. Kraft</i>	<i>[N]</i>	16,59	20,24	23,22	27,16	31,86	
<i>Arbeit 5mm</i>	<i>[Nmm]</i>	62,108	61,670	64,758	69,795	70,004	
<i>Arbeit 10mm</i>	<i>[Nmm]</i>	102,040	147,168	163,506	186,440	202,000	
<i>Arbeit 15mm</i>	<i>[Nmm]</i>	114,180	195,948	233,760	308,945	323,578	
<i>Arbeit 20mm</i>	<i>[Nmm]</i>	115,930	211,166	272,006	382,245	393,914	
<i>Arbeit ges</i>	<i>[Nmm]</i>	115,930	211,166	272,006	382,245	393,914	

HA 40-MV-FV (5x5-G2a)	Mittelwerte der Massenklaster						
	21°C Wassertemperatur				100°C Wassertemperatur		
	getaucht	entlüftet	5'	10'	getaucht	5'	10'
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	98,17 mm ³						
Füllgrad []	70,9%	69,6%	69,9%	69,5%	68,8%	69,2%	68,3%
Fasermasse [mg]	101,00	99,10	99,50	98,90	98,00	98,70	97,20
Faservolumen [mm ³]	69,62	68,29	68,58	68,22	67,53	67,98	67,01
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	13032,55	12779,96	12836,75	12767,05	12640,57	12723,16	12542,46
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	344,57	299,80	278,89	288,25	304,86	293,69	314,16
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	252,13	230,48	219,86	224,75	233,03	227,15	237,65
Porosität (konv.) []	0,79	0,77	0,75	0,76	0,77	0,76	0,78
Porosität (real) []	0,76	0,73	0,70	0,71	0,73	0,72	0,74
Feret (min) [mm]	7,30	6,80	6,55	6,69	6,83	6,80	6,76
Feret (max) [mm]	9,17	8,73	8,50	8,62	8,84	8,62	8,96
Feret (mittel) [mm]	8,33	7,94	7,71	7,81	8,00	7,87	8,06
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,35	1,39	1,45	1,41	1,42	1,40	1,48
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex []	0,24	0,14	0,12	0,14	0,19	0,17	0,17
Oberflächenfaktor []	1,34	1,17	1,14	1,17	1,24	1,21	1,20
- Basis-Druckprüfung -							
Detektierte L0 [mm]	6,20	5,93	5,67	5,78	5,98	5,83	5,82
Widerstandskraft (10%) [N]	3,39	5,56	7,19	6,91	5,60	6,18	6,13
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,85	1,27	1,70	1,72	1,32	1,45	1,48
Restverformung []	2,8%	2,9%	2,2%	2,4%	2,7%	2,7%	2,5%
Rückverformungsverhältnis []	0,72	0,71	0,78	0,76	0,73	0,73	0,75
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	71,26	125,30	167,49	158,78	124,82	143,13	135,68
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	117,91	215,37	298,74	276,56	212,61	250,48	237,41
- Stempel-Druckprüfung -							
Detektierte L0 [mm]	5,98	5,72	5,54	5,61		5,62	5,65
Widerstandskraft (10%) [N]	2,86	4,67	5,94	5,92		5,01	4,65
Arbeit (-belastung) [Nmm]							
Restverformung []	0,03	0,03	0,02	0,02		0,03	0,02
Rückverformungsverhältnis []	0,74	0,74	0,78	0,77		0,75	0,76

HA 40-MV-N (2,5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen				
		20	40	60	80	100
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	49,09 mm ³				
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	28,9%	43,1%	57,1%	71,9%	84,8%
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	20,80	30,60	40,80	51,20	60,40
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	14,20	21,16	28,04	35,28	41,62
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	2661,58	3962,66	5248,28	6606,20	7793,72
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	316,32	311,70	358,30	348,92	361,48
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	241,72	238,46	263,32	258,56	265,62
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	95,4%	93,1%	92,1%	89,8%	88,4%
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	93,5%	91,1%	89,0%	86,1%	84,5%
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	6,28	6,44	6,36	6,22	6,22
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	9,52	9,18	9,98	10,00	10,12
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	8,18	8,10	8,54	8,48	8,58
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	2,03	1,82	2,11	2,23	2,15
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,08	1,07	1,08	1,08	1,08
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	56,9%	47,7%	51,7%	45,6%	43,9%
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	2,38	1,92	2,08	1,84	1,80
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,12	1,11	1,16	1,11	1,21
<i>Seitenansicht1</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,86	1,80	1,94	2,13	2,12
<i>Seitenansicht2</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,78	1,56	1,94	2,03	1,86
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,11	1,06	1,09	1,09	1,10
<i>Seitenansicht1</i>	<i>SPHT²</i>	1,29	1,27	1,40	1,37	1,37
<i>Seitenansicht2</i>	<i>SPHT²</i>	1,44	1,20	1,33	1,31	1,25
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,78	1,56	1,94	2,03	1,86
<i>Mittelwert Seitenansicht</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,82	1,68	1,94	2,08	1,99
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,11	1,06	1,09	1,09	1,10
<i>Mittelwert Seitenansichten</i>	<i>SPHT²</i>	1,36	1,23	1,37	1,34	1,31

HA 40-MV-B (2,5x5-G2a)	Mittelwerte der Agglomeratklassen				
	20	40	60	80	100
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	49,09 mm ³				
Füllgrad []	29,5%	42,9%	57,1%	71,1%	85,6%
Fasermasse [mg]	21,00	30,40	40,80	50,60	61,00
Faservolumen [mm ³]	14,46	21,08	28,04	34,88	42,04
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	2708,06	3942,02	5250,88	6528,74	7868,58
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	122,56	135,06	137,18	160,20	174,84
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	127,04	136,44	137,42	152,42	161,52
Porosität (konv.) []	88,1%	84,3%	79,4%	78,0%	75,9%
Porosität (real) []	86,0%	80,9%	75,1%	73,1%	70,5%
Feret (min) [mm]	4,52	4,56	4,48	4,72	4,92
Feret (max) [mm]	6,32	6,62	6,62	7,16	7,34
Feret (mittel) [mm]	5,62	5,86	5,84	6,20	6,48
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,71	1,83	1,84	1,94	1,92
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex []	19,1%	18,7%	14,2%	16,0%	10,9%
Oberflächenfaktor []	1,25	1,24	1,17	1,20	1,12
- Basis-Druckprüfung -					
Detektierte L0 [mm]	2,97	3,00	3,01	3,04	3,23
Widerstandskraft (10%) [N]	1,42	2,66	3,49	2,98	2,41
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,20	0,35	0,46	0,37	0,32
Restverformung []	3,3%	2,9%	2,7%	3,5%	4,0%
Rückverformungsverhältnis []	0,67	0,71	0,73	0,65	0,60
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	45,15	78,86	97,77	83,58	65,69
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	153,21	262,35	328,76	275,49	207,08
- Hochkant-Druckprüfung -					
Detektierte L0 [mm]	5,21	5,34	4,45	5,71	6,27
Widerstandskraft (10%) [N]	1,28	1,70	3,42	3,78	3,64
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,36	0,48	0,71	1,00	1,07
Restverformung []	4,1%	3,7%	2,7%	3,5%	3,6%
Rückverformungsverhältnis []	0,59	0,62	0,73	0,65	0,64
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	40,67	51,06	95,25	105,55	98,82
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	74,15	96,11	240,51	184,73	157,67
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,10	1,14	1,09	1,12	1,09
Seitenansicht1 x_{max}/x_{min}	1,59	1,68	1,79	1,87	1,82
Seitenansicht2 x_{max}/x_{min}	1,61	1,74	1,77	1,82	1,85
Grundseite SPHT ²	0,94	0,99	0,96	0,99	0,98
Seitenansicht1 SPHT ²	1,00	1,05	1,08	1,12	1,14
Seitenansicht2 SPHT ²	1,03	1,06	1,07	1,11	1,13
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,61	1,74	1,77	1,82	1,85
Mittelwert Seitenansicht x_{max}/x_{min}	1,60	1,71	1,78	1,84	1,83
Grundseite SPHT ²	0,94	0,99	0,96	0,99	0,98
Mittelwert Seitenansichten SPHT ²	1,02	1,06	1,07	1,12	1,14

HA 40-MV-N (10x10-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen					
		20	40	60	80	100	120
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	785,40 mm ³					
<i>Füllgrad</i>	[]	42,3%	56,3%	70,4%	84,4%	28,2%	98,7%
<i>Fasermasse</i>	[mg]	481,50	641,50	801,33	961,33	321,00	1124,00
<i>Faservolumen</i>	[mm ³]	331,98	442,38	552,55	663,03	221,32	775,17
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	[mm ²]	62135,73	82794,60	103416,87	124090,75	41420,95	145080,93
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	[mm]	4788,20	5311,40	5856,97	5604,28	5171,67	3967,47
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	[mm]	1465,90	1570,12	1678,12	1622,58	1542,38	1289,33
<i>Porosität (konv.)</i>	[]	93,0%	91,5%	90,3%	88,1%	95,6%	80,2%
<i>Porosität (real)</i>	[]	89,7%	87,3%	85,0%	82,9%	93,5%	74,7%
<i>Feret (min)</i>	[mm]	16,68	17,23	17,70	17,72	17,03	15,90
<i>Feret (max)</i>	[mm]	22,97	23,78	24,97	23,97	23,65	21,32
<i>Feret (mittel)</i>	[mm]	20,42	21,10	21,87	21,48	20,92	19,17
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	[mm]	1,57	1,66	1,69	1,54	1,60	1,53
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	[mm]	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	[]	62,9%	62,3%	63,9%	60,0%	67,1%	50,9%
<i>Oberflächenfaktor</i>	[]	2,72	2,68	2,78	2,51	3,12	2,05
- Basis-Druckprüfung -							
<i>Detektierte L0</i>	[mm]	12,39	12,25	12,08	12,63	12,27	12,20
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	[N]	0,58	0,87	1,47	2,06	0,34	3,16
<i>Arbeit (Belastung)</i>	[Nmm]	0,36	0,47	0,72	0,98	0,24	1,34
<i>Restverformung</i>	[]	3,0%	3,0%	2,9%	2,8%	3,4%	2,5%
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	[]	0,70	0,70	0,71	0,73	0,66	0,75
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	[mN/mm ²]	2,15	2,93	4,93	6,72	1,18	12,12
<i>Druck-E-Modul</i>	[mN/mm ³]	1,73	2,40	4,09	5,33	0,96	9,99
<i>Grundseite</i>	x_{max}/x_{min}	1,25	1,19	1,23	1,18	1,21	1,17
<i>Seitenansicht1</i>	x_{max}/x_{min}	1,53	1,54	1,59	1,49	1,50	1,50
<i>Seitenansicht2</i>	x_{max}/x_{min}	1,39	1,47	1,46	1,43	1,49	1,39
<i>Grundseite</i>	SPHT ²	1,32	1,24	1,31	1,17	1,29	1,12
<i>Seitenansicht1</i>	SPHT ²	1,38	1,41	1,49	1,34	1,32	1,25
<i>Seitenansicht2</i>	SPHT ²	1,27	1,38	1,35	1,38	1,39	1,25
<i>Grundseite</i>	x_{max}/x_{min}	1,39	1,47	1,46	1,43	1,49	1,39
<i>Mittelwert Seitenansicht</i>	x_{max}/x_{min}	1,46	1,50	1,53	1,46	1,49	1,45
<i>Grundseite</i>	SPHT ²	1,32	1,24	1,31	1,17	1,29	1,12
<i>Mittelwert Seitenansichten</i>	SPHT ²	1,32	1,39	1,42	1,36	1,35	1,25

HA 40-MV-B (10x10-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen					
		20	40	60	80	100	120
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	785,40 mm ³					
Füllgrad	[]	42,3%	56,3%	70,4%	85,1%	28,2%	98,6%
Fasermasse	[mg]	481,83	641,67	801,67	969,33	321,33	1122,83
Faservolumen	[mm³]	332,27	442,52	552,75	668,48	221,65	774,23
mittel. Faseroberfläche	[mm²]	62189,50	82822,57	103455,60	125114,78	41483,35	144906,65
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	1505,63	1837,75	2325,68	2876,83	1322,08	3724,17
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	676,17	771,88	902,78	1042,07	622,13	1238,92
Porosität (konv.)	[]	77,8%	75,8%	75,9%	76,7%	83,0%	79,0%
Porosität (real)	[]	74,2%	71,0%	69,8%	71,2%	78,3%	74,1%
Feret (min)	[mm]	12,43	12,85	13,57	13,97	11,68	15,37
Feret (max)	[mm]	15,05	16,18	17,85	19,35	14,73	20,97
Feret (mittel)	[mm]	13,93	14,88	16,08	17,25	13,37	18,78
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,30	1,38	1,44	1,59	1,37	1,60
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex	[]	21,5%	23,6%	25,7%	17,8%	22,5%	19,1%
Oberflächenfaktor	[]	1,28	1,32	1,37	1,23	1,30	1,24
- Basis-Druckprüfung -							
Detektierte L0	[mm]	10,85	11,20	11,55	11,79	10,75	12,32
Widerstandskraft (10%)	[N]	19,62	41,02	46,43	49,75	13,25	27,76
Arbeit (Belastung)	[Nmm]	9,32	16,57	18,26	19,61	6,05	12,09
Restverformung	[]	4,18%	4,95%	4,75%	4,91%	4,22%	4,54%
Rückverformungsverhältnis	[]	0,58	0,51	0,52	0,51	0,58	0,55
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm²]	151,62	265,94	269,74	229,63	125,22	105,05
Druck-E-Modul	[mN/mm³]	137,15	238,93	235,37	196,22	119,10	85,88
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,09	1,12	1,19	1,20	1,15	1,19
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,27	1,36	1,43	1,54	1,34	1,57
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,27	1,32	1,34	1,45	1,30	1,40
Grundseite	SPHT²	1,06	1,07	1,12	1,10	1,12	1,09
Seitenansicht1	SPHT²	1,16	1,19	1,25	1,22	1,26	1,23
Seitenansicht2	SPHT²	1,16	1,20	1,20	1,23	1,23	1,21
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,27	1,32	1,34	1,45	1,30	1,40
Mittelwert Seitenansicht	x_{max}/x_{min}	1,27	1,34	1,39	1,50	1,32	1,48
Grundseite	SPHT²	1,06	1,07	1,12	1,10	1,12	1,09
Mittelwert Seitenansichten	SPHT²	1,16	1,19	1,23	1,23	1,24	1,22

HA 80-MV-N (10x10-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen				
		230	458	688	918	1149
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	785,40 mm ³				
Füllgrad	[]	20,2%	40,2%	60,4%	80,6%	100,9%
Fasermasse	[mg]	230,20	458,20	687,60	918,60	1149,00
Faservolumen	[mm ³]	158,64	315,88	474,22	633,28	792,44
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	29690,40	59122,64	88756,26	118526,68	148317,74
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	6157,04	5512,86	4500,40	4340,98	4496,44
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	1729,88	1603,26	1401,78	1370,40	1400,34
Porosität (konv.)	[]	97,2%	94,2%	89,2%	85,3%	82,1%
Porosität (real)	[]	95,3%	91,4%	85,8%	80,3%	77,4%
Feret (min)	[mm]	17,08	16,92	15,20	15,42	15,14
Feret (max)	[mm]	26,70	24,56	23,02	23,00	22,98
Feret (mittel)	[mm]	22,08	21,34	19,94	19,74	19,96
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,66	1,45	1,51	1,49	1,52
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex	[]	72,4%	69,3%	60,7%	57,7%	54,0%
Oberflächenfaktor	[]	3,67	3,36	2,56	2,39	2,20
- Basis-Druckprüfung -						
Detektierte L0	[mm]	11,81	12,25	12,41	12,20	12,25
Widerstandskraft (10%)	[N]	0,31	0,61	1,19	2,43	3,26
Arbeit (Belastung)	[Nmm]	0,22	0,37	0,63	1,08	1,43
Restverformung	[]	3,8%	3,0%	2,9%	2,8%	2,6%
Rückverformungsverhältnis	[]	0,62	0,69	0,71	0,72	0,74
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	1,15	2,05	4,28	9,02	11,44
Druck-E-Modul	[mN/mm ³]	0,98	1,67	3,45	7,41	9,39
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,29	1,12	1,15	1,13	1,13
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,37	1,44	1,45	1,40	1,46
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,35	1,38	1,40	1,41	1,40
Grundseite	SPHT ²	1,47	1,21	1,15	1,15	1,11
Seitenansicht1	SPHT ²	1,46	1,37	1,29	1,25	1,25
Seitenansicht2	SPHT ²	1,42	1,37	1,24	1,31	1,21
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,35	1,38	1,40	1,41	1,40
Mittelwert Seitenansicht	x_{max}/x_{min}	1,36	1,41	1,43	1,41	1,43
Grundseite	SPHT ²	1,47	1,21	1,15	1,15	1,11
Mittelwert Seitenansichten	SPHT ²	1,44	1,37	1,26	1,28	1,23

HA 80-MV-B (10x10-G2a)	Mittelwerte der Agglomeratklassen					
	321	482	642	801	969	1123
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	785,40					
Füllgrad []	28,2%	42,3%	56,3%	70,4%	85,1%	98,6%
Fasermasse [mg]	321,33	481,83	641,67	801,67	969,33	1122,83
Faservolumen [mm ³]	221,65	332,27	442,52	552,75	668,48	774,23
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	41483,35	62189,50	82822,57	103455,60	125114,78	144906,65
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	1322,08	1505,63	1837,75	2325,68	2876,83	3724,17
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	622,13	676,17	771,88	902,78	1042,07	1238,92
Porosität (konv.) []	83,0%	77,8%	75,8%	75,9%	76,7%	79,0%
Porosität (real) []	78,3%	74,2%	71,0%	69,8%	71,2%	74,1%
Feret (min) [mm]	11,68	12,43	12,85	13,57	13,97	15,37
Feret (max) [mm]	14,73	15,05	16,18	17,85	19,35	20,97
Feret (mittel) [mm]	13,37	13,93	14,88	16,08	17,25	18,78
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,37	1,30	1,38	1,44	1,59	1,60
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,07	1,07	1,06	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex []	22,5%	21,5%	23,6%	25,7%	17,8%	19,1%
Oberflächenfaktor []	1,30	1,28	1,32	1,37	1,23	1,24
- Basis-Druckprüfung -						
Detektierte L0 [mm]	10,75	10,85	11,20	11,55	11,79	12,32
Widerstandskraft (10%) [N]	13,25	19,62	41,02	46,43	49,75	27,76
Arbeit (Belastung) [Nmm]	6,05	9,32	16,57	18,26	19,61	12,09
Restverformung []	4,22%	4,18%	4,95%	4,75%	4,91%	4,54%
Rückverformungsverhältnis []	0,58	0,58	0,51	0,52	0,51	0,55
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	125,22	151,62	265,94	269,74	229,63	105,05
Druck-E-Modul [mN/mm ²]	119,10	137,15	238,93	235,37	196,22	85,88
Grundseite X_{max}/X_{min}	1,15	1,09	1,12	1,19	1,20	1,19
Seitenansicht1 X_{max}/X_{min}	1,34	1,27	1,36	1,43	1,54	1,57
Seitenansicht2 X_{max}/X_{min}	1,30	1,27	1,32	1,34	1,45	1,40
Grundseite SPHT ²	1,12	1,06	1,07	1,12	1,10	1,09
Seitenansicht1 SPHT ²	1,26	1,16	1,19	1,25	1,22	1,23
Seitenansicht2 SPHT ²	1,23	1,16	1,20	1,20	1,23	1,21
Grundseite X_{max}/X_{min}	1,30	1,27	1,32	1,34	1,45	1,40
Mittelwert Seitenansicht X_{max}/X_{min}	1,32	1,27	1,34	1,39	1,50	1,48
Grundseite SPHT ²	1,12	1,06	1,07	1,12	1,10	1,09
Mittelwert Seitenansichten SPHT ²	1,24	1,16	1,19	1,23	1,23	1,22

HA 40-MV-N (15x15-G2a)	Mittelwerte der Massenklasten				
	1620	2161	1083	3232	100
ideale Rotationsvolumen (Zylinder)	2650,72 mm ³				
Füllgrad []	42,1%	56,2%	70,0%	28,3%	82,8%
Fasermasse [mg]	1617,33	2161,33	2689,33	1086,33	3181,00
Faservolumen [mm ³]	1115,30	1490,47	1854,60	749,03	2193,63
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	208739,80	278957,93	347110,83	140182,43	410565,33
Agg.-Volumen (konv.) [mm]	16214,13	15041,60	13139,90	19152,27	14793,30
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]	3282,43	3137,10	2866,40	3711,57	3103,67
Porosität (konv.) []	92,9%	90,1%	85,9%	96,1%	85,1%
Porosität (real) []	90,5%	87,2%	80,8%	94,0%	80,6%
Feret (min) [mm]	25,00	24,63	23,70	27,20	24,37
Feret (max) [mm]	33,83	32,47	31,40	35,57	32,60
Feret (mittel) [mm]	30,27	29,60	28,40	32,20	29,47
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,54	1,51	1,52	1,52	1,56
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex []	62,5%	58,8%	59,5%	68,1%	59,1%
Oberflächenfaktor []	2,67	2,44	2,48	3,21	2,46
- Basis-Druckprüfung -					
Detektierte L0 [mm]	18,84	19,12	18,93	18,28	18,16
Widerstandskraft (10%) [N]	0,85	1,20	2,56	0,44	4,21
Arbeit (Belastung) [Nmm]	0,75	0,98	1,87	0,44	2,88
Restverformung []	2,7%	2,8%	2,3%	3,5%	2,2%
Rückverformungsverhältnis []	0,73	0,72	0,77	0,66	0,77
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]	1,30	1,83	4,70	0,64	6,60
Druck-E-Modul [mN/mm ³]	0,69	0,96	2,50	0,35	3,63
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,19	1,15	1,17	1,19	1,15
Seitenansicht1 x_{max}/x_{min}	1,51	1,46	1,39	1,49	1,56
Seitenansicht2 x_{max}/x_{min}	1,40	1,39	1,45	1,28	1,36
Grundseite SPHT ²	1,16	1,12	1,22	1,25	1,12
Seitenansicht1 SPHT ²	1,26	1,23	1,23	1,46	1,30
Seitenansicht2 SPHT ²	1,26	1,22	1,25	1,29	1,19
Grundseite x_{max}/x_{min}	1,40	1,39	1,45	1,28	1,36
Mittelwert Seitenansicht x_{max}/x_{min}	1,46	1,42	1,42	1,38	1,46
Grundseite SPHT ²	1,16	1,12	1,22	1,25	1,12
Mittelwert Seitenansichten SPHT ²	1,26	1,22	1,24	1,38	1,25

HA 40-MV-B (15x15-G2a)		Mittelwerte der Massenklaster				
		1620	2161	1083	3232	100
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	2650,72 mm ³				
Füllgrad	[]	42%	56%	70%	28%	84%
Fasermasse	[mg]	1623,00	2155,67	2683,00	1079,67	3224,00
Faservolumen	[mm ³]	1119,20	1486,70	1850,47	744,63	2223,33
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	209479,80	278248,00	346336,37	139364,93	416124,23
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	5251,90	6580,63	6879,37	4349,97	9861,20
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	1557,60	1805,30	1861,47	1382,20	2363,80
Porosität (konv.)	[]	78,6%	76,8%	73,0%	82,8%	77,4%
Porosität (real)	[]	74,8%	72,2%	68,6%	78,6%	73,2%
Feret (min)	[mm]	18,47	19,27	19,50	17,30	21,17
Feret (max)	[mm]	22,93	24,70	25,03	21,73	28,47
Feret (mittel)	[mm]	21,03	22,53	22,93	19,83	25,80
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,34	1,43	1,44	1,38	1,52
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,07	1,06	1,07	1,06
Oberflächenstrukturindex	[]	29,4%	22,5%	17,4%	27,0%	18,1%
Oberflächenfaktor	[]	1,43	1,29	1,21	1,38	1,22
- Basis-Druckprüfung -						
Detektierte L0	[mm]	16,10	16,10	16,54	15,63	17,21
Widerstandskraft (10%)	[N]	39,95	71,05	82,17	22,63	59,36
Arbeit (Belastung)	[Nmm]	31,27	49,42	55,58	17,02	36,39
Restverformung	[]	3,8%	4,1%	3,8%	3,7%	3,7%
Rückverformungsverhältnis	[]	0,62	0,59	0,62	0,63	0,63
Drucksteifigkeit (10%)	[mN/mm ²]	131,26	200,78	217,44	92,02	117,40
Druck-E-Modul	[mN/mm ³]	82,19	124,69	131,60	58,86	68,25
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,10	1,10	1,10	1,11	1,16
Seitenansicht1	x_{max}/x_{min}	1,34	1,39	1,43	1,35	1,51
Seitenansicht2	x_{max}/x_{min}	1,30	1,38	1,35	1,30	1,41
Grundseite	SPHT ²	1,06	1,11	1,03	1,08	1,04
Seitenansicht1	SPHT ²	1,16	1,16	1,18	1,24	1,18
Seitenansicht2	SPHT ²	1,16	1,17	1,15	1,21	1,17
Grundseite	x_{max}/x_{min}	1,30	1,38	1,35	1,30	1,41
Mittelwert Seitenansicht	x_{max}/x_{min}	1,32	1,39	1,39	1,33	1,46
Grundseite	SPHT ²	1,06	1,11	1,03	1,08	1,04
Mittelwert Seitenansichten	SPHT ²	1,16	1,17	1,16	1,22	1,17

HA 120-MV-N (15x15-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklasse			
		756	1505	2253	3057
ideale Rotationsvolumen	(Zylinder)	2650,72 mm ³			
Füllgrad	[]	20%	39%	59%	80%
Fasermasse	[mg]	756,00	1505,60	2252,60	3057,00
Faservolumen	[mm ³]	521,38	1038,16	1553,48	2108,40
mittel. Faseroberfläche	[mm ²]	97579,98	194305,48	290757,32	394615,66
Agg.-Volumen (konv.)	[mm]	14714,42	14308,92	14965,22	15767,86
Agg.-Oberfläche (konv.)	[mm]	3095,46	3029,58	3134,62	3235,26
Porosität (konv.)	[]	96,4%	92,7%	89,2%	86,3%
Porosität (real)	[]	95,5%	91,1%	86,6%	82,6%
Feret (min)	[mm]	23,46	22,38	22,14	22,54
Feret (max)	[mm]	34,58	33,36	35,60	34,94
Feret (mittel)	[mm]	29,50	29,12	29,56	30,10
Kubizität: Länge/Breite	[mm]	1,50	1,49	1,61	1,55
Heywoodfaktor (konv.)	[mm]	1,07	1,06	1,07	1,07
Oberflächenstrukturindex	[]	67,6%	60,1%	57,4%	56,2%
Oberflächenfaktor	[]	3,09	2,54	2,36	2,33
Grundseite		1,20	1,13	1,15	1,20
Seitenansicht1		1,39	1,47	1,45	1,48
Seitenansicht2		1,35	1,38	1,44	1,37
Grundseite		1,19	1,07	1,11	1,12
Seitenansicht1		1,18	1,20	1,17	1,23
Seitenansicht2		1,18	1,17	1,27	1,21

HA 40-MV-B (5x5-G2a)		
Porosität-Klasse (real)	Drucksteifigkeit (10%)	Rückverformungsverhältnis
63,0%	191,83	0,797
68,1%	162,54	0,723
73,1%	131,81	0,694
77,0%	99,57	0,635
91,8%	16,83	0,576

HA 40-MV-B (10x10-G2a)		
Porosität-Klasse (real)	Drucksteifigkeit (10%)	Rückverformungsverhältnis
64,7%	369,56	0,540
67,9%	313,86	0,530
72,4%	200,66	0,530
77,2%	102,29	0,557
80,4%	63,80	0,535

HA 40-MV-B (15x15-G2a)		
Porosität-Klasse (real)	Drucksteifigkeit (10%)	Rückverformungsverhältnis
66,5%	274,30	0,616
69,2%	209,80	0,610
70,8%	178,87	0,617
73,2%	127,91	0,627
75,9%	127,63	0,610
78,4%	101,81	0,625

FI X-MV-N (2,5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen				
		20	30	40	50	60
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	49,09 mm ³				
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	15,2%	21,5%	28,3%	36,0%	41,9%
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	21,80	30,80	40,40	51,20	59,80
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	14,94	21,10	27,76	35,36	41,16
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	2793,22	3949,76	5196,64	6613,92	7705,92
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	228,96	239,08	264,42	318,16	322,92
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	193,10	198,78	212,74	241,18	244,86
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	93,4%	91,2%	89,5%	88,9%	87,2%
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	91,6%	89,0%	86,7%	85,3%	83,8%
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	5,14	5,34	5,26	5,30	5,48
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	8,72	8,32	8,76	9,86	9,72
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	7,20	7,34	7,62	8,18	8,22
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,83	1,57	1,67	1,87	1,78
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	46,8%	43,1%	43,6%	45,4%	42,8%
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	1,89	1,76	1,77	1,84	1,75
- Basis-Druckprüfung -						
<i>Detektierte L0</i>	<i>[mm]</i>	3,65	3,91	4,00	3,95	4,22
<i>Widerstandskraft (10%)</i>	<i>[N]</i>	0,53	0,73	0,89	0,92	0,78
<i>Arbeit (Belastung)</i>	<i>[Nmm]</i>	0,10	0,13	0,16	0,16	0,15
<i>Restverformung</i>	<i>[]</i>	3,3%	2,8%	2,7%	2,7%	2,8%
<i>Rückverformungsverhältnis</i>	<i>[]</i>	0,67	0,73	0,73	0,73	0,73
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i>	<i>[mN/mm²]</i>	12,66	16,38	18,66	16,77	13,76
<i>Druck-E-Modul</i>	<i>[mN/mm³]</i>	35,10	42,17	47,71	42,47	32,62
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,14	1,09	1,14	1,17	1,13
<i>Seitenansicht1</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,70	1,50	1,60	1,80	1,70
<i>Seitenansicht2</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,50	1,49	1,62	1,57	1,60
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,07	1,05	1,06	1,09	1,10
<i>Seitenansicht1</i>	<i>SPHT²</i>	1,24	1,15	1,20	1,25	1,22
<i>Seitenansicht2</i>	<i>SPHT²</i>	1,13	1,15	1,18	1,27	1,17

CA X-MV-N (2,5x5-G2a)		Mittelwerte der Agglomeratklassen				
		5	15	25	40	50
<i>ideale Rotationsvolumen</i>	<i>(Zylinder)</i>	49,09				
<i>Füllgrad</i>	<i>[]</i>	7,4%	20,7%	37,5%	56,4%	72,9%
<i>Fasermasse</i>	<i>[mg]</i>	5,40	14,80	26,80	40,20	52,00
<i>Faservolumen</i>	<i>[mm³]</i>	3,64	10,18	18,40	27,70	35,78
<i>mittel. Faseroberfläche</i>	<i>[mm²]</i>	678,96	1907,76	3443,78	5178,60	6696,52
<i>Agg.-Volumen (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	218,82	233,66	236,86	273,66	304,34
<i>Agg.-Oberfläche (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	188,28	194,82	196,62	217,90	235,06
<i>Porosität (konv.)</i>	<i>[]</i>	98,4%	95,6%	91,6%	89,7%	88,1%
<i>Porosität (real)</i>	<i>[]</i>	98,1%	94,9%	90,1%	87,3%	85,3%
<i>Feret (min)</i>	<i>[mm]</i>	5,40	5,76	4,92	5,18	5,20
<i>Feret (max)</i>	<i>[mm]</i>	8,32	8,20	8,38	9,14	9,46
<i>Feret (mittel)</i>	<i>[mm]</i>	7,10	7,22	7,24	7,70	8,02
<i>Kubizität: Länge/Breite</i>	<i>[mm]</i>	1,52	1,42	1,70	1,77	1,82
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i>	<i>[mm]</i>	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08
<i>Oberflächenstrukturindex</i>	<i>[]</i>	46,1%	40,4%	32,4%	38,4%	40,2%
<i>Oberflächenfaktor</i>	<i>[]</i>	1,90	1,70	1,48	1,63	1,68
<i>Grundseite</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,16	1,11	1,10	1,16	1,17
<i>Seitenansicht1</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,48	1,37	1,61	1,66	1,81
<i>Seitenansicht2</i>	<i>x_{max}/x_{min}</i>	1,32	1,37	1,62	1,70	1,57
<i>Grundseite</i>	<i>SPHT²</i>	1,04	1,00	1,02	1,05	1,06
<i>Seitenansicht1</i>	<i>SPHT²</i>	1,08	1,07	1,09	1,16	1,23
<i>Seitenansicht2</i>	<i>SPHT²</i>	1,04	1,08	1,12	1,17	1,15

A.7.2 Aufbauagglomerationsversuche

Drehzahl	Masse [mg]	Länge [mm]	Breite [mm]	Länge/Breit	Fläche [mm ²]	Konv.Flä. [mm ²]	Umfang [mm]	Konv.Umf. [mm]	Pf-Rundheit	Oberflächen- struktur	
900 1/min											
3,15 mm	21,60	6,41	4,53	1,47	23,37	25,06	19,11	17,91	1,17	6,29%	
4 mm	31,56	6,88	5,37	1,28	27,93	29,42	20,65	19,27	1,14	6,66%	
5 mm	45,02	7,29	6,24	1,19	35,26	36,66	23,03	21,49	1,13	6,69%	
3,15 mm	14,50	6,72	4,24	1,57	18,70	24,88	23,74	17,55	2,32	26,06%	
4 mm	23,62	8,21	5,78	1,42	26,22	37,57	31,76	21,81	2,89	31,34%	
5 mm	39,18	9,63	7,12	1,40	40,00	56,41	48,85	26,77	4,63	45,21%	
1500 1/min											
Drehzahl	Feret0 [mm]	Feret22,5 [mm]	Feret45 [mm]	Feret67,5 [mm]	Feret90 [mm]	Feret112,5 [mm]	Feret135 [mm]	Feret157,5 [mm]	OrthoFeret [mm]	mittl. Feret [mm]	ÄquivKreis [mm]
900 1/min											
3,15 mm	6,15	5,72	5,21	4,89	5,12	5,81	6,15	6,37	4,65	5,47	5,45
4 mm	6,27	6,15	5,95	5,80	5,93	6,22	6,40	6,39	5,45	6,12	5,96
5 mm	6,95	7,08	7,05	6,88	6,67	6,59	6,68	6,85	6,50	6,77	6,70
3,15 mm	5,72	5,67	5,77	5,58	5,47	5,50	5,47	5,53	4,40	5,48	4,81
4 mm	7,19	7,30	7,45	7,23	6,79	6,49	6,34	6,74	6,13	6,99	5,77
5 mm	9,46	9,31	8,31	7,71	7,42	8,09	8,66	9,18	7,68	8,37	7,12
1500 1/min											

Faserlängenvarianz	Mittelwerte der Siebklassen											
	2 mm Siebnachweite			4 mm Siebnachweite			6 mm Siebnachweite			5 mm Siebnachweite		
	2 mm	3,15 mm	5 mm	2 mm	3,15 mm	5 mm	2 mm	3,15 mm	5 mm	2 mm	3,15 mm	5 mm
Fasermasse [mg]	16,60	27,40	39,20	15,60	30,40	40,20	16,20	29,20	42,20	16,20	29,20	42,20
Faservolumen [mm ³]	11,52	18,76	26,98	10,72	21,06	27,66	11,22	20,08	28,98	11,22	20,08	28,98
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	2153,02	3510,92	5054,66	2005,86	3942,02	5178,60	2101,36	3758,70	5429,00	2101,36	3758,70	5429,00
Fläche (mm ²)	20,70	25,80	31,67	19,86	26,98	32,46	20,71	26,70	32,69	20,71	26,70	32,69
konv. Fläche (mm ²)	21,85	27,04	33,29	20,73	28,28	33,99	23,03	28,10	34,68	23,03	28,10	34,68
Umfang (mm)	16,19	18,74	22,07	15,70	19,73	22,45	17,38	19,47	22,25	17,38	19,47	22,25
KonvUmf. (mm)	14,93	17,18	19,58	14,37	17,69	19,80	15,49	17,64	20,07	15,49	17,64	20,07
Feret (min) [mm]	3,82	4,56	5,44	3,90	4,80	5,46	3,70	4,78	5,46	3,70	4,78	5,46
Feret (max) [mm]	5,38	6,12	6,92	5,06	6,26	6,90	5,98	6,30	7,10	5,98	6,30	7,10
Feret (mittel) [mm]	4,7	5,5	6,2	4,5	5,6	6,3	4,9	5,6	6,3	4,9	5,6	6,3
Mittlere Pf-äqu-kreis-d [mm]	4,36	5,13	5,91	4,23	5,30	6,01	4,35	5,27	6,03	4,35	5,27	6,03
Agg.-Volumen (konv) [mm]	75,78	104,74	143,52	70,64	112,12	148,20	81,30	111,36	152,72	81,30	111,36	152,72
Agg.-Oberfläche (konv) [mm]	87,94	108,68	133,62	83,12	113,64	136,32	93,10	112,76	139,14	93,10	112,76	139,14
Porosität-gesamt (konv.) []	84,8%	82,1%	81,2%	84,9%	81,4%	81,4%	86,1%	82,0%	81,0%	86,1%	82,0%	81,0%
Porosität-innen (real) []	83,6%	80,8%	79,7%	83,9%	80,1%	80,1%	83,9%	80,6%	79,3%	83,9%	80,6%	79,3%
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,69	1,55	1,42	1,48	1,48	1,41	2,05	1,49	1,47	2,05	1,49	1,47
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,03	1,01	1,01	1,03	1,01	1,01
Oberflächenstruktur []	7,8%	8,3%	11,1%	8,4%	10,4%	11,7%	10,2%	9,4%	9,7%	10,2%	9,4%	9,7%
Oberflächenfaktor []	1,08	1,09	1,13	1,09	1,12	1,14	1,12	1,10	1,11	1,12	1,10	1,11
Teller-Druckprüfung												
Detektierete LO (mm)	3,05	3,80	4,66	3,16	4,09	4,68	2,83	4,05	4,66	2,83	4,05	4,66
Widerstandskraft (10%) (N)	2,28	3,56	4,22	2,60	4,31	4,12	2,58	3,31	4,25	2,58	3,31	4,25
Arbeit (-belastung) (Nmm)	0,39	0,76	1,08	0,47	0,95	1,05	0,39	0,73	1,01	0,39	0,73	1,01
Restverformung ()	3,4%	3,1%	3,4%	2,9%	3,0%	3,2%	3,2%	3,6%	3,4%	3,2%	3,6%	3,4%
Rückverformungsverhältnis	0,66	0,69	0,66	0,72	0,70	0,68	0,68	0,64	0,66	0,68	0,64	0,66
Drucksteifigkeit (10%) (mN/mm ²)	94,99	123,71	119,69	117,84	141,06	114,39	105,35	109,23	116,77	105,35	109,23	116,77
Druck-E-Modul (mN/mm ³)	312,24	325,82	258,24	364,71	341,84	244,61	375,46	269,07	251,55	375,46	269,07	251,55

LI 6-300-600 (1St-900)	Mittelwerte der Siebklassen					
	1 mm	2 mm	3,15 mm	4 mm	5 mm	6,3 mm
<i>Fasermasse</i> [mg]	3,34	10,50	18,20	30,10	45,40	67,40
<i>Faservolumen</i> [mm ³]	2,33	7,34	12,59	20,67	31,27	46,40
<i>mittel. Faseroberfläche</i> [mm ²]	435,00	1373,38	2356,94	3869,73	5854,97	8681,75
<i>Fläche</i> [mm ²]	5,28	11,83	17,34	24,04	32,39	42,78
<i>konv.Fläche</i> [mm ²]	9,08	13,72	20,79	26,08	34,66	47,57
<i>Umfang</i> [mm]	13,07	15,29	18,28	19,82	22,52	28,07
<i>KonvUmf.</i> [mm]	11,04	13,21	15,98	17,76	20,31	23,71
<i>Feret (min)</i> [mm]	1,60	2,87	3,43	4,45	5,20	6,20
<i>Feret (max)</i> [mm]	5,77	5,64	6,82	6,88	7,62	8,70
<i>Feret (mittel)</i> [mm]	3,48	4,21	5,09	5,68	6,48	7,56
<i>Mittlere Pf-äqu-kreis-d</i> [mm]	2,49	3,70	4,47	5,29	6,15	7,10
<i>Agg.-Volumen (konv)</i> [mm]	15,30	36,40	68,09	98,63	152,27	246,51
<i>Agg.-Oberfläche (konv)</i> [mm]	39,34	56,01	84,86	105,07	139,39	190,76
<i>Porosität-gesamt (konv.)</i> []	84,1%	80,0%	80,9%	78,9%	79,5%	80,9%
<i>Porosität-innen (real)</i> []	67,0%	75,0%	75,6%	76,2%	77,3%	77,7%
<i>Kubizität: Länge/Breite</i> [mm]	3,64	2,00	1,99	1,55	1,49	1,41
<i>Heywoodfaktor (konv.)</i> [mm]	1,34	1,06	1,06	1,02	1,02	1,01
<i>Oberflächenstruktur</i> []	15,2%	12,6%	11,7%	10,3%	9,7%	14,8%
<i>Oberflächenfaktor</i> []	1,18	1,15	1,14	1,11	1,11	1,18
- Basis-Druckprüfung -						
<i>Detektierte L0</i> [mm]	1,05	2,39	2,88	3,99	4,71	5,85
<i>Widerstandskraft (10%)</i> [N]	1,40	2,13	2,61	3,80	4,54	5,27
<i>Arbeit (Belastung)</i> [Nm]	0,09	0,28	0,40	0,81	1,14	1,65
<i>Restverformung</i> []	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
<i>Rückverformungsverhältnis</i> []	0,79	0,70	0,68	0,68	0,68	0,66
<i>Drucksteifigkeit (10%)</i> [mN/mm ²]	172,78	136,68	116,77	134,45	121,43	115,37
<i>Druck-E-Modul</i> [mN/mm ²]	1668,54	583,25	409,01	338,17	259,49	199,57

HA 6-300-600 (1St-900)-PN Trocknungsvarianz	Mittelwerte der Agglomeratklassen				
	Grünkörper	Norm	Umg.	50°C	95°C
Fasermasse [mg]	51,20	44,60	45,80	42,80	41,60
Faservolumen [mm ³]	35,22	30,66	31,60	29,54	28,74
mittel. Faseroberfläche [mm ²]	6595,86	5741,36	5909,20	5529,68	5374,02
Fläche (mm ²)	34,20	31,83	32,33	31,83	31,96
konv.Fläche (mm ²)	35,54	32,84	34,38	33,02	32,94
Umfang (mm)	22,10	20,54	21,49	21,09	20,58
KonvUmf. (mm)	20,32	19,36	19,91	19,45	19,43
Feret (min) [mm]	5,64	5,44	5,46	5,52	5,44
Feret (max) [mm]	7,12	6,78	7,00	6,74	6,76
Feret (mittel) [mm]	6,42	6,18	6,30	6,18	6,20
Mittlere Pf-äqu-kreis-d [mm]	6,21	5,92	6,06	5,93	5,95
Agg.-Volumen (konv) [mm]	158,44	141,18	150,70	142,50	141,28
Agg.-Oberfläche (konv) [mm]	142,72	131,76	138,06	132,34	132,18
Porosität-gesamt (konv.) []	77,8%	78,5%	79,1%	79,3%	79,7%
Porosität-innen (real) []	76,5%	77,4%	77,2%	78,1%	78,8%
Kubizität: Länge/Breite [mm]	1,41	1,42	1,46	1,34	1,38
Heywoodfaktor (konv.) [mm]	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01
Oberflächenstruktur []	8,0%	5,8%	7,2%	7,5%	5,6%
Oberflächenfaktor []	1,09	1,06	1,08	1,09	1,06
- Basis-Druckprüfung -					
Detektierte L0 (mm)	5,42	4,81	4,80	5,00	4,90
Widerstandskraft (10%) (N)	0,33	4,30	4,20	4,07	3,37
Arbeit (Belastung) (Nmm)	0,11	1,18	1,06	1,11	0,87
Restverformung ()	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04
Rückverformungsverhältnis	0,52	0,66	0,64	0,64	0,59
Drucksteifigkeit (10%) (mN/mm ²)	8,54	120,88	119,26	117,46	93,72
Druck-E-Modul (mN/mm ³)	15,92	258,45	249,20	234,01	190,20

LI 6-300-600 (2St ¹ /3-900)	Mittelwerte der Siebklassen							
	<1mm	1mm	2mm	3,15mm	4mm	5mm	6,3mm	7mm
	0,00	1,00	2,00	3,15	4,00	5,00	6,30	7,00
Masse	3,4 g	32,7 g	95,8 g	67,5 g	56,9 g	33,1 g	4,4 g	0,0 g
theor. Partikelanzahl		6412	8709	3392	1621	565	59	0
Massenanteil	1,2%	11,1%	32,6%	23,0%	19,4%	11,3%	1,5%	0,0%
Massenverteilungssumme	0,0%	1,2%	12,3%	44,9%	67,9%	87,2%	98,5%	100,0%
Fasermasse [mg]		5,10	11,00	19,90	35,10	58,60	75,10	
Faservolumen [mm ³]		3,48	7,47	13,79	24,28	40,46	51,77	
mittel. Faseroberfläche [mm ²]		649,25	1397,91	2582,83	4543,53	7569,12	9689,86	
Agg.-Volumen (konv.) [mm]		23,38	33,56	62,38	105,28	184,75	240,54	
Agg.-Oberfläche (konv.) [mm]		46,86	54,21	79,68	109,52	158,81	188,45	
Porosität-gesamt (konv.) []		81,3%	77,8%	77,7%	76,9%	78,1%	78,5%	
Porosität-innen (real) []		67,7%	70,9%	73,2%	73,8%	76,0%	76,6%	
Feret (min) [mm]		2,01	2,66	3,45	4,45	5,56	6,33	
Feret (max) [mm]		5,97	5,56	6,48	6,95	8,04	8,52	
Feret (mittel) [mm]		3,77	4,12	4,95	5,76	6,89	7,52	
Kubizität: Länge/Breite [mm]		2,99	2,10	1,89	1,58	1,47	1,35	
Heywoodfaktor (konv.) [mm]		1,19	1,08	1,05	1,02	1,01	1,01	
Oberflächenstruktur []		12,0%	11,1%	10,7%	8,2%	7,0%	7,8%	
Oberflächenfaktor []		1,14	1,13	1,12	1,09	1,08	1,09	
- Basis-Druckprüfung -								
Detektierte L0 [mm]		1,46	2,17	3,01	3,99	5,00	5,80	
Widerstandskraft (10%) [N]		1,88	2,37	3,30	4,37	6,42	6,56	
Arbeit (Belastung) [Nmm]		0,15	0,27	0,52	0,94	1,75	2,05	
Restverformung []		2,6%	3,3%	3,0%	3,2%	2,7%	2,9%	
Rückverformungsverhältnis []		0,74	0,67	0,70	0,68	0,73	0,71	
Drucksteifigkeit (10%) [mN/mm ²]		210,96	161,82	144,81	143,95	151,10	131,49	
Druck-E-Modul [mN/mm ²]		1443,38	763,45	483,60	361,35	302,92	227,44	

Agglomerationszeit	Siebrückstände [Massenprozent]										
	<1mm	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8
HA 3-300-600 (1St-900)-5'	5,6%	4,0%	9,8%	9,0%	17,2%	15,2%	14,8%	11,7%	4,0%	0,7%	0,0%
HA 3-300-600 (1St-900)-15'	3,3%	4,4%	11,6%	12,7%	17,7%	15,2%	14,3%	9,6%	3,9%	0,4%	0,0%
HA 3-300-600 (1St-900)-25'	1,6%	2,2%	7,0%	8,7%	21,8%	16,8%	16,6%	12,5%	5,4%	0,8%	0,0%
HA 3-300-500 (1St-900)-25'	11,9%	10,5%	19,9%	14,1%	13,2%	9,2%	8,3%	5,0%	1,7%	0,3%	0,0%

Agglomerationszeit	Auf Aufgabemasse bezogen			Auf Agglomeratmasse bezogen		
	Aufgabe	Ausschuss	Agg.-masse	Unterkorn	Produktfraktion	Überkorn
HA 3-300-600 (1St-900)-5'	100,0%	8,1%	91,9%	66,1%	33,1%	0,8%
HA 3-300-600 (1St-900)-15'	100,0%	6,9%	93,1%	69,7%	29,9%	0,4%
HA 3-300-600 (1St-900)-25'	100,0%	6,6%	93,4%	62,2%	36,9%	0,9%
HA 3-300-500 (1St-900)-25'	100,0%	5,9%	94,1%	83,7%	15,9%	0,3%