

IB 131-2015/55

**Laborverfahren zur Mischung von Fasern
als Vorbereitung zur Vliesstoffherstellung**

S. Kreuziger, J.Bachmann



**Institut für Faserverbundeichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

07 / 2015

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2015/55

**Laborverfahren zur Mischung von Fasern als Vorbereitung
zur Vliesstoffherstellung**

Braunschweig, Juli 2015

Der Bericht umfasst:

84 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Verfasser:
S. Kreuziger

Leiter der Abteilung:
Dr.-Ing. P. Wierach

Betreuer:
J. Bachmann

Inhalt

Inhalt	7
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverveichnis	11
1. Einleitung	12
2. Grundlagen	13
2.1 Faserverbundkunststoff.....	13
2.2 Faser	15
2.2.1 Kohlenstofffaser	18
2.2.2 Flachsfaser	18
2.3 Faserhalbzeuge	20
2.3.1 Gelege.....	20
2.3.2 Gewebe.....	21
2.3.3 Vliesstoffe	22
2.4 Vliesherstellung	22
2.4.1 Faservorbereitung	23
2.4.2 Fasermischung.....	24
2.4.3 Vliesbildung Trocken	25
2.4.4 Vliesbildung Nass.....	26
2.4.5 Vliesverfestigung	27
2.4.6 Vliesstoffveredelung.....	28
3. Stand der Technik.....	29
3.1 Hybrid- und rCF-Vliesherstellung.....	29
3.1.1 Patentschriften zur Herstellung von Hybridvliesen.....	29
3.1.2 Technikumsanlagen	30
3.2 Wissenschaftliche Arbeiten zu Hybridvliesen.....	33
3.3 Mischen	34
3.3.1 Mischen allgemeinen.....	34
3.3.2 Mischen und Vereinzeln von Fasern	37
3.3.3 Vorangegangene Arbeiten.....	38
3.4 Recycling von Kohlenstofffasern	40
4. Methoden	42
4.1 Verwendetes Fasermaterial	42

4.1.2 recycelte Kohlenstofffaser.....	42
4.1.3 Gesundheitliche Verträglichkeit	43
4.1.1 Flachsfaser	45
4.2 Verfahrensentwicklung.....	45
4.2.1 Anforderungen an das Verfahren.....	46
4.2.2 Brainstorming	46
4.2.3 Vorversuche	49
5. Umsetzung.....	51
5.1 Trockene Prozessführung	51
5.1.1 Karde.....	51
5.1.2 Druckluftmischer	57
5.2 Nasse Prozessführung	64
5.2.1 Luftdruck-Blasen Prinzip	64
5.2.2 Pulper.....	69
6. Ergebnisse.....	75
6.1 Vergleich der Anlagen.....	75
6.2 Verfahren zur Mischvliesherstellung.....	80
6.3 Bewertung	82
7. Zusammenfassung und Ausblick	85
Literaturverzeichnis	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>links:</i> Prinzip der Faserform, <i>rechts:</i> Prinzip der Verbundwirkung.....	13
Abbildung 2: Vergleich der mechanischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe	14
Abbildung 3: Gruppierung der Naturfasern	15
Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Flachsstängels	19
Abbildung 5: Mikroskopaufnahmen eines Fasergemisches aus Flachs und Kohlenstofffasern.....	20
Abbildung 6: UD Schicht	20
Abbildung 7: Gewebe, 1: Kettfaden 2: Schussfaden	21
Abbildung 8: Prozessschritte der Vliesstoffherstellung	23
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Kardierprozesses	25
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Aerodynamischen Verfahrens.	26
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Nassen Verfahrens zur Vliesbildung	26
Abbildung 12: Schematische Darstellung verschiedener Verfestigungsverfahren	28
Abbildung 13: Technikumsanlage zur Herstellung von Kohlenstofffaservliesen	31
Abbildung 14: Technikumsanlage zur Herstellung von Mischvliesen	32
Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Gasstrahlmischers (Datenblatt siehe Anhang).....	35
Abbildung 16: Luftmischer Dynamic Air Blendcon, Darstellung verschiedener Prozessstufen.....	36
Abbildung 17: Luftdruck-Blasen Prinzip.....	37
Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Pulpers	38
Abbildung 19: Faservermischung im wässrigen Medium	39
Abbildung 20: Faservermischung durch ein Aerodynamisches Verfahren.....	39
Abbildung 21: Kohlenstofffasermaterial. links: rC15, mitte: rC60, rechts: HT15	43
Abbildung 22: REM Aufnahmen der rC15 Fasern	43
Abbildung 23: verwendetes Flachsfasermaterial	45
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Aufbaus der Kardenrollen.....	53
Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Kardiermaschine, Realisierung der Übersetzung	54
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Realisierung der Wellenlagerung	55
Abbildung 27: Kardiermaschine.....	56
Abbildung 28: Vliesbildung durch Kardieren.....	57
Abbildung 29: Versuch eines Mischvorgangs durch Kardieren.....	57
Abbildung 30: Prinzip des Druckluftmischers	58
Abbildung 31: Unterteilung des Druckluftmischers in drei Segmente	58
Abbildung 32: Darstellung der Strömungseffekte bei verschiedenen Öffnungswinkeln	60
Abbildung 33: Strömungsausbildung	61
Abbildung 34: Realisierung der Filterung	62
Abbildung 35: Laboranlage Druckluftmischer mit geöffnetem Deckel.....	62
Abbildung 36: Unterschiedliche Faservolumina vor und nach dem Vereinzelungsprozess	63
Abbildung 37: Erzeugte Fasermischung aus 25% rCF60 und 75% Flachsfasern.....	64

Abbildung 38: Luftdruck-Blasen Mischer	65
Abbildung 39: links: Darstellung der Druckluftzufuhr, rechts: Darstellung des Wasserablasses ...	66
Abbildung 40: Schlauchanordnungen am Behälterboden.....	67
Abbildung 41: Luftdruck-Blasen Mischer	67
Abbildung 42: Auswirkung auf den Effekt des Faseranhäufens durch Position des Siebs.....	68
Abbildung 43: Strömungsverlauf im Pulper.....	69
Abbildung 44: Pulperrotor	70
Abbildung 45: Schematische Darstellung des Suspensionskanals.....	71
Abbildung 46: Schematische Darstellung der gesamten Anlage mit Pumpe	72
Abbildung 47: Verschraubbaren Verbindung zwischen Pulper und Suspensionskanal.....	73
Abbildung 48: Laboranlage Pulper	74
Abbildung 49: Ergebnisse der Fasermischung mit dem Druckluftmischer.....	77
Abbildung 50: Lichttisch	82
Abbildung 51: Lichttisch Bilder eines durch Wasserstrahl-Verfestigung erzeugten Vlieses	83
Abbildung 52: Lichttisch Bilder verschiedener Vliese	83
Abbildung 53: Lichttisch Bilder des erzeugten Mischvlieses.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von Kohlenstofffasern	18
Tabelle 2: Eigenschaften von Flachsfasern	19
Tabelle 3: Morphologischer Kasten zur Übersicht über alle denkbaren Möglichkeiten	47
Tabelle 4: Verwendete Faserlängen der einzelnen Verfahren.....	48
Tabelle 5: Vergleich der unterschiedlichen Vorteile der nassen und trockenen Prozessführung	79
Tabelle 6: Bewertungstabelle zu den einzelnen Laboranlagen.....	79

1. Einleitung

Am Anfang der 70er Jahre begann die japanische Firma Toray als erste mit der kommerziellen Produktion von Kohlenstofffasern. Mit der Verwendung dieser Fasern als Verstärkungsfasern in Faserverbundkunststoffen konnten Strukturbauteile mit nie dagewesenen mechanischen Eigenschaften hergestellt werden. Besonders im Bereich des Leichtbaus ergaben sich neue Möglichkeiten, die zur Herstellung vieler verschiedener Strukturbauteile führten, wie sie heute beispielsweise in Transportmitteln jeder Art zum Einsatz kommen. Viele Konstruktionen wären ohne die Nutzung von Kohlenstofffasern nicht möglich gewesen und werden auch in Zukunft durch die Verwendung herkömmlicher Strukturmaterialien nicht mehr möglich sein. Trotz des aufwendigen Herstellungsverfahrens und dem damit verbundenem hohen Preis, sieht sich die Industrie aktuell einem immer weiter steigendem Bedarf an Kohlenstofffasern gegenüber. Dies führt auch zu einer Steigerung der Produktion an Kohlenstofffaserabfällen. Bis vor wenigen Jahren war es noch nicht möglich diese Fasern zu recyceln und wieder zu verwenden. Die aktuellen Verfahren zur Rückführung von, in einer Polymermatrix gebundener, Kohlenstofffasern, sind größtenteils noch Gegenstand der Forschung. Das zurück gewonnene Fasermaterial wird momentan hauptsächlich als Additiv in der Kunststoffherstellung verwendet, um die elektrische Leitfähigkeit von Bauteilen zu verbessern. Es stellt sich gegenwärtig die Frage, ob auch die strukturellen Eigenschaften der recycelten Fasern wieder in Halbzeugen nutzbar gemacht werden können. Am Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Braunschweig wird dieser Frage nachgegangen. Dazu sollen Hybridvliese bestehend aus Flachsfasern und den recycelten Kohlenstofffasern erzeugt werden, aus denen sich Prüfplatten herstellen lassen, die es ermöglichen, den positiven Einfluss der beigemischten Kohlenstofffasern auf die mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs nachzuweisen. Flachs ist ein nachwachsender Rohstoff und stellt als Fasermaterial eine Alternative zu den aufwendiger zu fertigenden und teureren Glasfasern dar. Die Verwendung von technischen Flachsfasern unterstreicht hierbei den ökologischen Grundgedanken, der auch Motivation dafür ist, bessere Anwendungsmöglichkeiten für recycelte Kohlenstofffasern zu finden. In zwei vorangegangenen Arbeiten am DLR wurde die Problematik zur Erzeugung der genannten Hybridvliese bereits behandelt, mit dem Ergebnis, dass weitere Untersuchungen, besonders bezüglich des Mischprozesses der beiden Fasersorten, nötig sind. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Entwicklung eines Verfahrens zur Vereinzelung und Vermischung der vorliegenden Fasern und mit Möglichkeiten ein Vlies aus dem erzeugten Fasergemisch herzustellen. Nach einer umfangreichen Recherche zu dem Thema der Hybridvliesherstellung werden verschiedene ausgewählte Verfahren zur praktischen Untersuchung in Laboranlagen umgesetzt. Die Ergebnisse der Testläufe dieser Anlagen geben Aufschluss über die Machbarkeit der Herstellung dieser Vliese im Labormaßstab und darüber, ob ein weiteres Bestreben Hybridvliese aus Flachs- und recycelten Kohlenstofffasern zu erzeugen sinnvoll ist.

2. Grundlagen

2.1 Faserverbundkunststoff

Faserverbundkunststoff sind Strukturmaterialien, die aus Fasern und einem Kunststoff als Stützstoff bestehen. Bei dieser Technologie wird der von Griffith im Jahre 1920 entdeckte Effekt genutzt, nachdem ein Werkstoff in Faserform eine sehr viel höhere Festigkeit in Faserrichtung aufweist, als läge das gleiche Material in anderer Form vor. Dabei gilt, je dünner die Fasern sind, desto mehr Last kann das Bauteil ertragen, da pro Faser, bei geringer werdendem Querschnitt, weniger Fehlstellen auftreten. Dies wird in Abbildung 1 durch die linke schematische Darstellung verdeutlicht.

Moderne Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich im Allgemeinen durch zwei Hauptkomponenten aus, dem Harzsystem, welches als Matrix bezeichnet wird, und den verstärkenden Fasern. Im Verbund beeinflussen sich diese beiden Komponenten auf eine Weise, welche die Festigkeit des Werkstoffes größer als die Festigkeit der schwächeren Komponente werden lässt. (Hornbogen, Eggeler und Werner 2011) Die rechte Seite der Abbildung 1 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm, aus dem hervorgeht, dass Fasern und Matrix als Verbund höhere Spannungen ertragen, als die Matrix alleine. Es werden ein Anstieg des E-Moduls und eine Abnahme der Bruchdehnung bewirkt. Die in diesem Diagramm dargestellten Werte beziehen sich auf Fasern die als unidirektionales Gelege vorliegen.

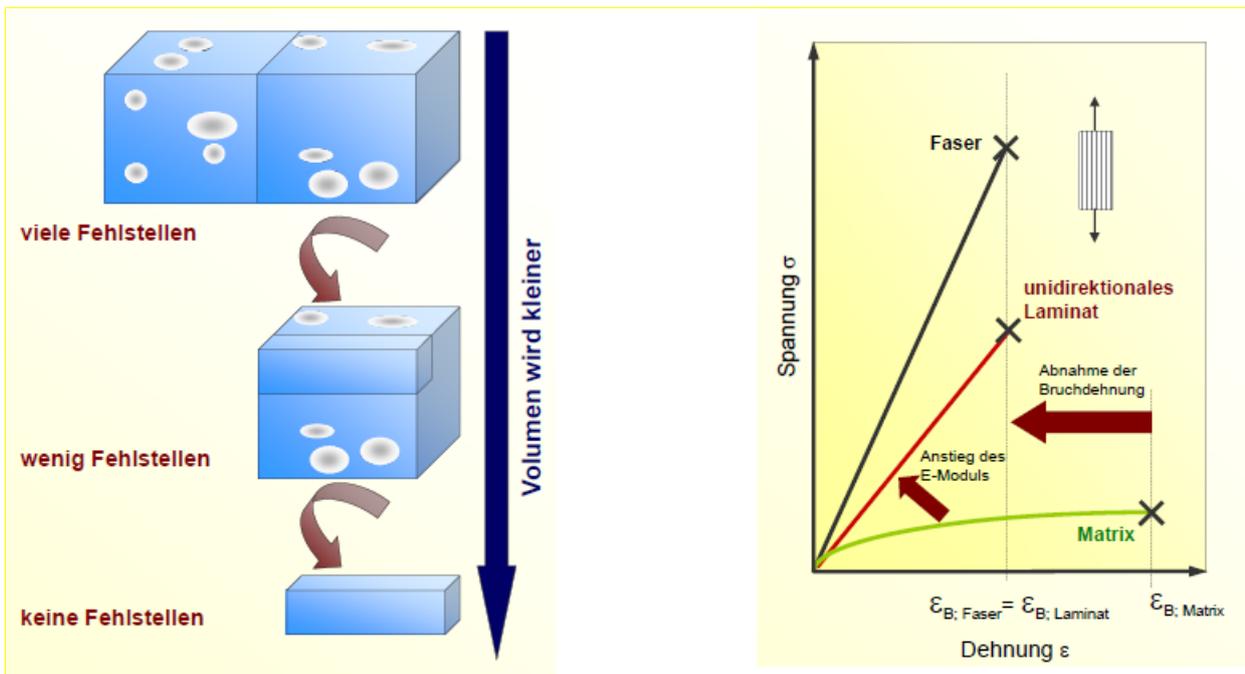


Abbildung 1: links: Prinzip der Faserform, rechts: Prinzip der Verbundwirkung (Kroll, Ulke und Seidlitz 2010)

Das Fasermaterial liegt in der Regel als Gewebe, Gelege oder als Vliesstoff vor (siehe Kapitel 2.3) und wird in dieser Textilen Form der gewünschten Kontur angepasst bevor es mit dem Harzsystem getränkt wird. Nach dem Aushärten des Harzsystems sind die Fasern von diesem vollkommen

umschlossen und eingebettet. Somit lassen sich viele, auch hoch komplexe, Bauteilgeometrien verwirklichen. Der entstandene inhomogene Werkstoff weist drei Phasen auf, die Matrix des Harzes, die Fasern und eine Grenzschicht zwischen Faser und Harz. Die **Fasern** bilden hierbei als dominierende Komponente das Tragwerk des Verbundes und verhindern Rissbildungen. Die **Matrix** ermöglicht eine Kraftübertragung von Faser zu Faser und schützt die Fasern vor Außeneinflüssen. Die **Grenzschicht** schützt die Oberfläche der Faser und sorgt für eine gute Haftung zwischen Faser und Matrix. Je besser Fasern und Matrix aneinander Haften, desto höher ist die Festigkeit des Bauteils. Entscheidend ist, dass die Fasern möglichst lückenlos von der Matrix umschlossen werden. Diese drei Phasen ermöglichen dem Werkstoff, aufgrund ihres Zusammenspiels, seine guten mechanischen Eigenschaften. Je größer hierbei der Anteil der Fasern ist, desto fester aber auch spröder wird der Werkstoff. (Schürmann 2005)

Je nach Anforderungen an den Werkstoff können die zwei Komponenten, Harzsystem und Fasern, aus einer Vielzahl verschiedener Möglichkeiten heraus variiert werden. So existieren nicht nur verschiedene Faserarten mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften, sondern auch sehr viele verschiedene Harzsysteme. Auf die Faserarten wird in Kapitel 2.2 genauer eingegangen. Die Harzsysteme bestehen meist ebenfalls aus zwei Komponenten, dem Harz an sich und einem Härter. Werden diese beiden Komponenten im richtigen Verhältnis miteinander vermischt, kommt es zu einer exothermen Reaktion, der so genannten Vernetzungsreaktion, während der das Material von der flüssigen in die Feste Phase übergeht. Bei Verwendung solcher Harz/Härter Gemische kommt es zum einen auf ihre Viskosität und zum anderen auf ihre Reaktivität an. Nach den Ausprägungen dieser beiden Eigenschaften richtet sich der Herstellungsprozess eines Bauteils aus Faserverbundkunststoff. (AVK - 2010)

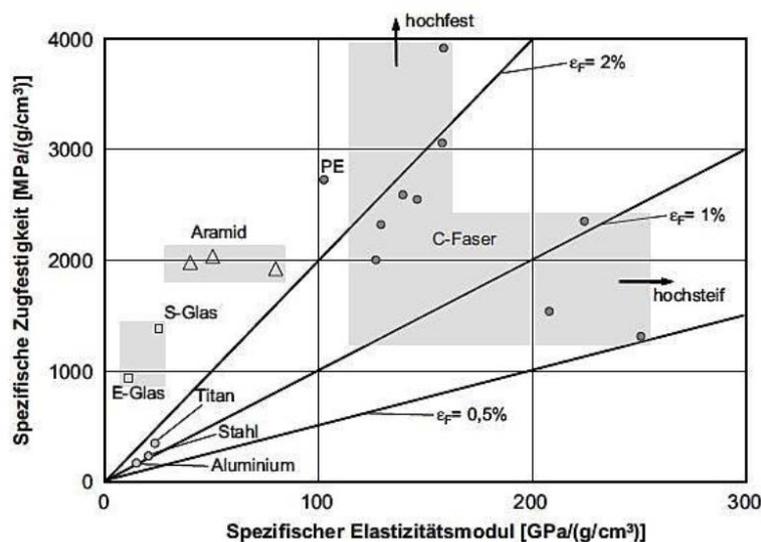


Abbildung 2: Vergleich der mechanischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe (Bonnet 2009)

Die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten von Faserarten mit Harzsystemen ermöglichen es, Bauteile nach den Anforderungen, die an sie gestellt werden, maßgeschneidert herzustellen. Weiterhin ermöglicht es die Faserverbundtechnologie bei erheblich geringerer Dichte und gleichen Bauteilabmessungen ähnliche Festigkeitswerte wie bei herkömmlichen Strukturmaterialien, wie zum Beispiel Stahl, zu erreichen. (Ziegmann 2001) Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt, dass besonders Bauteile mit Kohlenstofffasern (hier C-Fasern genannt) bessere Mechanische Eigenschaften aufweisen als herkömmliche Strukturmaterialien. Die erreichbaren mechanischen Eigenschaften der Bauteile hängen stark von der Art und Beschaffenheit der verwendeten Fasern ab

auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

2.2 Faser

Die Fasern verleihen den Faserverbundkunststoffen ihre Festigkeit. Sie sind die Komponente des Verbundes, welche die mechanischen Eigenschaften des Bauteils am stärksten beeinflusst. Im Allgemeinen gilt, dass die besten mechanischen Eigenschaften erzielt werden, wenn die Faser endlos und gerichtet im Bauteil vorliegen. Sind die Fasern ungerichtet und endlich, wird die Güte der Eigenschaften vermindert. Fasern verhalten sich annähernd elastisch bis es zum Bruch kommt. Die wichtigsten Faserarten die heutzutage in Faserverbundkunststoffen verarbeitet werden, lassen sich grob in zwei Gruppen zusammenfassen. Die erste Gruppe ist die des klassischen Fasermaterials, zu denen anorganische Fasern wie Glasfasern und organische Fasern wie Kohlenstoff- und Aramidfasern zählen. Diese Fasern kommen in einem Großteil der Faserverbundkunststoffe zum Einsatz. Die zweite Gruppe ist die der Naturfasermaterialien, deren Untergruppen in Abbildung 3 dargestellt sind.

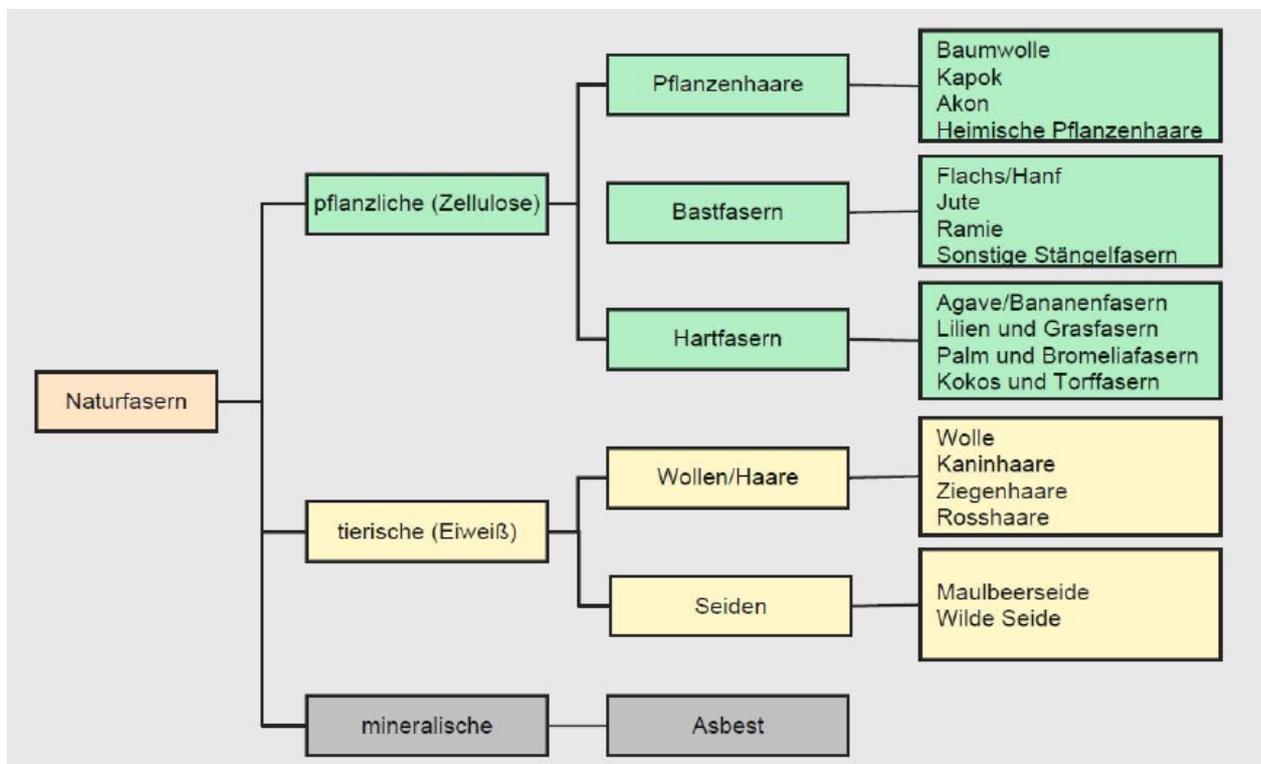


Abbildung 3: Gruppierung der Naturfasern (AVK - 2010)

Die Naturfasern haben gegenüber den klassischen Fasermaterialien einige **Vorteile**. In Verbindung mit dem richtigen Harzsystem sind diese wesentlich umweltfreundlicher, da sie problemlos entsorgt und abgebaut werden können. Der Herstellungsprozess erfordert weniger Energie und senkt damit die Kosten. Ein entscheidender Vorteil ist auch, dass es sich bei Naturfasern um einen nachwachsenden Rohstoff handelt der in größerem Maße vorhanden ist. (Ruch, Fritz und Bürkle 2002) Weiterhin weist das Material gute akustische Eigenschaften auf weshalb es gut als Dämmstoff eingesetzt werden kann.

Die **Nachteile** gegenüber den klassischen Materialien sind die geringeren absoluten Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Da es ein natürlich gewachsener Rohstoff ist und Fehlstellen häufiger vorkommen und schlechter zu kontrollieren sind, kommt es zu großen Streuungen der Eigenschaftswerte. Weiterhin sind den Verarbeitungsmöglichkeiten, durch eine geringere maximal ertragbare Temperatur und der Notwendigkeit einer Vorbehandlung der Fasern, Grenzen gesetzt. Das Material ist leichter brennbar und weist eine höhere Anfälligkeit gegen Bakterien und Pilze auf.

Weiterhin lassen sich Fasern generell in Endlos-, Lang- und Kurzfasern unterteilen, wobei nur der Herstellungsprozess der Fasern aus klassischem Fasermaterial eine beliebige Faserlänge ermöglicht. Hierbei geht aus der Literatur allerdings keine eindeutige Definition für die Länge von Kurz- und Langfasern hervor. Die angegebenen Längen für Kurzfasern liegen in den Bereichen von (0mm...1mm) bis (0,4...20mm) und für Langfasern in den Bereichen von (1mm...10mm) bis (30mm...50mm) aus den Quellen (Albrecht 2000) (AVK - 2010) (Schürmann 2005) gehen dafür keine eindeutigen Längenangaben hervor. Die Einteilung in Kurz- und Langfasern spielt bei der Herstellung von Faserhalbzeugen wie der Vliesherstellung, auf die in Kapitel 2.4 näher eingegangen wird, eine wichtige Rolle. Generell gilt, je länger eine Faser, desto bessere mechanische Eigenschaften weist diese auf. Allerdings sind manche Herstellungs- oder Verarbeitungsprozesse nur mit Kurzfasern möglich.

Für jede Faser lässt sich ein Schlankheitsgrad nach der folgenden Formel ermitteln:

$$\text{Schlankheitsgrad} = \frac{100 \cdot \text{Faserlänge}}{\sqrt{\text{Faserfeinheit}}}$$

Die Länge fließt in den Schlankheitsgrad in mm ein. Die Faserfeinheit wird in der Einheit Tex angegeben, welche das Gewicht der Faser in Bezug zu ihrer Länge setzt. So entspricht 1 tex = 1 Gramm pro 1000 Meter. (Schürmann 2005) Dieser Wert spielt, genau wie die Länge allein, eine wichtige Rolle gerade bei Vliesherstellungsprozessen nach dem aerodynamischen- und dem nassen Verfahren. Ist der Schlankheitsgrad zu hoch, sind manche Vliesherstellungsverfahren nicht mehr möglich, da die Aerodynamischen Eigenschaften für die Verfahren ungeeignet sind. (Albrecht 2000) Auch können spezielle Schlankheitsgrade Einfluss auf die gesundheitliche Verträglichkeit der Faser haben.

Eine Rolle für die Herstellungsprozesse von Faserhalbzeugen spielen außerdem noch die Oberflächenbeschaffenheit der Faser und die Form ihres Querschnittes. Die Oberfläche der Fasern lässt sich vor der Halbzeugherstellung mit Binde- und Dispergiermittel bearbeiten um die spätere Anbindung an die Harzmatrix zu verbessern oder um die Bildung des Halbzeugmaterials zu erleichtern. (Hackl 2007)

In dieser Arbeit sind aus der Gruppe der klassischen Fasermaterialien die Kohlenstofffasern und aus der Gruppe der Naturfasermaterialien die Flachsfasern von Interesse. Die Eigenschaften dieser speziellen Fasern werden nun näher beschrieben.

2.2.1 Kohlenstofffaser

Die Technologie Kohlenstofffasern herzustellen wie sie heute bekannt sind fand in den 1950er Jahren durch die Verwendung von Polyacrylnitril (PAN) als Ausgangsmaterial ihren Ursprung. Bei einem sehr niedrigen spezifischen Gewicht weisen Kohlenstofffasern eine hohe Festigkeit und Steifigkeit auf. Die Werte der wichtigsten mechanischen Eigenschaften von HT-Fasern sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Eigenschaft	Dichte	Durchmesser	E-Modul in Faserrichtung	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
Kohlenstofffaser	1,78 g/cm ³	5 - 9 µm	235 GPa	3400 MPa	1,5%

Tabelle 1: Eigenschaften von Kohlenstofffasern (Schürmann 2005)

HT steht für „High Tenacity“, was hier mit „Hochfest“ übersetzt wird und bezeichnet der Standardtyp der Kohlenstofffasern. Diese werden bei Temperaturen zwischen 1200 °C und 1500 °C hergestellt und stellen die günstigste Kohlenstofffaserform dar.

Weitere Eigenschaften, die ein großes Anwendungspotential ermöglichen, sind die folgenden. Die Fasern sind elektrisch und thermisch leitend, chemisch so gut wie inert, überaus widerstandsfähig gegenüber Wärme bis ca. 4000°C, unschmelzbar, biologisch kompatibel und durchlässig für Röntgenstrahlung. (AVK - 2010) Ohne die Anwendung von Kohlenstofffasern wäre die Realisierung vieler moderner Konstruktionen in sämtlichen technischen Bereichen nicht möglich. Allerdings sind Bauteile aus diesem Material sehr spröde und haben eine geringe Bruchdehnung. Weitere Nachteile dieser Faser zeigen sich sowohl bei ökonomischer als auch bei ökologischer Betrachtungsweise. Der Herstellungsprozess ist äußerst energieaufwendig, umweltschädlich und teuer. Aus diesen Gründen existieren Bestrebungen bereits verbaute Kohlenstofffasern mittels Recyclingverfahren zurück zu gewinnen. Auf die momentan genutzten Verfahren zur Rückführung von Kohlenstofffasern wird in Kapitel 3.4 genauer eingegangen.

2.2.2 Flachsfasern

Neben Jutefasern sind Flachsfasern, auch Lein genannt, die am meisten produzierten Naturfasern der Welt. Schon seit Beginn der Kulturgeschichte werden diese Fasern verwendet um Kleider, Zelte und Segel zu fertigen. Im Vergleich mit anderen Naturfasern weisen Flachsfasern eine relativ hohe Festigkeit sowie eine geringe Dehnung und Kräuselung auf. Flachs eignet sich gut zur Herstellung von Vliesstoffen. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften der Technischen Flachsfasern gehen aus Tabelle 2 hervor.

Eigenschaft	Dichte	Durchmesser	E-Modul in Faserrichtung	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
Flachsfaser	1,4 g/cm ³	50 - 100 µm	50 - 70 GPa	500 - 1500 MPa	1,8% – 3,3%

Tabelle 2: Eigenschaften von Flachsfasern (Heinick 2012) (Sparnins 2006)

Hier ist zu erkennen, dass Flachsfasern eine noch geringere Dichte haben als Kohlenstofffasern, dabei aber wesentlich dicker sind. E-Modul und Zugfestigkeit der Kohlenstofffasern sind hingegen 3 bis 4 Mal so groß wie bei den Flachsfasern, allerdings sind diese durch die höhere Bruchdehnung nicht so spröde. Nachteilig gegenüber der Kohlenstofffaser ist, dass Flachsfasern, da sie auf natürliche Weise entstanden sind, natürliche Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten aufweisen. In Abbildung 5 sind diese Unterschiede und auch der unterschiedliche Durchmesser der beiden Faserarten gut zu erkennen. Die Kohlenstofffasern sind als sehr fein und gerade mit glatter Oberfläche zu erkennen, während die dickeren Flachsfasern Knicke und Rillen in der Oberfläche zeigen. Dies ist ein Grund für die in Tabelle 2 zu sehenden Schwankungen der mechanischen Werte der Flachsfasern.

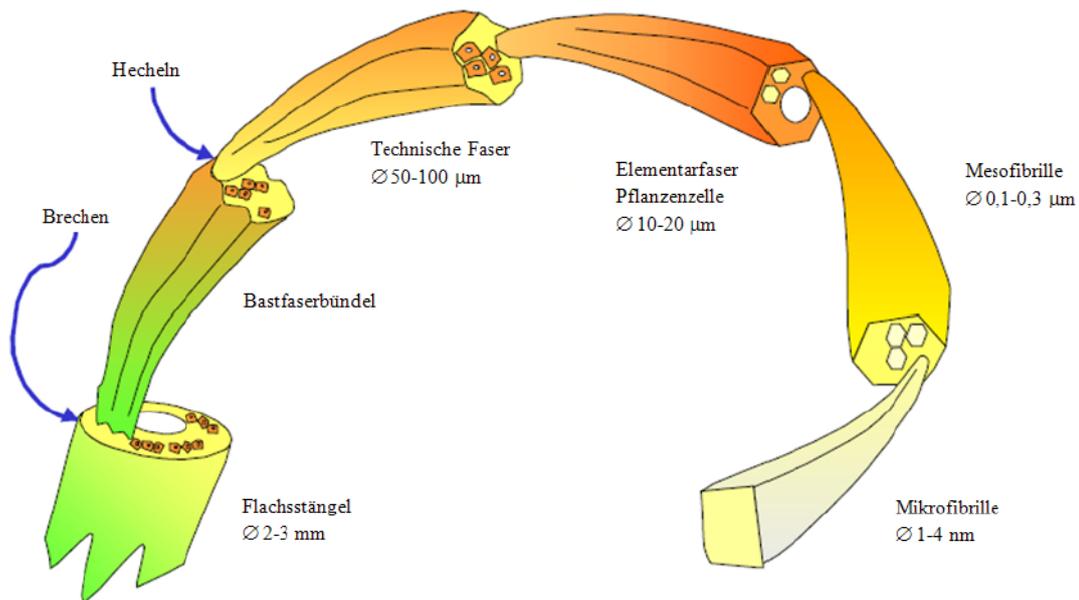


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Flachsstängels (Sparnins 2006)

Abbildung 4 stellt den Aufbau eines Flachsstängels dar. Hier sind die Größenverhältnisse gut nachzuvollziehen und es wird klar, dass die, für diese Arbeit relevante, Technische Faser nach Brechen und Hecheln entsteht. Die Technische- sowie die Elementarfaser werden zur Herstellung von Faserhalbzeugen, auf die im Kapitel 2.3 näher eingegangen wird, verwendet. Die Prozesse des Brechens und Hechelns tragen allerdings dazu bei, dass weitere Fehlstellen und Knicke in die Fasern gelangen.

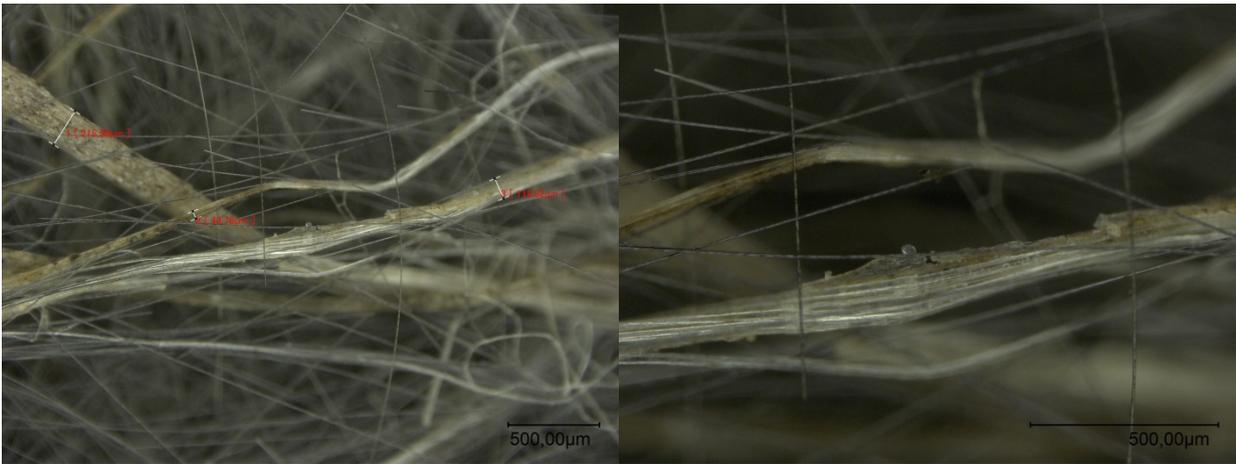


Abbildung 5: Mikroskopaufnahmen eines Fasergemisches aus Flachs und Kohlenstofffasern

2.3 Faserhalbzeuge

Die oben beschriebenen Fasern lassen sich zu verschiedenen Halbzeugmaterialien weiterverarbeiten. Ziel dieser Arbeit ist die Vermischung zweier Faserarten um die Herstellung eines Vliesstoffes vorzubereiten. Vliesstoffe zählen neben den Gelegen und Geweben zu den wichtigsten Faserhalbzeugen. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über diese drei Faserhalbzeuge und ihre unterschiedlichen Eigenschaften.

2.3.1 Gelege

Das Gelege besteht aus gestreckten Endlosfasern, die zu Rovings, also zu unverzwirnten Bündeln aus Filamenten, zusammengefasst werden und alle parallel zueinander ausgerichtet sind. Alle Rovings einer Schicht liegen nebeneinander und laufen in die gleiche Richtung, man spricht von einer unidirektionalen Schicht (UD-Schicht). Abbildung 6 zeigt den Schematischen Aufbau eines solchen Halbzeugmaterials.

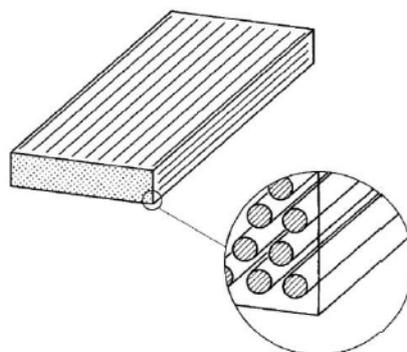


Abbildung 6: UD Schicht (Schürmann 2005)

Die Annahme die bei Berechnungen angestellt wird ist, dass alle Fasern gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sind und die Fasern ideal gerade und parallel vorliegen. (Schürmann 2005) Bei diesem Faserhalbzeug werden die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften der Fasern längs der Faser optimal ausgenutzt. Das führt allerdings dazu, dass dieses Halbzeugmaterial schlechter auf Kräfte, die senkrecht zur Faserrichtung wirken, reagiert, als andere Faserhalbzeuge. Damit die Faserbündel eines Geleges (zum Beispiel Kohlenstofffaser- oder Glasfasergelege) besser zusammenhalten, sind meist senkrecht zu den Fasern vereinzelte Glasfasern gezogen. Das erleichtert die Verarbeitung des Halbzeugs.

2.3.2 Gewebe

Ein weiteres Faserhalbzeug stellt das Gewebe dar. Es besteht zu gleichen Teilen aus Rovings des gleichen Materials, die senkrecht zueinander verlaufen und miteinander verwoben sind. Beim Gewebe wird zwischen Kett- und Schussfäden unterschieden. Während des Herstellungsprozesses werden die Rovings der einen Richtung unterschiedlich angehoben und wieder abgelegt, sodass sie sich um die Rovings der anderen Richtung herum schlängeln. Diese in Wellenform verlaufenden Faserbündel werden Kettfäden genannt und halten das Halbzeugmaterial zusammen. Die Rovings der anderen Richtung verlaufen hingegen gradlinig und werden Schussfäden genannt. Auf diese Weise entsteht eine bidirektionale Schicht, das heißt, es können Belastungen in beiden Richtungen ertragen werden. Je nach Art des Herstellungsprozesses können unterschiedliche Fadenkreuzungen und damit unterschiedliche Gewebestrukturen erzeugt werden.

Abbildung 7 zeigt einen schematischen Aufbau eines üblichen Gewebes nach der Leinwandbindung.

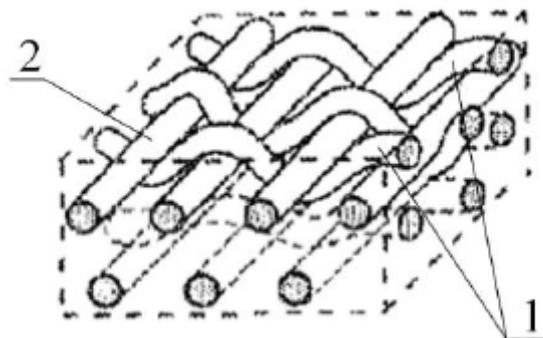


Abbildung 7: Gewebe, 1: Kettfaden 2: Schussfaden (Heinick 2012)

Im Gegensatz zum Gelege ist das Gewebe formstabiler, da sich die einzelnen Faserstränge nicht so leicht gegeneinander verschieben lassen. Die Schussrichtung des Gewebes weist höhere Festigkeitswerte auf als die Kettrichtung, da die Kettfäden aufgrund ihres welligen Verlaufes ihr mechanisches Potential nicht voll entfalten können. (AVK - 2010)

2.3.3 Vliesstoffe

Ein Vliesstoff ist laut CEN-Definition ein aus vereinzelt Fasern gefertigtes textiles Flächengebilde, das auf verschiedene Weise gebildet und verfestigt worden ist. Die verwendeten Fasern sind kurz, lang oder endlos, ihre Feinheit liegt meist im Bereich zwischen 1 – 100 dtex und sie können sowohl unidirektional als auch wirr im Vlies angeordnet sein. Per Definition sind diese Fasern innerhalb des Vlieses weder miteinander verwoben noch verstrickt, sie sind aber auf mechanische (kraftschlüssige) oder auf chemische sowie thermische (stoffschlüssige) Weise miteinander verbunden. Im Vergleich zur Herstellung von Geweben und Gelegen ist es bei der Vliesherstellung nicht erforderlich aus den Fasern zunächst Fäden- oder Rovings zu bilden. Die Eigenschaften des Vlieses hängen sehr stark von der Art der Faser und von der Art der Faservorbereitung sowie des Vliesbildungs- und des Vliesstoffverfestigungsverfahrens ab, auf die in Kapitel 2.4 näher eingegangen wird. So lassen sich Vliese aus den gleichen Fasern für sehr unterschiedliche Anwendungen individuell anfertigen. Vlieshalbzeuge lassen sich gut aus recycelbaren Faserabfällen herstellen und bieten damit eine günstigere Alternative zu Gelegen und Geweben. (Albrecht 2000) Als Halbzeug im Faserverbundbereich bieten Vliesstoffe die Möglichkeit der Funktionsintegration sowie Vorteile durch Reduktion des Bauteilgewichtes gegenüber Geweben und Gelegen.

2.4 Vliesherstellung

Dieses Kapitel behandelt die Herstellungsverfahren zu Vliesstoffen aus Lang- bzw. Kurzfasern, da es Ziel dieser Arbeit ist, Fasermischungen aus Recyclingfasern herzustellen, die zu Vlieshalbzeugen weiterverarbeitet werden sollen. Das Verfahren zur Vliesstoffherstellung aus Endlosfasern (Spinnvliesverfahren) soll hier aber nicht näher behandelt werden, da es für diese Arbeit keine Relevanz hat.

Die Eigenschaften von Vliesen hängen stark von der Art des Herstellungsverfahrens ab. Vliesstoffe aus endlichen Fasern werden meist im Kontinuumprozess nach dem in Abbildung 8 dargestellten Schema hergestellt. Somit wird die Vliesherstellung in die gezeigten, aufeinander folgenden Einzelprozesse unterteilt, für die es jeweils auch unterschiedliche Vorgehensweisen gibt. Das gesamte Herstellungsverfahren ist geprägt von der Art der Vliesbildung (Trocken oder Nass), welche Einfluss auf die anderen Prozesse hat. Auf diese Prozesse der Vliesherstellung wird im Folgenden näher eingegangen.

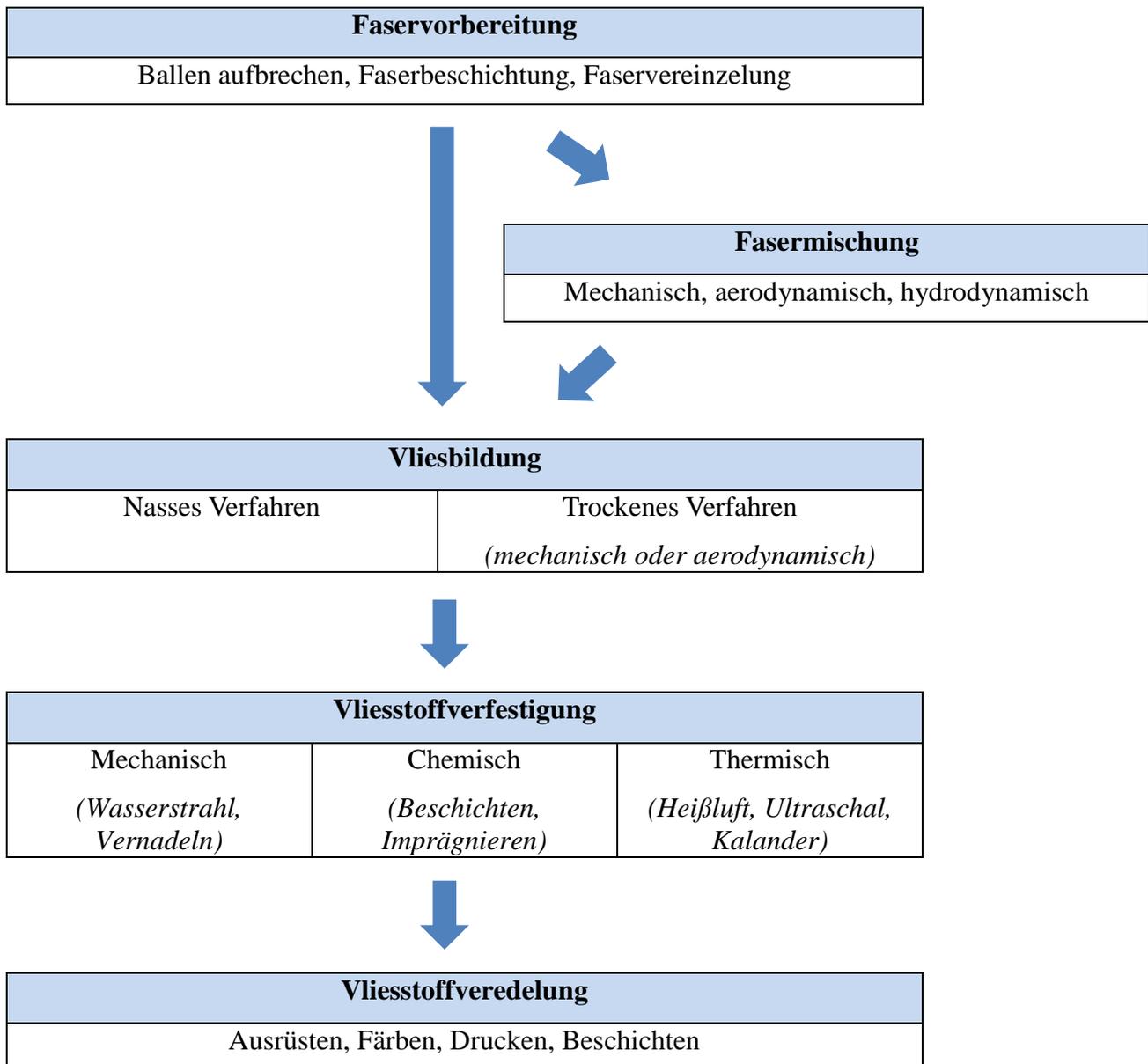


Abbildung 8: Prozessschritte der Vliesstoffherstellung

2.4.1 Faservorbereitung

Während des Vorbereitungsprozesses werden die Fasern in Hinblick auf das anschließende Vliesbildungs- oder Verfestigungsverfahren oder hinsichtlich des späteren Verwendungszwecks des Vlieses präpariert.

Lang- beziehungsweise Kurzfasern werden in Ballenform angeliefert und müssen sowohl für ein anschließendes Nasses als auch für ein trockenes Vliesbildungsverfahren zunächst vereinzelt werden. Dafür werden die Ballen mechanisch und/oder aerodynamisch aufgebrochen um die Fasern in einer möglichst nicht zusammenhängenden Form dem Nächsten Prozess zuzuführen.

Zur späteren Verwendung des Vliesstoffes als Faserverbundhalbzeugs kann es sein, dass die Fasern beschichtet werden müssen, um eine bessere Faser-Matrix-Anbindung zu erzielen.

Weiterhin kann es erforderlich sein die Fasern, besonders die Naturfasern, zu waschen bevor sie weiterverarbeitet werden.

Um bessere Faserverteilungen während des Nassen Vliesbildungsverfahrens zu erzielen, werden die Fasern oft mit einem Dispergiermittel versehen. Es wird eine Suspension aus Wasser und Fasern erzeugt, welche dem Vliesbildungsprozess zugeführt wird. Um den Fasern untereinander mehr Halt zu verleihen können an dieser Stelle bereits Bindemittel auf die Fasern aufgebracht werden. Somit hält das, noch unverfestigte, Faserflor nach dem Vliesbildungsprozess besser zusammen. (Albrecht 2000)

2.4.2 Fasermischung

Nicht für jedes Vlies ist ein Mischprozess während der Herstellung notwendig. Soll aber ein Misch- oder Hybridvlies entstehen, so findet der Mischprozess der Fasern in der Regel vor der Vliesbildung statt. In Albrechts Buch „Vliesstoffe“ heißt es:

„Dem Vermischen der Fasern kommt sowohl bei Einkomponenten - als auch bei Mehrkomponentenmischung eine große Bedeutung zu. Eine gute Vermischung ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine gleichmäßige Vliesqualität“ (Albrecht 2000)

Da es Kernthema dieser Arbeit ist, ein Mischvlies herzustellen, wird an dieser Stelle näher auf diesen Prozess eingegangen.

Durch das Vermischen zweier oder mehrerer Fasersorten soll unter anderem erreicht werden, dass die verschiedenen Eigenschaften der unterschiedlichen Fasern in einem Vliesstoff vereint werden. So können zum Beispiel die mechanischen Eigenschaften eines Vliesstoffes, je nach Anteil der beigemischten Fasern individuell angepasst werden. Die beigemischten Fasern stammen oft aus Recyclingprozessen was einen Kostenvorteil mit sich bringt. Ein weiterer Grund Fasern miteinander zu vermischen ist in der Vliesherstellung selbst zu finden. So ist es für den thermischen Vliesverfestigungsprozess erforderlich, dass dem Faserflor synthetische Polymerfasern beigemischt sind. (AVK - 2010)

Abhängig von der Beschaffenheit der zu vermischenden Fasern ist dieser Prozess sehr aufwendig oder trivial. Es gilt, je ähnlicher sich die Fasern, bezüglich ihrer Geometrie, Dichte und Oberflächenbeschaffenheit sind, desto einfacher lassen sie sich miteinander vermischen. Auch bereits vereinzelt Fasern lassen sich besser mischen.

Liegen vereinzelt Fasern in großer Menge vor können diese zum Beispiel mittels Rührer oder Schneckenförmigen Walzen gemischt werden. Hierbei ist die Homogenität des Gemisches aber nicht optimal. Für ein anschließendes Trockenes Vliesbildungsverfahren werden Fasern generell mechanisch oder durch einen kontinuierlichen Luftstrom miteinander vermischt.

Für das Nasse Vliesbildungsverfahren können die zuvor erzeugten Suspensionen der verschiedenen Fasern in einem Behälter verrührt und die Fasern so miteinander vermischt werden. Der Mischprozess wird so lange durchgeführt bis der maximale Grad an Homogenität erreicht ist, anschließend wird das Gemisch aus vereinzelt Fasern dem Vliesbildungsprozess zugeführt. Eine Übersicht über die aktuell genutzten Mischtechniken ist in Kapitel 3.3.2 zu finden. (Albrecht 2000)

2.4.3 Vliesbildung Trocken

Wie in Abb. Schema zu sehen ist, gibt es zwei Möglichkeiten aus endlichen Fasern ein Vlies zu bilden. Das Nasse und das Trockene Verfahren. Welcher Prozess Anwendung findet, hängt hauptsächlich von der Länge der verwendeten Fasern ab.

Das trockene Verfahren umfasst zum einen den mechanischen Vliesbildungsprozess und zum anderen den Vliesbildungsprozess auf aerodynamischem Wege. Ab einer Faserlänge von 5 mm – 10 mm ist es möglich das Vlies auf trockene Weise zu bilden.

Mechanisches Verfahren:

Während des mechanischen Vliesbildungsprozesses werden die aufgeteilten und vermischten Fasern mittels Krempeln oder Karden weiter vereinzelt und ausgerichtet.

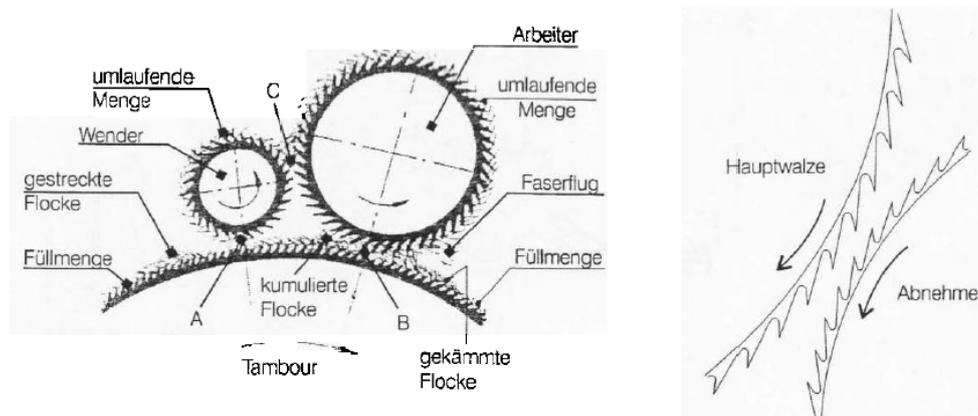


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Kardierprozesses (Albrecht 2000)

Krempeln bzw. Karden sind auf Trommeln angeordnete Nadeln oder Hacken (siehe Abbildung 9), welche die Aufgabe haben, die aus den Vorherigen Prozessen wirt vorliegende Fasermasse zu ordnen und den Fasern bis hin zur Einzelfaser eine Richtung zu geben. Hierbei kann sowohl eine Parallellage oder eine Wirrlage der Fasern angestrebt sein. Die Einzelfasern werden so zu einem zusammenhängenden Faserflor zusammengeführt, welches je nach gewünschtem Flächengewicht übereinander gelegt wird und den folgenden Verfestigungsprozessen zugeführt wird. Diese Art der Vliesbildung ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden, hat aber den Nachteil, dass die Fasern hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt werden und somit beschädigt werden können. (Albrecht 2000)

Aerodynamisches Verfahren:

Während des aerodynamischen Vliesbildungsprozesses (Airlyay Verfahren) werden die, zuvor von einem Krempel geöffneten Faserflocken in einen Luftstrom gebracht, der durch ein Gebläse erzeugt wird. Dieser transportiert die Fasern durch einen Kanal, wobei sie durch die Turbulenzen in der Luftströmung weiter vereinzelt werden. Am Ende des Strömungskanals werden die vereinzelt Fasern von der Luft auf einem Siebband, einer luftdurchlässigen Trommel oder einer weiteren Krempel abgelegt und anschließend verfestigt. Abbildung 10 zeigt die schematischen Darstellungen eines solchen Verfahrens umgesetzt als Unterdruck- und Überdrucksystem.

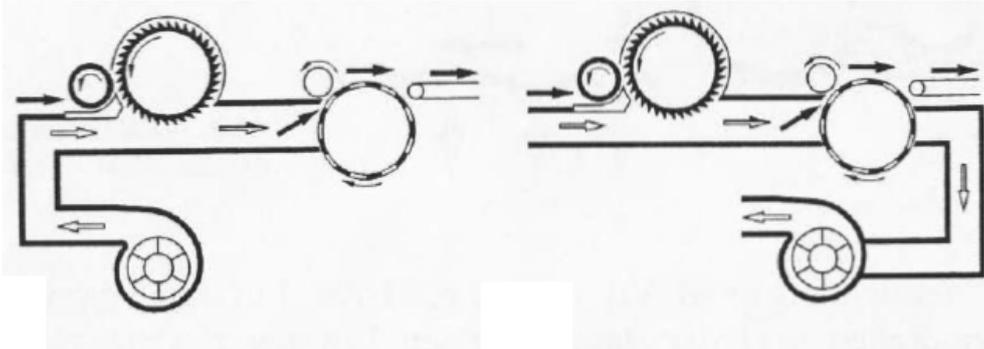


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Aerodynamischen Verfahrens. links: Überdrucksystem, rechts: Unterdrucksystem (Albrecht 2000)

Dieses Verfahren ermöglicht eine kostengünstige Verarbeitung von Kurz- bis Langfasern. Die so entstehenden Vliese haben die Eigenschaft, dass die Fasern in alle Richtungen gleichermaßen ausgerichtet sind, da sie von dem Luftstrom rein zufällig auf der Sieboberfläche abgelegt werden. Es wird eine hohe Gleichmäßigkeit über alle Zonen des Vlieses erreicht.

2.4.4 Vliesbildung Nass

Zur Vorbereitung des nassen Vliesbildungsverfahrens findet zunächst eine Dispergierung der Fasern in Wasser statt. Die so entstehende Faser-Wasser Suspension wird horizontal durch ein schräg angeordnetes Sieb geleitet auf dem sich die Fasern gleichmäßig ablegen und das Vlies bilden. Die Abbildung 11 zeigt dieses Verfahren schematisch.

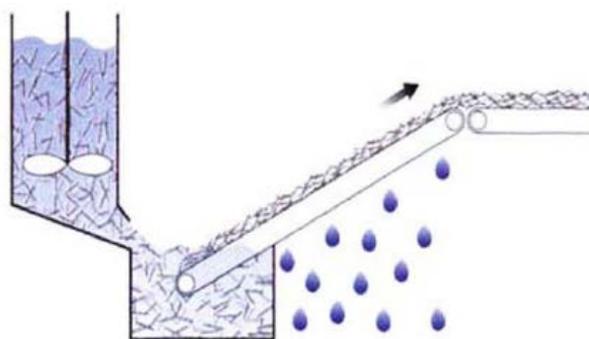


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Nassen Verfahrens zur Vliesbildung (AVK - 2010)

Vliese die nach diesem Verfahren entstehen weisen, ähnlich wie beim aerodynamischen Verfahren, eine hohe Homogenität auf. Die Güte der zuvor erzeugten Suspension ist entscheidend für den Erfolg des Verfahrens. Das Dispergierverhalten der Fasern hängt von folgenden Eigenschaften ab:

- Schlankheitsgrad (je geringer desto besser)
- Steifigkeit der Faser im Nassen Medium (je größer desto besser)
- Art der Kräuselung (starke Kräuselung erschwert Dispergierung)
- Benetzbarkeit (je höher desto besser)
- Schnittqualität, Oberfläche der Fasern (je glatter desto besser)

Aufgrund dieser Einflussgrößen sind Kurzfasern besser für das nasse Vliesbildungsverfahren geeignet als Langfasern. In der Industrie werden Fasern bis zu einer Länge von maximal 30mm zur Vliesherstellung nach diesem Verfahren verwendet. Längere Fasern neigen zu Flockenbildung oder zum Verspinnen innerhalb der Suspension.

Es ist möglich das wässrige Medium durch verschiedene Stoffe so zu präparieren, dass die Auswirkungen einiger der oben genannten Fasereigenschaften abgeschwächt werden. Da schwerere Fasern zum Beispiel absinken, ist es möglich die Flüssigkeit einzudicken oder durch spezielle Öle die Benetzbarkeit der Fasern zu verbessern. Auch können Dispergiermittel zu Einsatz gebracht werden, die das Dispergierverhalten der Fasern verbessern.

Weiterhin spielt der Grad der Verdünnung eine wichtige Rolle. Je länger die Fasern sind, desto höher muss die Verdünnung durch das wässrige Medium sein um eine homogene Vliesbildung zu gewährleisten. Wie hoch die Verdünnung genau sein muss hängt allerdings auch von Art und Beschaffenheit der Fasern ab. Generell kann eine Verdünnung von 0,2 g/l – 0,8 g/l für längere Fasern als grober Richtwert angegeben werden. (Albrecht 2000)

Diese Vliesbildungsmethode ermöglicht die Herstellung sehr dichter und leichter Vliese mit hoher Festigkeit.

2.4.5 Vliesverfestigung

Das auf Nasse oder Trockene Weise gebildete Vlies oder Faserflor muss Verfestigt werden um es als Halbzeug nutzbar zu machen. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, gibt es hierfür verschiedene Möglichkeiten. Mechanisches-, chemisches- oder thermisches Verfestigen.

- A. Während des Mechanischen Verfestigungsverfahrens wird das Vlies mit speziellen Nadeln oder Hochdruckwasserstrahlen senkrecht (in Z-Richtung) durchstochen bzw. bestrahlt. Dies wird schematisch in den beiden linken Darstellungen in Abbildung 12 gezeigt. Dadurch werden die Fasern miteinander „verschlaft“ und es entsteht auch in Z-Richtung des Vlieses eine Festigkeit. Je nach Intensität dieses Prozesses kann so ein sehr dichtes, festes Vlies mit niedriger Drapierbarkeit oder ein Vlies mit geringerer Festigkeit und besserer Drapierbarkeit erzeugt werden. Anders als bei den anderen Verfestigungsverfahren, ist hier die Verwendung zusätzlicher Stoffe nicht nötig.

- B. Beim chemischen Verfestigungsverfahren wird ein chemischer Binder (Kleber) durch Tränken, Sprühen oder Streichen auf die Fasern aufgebracht und diese so miteinander verklebt. Über diesen Bindestoff können dem Vlies auch weitere Eigenschaften wie Flammenschutz, Leitfähigkeit oder bessere Haptik gegeben werden. Dieses Verfahren zeigt die dritte Darstellung in Abbildung 12.
- C. Das thermische Verfestigungsverfahren basiert auf den thermoplastischen Eigenschaften von Polymeren. Das zu verfestigende Vlies besteht hierbei aus einem Gemisch aus Matrixfasern und polymeren Bindefasern die einen geringeren Schmelzpunkt aufweisen. Wird nun, wie in der rechten Darstellung aus Abbildung 12 gezeigt ist, Wärme in das Faserflor eingebracht, schmelzen die Polymerfasern und verbinden so die Matrixfasern miteinander. Die Wärme kann mittels heißer Luft, mit einem erhitzten Kalandrierwerk wie in der Abbildung gezeigt oder durch Ultraschall in das Vlies eingebracht werden. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung sehr dünner, folienartiger Vliese. (AVK - 2010) (Albrecht 2000)

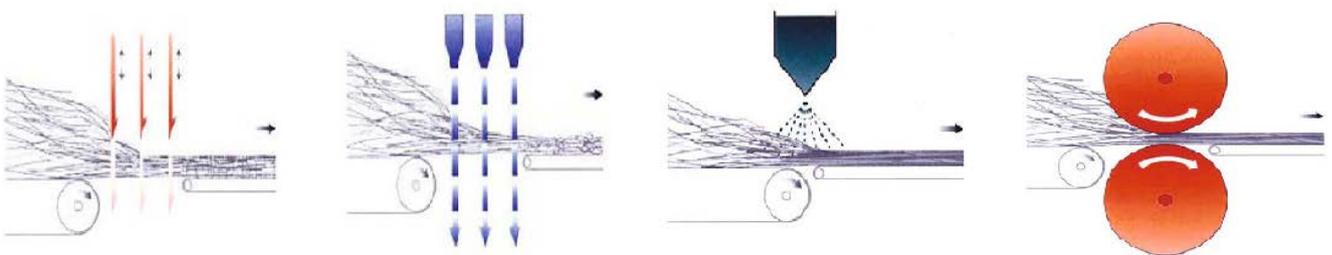


Abbildung 12: Schematische Darstellung verschiedener Verfestigungsverfahren für Vliese. Von links nach rechts: Vernadeln, Wasserstrahlverfestigen, chemisches Verfestigen, thermisches Verfestigen (AVK - 2010)

2.4.6 Vliesstoffveredelung

Genau wie andere textile Flächengebilde, wie Gewebe oder Gelege, können auch Vliese veredelt oder für bestimmte Zwecke ausgerüstet werden. Es gibt sehr viele Möglichkeiten einem Vlies nachträglich noch zusätzliche, gewünschte Eigenschaften zu verleihen, auf die hier nicht im Detail eingegangen werden soll. Im Allgemeinen lassen sich die Veredelungsverfahren in mechanische- und chemische Verfahren einteilen. Zu den Mechanischen Verfahren zählt neben dem Schrumpfen, Perforieren, Schlitzen, Brechen, Nähen oder Schweißen noch eine Vielzahl anderer Verfahren, die dem Vliesstoff spezifische mechanische Eigenschaften verleihen und das Halbzeug so auf seine spezielle Anwendung vorbereiten.

Die chemischen Verfahren sind im Wesentlichen das Waschen, Färben, Drucken, Weichmachen und Beschichten.

Nachdem die nötigen Ausrüst- und Veredelungsprozesse abgeschlossen sind kann der Vliesstoff als Halbzeug seiner Individuellen Anwendung zugeführt werden. (Albrecht 2000)

3. Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die aktuell genutzten Vliesherstellungsverfahren verschiedener Hybridvliese und Vliese aus recycelten Kohlenstofffasern. Weiterhin finden verschiedene Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema Hybridvliese und zum Thema recycelte Kohlenstofffasern Erwähnung und es wird auf unterschiedliche, industriell genutzte Mischverfahren von Fasern oder anderen Feststoffen eingegangen.

3.1 Hybrid- und rCF-Vliesherstellung

Die Herstellung von Vliesen, welche aus mindestens zwei unterschiedlichen Fasersorten bestehen, ist nichts neues, gewann aber in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Als etabliert gilt dabei die Herstellung solcher Vliese, die aus Matrix- und Bindefasern bestehen, wie sie in Kapitel 2.4.5, C erwähnt werden. Mit der Herstellung dieser speziellen Hybridvliese befassen sich die im Folgenden genannten Patentschriften.

3.1.1 Patentschriften zur Herstellung von Hybridvliesen

- i. Die Patentschrift zur Erfindung von Klaus-Peter Dr. Mieck mit der Veröffentlichungsnummer DE19506083 A1 trägt den Titel *„Hybridvliese mit haftungsverbessernden Eigenschaften für faserverstärkte Kunststoffe“* und befasst sich mit der Herstellung eines Hybridvlieses. Dieses Vlies besteht aus cellulosischen Verstärkungsfasern (hier Flachsfasern) und thermoplastischen Matrixfasern aus Polypropylen. Damit wird erreicht, dass die Haftung des Vliesstoffes im späteren Polypropylen-Verbund verbessert wird.

Bevor das Vlies gebildet werden kann, müssen die zwei Fasersorten in einem Mischbett vermischt werden. Dabei ist es erforderlich, dass die hier verwendeten Grünen Flachsfasern zunächst mechanisch aufgeschlossen werden. Das Vlies wird anschließend nach bekannten Methoden gebildet und thermisch verfestigt. Wie genau der Mischprozess abläuft, wird hier aber nicht erwähnt. Dieses Patent wurde bereits im Jahre 1995 angemeldet. (Mieck, Hybridvliese mit haftungsverbessernden Eigenschaften für faserverstärkte Kunststoffe 1995)

- ii. Die Patentschrift mit dem Titel *„Verfahren zur Herstellung eines thermoplastisch verformbaren, faserverstärkten Halbzeugs auf Basis von Polyetherimiden“* (DE10114554 A1) wurde von Harri Ditmar bereits im Jahre 2001 eingereicht und befasst sich ebenfalls mit der Herstellung eines Hybridvlieses. Hierbei besteht das Vlies aus synthetischen Verstärkungsfasern der Länge 10mm – 200mm und Polyetherimid-

(PEI-) Fasern.

Die Verstärkungsfasern müssen vereinzelt und ohne polymere Bindemittel vorliegen um mit den Polyetherimidfasern mittels Krempel- oder durch ein Airlay-Verfahren homogen vermischt zu werden. Es können Glas, Kohlenstoff oder Aramidfasern als Verstärkungsfasern genutzt werden. Das so entstandene Mischvlies wird durch Nadeln verfestigt. Zuschnitte dieses Vlieses können durch Temperatureinwirkung direkt zu dreidimensionalen Formteilen verpreßt werden. (Dittmar 2001)

- iii. Die FRENZELIT-WERKE GMBH & CO. KG hat im Jahr 2006 ein Patent mit dem Titel „Faservliesmatte, Verfahren zu dessen Herstellung und Faserverbundwerkstoff“ und der Nummer EP 1 618 252 B1 angemeldet. Hierbei handelt es sich sowohl um das Herstellungsverfahren, als auch um die Verwendung einer Faservliesmatte, welche aus Hochleistungsthermoplasten als Schmelzfasern und Verbindungsfasern besteht. Ziel ist es ein Mischvlies zu erzeugen, das zu Faserverbundbauteilen mit hoher Dichte weiterverarbeitet werden kann. Die Verstärkungsfasern können aus einem beliebigen der bekannten Hochleistungsmaterialien bestehen, die in der Faserverbundtechnologie zum Einsatz kommen. Um eine homogene Mischung zu erhalten, müssen die Verstärkungsfasern länger sein als die Schmelzfasern und alle Fasern einer Sorte müssen eine einheitliche Länge aufweisen. Beide Fasersorten können mit einer Länge von 0,1mm bis 30mm vorliegen, weshalb zur Vliesbildung das Nasse Vliesbildungsverfahren genutzt wird. Die unterschiedlichen Fasern werden zunächst in Wasser dispergiert und dann mittels Rührens vermischt. Um eine höhere Festigkeit des Vlieses zu erzielen, wird der Dispersion vor dem Vliesbildungsprozess ein spezieller Binder beigemischt. (Erb und Übelmesser 2006)

3.1.2 Technikumsanlagen

Da das, in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Mischvliesherstellung, recycelte Kohlenstofffasern nutzen soll, ist der aktuelle Stand der Technik zur Verarbeitung solcher Fasern zu Vliesstoffen recherchiert worden. Die beiden im Folgenden vorgestellten Technikumsanlagen erfüllen diese Aufgabe und stellen den momentanen Stand der Forschung auf diesem Gebiet dar.

Mit dem Bericht „Aufbereitung von Carbonabfällen und deren Wiedereinsatz in textilen Strukturen unter Nutzung des Kardierprozesses“ des Sächsischen Textilforschungsinstituts e. V. (STFI) wird bewiesen, dass es möglich ist, aus recycelten Kohlenstofffasern mittels des mechanischen Kardierverfahrens ein Vlies zu bilden.



Abbildung 13: Technikumsanlage zur Herstellung von Kohlenstofffaservliesen aus Recyclingmaterial mittels Kardierens (Hofmann, Gulich und Illing-Günther 2012)

Die vorhandene Technikumsanlage ist in Abbildung 13 zu sehen und kardiert rC-Fasern zwischen 30mm – 100mm Länge zu einem gleichmäßigen Faserflor, welches anschließend durch Nähwirkverfahren oder Vernadelungstechnik verfestigt wird. Es sind Flächengewichte von 40g/m² bis 1500g/m² herstellbar. Um die Fasern kardieren zu können, müssen diese einen Vorbereitungsprozess durchlaufen. Der Bericht erwähnt hierzu einerseits ein auf Mühlentechnik basierendes Verfahrens und führt andererseits einen modifizierten Reißprozess an, mit dem bessere Ergebnisse erzielt werden. Aus dem erzeugten Faservlies werden in Faserverbundbauweise Materialproben hergestellt, welche am STFI durch Zug-, Biege- und Druckversuche geprüft werden. Bei ca. 22% Faservolumengehalt erreichen diese Prüfkörper E-Modul-Werte von 15,7 GPa - 30 GPa und Zugfestigkeiten von 200 MPa - 404 MPa. Diese Werte sind mehr als doppelt so hoch wie die vergleichbarer Verbundmaterialien aus GFK-Vliesen. Abschließend gibt der Bericht Ausblicke auf eine eventuell mögliche Mischvlies Herstellung aus rC- und Glasfasern nach diesem Verfahren. (Hofmann, Gulich und Illing-Günther 2012)

Eine weitere Technikumsanlage zur Herstellung von rC-Faservliesen steht am Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoffforschung (TITK). Der Mitte des Jahres 2014 veröffentlichte Schlussbericht mit dem Titel „*Werkstoff- und Prozessentwicklung für thermoformbare hochleistungsfaserverstärkte Halbzeuge in Serienprozessen*“ stellt die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes zur Herstellung von Halbzeugen aus endlich langen Verstärkungsfasern dar. Die Halbzeuge sollen sich durch Faserorientierung, gute Matrix-anbindungs-eigenschaften und gute Verarbeitungseigenschaften in späteren Prozessen auszeichnen. Um diese Ziele zu erfüllen, werden Vliese durch verschiedene Verfahren hergestellt. Es wurden Untersuchungen nach dem Nassen-, dem Krempel- und dem Aerodynamischen Vliesbildungsverfahren angestellt. Das TITK weist mit diesem Bericht die Eignung aller drei Verfahren zur Herstellung von Vlieshalbzeugen aus recycelten Kohlenstofffasern nach. Hierbei werden Fasern der Länge 3mm – 15mm nach dem Nassen-, Fasern der Länge 20mm – 80mm nach dem aerodynamischen und Fasern der Länge 40mm – 80mm nach dem Krempelverfahren verarbeitet. Der Bericht führt weiterhin an, dass für alle drei

Verfahren folgende Modifikationen der Anlagentechnik zur Verarbeitung von rC-Fasern getroffen werden müssen:

- Absicherung aller elektrischen Anlagen gegen Kohlenstofffaserstaub
- Installation einer leistungsfähigen Entstaubungsanlage
- Verwendung spezieller Beschläge und verschleißfester Materialien
- Schonende Faserzuführung und Faseröffnung

Während des Nassen Vliesbildungsverfahrens führen zu große Faserlängen zur Bildung von Agglomeraten und Faseranhäufungen und damit zu einem inhomogenen Vlies. Mit der in Abbildung 14 gezeigten Anlage können Wirrvliese mit einem Flächengewicht von 50g/m^2 – 200g/m^2 gebildet werden. Es sind auch Mischungen mit Schmelzfasern möglich.



Abbildung 14: Technikumsanlage zur Herstellung von Mischvliesen nach dem Nassen Vliesbildungsverfahren (Lützkendorf 2014)

Auch nach dem untersuchten Krempelverfahren können solche Mischungen verarbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass sich Stapelfasern als Flocken nur schlecht verarbeiten lassen. Entscheidend für die Homogenität der Fasermischung und der Vliesbildung ist ein der Krempel vorangestellter Öffnungsprozess der Fasern. Die erzeugten Kohlenstofffaservliese haben eine Flächengewichte von 20g/m^2 – 30g/m^2 und eine geringe Faserorientierung. Nachteilig hierbei ist die hohe mechanische Schädigung der Fasern.

Die aerodynamisch gelegten Vliese weisen hier eine noch geringere Faserorientierung auf, die Fasern werden allerdings weniger mechanisch beschädigt. Es wurden Vliese mit Flächengewichten von 300g/m^2 – 3000g/m^2 erzeugt. Der Bericht führt an, dass die Fasermischung hierbei nicht so homogen wie bei der Verarbeitung auf der Krempel ausfällt.

Die nach dem Krempelverfahren erzeugten Vliese weisen in späteren Prüfverfahren die besten mechanischen Eigenschaften auf. Die Prüfkörper erreichen E-Modul-Werte von 35 GPa – 45 GPa und Festigkeitswerte über 300 MPa . (Lützkendorf 2014)

3.2 Wissenschaftliche Arbeiten zu Hybridvliesen

Im Rahmen der Recherche zu dieser Arbeit wurden nur wenige wissenschaftliche Abhandlungen gefunden, die sich mit dem Thema der Hybridvliese befassen. Im Folgenden sollen drei Paper kurz vorgestellt werden, die diese Thematik behandeln.

- A. Das Paper *“Mechanical properties and damage analysis of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles”* von Amit Rawal et al. wurde über das Indian Institute of Technology im Jahr 2013 veröffentlicht. Dieses Paper befasst sich mit der mechanischen Analyse von Jute-Polypropylen Hybridvliesen. Die Öffnung und Mischung der beiden Fasersorten findet laut Amit Rawal mittels Kardierens statt, näher wird hier allerdings nicht darauf eingegangen. Anschließend wird ein Kreuzvlies gelegt und durch Nadeln verfestigt. Die hier verwendeten Jutefasern haben eine Länge von 51 mm, eine Feinheit von 28,1 dtex und einen Durchmesser von 53,38 μm . Die Polypropylen-Fasern haben eine Länge von 60 mm, eine Feinheit von 6,6 dtex und einen Durchmesser von 25,24 μm . Es können Vliese mit einem Flächengewicht von 400 g/m² hergestellt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass ein Vlies bestehend aus einer Mischung aus 40gew.% Jute- und 60gew.% Polypropylenfasern die besten mechanischen Eigenschaften aller getesteten Verhältnisse hat.. (Rawal, Mechanical properties and damage analysis of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles 2013)
- B. Eine sehr ähnliche Thematik wird in dem ebenfalls von Amit Rawal et al. im Jahre 2012 veröffentlichten Paper mit dem Titel *„A comparison of wide-width tensile strength to its axisymmetric tensile strength of hybrid needlepunched nonwoven geotextiles“* behandelt. Auch in dieser Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften von Hybridvliesen untersucht, wobei das Fasermaterial hier Viskose und Polypropylen ist. Wie im zuvor genannten Paper findet eine Öffnung und Mischung der Fasern mittels Kardierens statt. Die Viskosefasern haben eine Länge von 76 mm und einen Durchmesser von 15,3 μm . Die Polypropylen-Fasern sind denen aus dem zuvor genannten Paper identisch. Auch hier haben die Vliese ein Flächengewicht von 400 g/m², sind nach dem Kreuzlegeprinzip hergestellt und weisen ein optimales Mischungsverhältnis von 40gew.% Viskose- und 60gew.% Polypropylenfasern auf. (Rawal, Sayeed und Sarawat, A comparison of wide-width tensile strength to its axisymmetric tensile strength of hybrid needlepunched nonwoven geotextiles 2012)
- C. Ein schon älteres Paper aus dem Jahre 1995 wurde von K.-P. Mieck, R. Lutzkendorf, und T. Reussmann verfasst und trägt den Titel *„Needle-Punched Hybrid Nonwovens of Flax and PP-Fibers - Textile Semiproducts for Manufacturing of Fiber Composites“*. Die Arbeit ist am Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoffforschung e. V. (TITK) entstanden und befasst sich mit der Fragestellung ob Naturfasern die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden, die teuren Aramid oder Kohlenstofffasern als Verstärkungsfasern in

Verbundwerkstoffen teilweise ersetzen können. Hierzu wurden Hybridvliese bestehend aus Flach- und Polypropylen-Fasern hergestellt. Die Flachfasern sind hierbei länger als 30 mm und haben eine Faserfeinheit von 29,4 dtex. Die PP-Fasern haben, wie auch in den anderen genannten wissenschaftlichen Arbeiten, eine einheitliche Länge von 60mm und eine Feinheit von 6,7 dtex. Details zur Vliesbildung oder zum Mischprozess werden allerdings nicht genannt. Dieses Paper weist schon sehr früh nach, dass es möglich ist Flachfasern mit Schmelzfasern zu Hybridvliesen zu verarbeiten und dass die Flachfasern das Potential besitzen andere Verstärkungsfasern, wie zum Beispiel Glasfasern, in Faserverbundbauteilen wie Vliesstoffen zu ersetzen. (Mieck, Lützkendorf und Reussmann, Needle-Punched Hybrid Nonwovens of Flax and PPFibers - Textile Semiproducts for Manufacturing of Fiber Composites 1996)

Wie zu erkennen ist, bestehen alle Hybridvliese, die im Rahmen der genannten wissenschaftlichen Arbeiten oder Patentschriften hergestellt wurden, aus Verstärkungsfasern wie Kohlenstoff- oder Naturfasern vermischt mit Schmelzfasern, wie sie in Kapitel 2.4.5, C schon erwähnt wurden. Es wurde keine Beschreibung zu einem Herstellungsverfahren eines Hybridvlieses bestehend aus rC- und Flachfasern gefunden. Dennoch können die in diesen Arbeiten, Schriften und Berichten erwähnten Herstellungsmethoden hilfreich sein, um daraus Verfahren zur Herstellung eines rCF/Flachfaser-Hybridvlieses abzuleiten. Wie in Kapitel 2.4.2 bereits erwähnt, ist der entscheidende Prozess dabei das Mischen der Fasersorten. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Recherche speziell zum Prozess des Mischens gezeigt.

3.3 Mischen

Aus der bisherigen Recherche geht hervor, dass die Homogenität einer Fasermischung auch von der Verteilung und Öffnung der Fasern abhängt. Es werden demnach bessere Ergebnisse erzielt, wenn dem Mischprozess möglichst stark vereinzelt Fasern zugeführt werden. Daher ist sowohl das Mischen als auch das Vereinzeln von Fasern Gegenstand dieses Kapitels.

Da das Mischverfahren in den gefundenen Arbeiten nie konkretisiert wird und auch sonst keinerlei Informationen über das Mischen von recycelten Kohlenstoff- mit Flachfasern vorliegen, wurde die Recherche auf den Prozess des Mischen im Allgemeinen und nicht nur in Bezug auf Fasern ausgeweitet.

3.3.1 Mischen allgemeinen

Das Mischen stellt eine Grundoperation der mechanischen Verfahrenstechnik dar. Es werden mindestens zwei getrennt voneinander vorliegende Ausgangsstoffe so um positioniert, dass ein neues Anordnungsschema entsteht. (Weinekötter und Gericke 1995) Dabei ist entscheidend in welchem Aggregatzustand die beiden Stoffe vorliegen. Die Fasermaterialien liegen hier als feste

Stoffe vor. Man spricht daher von einem Feststoffmischen oder, im Falle des Nassen Vliesbildungsverfahrens, bei dem die Fasern in Wasser aufgeschwemmt werden, vom Suspendieren. Es ist wichtig einen Mischungstyp und einen Mischer zu wählen, der die unterschiedlichen Eigenschaften der zu mischenden Feststoffe ausgleicht, um der Tendenz des Entmischens entgegen zu wirken. (Weinekötter und Gericke 1995)

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Feststoff- und Suspensionsmischer die mit verschiedenen Mischprozessen arbeiten. Die für diese Arbeit relevanten Mischer und Mischprinzipien seien im Folgenden genannt.

- a. Das Prinzip des Gasstrahlmischers ist in Abbildung 15 veranschaulicht. Hierbei wird das Mischgas (meist Luft) in einem Druckspeicher (hier blau) bereitgestellt und impulsartig in den Mischbehälter (hier grün) eingeblasen. Das in dem Behälter befindliche Mischgut wird von dem einströmenden, turbulenten Gasstrahl mitgerissen und an den Wänden des Mischbehälters nach oben befördert. Die Feststoffpartikel des Mischgutes fallen im zentralen Bereich des Behälters wieder nach unten, wodurch eine Zirkulationsbewegung des Mischgutes entsteht. Man spricht hierbei auch von einer Fluidisierung des aus Feststoffpartikel bestehenden Mischgutes, da sich die Partikel zunächst mit dem Mischgas vermischen und stark vereinzelt werden. Das nach dem Mischimpuls im Behälter überschüssige Mischgas kann über Filter entweichen.

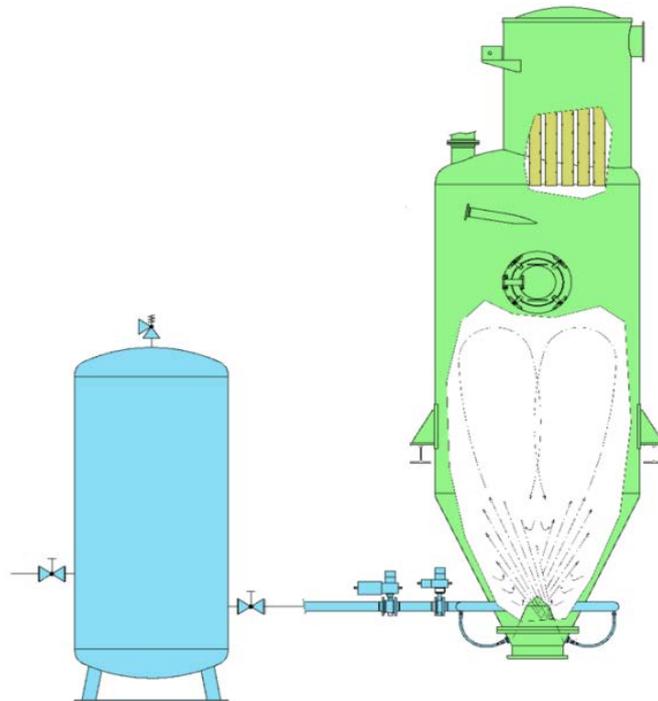


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Gasstrahlmischers (Datenblatt siehe Anhang)

Nach dem Datenblatt zu den Gasstrahlmischern der Firma Seco GmbH (siehe Anhang), können Granulate mit einer Schüttdichte von bis zu 700 Kg/m³ und einer Korngröße von bis zu 4mm Durchmesser verarbeitet werden. Die Vorteile dieses Mischverfahrens sind laut Seco GmbH:

- extrem kurze Mischzeit bei hoher Mischgenauigkeit
- schonende Behandlung des Mischgutes
- sehr simple Mischvorrichtung da keine beweglichen Teile
- einsetzbar für viele unterschiedlich beschaffene Mischgüter

b. Ein leicht abgewandeltes aber dennoch ähnliches Mischverfahren nutzt der *Dynamic Air Blendcon* Luftmischer der Firma Dynamic Air Inc. Hierbei wird durch das einblasen von Druckluft in den Mischbehälter ein Anheben, Umwälzen und Tordieren des trockenen Schüttgutes bewirkt, welches so homogen vermischt wird. Die Abbildung 16 verdeutlicht dieses Prinzip. Wie zu erkennen ist, wird das Mischgut auch hier in eine Zirkulationsbewegung versetzt, man kann aber nicht von einer Fluidisierung sprechen. Bei fortgeschrittenem Mischvorgang wird die Teilchenbewegung allerdings beliebig und eine gute Durchmischung findet statt.

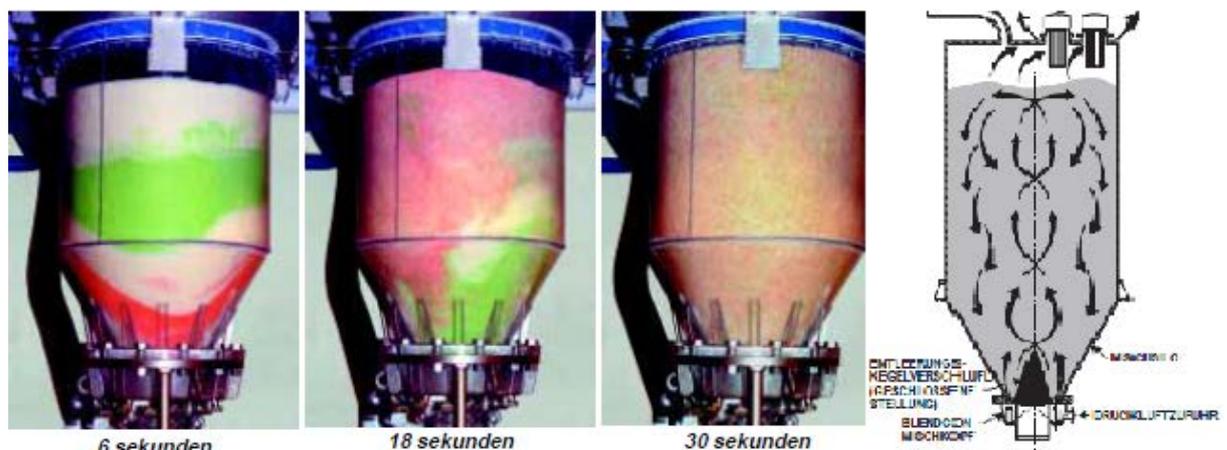


Abbildung 16: Luftmischer Dynamic Air Blendcon, Darstellung verschiedener Prozessstufen, Schematische Darstellung des Funktionsprinzips

Laut dem Datenblatt zu diesem Mischer (siehe Anhang), können sämtliche unterschiedliche Schüttgüter mit dieser Vorrichtung schonend gemischt werden. Alle weiteren wesentlichen Vorteile sind die gleichen wie bei dem Gasstrahlmischer.

c. Das Durchmischen einer Suspension kann sowohl durch schlichtes Rühren als auch durch die Druckluft-Blasentechnik erfolgen. Die Firma AGO Hydroair GmbH bietet zur Reduzierung von Sedimentation, Bodenablagerungen und Schwimmdecken mehrere technische Lösungen an. Eine davon ist die Druckluft-Blasentechnik. Diese Technik kommt oft zum Einsatz um zwei oder mehrere Flüssigkeiten oder Feststoffe in einer Flüssigkeit zu

vermischen. Feststoffe lassen sich dadurch besser in der Flüssigkeit in Schwebelage halten und die Dichte der Flüssigkeit wird vereinheitlicht, was für die Bildung einer homogenen Suspension vorteilhaft ist. Die Abbildung 17 stellt dieses Verfahren schematisch dar.

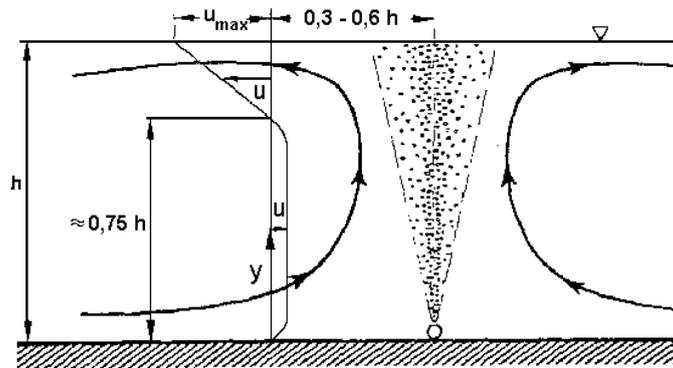


Abbildung 17: Luftdruck-Blasen Prinzip (AGO Hydroair GmbH 2015)

Hierbei wird Druckluft durch ein perforiertes Rohr geleitet. Die aufsteigenden Luftblasen fördern das Wasser aus den unteren Schichten mit nach oben und es entsteht ein Strömungsschema, welches die Dichteunterschiede in den Wasserschichten aufhebt. Diese entstehende Strömung sorgt für eine zirkulierende Bewegung der Feststoffe, wodurch sie vereinzelt und gemischt werden. (AGO Hydroair GmbH 2015)

3.3.2 Mischen und Vereinzeln von Fasern

A dieser Stelle finden die verschiedenen Möglichkeiten zur Mischung und Vereinzeln von Fasern Erwähnung, wie sie in der Industrie oder der Forschung zurzeit angewendet werden.

Grundsätzlich existieren mehrere Verfahren Fasermaterialien zu mischen und zu vereinzeln. Die während der Recherche zu dieser Arbeit betrachteten sind die Folgenden:

- Mischen mittels Kardierens oder Krempelns
- Mischen und Vereinzeln mittels des Airlay Verfahrens
- Erzeugen einer Fasersuspension durch einen Pulper
- Faservereinzeln durch Ultraschall

Wie in Kapitel 2.4.3 schon erwähnt, sind sowohl das Kardier- als auch das Airlay Verfahren in erster Linie Vliesbildungsprozesse. Aus den genannten Arbeiten, Patentschriften und Berichten in den Kapiteln 3.1 und 3.2 geht allerdings hervor, dass sich Fasern während dieser Prozesse auch mischen lassen. Für den Erfolg beider Verfahren müssen die Fasern eine gewisse Mindestlänge haben. Das Verfahren des Kardierens wie auch das Airlay Verfahren werden in Kapitel 2.4.3 bereits beschrieben. Zum Mischen werden diesen Vliesbildungsprozessen beide Fasersorten gleichzeitig in möglichst stark vereinzelter Form zugeführt. Diese Prozesse können zeitlich ausgedehnt oder wiederholt werden, um einen höheren Grad an Homogenität in der Mischung zu erreichen.

Die Aufgabe eines Pulper ist es, Fasern zu vereinzeln und zu durchmischen. Dieses Gerät wird vor dem Prozessbeginn mit Wasser gefüllt, um die vereinzelt Fasern nach Prozessende als Suspension vorliegen zu haben. Im der Abbildung 18 ist eine Schematische Darstellung des Prozesses gezeigt.

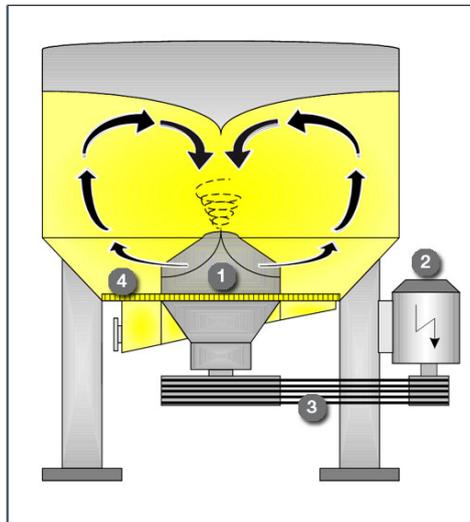


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Pulpers (GmbH 2011)

Am Boden des Pulpers befindet sich ein schneckenförmiger Rotor an dem die Faserklumpen aufbrechen. Durch die Drehung des Rotors wird eine vertikale Strömung des Faser-Wasser-Gemisches im Behälter erzeugt und das Gemisch wird in eine zirkulierende Bewegung versetzt. Dabei treffen die Fasern immer wieder auf den Rotor, wobei sie weiter vereinzelt und durchmischt werden. Die Papierindustrie nutze so genannte Pulper zur Rückgewinnung von Zellstoff aus Altpapier. Aber auch zur Nassvliesherstellung werden Pulper genutzt, um vor dem Vliesbildungsprozess die Suspensionen zweier unterschiedlicher Kurzfasersorten miteinander zu vermischen.

Eine weitere Möglichkeit Fasern in einem wässrigen Medium zu vereinzeln stellt die Behandlung durch Ultraschall dar. Werden Ultraschallwellen über einen Geber in ein mit Fasern versetztes wässriges Medium geleitet, so übertragen sich die Mikrovibrationen durch das Wasser auf jede einzelne Faser. Je nach Ausrichtung der Faser im Wasser wird dabei mehr oder weniger Kinetische Energie auf die Faser übertragen. Somit wird jede Faser in individuell ausgeprägte Schwingungen versetzt, wodurch sich diese voneinander separieren. Dieses Verfahren zeigt eine gute Wirkung bei Faserlängen <3 mm. (Albrecht 2000)

3.3.3 Vorangegangene Arbeiten

Die Thematik der Faservermischung zur Hybridvliesherstellung aus Flachs- und Kohlenstofffasern wurde abgesehen von dieser Arbeit bereits in zwei vorangegangenen Arbeiten behandelt. In Beiden Arbeiten wurde ebenfalls versucht das unterschiedliche Fasermaterial möglichst homogen miteinander zu vermischen.

Während der ersten Arbeit wird ein hydrodynamisches Verfahren zur Herstellung des Mischvlieses untersucht. Die Fasern werden hierbei in einem wässrigen Medium verteilt und mittels Rührens miteinander vermischt, bevor sie sich auf einem Sieb zur Vliesbildung ablegen. Die Durchführung dieses Verfahrens zeigt, dass eine homogene Verteilung beider Fasersorten im Wasser schwierig ist, da die Kohlenstofffasern hydrophil und die Flachsfasern hydrophob sind. Somit kommt es zu einer inhomogenen Fasermischung und zur Bildung eines ungleich verteilten Hybridvlieses.



Abbildung 19: Faservermischung im wässrigen Medium (V. Reichel) (Neumann 2014)

Die Abbildung 19 zeigt den Mischvorgang im Wasser und das Ergebnis nach sehr langer Prozessführung. Dieses Verfahren zur Mischvliesherstellung aus diesen beiden Fasersorten hat sich somit als ineffektiv herausgestellt.

Die zweite Arbeit schließt sich an die zuvor Genannte an und hat das Mischen der gleichen Flachsfasern und Kohlenstofffasern zum Ziel. Basierend auf den Erkenntnissen der ersten Arbeit wird sich hier für eine aerodynamische Prozessführung entschieden. Es wird eine Laboranlage entwickelt in der eine rotierende Luftströmung erzeugt werden kann um darin die Fasern aufzulösen und auch zu mischen. Wie sich zeigt, stellt das Vermischen der unterschiedlichen Fasern wieder die grundlegende Problematik dar. Reine Flachsfasern können zwar mit dieser Laboranlage aufgelöst und vereinzelt werden, die Erzeugung einer homogenen Mischung mit den Kohlenstofffasern ist allerdings nur bedingt und nach aufwendigen Vorbereitungsprozessen der rC-Fasern möglich. Die Abbildung 20 zeigt das Fasermaterial vor und nach der aerodynamischen Vermischung.



Abbildung 20: Faservermischung durch ein aerodynamisches Verfahren (Neumann 2014)

Weiterhin benötigt die Anlage eine Zeit von 6 min zur Auflösung von 3 g Flachsfasern, was die Erzeugung einer Faserflormenge, die zur Vliesbildung ausreicht, sehr Zeitaufwendig werden lässt. Die Mischung, die während dieser Arbeit mit der entwickelten Laboranlage durch ein aerodynamisches Prinzip erreicht wird ist zwar besser als die aus der vorangegangenen Arbeit, reicht allerdings zu einer Mischvliesherstellung noch nicht aus.

3.4 Recycling von Kohlenstofffasern

Da der Bedarf an Kohlenstofffasern in den nächsten Jahren weiter steigen wird, ist es wichtig die Forschung im Bereich der Recyclingverfahren und der Anwendung der recycelten Kohlenstofffasern, weiter voran zu treiben. (Fischer und Schmid 2013) (Rademacker 2012)

Die in dieser Arbeit verwendeten Kohlenstofffasern sind Produkt eines Recyclingprozesses, weshalb an dieser Stelle auf die Verfahren zur Gewinnung, die Anwendungsmöglichkeiten und die Eigenschaften dieser Fasern eingegangen wird.

Der aktuelle Stand der Technik kennt hauptsächlich drei unterschiedliche Methoden um Kohlenstofffasern aus einem bestehenden Matrix-Faser-Verbund zurück zu gewinnen. Das mechanische Recycling, das chemische Recycling und die Pyrolyse.

Beim mechanischen Recycling werden alte Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff mittels spezieller Mühlen so lange zerkleinert bis Flakes in der Größe zwischen 50µm - 10mm übrig bleiben. Da durch diese Methode die Fasern nicht vollständig von Harzresten getrennt werden können, wird das zurückgewonnene Fasermaterial nur als Füllstoff oder Verstärkungszusatz verwendet. (Emmerich und Kuppinger 2014) (Pimenta und Pinho 2010)

Das chemische Recycling hingegen ermöglicht die Rückgewinnung einer kompletten und sauberen Faser. Dies gelingt durch den Einsatz von Lösungsmitteln, welche die Bindungen der Harzmatrix aufbrechen und die Fasern so vom Polymer getrennt werden. Allerdings hat der Einsatz des Lösungsmittels bei dieser Methode einen schlechten Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit der Fasern. Beim Einsatz der zurück gewonnenen Fasern in neuen Verbundbauteilen kommt es zu schlechteren Anbindungen an das Harz.

Das momentan einzige industriell genutzte Recyclingverfahren für Kohlenstofffasern ist die Pyrolyse. Hierbei wird das Bauteil unter Luftabschluss auf 500°C – 600°C erwärmt, wodurch die polymere Matrix des Bauteils zersetzt wird und nur die Fasern zurückbleiben. Bei gut gewählten Prozessparametern sind die so zurück gewonnenen Fasern sauber und weitgehend unbeschädigt. Momentan existieren zwei Möglichkeiten die benötigte Temperatur in das Material einzubringen. Während der Thermischen Pyrolyse wird das Bauteil in einem Pyrolyse Ofen auf die nötige Temperatur erwärmt. Dem gegenüber steht die Mikrowellen-Pyrolyse. Durch das gezielte Eindringen der Mikrowellen wird die Temperatur direkt innerhalb des Materials erzeugt, was die Prozesszeit reduziert und Rauchentwicklung verhindert. Allerdings weisen Fasern die durch Mikrowellen-Pyrolyse zurückgewonnen wurden deutlich schlechtere Mechanische Eigenschaften auf als die gleichen Fasern nach der Thermischen-Pyrolyse. Beide Methoden verursachen eine Reduktion des Faserquerschnittes und eine Verminderung der Mechanischen Eigenschaften im

Vergleich zu neuen Kohlenstofffasern. Deswegen und wegen der Tatsache, dass nur Kurz- oder Langfasern aus den Recyclingprozessen hervorgehen, muss von Downcycling gesprochen werden. (Emmerich und Kuppinger 2014)

Trotz der verminderten Qualität finden zurückgewonnene Kohlenstofffasern Anwendung bei der Herstellung von Vliesstoffen, als Füllmaterial von Kunststoffen oder als Additiv, um die elektrische Leitfähigkeit von Bauteilen zu verbessern. Die in dieser Arbeit betrachteten zurückgewonnenen Kohlenstofffasern sollen allerdings die mechanischen Eigenschaften eines Vlieshalbbezeuges verbessern. Das entsprechende Datenblatt ist im Anhang zu finden.

4. Methoden

Das Ziel besteht darin, eine Möglichkeit zu finden, das vorhandene Fasermaterial homogen zu vermischen, um anschließend ein Mischvlies zu bilden. Die Aufgabe besteht also in der Entwicklung eines Verfahrens zur Mischvlies-Herstellung. Dabei spielt die Art und Beschaffenheit des zu mischenden Fasermaterials eine entscheidende Rolle. In diesem Kapitel wird zunächst auf die Eigenschaften des Fasermaterials eingegangen um anschließend die Prozesse der Verfahrensentwicklung näher zu beleuchten.

4.1 Verwendetes Fasermaterial

Das Fasermaterial, das zur Untersuchung hinsichtlich der Mischbarkeit zur Verfügung steht, unterteilt sich in vier Gruppen. Die recycelten Kohlenstofffasern der Länge 15mm (rCF-15), die recycelten Kohlenstofffasern der Länge 6mm – 60mm (rCF-60), Die neuen Kohlenstofffasern der Länge 15mm (HT15) und die Flachsfasern. Die verschiedenen Fasern, ihre Eigenschaften und die Gefahren, die von ihnen ausgehen werden im Folgenden kurz beleuchtet.

4.1.2 recycelte Kohlenstofffaser

Es werden zwei verschiedene Längen der gleichen recycelten Kohlenstofffaser sowie einheitlich zugeschnittene neue Kohlenstofffasern verwendet. Die recycelten Fasern der Länge 15mm werden im Folgenden „rC15“ genannt und sind auf der linken Seite der Abbildung 21 zu sehen. Die recycelten Fasern der Länge 6mm – 60mm heißen im Weiteren „rC60“ und sind in der Mitte der Abbildung 21 gezeigt. Die Neufasern (HT15), sind auf der rechten Seite gezeigt und haben eine einheitliche Länge von 15mm. Ein Datenblatt zu den recycelten Fasern ist im Anhang zu finden. Es ist zu erkennen, dass die angegebenen Werte für die mechanischen Eigenschaften etwas geringer sind als die der Neufasern aus Tabelle 1. Allerdings treffen diese Werte nicht auf die Fasern zu, die während des Recyclingprozesses eventuell beschädigt wurden. Daher treffen die vom Lieferanten gemachten Angaben über die einzelne Faser nicht auf 100% der Fasern zu. Ein weiterer Unterschied im Vergleich mit Neufasern ist die fehlende Schlicht. Neue Kohlenstofffasern sind mit einer Schlichte (Sizing) aus Epoxidharz überzogen um sie vor Aufspießen zu schützen und um den Verarbeitungsprozess sowie die Anbindung an das Harzsystem zu erleichtern. (Hackl 2007) Diese Schlichte geht während des oben beschriebenen Pyrolyseprozesses verloren. Die gelieferten Beutel der rC15 und rC60 Fasern enthalten eine beträchtliche Menge feinen Faserstaubs der die Frage nach der gesundheitlichen Verträglichkeit aufwirft auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Abbildung 22 zeigt drei REM-Bilder der rC15 Fasern samt Staubpartikel. Das mittlere Bild zeigt, dass trotz des Pyrolyseverfahrens noch Harzreste an den Fasern zu finden sind. Aus dem rechten Bild wird die Größe und Anzahl der Staubpartikel deutlich und das linke Bild zeigt die vom Pyrolyseprozess beschädigte und unebene Oberfläche einer einzelnen Faser. Die drei Bilder sind im Anhang größer und mit Angaben zum Maßstab zu finden.



Abbildung 21: Kohlenstofffasermaterial. links: rC15, mitte: rC60, rechts: HT15

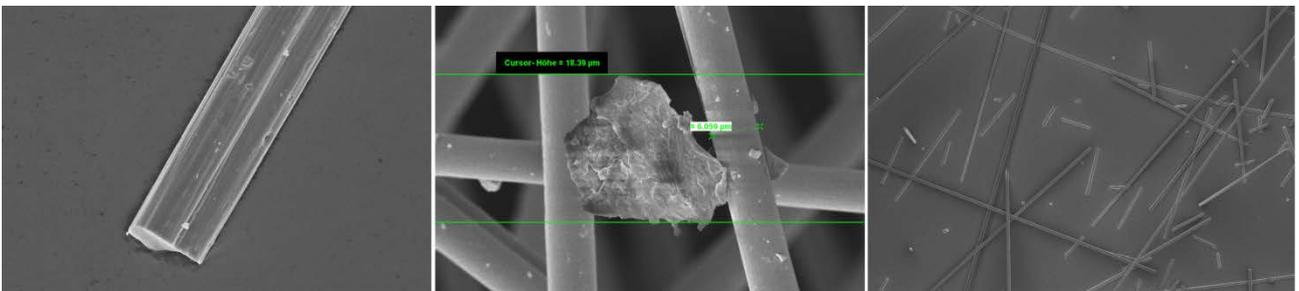


Abbildung 22: REM Aufnahmen der rC15 Fasern. links: Faseroberfläche, mitte: Harzreste, rechts: Staubpartikel

4.1.3 Gesundheitliche Verträglichkeit

Kohlenstofffasern stellen solange keine Gefahr für die Gesundheit dar, wie sie in einem Faserverbundmaterial durch ein Harzsystem vollständig umschlossen und somit gebunden sind. Während mechanischer Bearbeitungsvorgänge, wie Sägen, Feilen oder Fräsen entsteht allerdings Partikel- und Faserstaub, der als gesundheitsschädlich gilt. Der Staub, kann bei Kontakt Hautreizungen verursachen, da die Poren der Haut von den feinen Staubpartikeln zugesetzt werden. Laut der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) wird der entstehende Partikelstaub in zwei Gruppen unterteilt. Der alveolengängige Staub besteht aus Partikeln die kleiner sind als $10\ \mu\text{m}$ und somit bis in die Lungenbläschen vordringen können. Hierfür ist der Grenzwert auf $3\ \text{mg}/\text{m}^3$ festgesetzt. Der einatembare Staub besteht aus Partikeln die größer sind als $10\ \mu\text{m}$ und hat einen Grenzwert von $10\ \text{mg}/\text{m}^3$. Kohlenstoff kann von dem Körper nur schwer als Fremdkörper identifiziert werden, weshalb es dazu kommen kann, dass Staubpartikel sich in der Lunge festsetzen und dort bleiben. Für die Atemwege stellt dieser Staub also eine große Gefährdung da. Diese Definition der Gefährdung geht von der WHO aus und kann auf der Internetseite dieser Organisation nachgelesen werden.

Besondere Gefahr geht von verbrannten Kohlenstofffaserverbundkunststoffen aus. Hierbei kann es dazu kommen, dass die Kohlenstofffasern im Faserstaub ähnliche Geometrien wie die der Asbestfaser annehmen. Durch die spezielle Geometrie der Asbestfaser richtet sie sich im Luftstrom längs der Strömung aus und gelangt auf diese Weise besonders tief in die Lunge, wo sie das Wachstum von Tumoren auslösen kann. Nach der Weltgesundheitsorganisation (WHO) gelten Fasern als Krebserregend, wenn sie dünner als 3 µm, dabei mindestens 10 µm lang sind und ein Länge-Durchmesser-Verhältnissen von größer als 3:1 aufweisen.

Da die, in dieser Arbeit, verwendeten zurückgeführten Kohlenstofffasern Produkt eines Pyrolyseprozesses sind, also unter Luftabschluss verbrannt wurden, liegt es nahe, die Geometrie dieser Fasern hinsichtlich der oben genannten Kriterien zu untersuchen. Das rechte Bild der Abbildung 22 ist im Rahmen der daraufhin veranlassten REM Analyse entstanden und zeigt die Fasern samt Partikel. Weder die hier zu sehende noch irgendeine andere der untersuchten Fasern entspricht den oben genannten Kriterien der WHO. Andernfalls hätte der bereits erwähnte hohe Staubanteil des gelieferten Materials den angemessenen Umgang mit den Fasern zur Durchführung der Versuche im Rahmen dieser Arbeit unmöglich gemacht. Dennoch stellt dieser Staub, aufgrund der Größe der Partikel von weniger als 10µm, eine Gefährdung für die Atemwege und die Lunge dar, weshalb Versuche mit diesen Fasern nur mit Atemschutz, Handschuhen und unter dem Abzug durchgeführt wurden.

Abgesehen von den Gesundheitlichen Aspekten, geht von dem Kohlenstofffaserstaub, aufgrund der leitenden Eigenschaften dieses Materials, die Gefahr aus, Kurzschlüsse in technischen Geräten zu verursachen und diese damit zu beschädigen.

4.1.1 Flachsfaser

Die in dieser Arbeit verwendeten Flachsfasern sind auf eine einheitliche Länge von 15mm geschnitten und in Abbildung 23 gezeigt. Im Vergleich mit dem Bild der rC15 Fasern aus Abbildung 21 fällt auf, dass sich die beiden Faserarten, trotz gleicher Länge, sehr voneinander unterscheiden. Das liegt an der unterschiedlichen Beschaffenheit der einzelnen Fasern selbst, welche in Abbildung 5 aus Kapitel 2.2.2 sehr gut zu erkennen ist. Die Flachsfasern bilden größere Büschel und hängen aufgrund ihrer zahlreichen Knicke, der unebenen Oberfläche und den Aufspießungen stärker untereinander zusammen. Außerdem besteht das gelieferte Material nicht nur aus der technischen Faser, sondern enthält auch wesentlich dickere Faserbündel. Ansonsten können diese Fasern mit den bereits gemachten Angaben aus Tabelle 2 in Kapitel 2.2.2 charakterisiert werden.



Abbildung 23: verwendetes Flachsfasermaterial

4.2 Verfahrensentwicklung

Die Entwicklung eines geeigneten Faserverteilungs- und Fasermischverfahrens stellt die grundlegende Herausforderung zu dieser Arbeit dar und erweist sich als komplexe Problematik. Wie in Kapitel 3.1.X zu sehen ist, wurde schon in zwei vorangegangenen Arbeiten versucht ein Verfahren zur Mischung des in Kapitel 4.1 erwähnten Fasermaterials zu entwickeln. Sowohl die hydrodynamischen als auch die aerodynamischen Ansätze zur Fasermischung erwiesen sich dabei als wenig praktikabel. Auf Basis der Erfahrungen, die während dieser Arbeiten gemacht wurden, auf Basis der Fasereigenschaften und den Angaben aus der Literatur und auf Basis der Erkenntnisse, die aus den aktuellen Studien, Technikumsanlagen und Patentschriften aus Kapitel 3 gewonnen werden können, wird im Folgenden eine erneute Betrachtung der Möglichkeiten zur Mischung der in Kapitel 4.1 beschriebenen Flachs- und rC-Fasern angestellt.

4.2.1 Anforderungen an das Verfahren

Bevor mit der Verfahrensentwicklung begonnen werden kann, muss zunächst festgelegt werden welchen Bedingungen und Restriktionen das Verfahren genügen muss. Mit anderen Worten: Was muss das Verfahren genau leisten und in welchem Rahmen bewegt sich dabei die Prozessführung. Hierbei wird im Folgenden in Anforderungen primärer und sekundärer Relevanz unterschieden. Es wird schon hier die Vliesbildung als potentielle Erweiterung zu der bestehenden Aufgabenstellung mit betrachtet.

primäre Anforderungen:

- Faservereinzelung
- Fasermischung
- (Vliesbildung)

sekundäre Anforderungen:

- stufenlose Einstellung des Mischungsverhältnisses
- akzeptables Menge/Zeit Verhältnis
- gute Handhabbarkeit der Anlage (entnehmen, reinige)
- kostengünstig
- sichere Prozessführung (Gefahr für Gesundheit und Technik)

Das Verfahren wird entwickelt um die primären Anforderungen zu erfüllen, wie diese erfüllt werden sollen geben die sekundären Anforderungen an. Ein *gute Handhabbarkeit* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Anlage leicht zu Befüllen und zu entleeren ist und dass eine Reinigung unter geringem Aufwand durchzuführen ist. Eine *sichere Prozessführung* hängt hierbei von den in Kapitel 4.1.3 gestellten Bedingungen zum Umgang mit Kohlenstofffaserstaub ab, um zum einen die Gefahr für die Gesund zu minimieren und zum anderen Beschädigungen technischer Geräte durch Faserflug der leitenden Kohlenstofffasern zu vermeiden. Die Möglichkeit einer sicheren Prozessführung ist Voraussetzung für den Betrieb der Anlage und stellt daher die wichtigste der sekundären Anforderungen dar. Demnach muss die Anlage klein genug sein, um den Betrieb unter einem Laborabzug zu gewährleisten. Die in Kapitel 4.2.2 getroffenen Entscheidungen zur Realisierung des Verfahrens werden demnach unter Berücksichtigung der sekundären Anforderungen gefällt.

4.2.2 Brainstorming

Da sowohl ein Nasses als auch ein Trockenes Verfahren zur Mischung bereits versucht worden sind, werden seitens der Aufgabenstellung keine weiteren Vorgaben oder Einschränkungen zur Verfahrensentwicklung gemacht. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten das Problem der Mischvliesherstellung zu behandeln, die strukturiert und bewertet werden müssen. Abhilfe kann hier eine morphologische Analyse leisten. Diese Analyse ist eine heuristische Methode, mit der sich ein Überblick über die komplexe Problemstellung und alle möglichen Lösungen verschafft werden kann. Die möglichen Lösungen werden zunächst vorurteilslos und ohne Wertung in eine Tabelle eingetragen, den so genannten morphologischen Kasten. Zu jedem Prozessschritt der untersuchten Mischvliesherstellung werden alle denkbaren Möglichkeiten zur Umsetzung in eine Zeile geschrieben. Somit werden alle aus den Kapiteln 2 und 3 bekannten Verfahren, die eine Umsetzung

der einzelnen primären Anforderungen ermöglichen könnten, in Tabelle 3 eingetragen, um einen Überblick über die bestehenden Möglichkeiten zu erlangen. Hierbei werden auch die in Kapitel 3.3.1 genannten Mischverfahren, die nicht primär zur Fasermischung gedacht sind, herangezogen, um eine größere Vielfalt an potentiellen Lösungswegen zu generieren.

Faserauflösung	Krempel	Aerodynamisch	Druckluft	Luftdruck-Blasen	Pulper	Ultraschall
Mischung	Karde	Aerodynamisch	Druckluft	Luftdruck-Blasen	Pulper	
Vliesbildung	Karde	Aerodynamisch (Airlay Verfahren)	Hydrodynamisch stationäres Sieb		Hydrodynamisch schräges Sieb	

Tabelle 3: Morphologischer Kasten zur Übersicht über alle denkbaren Möglichkeiten zur Mischvliesherstellung

Die Tabelle 3 stellt einen Morphologischen Kasten dar, der alle denkbaren Möglichkeiten zur Verfahrensentwicklung durch alle Kombinationen jeweils einer gewählten Zelle aus jeder Zeile aufzeigt. Die einzelnen gefundenen Möglichkeiten lassen sich anschließend bezüglich der sekundären Anforderungen bewerten, wodurch einige von weiteren Überlegungen ausgeschlossen werden können:

- Somit fallen alle Möglichkeiten die auf eine Vliesbildung mit Schrägsieb hinauslaufen weg, da eine solche Anlage im Rahmen dieser Arbeit, sowohl aus Kosten- als auch aus zeitlichen Gründen, nicht zu realisieren wäre, auch wenn aus Kapitel 3 ersichtlich wird, das Nassvliese vorzugsweise mit Schrägsieb gebildet werden.
- Auch die Faserauflösung und Mischung nach dem aerodynamischen Verfahren wird ausgeschlossen, da dies mit einem unzureichenden Mischergebnis nach einem langwierigen Prozess bereits versucht worden ist. Der Bau einer größeren, besser funktionierenden Anlage wäre denkbar, würde aber den Rahmen von Zeit und Kosten zu dieser Arbeit sprengen.
- Ebenso sprechen die Faktoren Zeit und Kosten gegen die Umsetzung einer Laboranlage, die an das Airlay Verfahren angelehnt ist. Zur Gewährleistung einer funktionierenden Prozessführung müsste diese Anlage in größeren Dimensionen ausgeführt werden, was nur zu Lasten einer sicheren Prozessführung und einer guten Handhabbarkeit gelänge.
- Auch kann die Faserauflösung durch einen Ballenöffner oder eine Krempel ausgeschlossen werden, da für dieses Verfahren sehr viel größere Fasermengen nötig sind. Ein solches Verfahren zur Vereinzelung von Fasern im Labormaßstab konnte während der Recherche nicht gefunden werden.

Zur Frage ob ein trockenes oder ein nasses Verfahren zur Faservereinzelung und Mischung verfolgt werden soll, können die in Kapitel 4.1 beschriebenen Fasereigenschaften herangezogen werden. Die Flachfasern haben eine Länge von 15mm und die recycelten Kohlenstofffasern stehen sowohl mit

einer Länge von 15mm, wie auch mit einer Länge von 6mm – 60mm zur Verfügung. In Tabelle 4 sind die Längen der Fasern, welche in den Arbeiten, Patentschriften oder Berichten aus Kapitel 3 erwähnt werden, den jeweilig angewendeten Verfahren gegenübergestellt.

Quelle	Verfahren	Faserlänge
Patent II	Karde + Airlay	10mm – 200mm
Patent III	Hydrodynamisch (Mischung durch Rühren)	0,1mm – 30mm
Technikum (STFI)	Karde	30mm – 100mm
Technikum (TITK)	Hydrodynamisch	3mm – 15mm
	Airlay	20mm – 80mm
	Karde	40mm – 80mm
Paper A	Karde	51mm – 60mm
Paper B	Karde	60mm – 76mm

Tabelle 4: Verwendete Faserlängen der einzelnen Verfahren

Es ist zu erkennen, dass bei Faserlängen, die kleiner als 20mm sind, das Hydrodynamische Verfahren gewählt wurde. In Kapitel 2.4.4 sind weitere Eigenschaften genannt, welche die Fasern aufweisen müssen um sich für ein Hydrodynamisches Verfahren zu eignen. Diese Eigenschaften treffen zwar auf die glatten, steifen, hydrophilen Kohlenstofffasern zu, auf die gekräuselten, rauhen, hydrophoben Flachsfasern allerdings nicht. Auch die in Patent III erwähnte Bedingung, dass alle Fasern einer Sorte eine einheitliche Länge aufweisen sollten, trifft auf die Gruppe der 6mm – 60mm langen rC-Fasern nicht zu. Dem gegenüber steht, dass die Faserlänge von 15mm für eine Verarbeitung durch eine Karde sehr gering ist. Außerdem ist die mechanische Belastung für die Fasern beim Kardieren wesentlich höher als hydrodynamischen Prozessen.

Alles in allem kann gesagt werden, dass sich aus der Literatur und aus dem Stand der Technik keine Antwort auf die Frage nach einem nassen oder einem trockenen Verfahren finden lässt. Das Problem liegt in den Unterschieden der Eigenschaften der zwei vorliegenden Faserarten. Es werden somit beide Verfahrensarten weiter betrachtet, wobei ein besonderes Augenmerk auf die unkonventionellen Prozessführungen gelegt wird, die in Tabelle 3 genannt werden.

Die nach dieser Diskussion verbleibenden Möglichkeiten zur Umsetzung der einzelnen Prozesse im Labormaßstab werden in Vorversuchen auf ihre Realisierbarkeit geprüft. Hierbei wird der Focus auf die Faserverteilungs- und die Fasermischverfahren gelegt. Der Vliesbildungsprozess spielt zunächst eine untergeordnete Rolle und soll sich dann aus der Beschaffenheit des vorliegenden Fasergemisches ergeben.

4.2.3 Vorversuche

Die Vorversuche finden zu den folgenden verbleibenden Möglichkeiten zur Umsetzung eines Verfahrens der Faservereinzelung und Mischung statt:

- i Druckluft-Blasen Prinzip
- ii Pulper
- iii Druckluftmischer
- iv Ultraschall

Zu i: Zum Testen des, in Kapitel 3.3.1 c erklärten, Druckluft-Blasen Prinzips, wird ein perforierter Silikonschlauch an eine regelbare Druckluftleitung angeschlossen und in einen mit Wasser gefüllten Behälter gelegt. In das Wasser werden Flachfasern eingerührt und die Druckluftzufuhr wird vorsichtig geöffnet. Der entstehende Vorhang aus Luftbläschen erzeugt eine Strömung, welche die Fasern im Wasser über die Zeit vereinzelt. Der Vorversuch wird positiv gewertet und die Konstruktion einer entsprechenden Laboranlage soll erfolgen.

Zu ii: Das in Kapitel 3.3.2 erklärte Prinzip eines Pulpers wird durch einen Rührer getestet, der sich in einem, mit Wasser und Fasern gefüllten Becherglas befindet. Es zeigt sich, dass die vereinzeltende Wirkung auf die Fasern stark von der Drehgeschwindigkeit und der Form des Rührers abhängt. Es ist das Potential zu erkennen mit diesem Verfahren Fasern zu vereinzeln und eventuell auch zu mischen. Auch hier soll die Konstruktion einer entsprechenden Laboranlage erfolgen.

Zu iii: Um das Prinzip des Druckluftmischers aus Kapitel 3.3.1 b und c zu testen, wird komprimierte Luft mit einer Luftdruckpistole auf Fasern geschossen, die sich in einer großvolumigen Plastikbox befinden. Es zeigt sich, dass der Gasstrom die Fasern im Ansatz vereinzelt. Dies stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, weil die Fasern hierbei nicht einem wässrigen Medium zugeführt werden müssen. Es soll eine Laboranlage basierend auf diesem Prinzip konstruiert werden.

Zu iv: Das Prinzip Fasern mittels Ultraschallwellen im Wasserbad zu vereinzeln wurde an den vorhandenen Fasern ebenfalls getestet. Da dieses Prinzip oft angewendet wird, um Fasern im Wasser zu vereinzeln, wurde es ausführlicher untersucht. Es werden Ultraschallwellen in ein Gemisch aus 600ml Wasser und 0,2 g Fasern geleitet, wobei der Verteilungsgrad jeweils nach 2, 4 und 6 Minuten visuell beurteilt wird. Das findet sowohl für jede der drei vorliegenden Faserarten einzeln statt, als auch mit unterschiedlichen Intensitäten der Ultraschallwellen.

Es ist zu erkennen, dass der Prozess nur eine leichte Erhöhung der Faserverteilung bewirkt und dass nach 2 Minuten fast keine Veränderung des Verteilungsgrades mehr festzustellen ist. Auch das Mischverhalten der Fasern unter der Einwirkung der Ultraschallwellen wird mit geringem Erfolg getestet. Eine Erklärung kann die Größe der verwendeten Fasern liefern, da bei kleineren Fasern bessere Ergebnisse erzielt werden. Von der Umsetzung dieses Faserverteilungsverfahrens in einer Laboranlage wird daher abgesehen.

Vorversuche zum Prozess des in Kapitel 3.3.2 genannten Kardierens finden nicht statt, da es schwierig ist dieses Verfahren als Vorversuch zu realisieren. Dennoch soll eine solche Vorrichtung konstruiert werden, da der Kardier-Prozess bei fast allen, während der Recherche gefundenen Verfahren zur Mischvliesherstellung, zum Einsatz kommt. Des Weiteren stellt das Kardieren in dieser Arbeit die einzige realisierbare Möglichkeit zur Vliesbildung auf trockenem Wege dar. Laut Literatur lassen sich auch Fasern mit geringen Längen von 15mm auf einer Karde mit hoher Nadeldichte und langsamer Prozessführung verarbeiten.

Auf Grundlage der Erkenntnisse, die aus den Vorversuchen gewonnen werden und auf Basis der Informationen aus Literatur und Stand der Technik können abschließend zu diesem Kapitel vier mögliche Verfahren genannt werden, die als Laboranlagen umgesetzt werden sollen. Diese sind:

- Faservereinzelung und Mischung nach dem Druckluft-Blasen Prinzip
- Faservereinzelung und Mischung mittels Pulper
- Faservereinzelung und Mischung durch das Prinzip eines Druckluftmischers
- Mischung und Vliesbildung mittels Kardierens

Da all diese Verfahren nach Vorversuchen und Recherche ähnlich viel Erfolg versprechen, müssen sie alle an dieser Stelle der Suche nach einer Lösung zur Mischvliesherstellung, einem praktischen Test unterzogen werden. Diese unterschiedlichen Methoden zur Faserverteilung, Fasermischung und Vliesbildung können dann untersucht und miteinander verglichen werden, um das Ziel einer Mischvliesherstellung aus Flachs- und recycelten Kohlenstofffasern zu erreichen.

5. Umsetzung

Dieses Kapitel beschreibt die Konstruktion und den Betrieb der einzelnen Laboranlagen zu den in Kapitel 4.2 gefundenen Verfahren. Hierbei werden die Verfahren in trocken- beziehungsweise nass operierend unterteilt. Die trocken operierenden Verfahren sind zum einen das Vereinzeln und Mischen mittels Druckluft und zum anderen das Mischen und die Vliesbildung durch Kardieren. Die Nass operierenden Verfahren sind das Vereinzeln und Mischen einerseits durch einen Pulper und andererseits durch das Druckluft-Blasen Prinzip. Es werden die einzelnen Entwicklungsstufen und die durch den Betrieb gewonnenen Erkenntnisse zu jeder einzelnen Vorrichtung in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Die Konstruktionen der Anlagen finden unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.1 gestellten sekundären Anforderungen statt:

- stufenlose Einstellung des Mischungsverhältnisses
- akzeptables Menge/Zeit Verhältnis (vielleicht raus?)
- gute Handhabbarkeit der Anlage (entnehmen, reinige)
- kostengünstig
- sichere Prozessführung (Gesundheitsschädlichkeit)
- Realisierbarkeit

5.1 Trockene Prozessführung

Es sollen Laboranlagen konstruiert werden, mit denen die gefundenen trockenen Prozesse des Kardierens und der Fasermischung durch Druckluft umsetzbar sind.

5.1.1 Karde

Um eine Kardierung des vorliegenden Fasermaterials im Labormaßstab zu erreichen, genügt der Aufbau einer simpel angeordneten Kardiermaschine, wie sie meist im privaten Bereich Einsatz findet. Da solche Maschinen am Markt verfügbar sind, wird zunächst eine kurze Recherche zur Beschaffung und Kosten durchgeführt. Die Maschine wird mit einer Breite von ca. 12cm ausgeführt, um die Möglichkeit zu haben die entstehenden Vliese später mit den Vliesen aus vorherigen Arbeiten vergleichen zu können. Die Kosten für Kardiermaschinen dieser Breite liegen bei 400€ bis 500€ Aufgrund der geringen Faserlänge und der hohen Faserfeinheit der Kohlenstofffasern, muss die Oberfläche der Rollen einen hohen ppsi (pins per square inch) Wert aufweisen, die Nadeln müssen also sehr dicht beieinander liegen. Diese Eigenschaft treibt die Kosten für solch eine Maschine weiter in die Höhe.

Da die wichtigsten Elemente, wie Kardierbelege, Riemen, Rollen und Schrauben bereits vorhanden sind, kommt die eigenständige Konstruktion, mit zusätzlichen Materialkosten von nicht mehr als 50€ dem Anspruch nach Kosteneffizienz sehr entgegen.

Während der Berechnung zur Konstruktion werden die Daten wie Übersetzungsverhältnis und Oberflächengeschwindigkeitsverhältnis eines im Internet erhältlichen Modells, passend zu den bereits vorhandenen Teilen umgerechnet.

Die Daten zu der Kardiermaschine die hier als Vorlage dient sind aus der Produktbeschreibung ersichtlich und lauten:

- Durchmesser große Rolle: 20 cm
- Durchmesser kleine Rolle: 7,5 cm
- Übersetzungsverhältnis: 4,5 : 1
- Verhältnis der Oberflächengeschwindigkeiten: 12 : 1

Ziel der Konstruktion ist es bei anderen Rollendurchmessern für große und kleine Rolle das richtige Übersetzungsverhältnis zu finden, um das gleich Verhältnis der Oberflächengeschwindigkeiten von 12 : 1 zu erreichen.

Berechnung:

Die vorhandenen Rollen haben folgende Durchmesser und damit folgende Umfänge:

$$\begin{array}{ll} D_{\text{groß}} = 18 \text{ cm} & ; \quad D_{\text{klein}} = 6 \text{ cm} \\ U_{\text{groß}} = 56,55 \text{ cm} & ; \quad U_{\text{klein}} = 18,85 \text{ cm} \end{array}$$

Während einer Umdrehung der kleinen Rolle legt also ein Punkt auf ihrer Oberfläche eine Strecke von 18,85 cm zurück. Ein Punkt auf der Oberfläche der großen Rolle soll in der gleichen Zeit eine 12 Mal längere Strecke zurücklegen. Das heißt, dass bei einer Umdrehung der kleinen Rolle, ein Punkt auf der großen Rolle folgende Strecke zurücklegen soll:

$$18,85 \text{ cm} \cdot 12 = 226,2 \text{ cm}$$

Zum Erreichen dieser Strecke braucht die große Rolle genau 4 Umdrehungen.

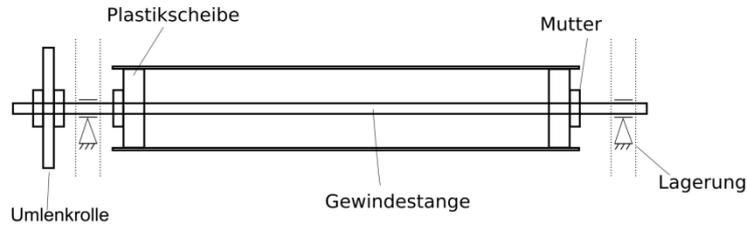
$$\frac{226,2 \text{ cm}}{56,55 \text{ cm}} = 4$$

Das richtige Übersetzungsverhältnis um das gleiche Verhältnis der Oberflächengeschwindigkeiten zu erhalten bei den gegebenen Rollen ergibt sich also zu 4 : 1.

Der vorhandene Kardierbelag liegt als Kardenband vor hat eine Nadeldichte von 72 ppsi und ist somit gut geeignet zur Kardierung des vorhandenen Fasermaterials. Das Kardenband wird mit Sekundenkleber auf der Oberfläche der vorliegenden Papprolle befestigt. Die Pläne zur Konstruktion sind schematisch in den Abbildungen 24 bis 26 dargestellt.

Kardenrollen:

kleine Rolle



große Rolle

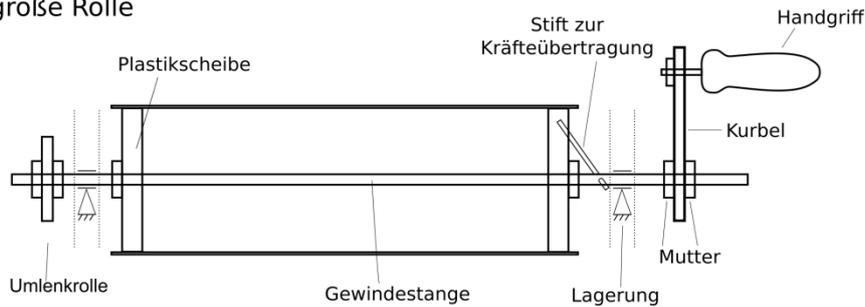


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Aufbaus der Kardenrollen

Die Abbildung 24 zeigt den schematischen Aufbau der Kardenrollen. Passenden Plastikscheiben werden von beiden Seiten in jede Rolle gesteckt und mit ihr verklebt. So lassen sich die Kardenrollen zentrisch auf die Gewindestange schieben. Da sich die Kardenrollen noch frei auf den Gewindestangen drehen können, müssen sie durch Muttern auf der Gewindestange festgeklemmt werden. Die Muttern werden zusätzlich durch Epoxidharz den Plastikscheiben und der Gewindestange verklebt, sodass das Moment von der Welle auf die Kardenrolle übertragen werden kann. Die auf der Zeichnung zu sehenden Umlenkrollen werden auf die gleiche Weise auf der Gewindestange befestigt. Auf die große Kardenrolle wird das Moment von einem Stift übertragen, der in einer schrägen Bohrung durch die Gewindestange steckt und in die Plastikscheibe verläuft. Dies ist in Abbildung 24 ebenfalls verdeutlicht. Die Kräfteinleitung soll über eine Kurbel erfolgen, die an einer Seite der Gewindestange befestigt ist, auf der die große Kardenrolle sitzt. Es ist sinnvoll, die Kurbel an der großen Kardenrolle zu befestigen, da aufgrund der Übersetzung, weniger Kraft aufgewendet werden muss, um die Maschine zu betreiben, als wenn die Kurbel an der kleinen, langsam drehenden Kardenrolle befestigt wäre. Die Lagerung der Welle findet durch vereinfachte Hülslager statt, die im Späteren näher beschrieben werden.

Aufbau und Realisierung der Übersetzung:

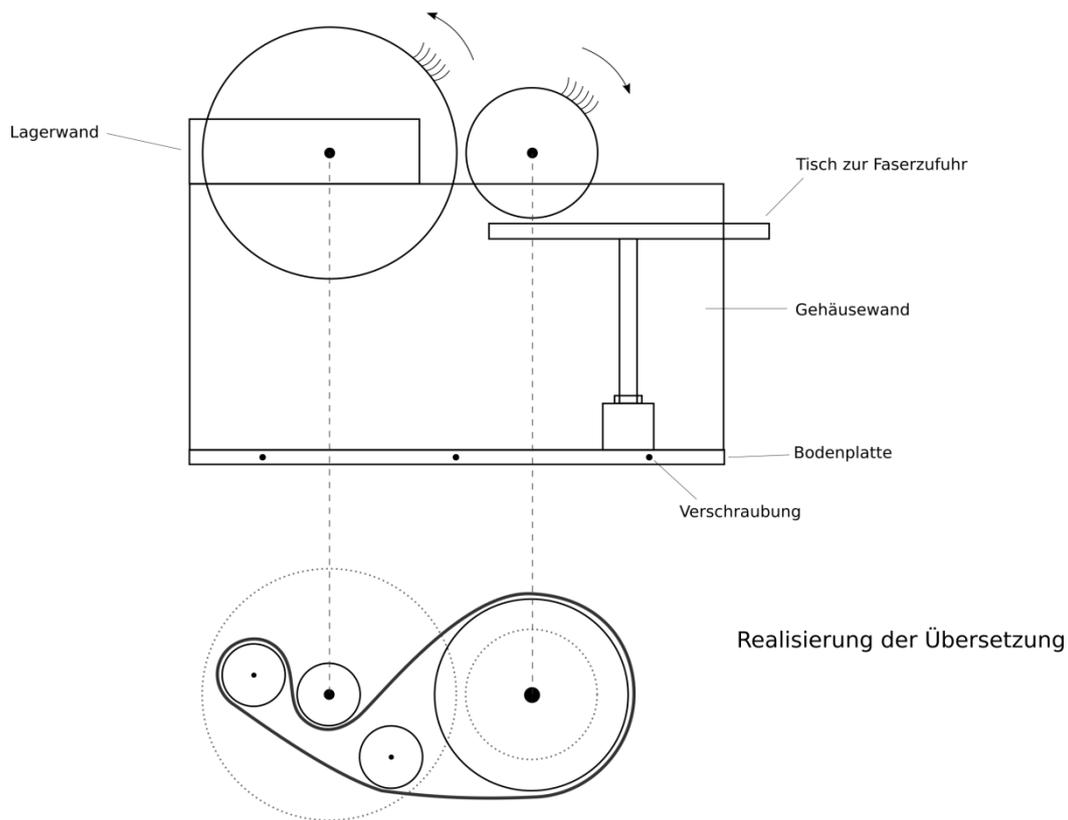


Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Kardiermaschine und der Realisierung der Übersetzung

Auf Abbildung 25 sind die grundlegende Anordnung der Maschine sowie die Realisierung der Übersetzung gezeigt. Die beiden Kardentrollen werden auf gleicher Höhe zwischen den Gehäusewänden gelagert. Das Gehäuse besteht aus lackierten Pressspanplatten und wird so simpel wie möglich gestaltet. Es soll die Möglichkeit bestehen die Maschine später mit einer Plexiglashaube abzudecken um in Bezug auf eine sichere Prozessführung Faserflug zu verhindern. Damit der Maschine die Fasern gut und leicht zugeführt werden können, wird ein waagerechter Tisch gebaut, der in der Höhe verstellbar ist und genau zwischen die zwei Gehäusewände passt. Somit kann das Fasermaterial gut von der kleinen Kardentrolle eingezogen werden.

Um die angedeutete Drehrichtung und die berechnete Übersetzung von 4 : 1 zu realisieren wird ein Riemen wie in der Abbildung gezeigt zwischen vier Umlenkrollen gespannt. Hierbei haben die kleinen Umlenkrollen einen einheitlichen Durchmesser, die Große Umlenkrolle, die mit der kleinen Kardentrolle auf einer Welle sitzt, hat einen viermal größeren Umfang, was zu der Übersetzung von 4 : 1 führt. Zur Realisierung der unterschiedlichen Drehrichtungen muss der Riemen umgelenkt werden bevor er auf die große Rolle geführt wird. Daher werden drei kleine Rollen und nicht nur eine benötigt. Die mittlere der kleinen Rollen sitzt auf einer Welle mit der großen Kardentrolle und die beiden anderen sitzen lediglich jeweils auf einer Schraube, die von außen in die Gehäusewand geschraubt ist. Da es leichter zu konstruieren ist, sind die Umlenkrollen und der Riemen außerhalb des Gehäuses angebracht.

Lagerung:

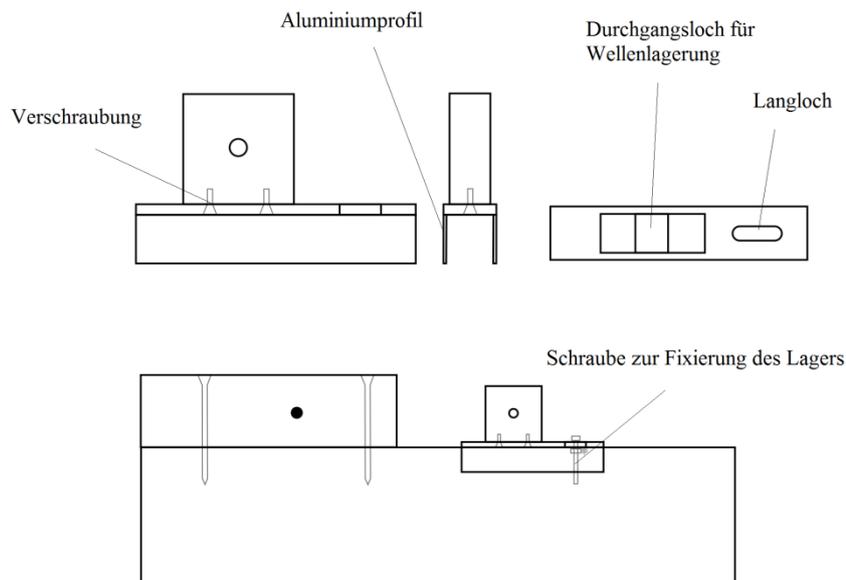


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Realisierung der Wellenlagerung

Die Abbildung 26 zeigt eine schematische Darstellung der Lagerung der Wellen auf denen die beiden Kardenrollen befestigt sind. Für die große Kardenrolle wird die Gehäusewand, wie in der Abbildung gezeigt, um ein Stück Pressspanplatte, in der ein passendes Loch gebohrt ist, erweitert. In dem Loch befindet sich ein Stück Kupferrohr, welches genau auf die Gewindestange passt und in dem eine Drehung der Welle möglich ist. Da der Abstand zwischen großer und kleiner Kardenrolle einstellbar sein soll, um verschiedene Eintauchtiefen der Nadeln ineinander zu ermöglichen, gestaltet sich die Umsetzung der Lagerung der kleinen Kardenrolle schwieriger. Hierzu wird ein Lager konstruiert, das aus einem Aluminiumprofil und einem durchbohrten Aluminiumblock besteht. Wie in Abb. Karde3 zu sehen ist passt das Aluminiumprofil genau auf die Gehäusewand und lässt sich somit horizontal verschieben. Dank eines Langloches im Aluminiumprofil und einer in der Gehäusewand eingeklebten Einschlagmutter, kann das Lager nach eingestelltem Abstand mit einer Schraube fixiert werden. Über eine Skala an der Gehäusewand lässt sich der Abstand auf beiden Seiten gleich einstellen. Somit kann der Kardierprozess mit unterschiedlichen Eintauchtiefen der Nadeln auf den beiden Kardenrollen getestet werden. Die Abbildung 27 zeigt ein Bild der fertigen Kardiermaschine.



Abbildung 27: Kardiermaschine

Betrieb:

Im Folgenden wird kurz auf die Funktionsweise und den Betrieb der konstruierten Kardiermaschine eingegangen.

Die zuvor vereinzelt Fasern werden über den Tisch der Maschine der kleinen Kardenrolle zugeführt. Diese zieht das wirt vorliegende Fasermaterial in die Maschine. Es ist wichtig die Fasern in vereinzelter Form bereit zu stellen, da kleine Ballen oder Faserhaufen die Maschine verstopfen können. Die Fasern sammeln sich zunächst auf der kleinen Rolle, von der sie dann durch die großen Rolle abgenommen werden. Auf dem Umfang der großen Rolle bildet sich bei längerer Prozessführung ein Vlies aus gerichteten Fasern. Dieser Prozess funktioniert für die Flachs und die rCF-60 Fasern, jedoch nicht für die rCF-15 Fasern, da diese sehr kurz und zu fein für die Vliesbildung nach diesem Verfahren sind. Die Flachsfasern haben zwar die gleiche Länge, sind aber dicker und verhaken sich aufgrund ihrer Eigenschaften gut ineinander, was eine Vliesbildung begünstigt. Der Betrieb dieser Maschine zeigt, dass es erst ab Fasermengen von $>25\text{g}$ zu einer Vliesbildung auf der großen Rolle kommt. Bei geringeren Mengen sind zu wenig Fasern vorhanden, um auf der Mantelfläche der großen Rolle ein gleichmäßiges Vlies zu bilden. Aufgrund der eng beieinander stehenden Nadeln auf den Rollen, ist das Abheben des Vlieses von der großen Rolle nach Beendigung des Kardierprozesses ein langwieriger Prozess. Um das Vliesgebilde nicht zu zerreißen muss es langsam mit einem Kamm von der großen Rolle entfernt werden. Es entsteht ein zusammenhängendes Faservlies mit Vorzugsrichtung, wie es in Abbildung 28 zu sehen ist. Somit ist diese Maschine geeignet um gerichtete Vliese aus dem vorhandenen Fasermaterial zu bilden.



Abbildung 28: Vliesbildung durch Kardieren

Die Versuche das Fasermaterial mittels Kardierens zu vermischen stellen sich als sehr umständlich und langwierig dar, weil der Prozess mit dem gleichen Material oft wiederholt werden muss um eine leichte Vermischung zu erzielen. Die Fasern neigen dazu in Flocken gleicher Art zusammen zu bleiben. Abbildung 29 verdeutlicht dies. Das entstehende Vlies muss dabei immer wieder von der Rolle abgenommen werden, um es erneut zu kardieren, damit eine Vermischung entsteht. Somit ist dieses Verfahren zur Erzeugung einer Fasermischung aus dem vorliegenden Fasermaterial eher ungeeignet.



Abbildung 29: Versuch eines Mischvorgangs durch Kardieren

5.1.2 Druckluftmischer

Die im Folgenden beschriebene Laboranlage soll das Prinzip der Druckluftmischung nutzen, wie es in Kapitel 3.3.1a beschrieben ist, um zu untersuchen ob sich die vorliegenden Fasern nach diesem Prinzip verteilen und/oder mischen lassen. Dieses Prinzip stellt kein herkömmliches Fasermisch- oder Faservereinzelungsverfahren dar, weshalb sich die Konstruktion an keiner bereits existierenden Maschine orientieren kann. Lediglich der Aufbau eines in Kapitel 3.3.1a beschriebenen Gasstrahlmischers kann als Basis zur Ideenfindung herangezogen werden. Während

der Planung der Konstruktion wird berücksichtigt, dass die Anlage sowohl kostengünstig als auch klein genug sein soll, um unter einem Abzug betrieben werden zu können. Um das Prinzip des Mischens mittels Druckluft in der Laboranlage umzusetzen, werden zu Beginn der Konstruktionsplanung einige konstruktive Restriktionen und Bedingungen festgelegt, an denen sich die Planung orientieren kann. Diese Anhaltspunkte lauten wie folgt und sind in Abbildung 30 graphisch dargestellt.

1. Die Druckluftzufuhr soll, wie bei anderen Maschinen, die ähnliche Prinzipien nutzen, von unten erfolgen
2. Der Behälter soll eine bauchige, zylindrische Form haben, damit die Druckluft gut expandieren kann.
3. Der Behälter soll über eine Möglichkeit verfügen, überschüssigen Druck wieder Abzulassen (Ventile)
4. Es muss eine Möglichkeit zum Öffnen und luftdichtem Verschießen des Behälters geben.

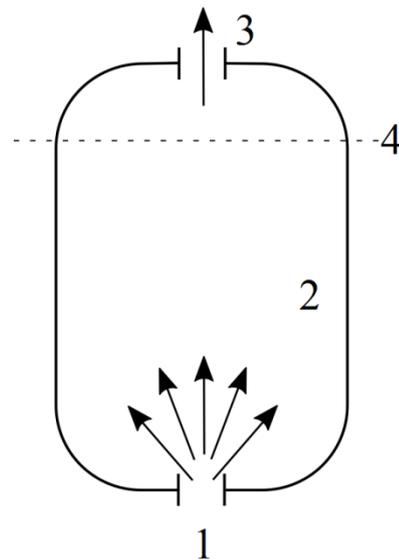


Abbildung 30: Prinzip des Druckluftmischers

Unter der Berücksichtigung dieser Vorgaben wird der Aufbau der Anlage in drei Segmente unterteilt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Die Schematische Darstellung in Abbildung 31 zeigt diese drei Teile.

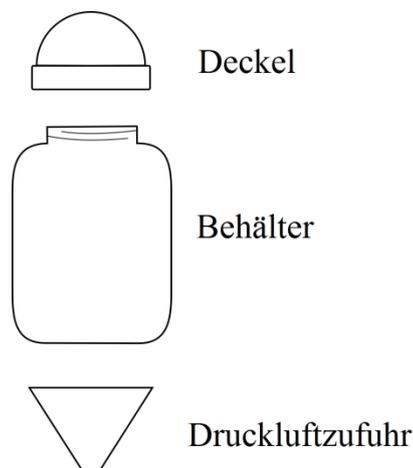


Abbildung 31: Unterteilung des Druckluftmischers in drei Segmente

Deckel:

Die Möglichkeit zum Öffnen und Schließen wird am oberen Ende des Behälters realisiert, da das ein leichteres Befüllen und Entleeren der Anlage garantiert. Um den Deckel fest an dem Behälter anbringen zu können, wird ein Gewinde genutzt. Da dieses Gewinde mit einer Gummidichtung versehen ist, kann auch der Luftabschluss gewährleistet werden. Zur besseren Umlenkung des Luftstroms am oberen Ende der Anlage, soll die rundliche Form des Behälters durch den halbkugelförmigen Deckel wieder aufgegriffen werden. Diese Halbkugel besteht aus klarem Acrylglas, was eine Beobachtung des im Behälter statt findenden Prozesses ermöglicht. Die Auswirkungen des Luftstroms auf die Fasern im Behälter werden so direkt ersichtlich und Parameter wie Druck, Fasermenge oder Prozessdauer können schneller angepasst werden.

Behälter:

Der bauchige, zylindrische Behälter besteht aus weißem Kunststoff und hat ein Fassungsvermögen von ca. 7 Litern. Der Boden des Behälters wird entfernt um die im nächsten Absatz genannte Druckluftzufuhr anbringen zu können. Die Form des Behälters bietet der einströmenden Luft genug Platz, um durch turbulente Wirbel kinetische Energie auf die Fasern zu übertragen. Da es keine Ecken oder Kanten gibt, begünstigt die Form die Ausbildung eines gleichmäßig über das Volumen des Behälters verteilten Strömungsfeldes.

Es wird ein waagrecht angeordnetes Sieb über den gesamten Querschnitt im unteren Bereich des Behälters angebracht, unter der Annahme die verwirbelten Fasern könnten sich nach Beendigung des Prozesses darauf gleichmäßig ablegen. Dazu wird der Behälter der Breite nach aufgeschnitten und ein Metallsieb wird zwischen die beiden entstandenen Teile geschraubt. Es zeigt sich allerdings, dass das Sieb fast die komplette Energie des Luftstroms abfängt und die Fasern keine vertikale Bewegung erfahren. Die getroffene Annahme stellt sich somit als falsch heraus und die Konstruktion wird ohne Sieb verwirklicht.

Druckluftzufuhr:

Um alle Fasern im Behälter durch den Luftstrom zu erfassen muss der untere Teil der Anlage spitz zulaufen. Dieser Teil ist trichterförmig ausgeführt, damit die herabfallenden Fasern immer wieder dem einströmenden Luftstrom zugeführt werden. Der Trichter wird von unten mit dem Behälter der Anlage verklebt. Am unteren Ende des Trichters befindet sich eine Öffnung, an der die Druckluftzufuhr angeschlossen werden kann. Auch der Trichter ist, wie die Halbkugel am Deckel, transparent, wodurch die während des Prozesses stattfindenden Effekte beobachtet werden können. Während des Baus und einigen Testläufen fällt auf, dass der Trichter einen größeren Öffnungswinkel aufweisen muss als der einströmende Gasstrahl. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu den in Abbildung 32 gezeigten Effekten.

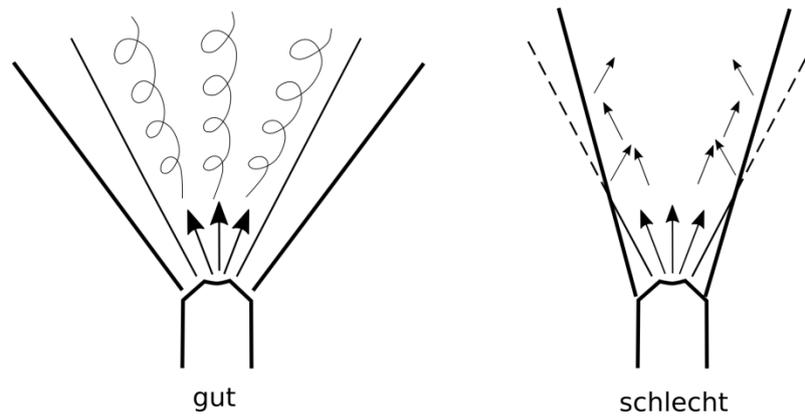


Abbildung 32: Darstellung der Strömungseffekte bei verschiedenen Öffnungswinkeln des Trichters

Die Druckluft wird durch das Einblasen in den Behälter schlagartig auf Umgebungsdruck expandiert, was zur Bildung von Turbulenzen führt. Diese Turbulenzen begünstigen ein Vermischen der Fasern mit der Luft und reißen die Fasern mit nach oben. Ist der Öffnungswinkel des Trichters zu klein, trifft die Luft am Rand des Strahlkegels auf die Trichterinnenwände und wird reflektiert und umgelenkt (siehe rechte Seite in Abbildung 32). Somit kommt es zu turbulenten Strömungen, die den gewollten Luftwirbeln entgegengerichtet sind und diese abschwächen. Die Interaktion der Strömung mit der Trichterwand führt dazu, dass auf die Fasern nahezu keine kinetische Energie übertragen wird und muss daher verhindert werden. Der Trichter wird also mit einem ausreichend großen Öffnungswinkel verwirklicht, wie auf der linken Seite der Abbildung 32 gezeigt ist.

Die untere Öffnung des Trichters ist genau so groß, dass sich der Kopf einer Druckluftpistole dort hinein stecken lässt. An dieser Stelle eine Druckluftpistole zu verwenden ist sinnvoll, da so sehr leicht die Intensität des Luftstrahls und die Prozessdauer geregelt werden kann. Dies verbessert die Handhabbarkeit der Anlage da verschiedene Parameter während des gleichen Prozessdurchlaufs getestet werden können.

Druckausgleichsöffnungen:

Auf die Anforderung an die Konstruktion, den steigenden Druck im Behälter abbauen zu können, wird nun eingegangen. Der Druck soll sich über kleine Bohrungen mit 3mm Durchmesser ausgleichen können. Damit die ausströmende Luft den Strömungsverlauf im Inneren des Behälters so wenig wie möglich beeinflusst, müssen die Bohrungen klein und symmetrisch angeordnet sein. Hierbei stellt sich die Frage an welcher Position der Anlage diese Druckausgleichsbohrungen am sinnvollsten sind. Es wurden zwei verschiedene Positionen untersucht. Zum einen am oberen Bereich des Behälters und zum anderen so weit unten am Trichter wie möglich. Diese Beiden Varianten sind schematisch in Abbildung 33 gezeigt.

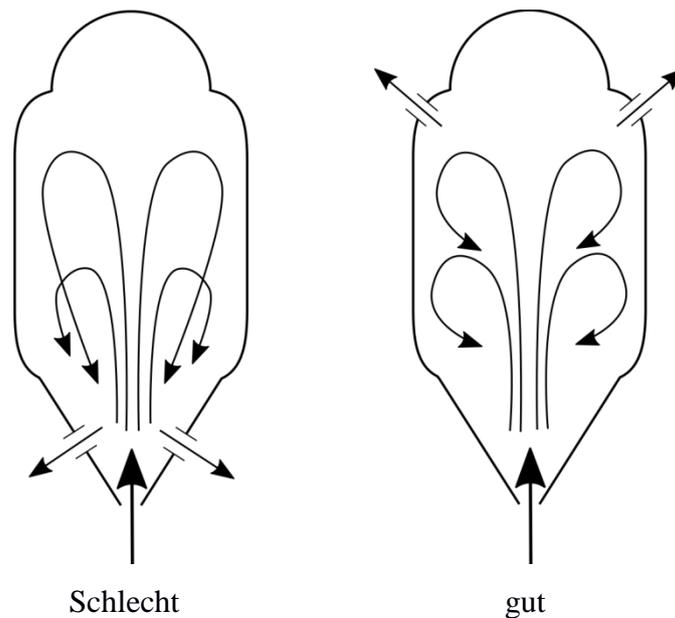


Abbildung 33: Strömungsbildung bei unterschiedlicher Anordnung der Druckausgleichsbohrungen

Durch die Anordnung der Bohrungen am unteren Ende der Anlage soll erreicht werden, dass die Luft einen möglichst weiten Weg durch die Anlage nehmen muss, bevor sie wieder ausströmt und dass die Fasern die Bohrungen nicht zusetzen können, da sie während des Prozesses davon weggeblasen werden. Testläufe zeigen dass diese Annahmen falsch sind. Sind die Bohrungen am unteren Ende der Anlage angeordnet kommt es dazu, dass sich die Fasern vor den Bohrungen sammeln und durch den eingeblasenen Luftstrom, der am Deckel umgelenkt wird, von oben nach unten an den Boden der Anlage gedrückt werden, wie in der linken Darstellung in Abbildung 33 angedeutet ist. Im unteren Bereich des Trichters bildet sich ein Ring aus Fasermaterial, durch dessen Loch die Druckluft strömt. Die Fasern werden also nicht im Inneren des Behälters vereinzelt. Sind die Bohrungen hingegen am oberen Bereich des Behälters angeordnet, so tritt dieser Effekt nicht auf.

Filter:

Die Bohrungen sind zwar zu klein für die Fasern aber es befindet sich unter dem verwendeten Fasermaterial auch Kohlenstofffaserstaub, wie er in Kapitel 4.1.3 beschrieben wird, dessen Partikel klein genug sind um die Bohrungen zu passieren. In Kapitel 4.1.3 wird weiterhin erwähnt, dass dieser Staub gesundheitsschädlich ist. Da eine sichere Prozessführung eine der sekundären Anforderungen ist, die an die Konstruktion der Anlage gestellt werden, müssen Filter installiert werden. Um die Strömung im Behälter nicht zu beeinflussen werden die Filter von außen angebaut. Die Filter werden so umgesetzt, dass sie leicht auszuwechseln sind. Abbildung 34 zeigt diese Umsetzung.

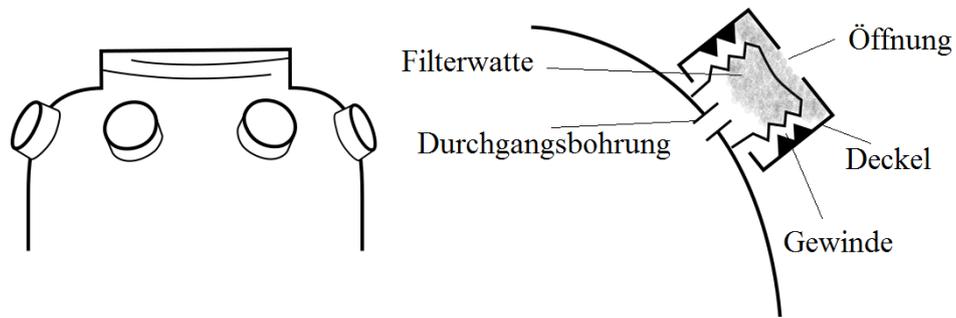


Abbildung 34: Realisierung der Filterung

Da die Filter bei gleichem Druck einen geringeren Luftmassenstrom aus dem Behälter zulassen, wird die Anzahl der Bohrungen von 4 auf 6 erhöht. Somit ist eine sichere Prozessführung gewährleistet.

Betrieb:

In Abbildung 35 ist die fertige Laboranlage zu sehen. Testläufe zeigen, dass Fasermengen bis zu 6 g innerhalb weniger Sekunden einem sehr guten Vereinzelnungsgrad zugeführt werden können.



Abbildung 35: Laboranlage Druckluftmischer mit geöffnetem Deckel

Die Begrenzung der Fasermenge, die in einem Prozess zu verarbeiten ist, wird von der Größe des Volumens des Behälters vorgegeben. Wie bei dem in Kapitel 3.3.1a beschriebenen Gasstrahlmischer, wird bei dieser Prozessführung eine Fluidisierung des Fasermaterials erreicht. Die Fasern mischen sich mit der turbulenten Luftströmung, wobei sich dieses entstehende Gemisch ähnlich wie ein Gas verhält. Dadurch kommt es zu Effekten der Durchmischung, welche die Fasern vereinzeln. Die Fluidisierung kommt nur dann zu Stande, wenn das Fasermenge/Volumen

Verhältnis dies zulässt. Weiterhin nimmt die Fasermenge aus vereinzelt Fasern nach Prozessende ein sehr viel größeres Volumen ein als die nicht vereinzelt Fasern, was auch dazu führt, dass die Grenze des Behältervolumens schnell erreicht ist. In Abbildung 36 sind die unterschiedlichen Volumina der Fasermengen mit jeweils 4g des gleichen Fasermaterials gezeigt. Gut zu erkennen ist auch der Grad der Vereinzeltung.

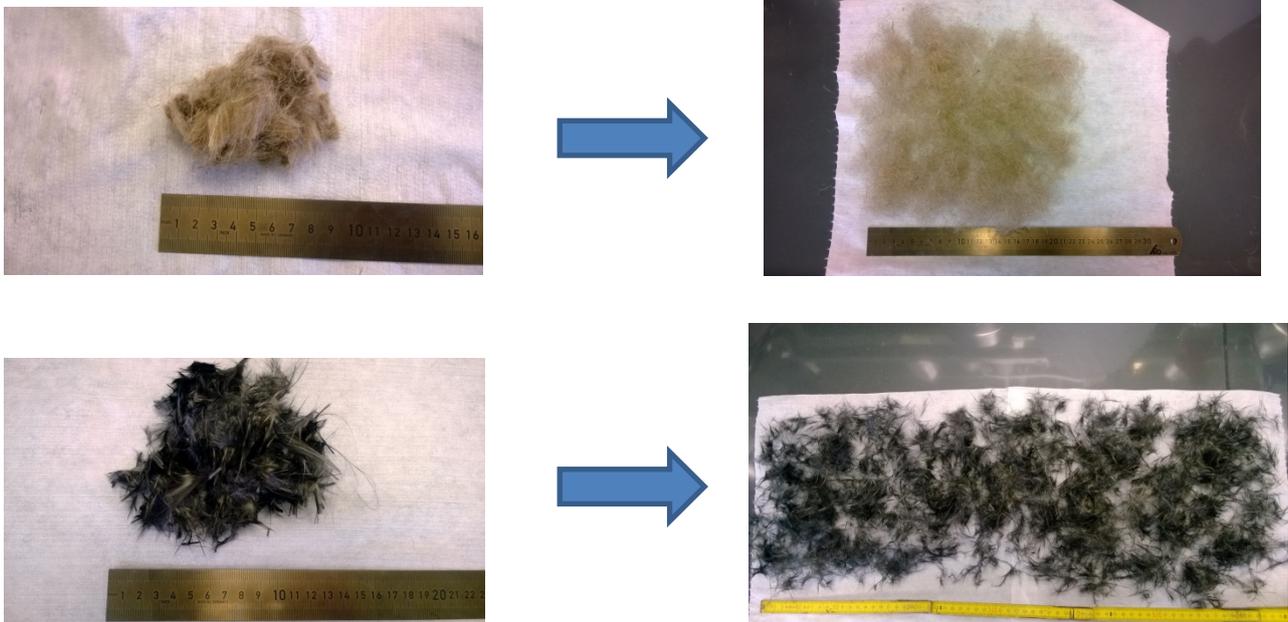


Abbildung 36: Unterschiedliche Faservolumina vor und nach dem Vereinzeltungsprozess durch den Druckluftmischer. oben: Flachsfasern, unten: rC60

Es zeigt sich weiterhin, dass ein Druck von 3,5 bar am besten für die Durchführung des Prozesses mit dieser Anlage geeignet ist. Bei zu viel Druck werden die Fasern von innen an den Deckel der Anlage gedrückt und es kann zu Verknotungen der Fasern kommen. Außerdem ist der Konstruktion, was das Ertragen der Last durch den hohen Druck angeht, Grenzen gesetzt.

Testläufe mit verschiedenen Fasermaterialien zeigen, dass es möglich ist, nach diesem Verfahren Flachs und Kohlenstofffasern in einem hohen Vermischungsgrad und in einem stufenlos einstellbaren Verhältnis miteinander zu vermischen. In Abbildung 37 ist eine solche Mischung gezeigt.



Abbildung 37: Erzeugte Fasermischung aus 25% rCF60 und 75% Flachsfasern

Zwar weisen die rCF-15, rCF-60 und die Flachsfasern jeweils unterschiedliche Aerodynamische Eigenschaften auf, doch relativieren sich diese Unterschiede angesichts der hohen kinetischen Energie, die durch die turbulente Strömung in die Fasermengen eingebracht wird. Beste Ergebnisse werden erzielt wenn die reinen Fasern in einem Prozess vereinzelt und in einem anschließenden Prozess gemischt werden. Diese Anlage eignet sich also sowohl dazu die Fasern des vorliegenden Fasermaterials zu vereinzeln, als auch diese miteinander zu vermischen.

5.2 Nasse Prozessführung

In diesem Kapitel geht es um die konstruktive Umsetzung der in Kapitel 4.2 gefundenen nassen Verfahren des Pulpers und des Luftdruck-Blasen Prinzips in Form von Laboranlagen mit dem Ziel Fasern zu vereinzeln und zu mischen.

5.2.1 Luftdruck-Blasen Prinzip

Das in Kapitel 3.3.1c beschriebene Luftdruck-Blasen Prinzip soll in einer Laboranlage umgesetzt werden, um die verteilende und vermischende Wirkung dieses Prinzips auf das vorliegende Fasermaterial zu untersuchen. Auch dieses Prinzip stellt kein herkömmliches Verfahren zur Mischung oder Verteilung von Fasern dar, weshalb auch keine Anlagen oder Maschinen existieren, die als Konstruktionsgrundlage herangezogen werden könnten. Allein das in Kapitel 3.3.1c beschriebene Prinzip zur Blasenenerzeugung mit Druckluft, die durch einen perforierten Schlauch geleitet wird, soll so in der hier entwickelten Anlage Anwendung finden. Um das Luftdruck-Blasen Prinzip in einer Laboranlage umzusetzen, werden vor der Konstruktion einige Bedingungen, an denen sich die Konstruktionsplanung orientieren kann, festgelegt.

Da zur Bildung einer homogenen Faser/Wasser Suspension große Wasservolumina benötigt werden, siehe Kapitel 2.4.4, wird entschieden, dass der Vliesbildungsprozess in dieser Anlage mit integriert wird, um ein Umfüllen der großen Wassermenge zu vermeiden. Weiterhin würden durch ein Umfüllen Strömungen entstehen, welche die homogene Suspension stören könnten. Laut der Angaben die in Kapitel 2.4.4 gemacht werden, wird ein Faser/Wasser Verhältnis zwischen 0,2g/l –

0,8g/l zur Bildung einer homogenen Suspension benötigt. Da die Kohlenstofffasern gute und die Flachfasern schlechte Eigenschaften für die nasse Verarbeitung aufweisen, wird hier zunächst von einem Verhältnis von 0,5g/l ausgegangen. Um Mengen von 5g Fasermaterial zu verarbeiten, wird also ein Volumen von mindestens 10l Wasser benötigt. Die im Wasser dispergierten Fasern sollen sich langsam nach unten auf einem Sieb absetzen und das Vlies bilden. Je kleiner die Siebfläche ist, desto größer wird das erreichbare Flächengewicht des Vlieses. Da nur geringe Fasermengen verarbeitet werden können, muss die Siebfläche verhältnismäßig klein sein. Es wird also ein Behälter mit großem Volumen und geringer horizontaler Querschnittsfläche benötigt. Daraus ergibt sich die Bedingung nach einer hohen Bauform. Die Bedingungen an die Konstruktion stellen sich demnach wie folgt dar und sind in der Abbildung 38 schematisch in einer Skizze zusammengefasst.

1. Schmale und Hohe Bauform
2. Transparente Wände, um den Prozess zu beobachten und untersuchen zu können.
3. Druckluftzufuhr durch die Behälterwand am unteren Ende des Behälters, Druckluftschläuche verlaufen am Behälterboden
4. Wasserablass am Behälterboden, um das Wasser langsam und kontrolliert abzulassen
5. Sieb über den Druckluftschläuchen

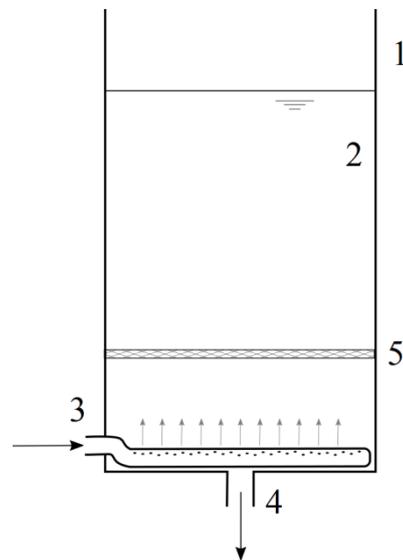


Abbildung 38: Luftdruck-Blasen Mischer

Behälter:

Der Behälter besteht aus vier gleich großen Acrylglasplatten, die erst miteinander und anschließend mit einer Bodenplatte verklebt werden. Die so entstehende quadratische Querschnittsfläche hat eine Kantenlänge von 20cm. An der Seite des Behälters wird eine Skala aufgetragen, um den Füllstand und demnach die Fasermenge bemessen zu können. Der Behälter muss wasserdicht und stabil genug verklebt werden, um dem Gewicht von bis zu 15l Wasser zu widerstehen.

Druckluftzufuhr:

Da die Druckluftschläuche zur Blasenenerzeugung waagrecht am Boden des Behälters verlaufen sollen, muss die Druckluftzufuhr am unteren Ende des Behälters durch die Acrylwand geführt werden. Hierbei entsteht die Schwierigkeit, gleichzeitig sowohl die Druckluftleitung als auch den Behälter gegenüber der Umgebung abzudichten. In der linken Skizze aus Abbildung 39 ist dies Dargestellt. Es wird ein Verbindungsstück einer Rohrleitung, das mit einem Gewinde versehen ist, durch ein passendes Loch in der Behälterwand gesteckt und von beiden Seiten mit Muttern an die

Acrylglasswand geklemmt. Zwischen Wand und Mutter befindet sich auf der inneren Wandseite eine Gummidichtung um Wasseraustritt zu verhindern. An der äußeren Seite des Verbindungsstückes wird ein Regelstück angeschraubt, mit dem es über einen Stellhahn möglich ist, den gewünschten Druckluftzufluss genau einzustellen, um die Wirkung verschiedener Intensitäten auf die Fasersuspension untersuchen zu können.

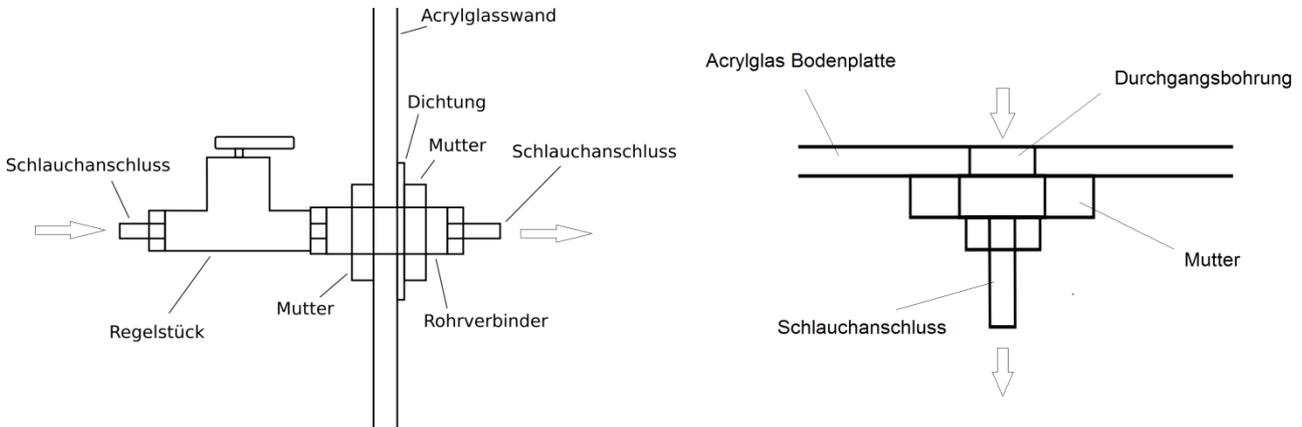


Abbildung 39: links: Schematische Darstellung der Druckluftzufuhr, rechts: Schematische Darstellung des Wasserablasses

Wasserablass:

Der Wasserablass soll sich in der Mitte des Behälterbodens befinden. Da sich das Sieb ebenfalls dicht am Behälterboden befindet, soll die Strömungsentwicklung durch das Abfließende Wasser möglichst gering und gleichmäßig sein, um die Vliesbildung auf dem Sieb nicht negativ zu beeinflussen. Daher ist die Mitte des Behälterbodens die optimale Position für den Wasserablass. Wie in der rechten Skizze aus Abbildung 39 gezeigt ist, wird der Ablass durch einen Verbindungsstück, das in ein Loch im Behälterboden geklebt wird realisiert. Am unteren Ende des Ablasses wird ein Schlauch angeschlossen der auf ein Regelstück führt. Damit ist die Ausfließgeschwindigkeit des Wassers genau einstellbar. Aufgrund der in der rechten Hälfte der Abbildung 39 schematisch gezeigten Umsetzung des Abflusses, muss der Behälter auf Füßen stehen, wozu hier zwei Item-Profile genutzt werden. Da es nicht ausgeschlossen werden kann, dass einzelne Fasern oder Partikel das Sieb passieren, ist der Ausfluss auf der inneren Seite des Behälters mit einem sehr feinen Sieb versehen, um diese Fasern zurückzuhalten. Dies dient einer sicheren und umweltschonenden Prozessführung.

Schläuche:

Der Druckluftschlauch wird von innen an die Druckluftzufuhr angeschlossen und auf dem Boden des Behälters verlegt. Es werden mehrere Schlaucharten getestet, wobei es sich herausstellt, dass ein Silikonschlauch am besten geeignet ist, da er gut und einfach zu perforieren ist und sich leicht verlegen lässt. Auf der Oberseite des Schlauches werden mit einer Nadel Löcher im Abstand von

einem Zentimeter in das Silikon gestochen. Der so perforierte Schlauch wird in verschiedenen, in Abbildung 40 gezeigten, Mustern auf dem Boden des Behälters verlegt.

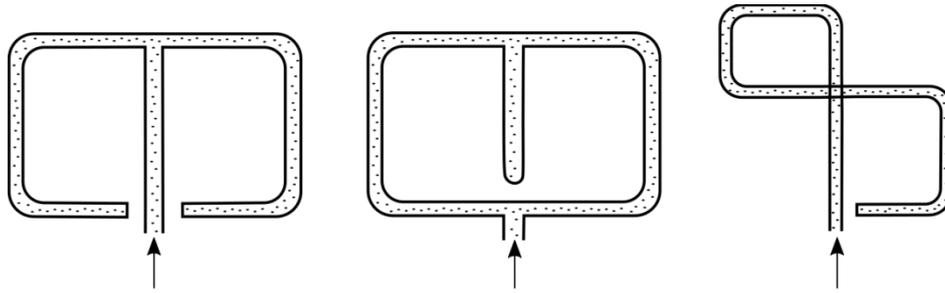


Abbildung 40: Schlauchanordnungen am Behälterboden

Ziel ist es hierbei möglichst über den gesamten Querschnitt des Behälters Blasen zu erzeugen, um möglichst viele turbulente Strömungen im Wasser zu erhalten.

Sieb:

Die Fläche des Siebes entspricht der Querschnittsfläche des Behälters. Die Schwierigkeit hier ist, dass die Löcher des Siebes klein genug sein müssen, um die Fasern aufzufangen und gleichzeitig groß genug sein müssen, um die Blasen hindurch zu lassen. Es wurden daher unterschiedliche Lochgrößen und verschiedene vertikale Positionen des Siebes im Behälter getestet. Ein Einfluss des Siebes auf die Turbulenzbildung der Blasen kann aber nicht unterbunden werden.

Betrieb:

Die zwei Fotos in Abbildung 41 zeigen die fertige Laboranlage, die das Luftdruck-Blasen Prinzip nutzt.

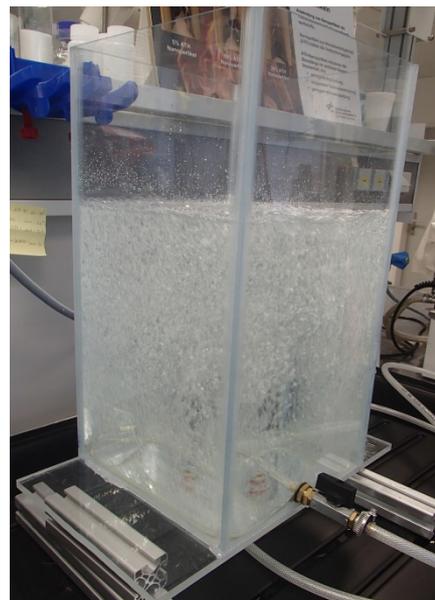
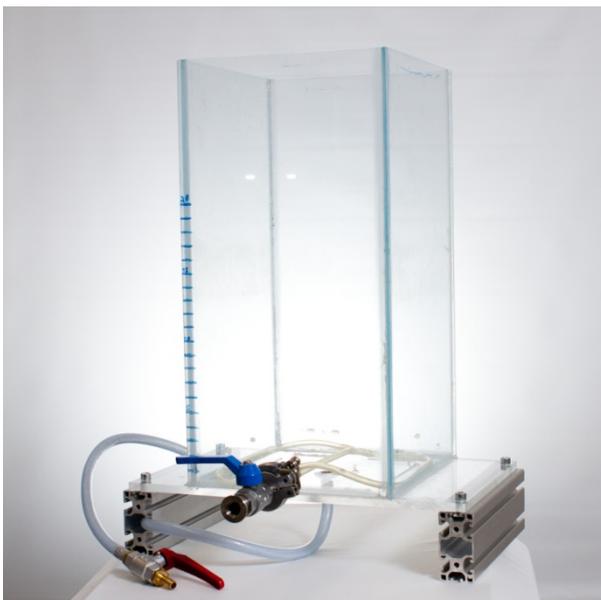


Abbildung 41: Luftdruck-Blasen Mischer

Während der Testläufe zeigt es sich, dass es zu Schaumbildung oberhalb der Wasserlinie kommt, die sich mit der Dauer des Prozesses weiter verstärkt. Einzelne Fasern, die von den Blasen mit nach oben gerissen werden, verfangen sich in dem Schaum und können so nicht weiter dispergiert werden. Zu dieser Schaumbildung kann es aufgrund der Fette kommen, die an den Flachsfasern haften. Um die Schaumbildung in einem für den Prozess akzeptablen Rahmen zu halten, wird das Verfahren mit 3 bar und halb geöffnetem Hahn der Druckzuführung betrieben.

Bei zu hohem Druck und zu intensiver Blasenbildung kommt es zur Bildung von Agglomeraten im Fasermaterial und zu einer Anhäufung der Fasern im Schaum und am Boden des Behälters.

Es zeigt sich weiterhin, dass sich bei optimalen Einstellungen des Druckes und der Druckzufuhr, die in Abbildung 42 gezeigten Strömungsbilder ergeben. Das Wasser wird von den Blasen nach oben gerissen und senkt sich an den Stellen an denen keine oder weniger Blasen aufsteigen wieder ab.

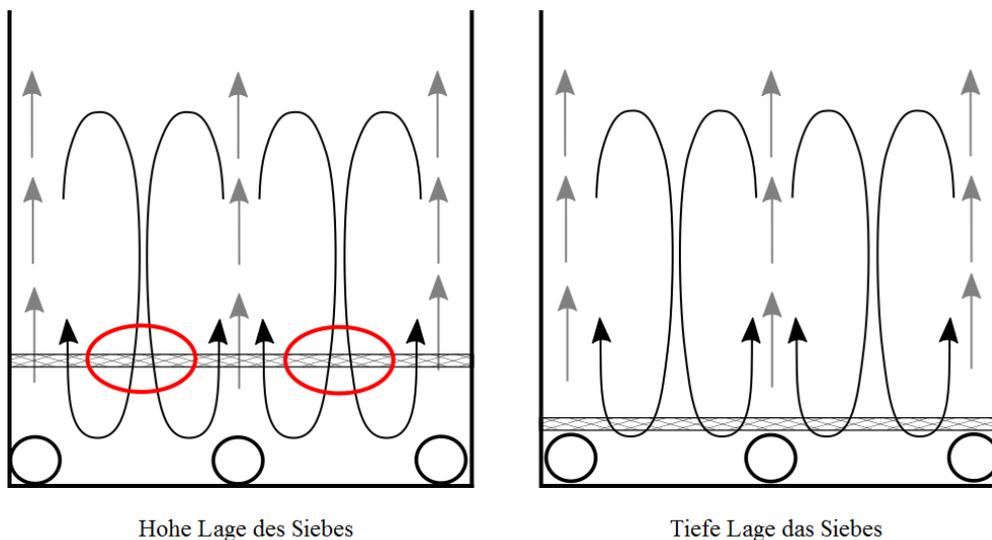


Abbildung 42: Auswirkung auf den Effekt des Faseranhäufens durch Position des Siebs

Wie in der linken Darstellung verdeutlicht ist, werden die Fasern bei einer zu hohen Positionierung des Siebes, an den rot umkreisten Stellen von der Strömung vertikal auf das Sieb gedrückt, was zu einer Anhäufung der Fasern in diesen Gebieten und somit zu einer inhomogenen Vliesbildung führt. Wird das Sieb so weit unten wie möglich platziert (siehe rechte Darstellung), verkleinert sich dieser Effekt zwar aber die Blasenbildung wird stark von dem Sieb beeinflusst. Wie bei dem in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Druckluftmischer ist es auch hier das Sieb, das die Bildung von Turbulenzen abschwächend beeinflusst und eine Faserverteilung und Mischung verhindert. Ohne Sieb und bei Fasermengen von 0,5 g/l kann eine Vereinzelnung der Fasern und eine gute Suspensionsbildung beobachtet werden, die sich auch bei einer Prozessführung mit gleichzeitig zwei verschiedenen Faserarten einstellt. Die Laboranlage beweist, dass das Prinzip zwar funktioniert, aber hier nicht genutzt werden kann, da die Durchmischung der Fasern ohne eine homogene Vliesbildung nicht bewertet werden kann. Da die Suspension im Behälter nach Prozessende keinem Vliesbildungsprozess zugeführt werden kann, wenn das Sieb entfernt wird, kann diese Laboranlage in der Form keine Rolle innerhalb einer Mischvliesherstellung aus dem vorliegenden übernehmen. In Kapitel 7 wird allerdings darauf eingegangen welche Änderungen oder Erweiterungen denkbar wären, da diese Anlage während der Testläufe vielversprechende Zwischenergebnisse liefern konnte.

5.2.2 Pulper

Das Verfahren durch einen Pulper eine Fasermischung zu erzeugen ist in der Industrie etabliert und wird in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Nach diesem Prinzip wird über einen Rotor eine konstante, zirkulierende Strömung in ein Faser/Wasser Gemisch eingebracht, um so eine homogene Suspension zu erzeugen. Dieses Prinzip soll in einer Laboranlage umgesetzt werden. Die Konstruktion orientiert sich dabei an dem Aufbau eines industriell genutzten Pulpers, wie er in Kapitel 3.3.2 beschrieben wird. Ähnlich wie bei der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Laboranlage, soll auch hier die entstehende Suspension möglichst direkt einem Vliesbildungsprozess zugeführt werden. In der Industrie wird dies erreicht indem die Suspension nach Prozessende am unteren Ende des Pulpers abgelassen wird. Dieser Aufbau wird auf die Laboranlage übertragen, wobei alle Wände der Anlage aus transparentem Acrylglas bestehen sollen, um eine gute Beobachtung der Prozessabläufe und der entstehenden Strömungseffekte zu ermöglichen. In Anlehnung an den Aufbau des zuvor beschriebenen Pulpers und unter Berücksichtigung der Bedingung, einen möglichst simplen Vliesbildungsprozess möglichst direkt an die Suspensionserzeugung anzuschließen, wird die Konstruktion in die folgenden zwei Segmente unterteilt:

- A. Pulperbehälter mit Rotor
- B. Suspensionskanal mit Sieb

Zu A:

Dieser Teil stellt den Pulper an sich dar. Hier soll der Vereinzelungs- und Mischungsprozess der Fasern stattfinden. Der Pulperbehälter soll, wie der zuvor beschriebene, einen runden, weiten Querschnitt aufweisen und am unteren Ende konisch zulaufen, damit sich die für den Prozess nötige Strömung ausbilden kann. Dies wird durch eine Plexiglasröhre mit einem Durchmesser von 40cm verwirklicht. In Abbildung 43 sind der Strömungsverlauf und die Form des Behälters schematisch dargestellt.

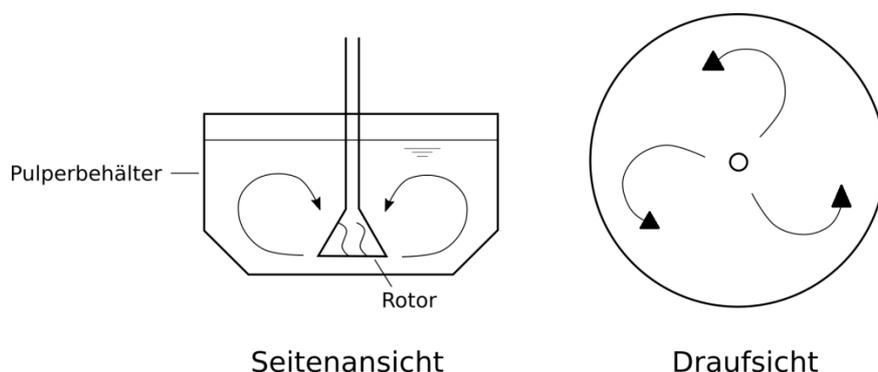


Abbildung 43: Strömungsverlauf im Pulper

Wie zu erkennen ist, zirkuliert die entstehende Strömung sowohl vertikal als auch horizontal, um schnell einen hohen Verteilungsgrad der Fasern im Wasser zu erreichen. Ob die Ausbildung dieser Strömung zu Stande kommt hängt nicht nur von der Behälterform, sondern auch stark von der Form und Beschaffenheit des verwendeten Rotors ab.

Rotor:

Da nach einer kurzen Recherche festgestellt wird, dass ein solcher Rotor in der benötigten Größe und Form nicht beschafft werden kann, wird ein passender Rotor, der in seiner Form einem Pulperrotor aus der Industrie nachempfunden ist, unter Verwendung des CAD Programms CATIA konstruiert. Um die in Abbildung 43 dargestellte Strömung zu erzeugen, muss der Rotor in der Lage sein, das Wasser vertikal nach unten anzusaugen, um es dann umzulenken und horizontal nach außen abzuführen. Eine weitere Bedingung zur Konstruktion des Rotors liegt in der Beschaffenheit der Schaufeln. Die Rotorschaukeln müssen möglichst dick und ohne Spitzen oder Kanten ausgeführt werden, damit die Fasern nicht daran hängen bleiben können. Da es Teil des Prinzips ist, dass das Faser/Wasser-Gemisch immer wieder von oben auf den Rotor trifft, muss auch die Oberfläche des Rotors möglichst glatt sei, um ein gutes Vorbeigleiten des Gemisches zu gewährleisten. Aufgrund der komplexen Struktur des mit CATIA konstruierten Rotors, wird dieser unter Verwendung eines Rapid-Prototyping-Verfahrens aus ABS Kunststoff filament in einem positiv aufragenden Druckvorgang hergestellt. Der entstandene Rotor ist in Abbildung 44 zu sehen.



Abbildung 44: Pulperrotor

Der Rotor weist eine ähnliche Kegelform auf wie die in der Industrie genutzten Pulperrotoren und verfügt über sehr dicke Schaufeln. Die Oberfläche muss mit Schleifpapier nachbearbeitet werden, da sie, durch den Herstellungsprozess bedingt, aus kleinen Stufen besteht und nicht glatt ist. Durch das Loch in der Mitte kann der Rotor auf einer Welle befestigt werden.

Zu B:

Da der Vliesbildungsprozess der gleiche ist, wird der Suspensionskanal nach den gleichen Gesichtspunkten konstruiert wie die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Laboranlage. Wie in dem vorangegangenen Kapitel bereits erwähnt wird ein großes Wasservolumen zur Verarbeitung weniger Fasern benötigt, was, unter der Bedingung ein akzeptables Flächengewicht des Vlieses zu erzeugen, eine hohe Bauform mit kleinem Querschnitt voraussetzt. Weiterhin wird der Querschnitt, aus den ebenfalls in Kapitel 5.2.1 genannten Gründen, quadratisch ausgeführt. Der Suspensionskanal wird aus Acrylglasplatten gebaut und ist in Abbildung 45 schematisch gezeigt. Zu sehen ist, dass der Strömungskanal direkt unter den Pulperbehälter gebaut wird, um die Vliesbildung unmittelbar an den Vereinzelungs- und Mischprozess anzuschließen.

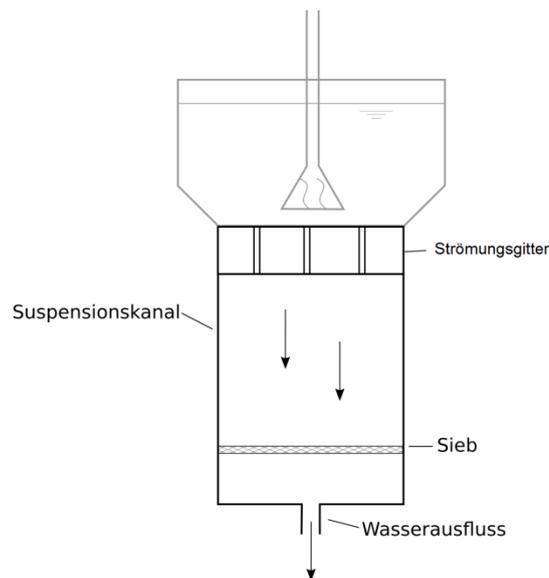


Abbildung 45: Schematische Darstellung des Suspensionskanals

Genau wie in der im vorherigen Kapitel umgesetzten Konstruktion, wird auch hier ein Sieb, dessen Fläche der Querschnittsfläche des Kanals entspricht, an dessen unterem Ende platziert, um die Fasern aufzufangen. Dieses Sieb kann allerdings sehr viel feiner sein als das der zuvor beschriebenen Anlage, da es keine Luftblasen hindurchlassen muss. Im oberen Bereich des Suspensionskanals wird ein Strömungsgitter gesetzt, um zu gewährleisten, dass nur vertikale Strömungen aus dem Pulperbehälter und den darunter liegenden Suspensionskanal kommen können. Wie in der zuvor beschriebenen Anlage, wird ein Ausfluss in der Mitte des Behälterbodens realisiert, um durch langsames Ausfließen des Wassers eine vertikale Strömung und ein langsames Absetzen der Fasern auf dem Sieb zu erzeugen. Wäre diese Strömung zu stark, käme es durch die Fasern die sich bereits auf dem Sieb abgelegt haben, zu einer Umlenkung der Strömung auf die noch freien Bereiche des Siebes. Dadurch wäre die Strömung nicht mehr über den ganzen Querschnitt konstant und es kommt zu einer ungleichmäßigen Vliesbildung.

Pumpe:

Um die Geschwindigkeit der, in Abbildung 45 durch die Pfeile angedeuteten Strömung konstant zu halten, soll eine Förderpumpe an den Ausfluss angeschlossen werden. Mit Hilfe der Pumpe kann das Wasser der Anlage von oben wieder zugeführt werden, wodurch ein kontinuierlicher Wasserkreislauf entsteht, der so lange aufrecht erhalten werden soll, bis sich alle Fasern auf dem Sieb abgesetzt haben. Dieser konstante Wasserkreislauf ist nötig, um ein Klebenbleiben der Fasern an den schrägen Wänden im Unteren Bereich des Pulperbehälters zu verhindern. Die in Abbildung 46 gezeigte Darstellung stellt schematisch den kompletten Aufbau der Anlage mit der Pumpe dar.

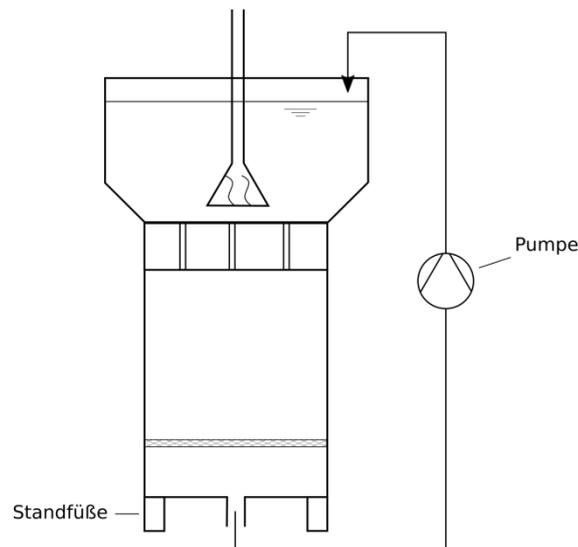


Abbildung 46: Schematische Darstellung der gesamten Anlage mit Pumpe

Schließen und Öffnen der Anlage:

Das größte Problem der Konstruktion dieser Anlage stellt die Bedingung dar, dass eine Möglichkeit des Öffnens und Schließens existieren muss, um das entstandene Vlies samt Sieb zu entnehmen und die Anlage zu reinigen. Die einzige Option diese Bedingung zu erfüllen, liegt darin, die Verbindung der beiden oben genannten Segmente A und B durch Verschraubungen zu realisieren. Somit kann der Pulperbehälter von dem Suspensionskanal losgeschraubt und abgenommen werden. Die Umsetzung dazu gestaltet sich als sehr kompliziert, da sowohl ein runder mit einem quadratischen Querschnitt wasserdicht verbunden werden müssen, als auch muss die Verschraubung gut zugänglich und stabil genug ausgeführt werden. In Abbildung 47 ist ein Schema der Konstruktion gezeigt, die dieses Problem lösen soll.

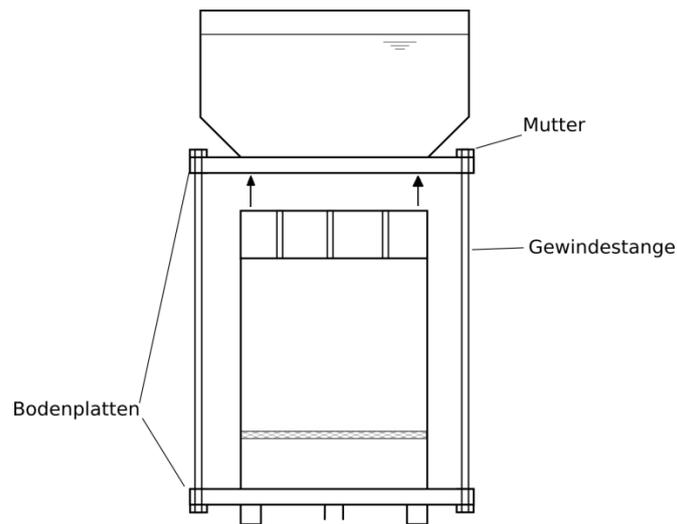


Abbildung 47: Schematische Darstellung der verschraubbaren Verbindung zwischen Pulper und Suspensionskanal

Es werden vier Gewindestangen jeweils durch Löcher an den Ecken der Bodenplatten des Suspensionskanals und des Pulperbehälters geführt und mit Muttern verschraubt. Die beiden Bodenplatten bestehen aus Acrylglas mit einer Dicke von 3cm und bieten damit genug Steifigkeit um die Klemmkraft der Verschraubung auf die Dichtungen zu übertragen. Es befindet sich eine Gummidichtung zwischen dem oberen Bereich des Suspensionskanals und der Bodenplatte des Pulperbehälters. Wird die Verschraubung an allen vier Punkten gleich stark angezogen, kann ein wasserdichter Übergang zwischen den beiden Segmenten A und B hergestellt werden.

Betrieb:

Abbildung 48 zeigt die fertige Laboranlage. Während erster Testläufe zeigt sich eine sehr umständliche Handhabung der Anlage, was nicht der in Kapitel 4.2.1 gestellten sekundären Anforderung nach einer guten Handhabbarkeit entspricht. Sowohl das Befüllen und Entleeren der Anlage mit Wasser, als auch das Öffnen und Schließen stellen sich als sehr langwierig heraus.

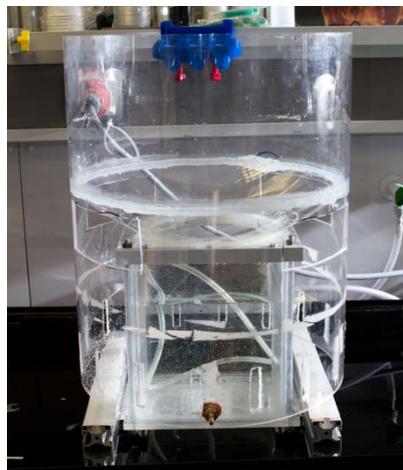


Abbildung 48: Laboranlage Pulper

Da die Bodenplatte des Pulperbehälters während des Festziehens der Verschraubung vor dem letzten Testdurchgang einen Riss bekam und damit eine Abdichtung nicht mehr möglich war, konnten weitere Tests im zeitlichen Rahmen zu dieser Arbeit nicht mehr stattfinden. Die Rotortests zeigen allerdings, dass eine Faserverteilung und Mischung nach diesem Prinzip, bei richtig gewähltem Faser/Wasser Verhältnis von unter 5g/l, möglich ist. Deutlich bessere Ergebnisse wurden hier mit den 15mm langen Flachs- und Kohlenstofffasern erzielt, als mit den 6mm – 60mm langen Kohlenstofffasern. Zur Vliesbildung ist es aufgrund der Probleme des Abdichtens nicht mehr gekommen, weshalb auch diese Anlage nicht zur Herstellung eines Mischvlieses verwendet wurde. Das Problem des Abdichtens ist aber ein rein konstruktives, somit haben sich bis zu diesem Punkt keine Gründe ergeben, das in dieser Anlage umgesetzte Prinzip als Möglichkeit zur Mischvliesherstellung auszuschließen. In Kapitel 7 wird näher auf das Potential dieser Anlage durch kommende Bearbeitungen eingegangen.

6. Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Erkenntnisse, die aus dem Betrieb und den Testläufen der vier Laboranlagen gewonnen werden. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse im Rahmen eines Vergleiches zwischen den Anlagen dargestellt. Anschließend wird das aus diesen Ergebnissen entwickelte Verfahren zur Mischvliesherstellung vorgestellt und es findet eine Bewertung der entstandenen Fasergemische und Vliese statt.

6.1 Vergleich der Anlagen

Die während dieser Arbeit konstruierten und getesteten Laboranlagen dienen dem Zweck, ein homogenes Gemisch aus recycelte Kohlenstofffasern und Flachsfasern herzustellen, um dieses zu einem Vlies weiterverarbeiten zu können. Es wurden sowohl ein Druckluftmischer und eine Kardiermaschine aus dem Bereich der trockenen Prozessführung, als auch ein Luftdruck-Blasen Mischer und ein Pulper aus dem Bereich der nassen Prozessführung konstruiert. Im Folgenden werden die durch den Betrieb gewonnenen Erkenntnisse zu den einzelnen Prinzipien aufgezählt.

Karde:

Die Kardiermaschine ist zum Vermischen des vorliegenden Fasermaterials schlecht geeignet. Um eine im Ansatz homogene Mischung zu erhalten, muss der Kardierprozess viele Male wiederholt werden. Die mechanischen Belastungen für die Fasern, sowie die Belastungen für die Gesundheit durch fliegenden Faserstaub steigen damit in nicht akzeptablem Maße an. Weiterhin ist es sehr zeitaufwendig nach diesem Prinzip eine Fasermischung herzustellen. Die getesteten Parameter, die sich bei dieser Anlage einstellen lassen, sind die Folgenden:

1. Drehgeschwindigkeit der Kardenrollen
2. Dauer des Prozesses
3. Abstand der beiden Kardenrollen voneinander
4. Menge des Kardierte Fasermaterials
5. Grad der Vereinzelung der Fasern

Testläufe zeigen, dass es möglich ist, aus stark vereinzelt Fasern des vorliegenden Materials ein gleichmäßiges Vlies zu bilden (siehe Abbildung 28 in Kapitel 5.1.1). Dafür eignet sich ein mittlerer Abstand der Rollen voneinander, mit einer Nadeleintauchtiefe von ca. 1mm. So können die Nadeln der großen Rolle die kurzen Fasern von der kleinen Rolle gut abgreifen und es kommt zur Bildung eines Flors auf der großen Rolle. Bei größeren Eintauchtiefen kann es während des Kardierens zur Verklebung der Rollen kommen und der Riemen rutscht durch. Bei geringerer Eintauchtiefe werden nicht genug Fasern von der kleinen Rolle abgegriffen. Die Drehgeschwindigkeit der großen Rolle beträgt für eine gleichmäßige Vliesbildung ca. 40U/min – 50U/min. Damit sich ein Faserflor auf der großen Kardenrolle bilden kann, das dick genug ist um es in einem Stück von der Rolle zu nehmen, muss eine Mindestmenge von 25g Fasermaterial für den Prozess verwendet werden. Diese Fasermenge nimmt in Form von stark vereinzelt Fasern ein großes Volumen ein, was es erschwert die Fasern dem Prozess zuzuführen. Die sich daraus ergebende Prozesszeit beträgt ca.

30min. Bei einer verwendeten Menge von 25g entsteht ein Vlies mit einem Flächengewicht von ca. 120 g/m², ein Teil des Fasermaterials verbleibt ungenutzt auf der kleinen Kardenrolle. Der Prozess kann ausschließlich unter einem Laborabzug durchgeführt werden, da es während des Kardierens zum Faserflug kommt. Im Vergleich zu den anderen Anlagen stellt die Karde die einzige Möglichkeit zur Bildung eines gleichmäßigen Vlieses da.

Druckluftmischer:

Der Betrieb des Druckluftmischers zeigt, dass das Vereinzeln und auch das Vermischen der beiden Fasersorten nach diesem Prinzip gut realisierbar sind. Wie auf den Abbildungen in Kapitel 5.1.2 zu sehen ist, kommt es durch die Vereinzelnung der Fasern zu einer Vergrößerung des Volumens, das von dem Fasermaterial eingenommen wird. Daher ist die Menge, die während eines Durchgangs verarbeitet werden kann auf ca. 6g begrenzt. Da ein Durchgang allerdings nicht länger als ein paar Sekunden dauert, kann der Durchsatz an Fasermaterial trotzdem hoch sein. Die Parameter die sich zur Durchführung einstellen lassen sind die Folgenden:

1. Druck
2. Dauer des Prozesses
3. Intervalldauer der Druckluftzufuhr

Es stellte sich ein optimaler Druck von 3 bar heraus, mit dem die Luft in kurzen unregelmäßigen Intervallen in den Behälter eingeblasen wird. Dies begünstigt ein Auflockern des Fasermaterials, da es so nicht in eine monotone Zirkulationsbewegung verfallen kann. Durch das wiederholte Öffnen und Schließen des Mischbehälters zwischen den Durchgängen, kommt es allerdings ebenfalls zu Faserflug, weshalb auch dieses Verfahren nur unter einem Laborabzug durchgeführt werden kann. Um beste Ergebnisse zu erzielen müssen das Vereinzeln der Fasern und das Vermischen in zwei getrennten Durchgängen erfolgen. Es bleibt zu erwähnen, dass nach jedem Durchgang ein paar Faserreste in der Anlage verbleiben, was bei genauen Mengenvorgaben berücksichtigt werden muss. Diese Anlage ist im Vergleich zu den anderen gut zu Handhaben und stellt die Lösung da, zu der in der Aufgabenstellung beschriebenen Problematik des Vereinzeln und Vermischens des vorliegenden Fasermaterials. In der nachfolgenden Abbildung 49 ist die, mit dieser Anlage erreichte, Vermischung der Fasern gezeigt. Wie auf dem rechten Foto zu sehen ist, liegen die unterschiedlichen Fasern wirt neben, über und untereinander, was auf einen hohen Verteilungsgrad schließen lässt. Auf dem mittleren Foto weist das erzeugte Fasergemisch eine gräuliche Farbe auf. Diese Farbe entsteht durch die beiden Farben der vermischten Fasersorten, die auf dem linken Foto zu sehen sind. Die graue Farbe des Gemisches ist ein Hinweis auf eine gute Vermischung der beiden Faserarten.



Abbildung 49: Ergebnisse der Fasermischung mit dem Druckluftmischer. links: vereinzelte Flachs und rC60 Fasern, Mitte: Fasergemisch 75/25, rechts: Mikroskopaufnahme des Gemisches

Luftdruck-Blasen Mischer:

Die einstellbaren Parameter der Prozessführung des Luftdruck-Blasen Mischers sind die Folgenden:

1. Druck,
2. Anordnung des perforierten Schlauches am Behälterboden,
3. vertikale Position des Siebes,
4. Art des Siebes
5. Dauer des Prozesses

Nachdem alle denkbaren Kombinationen der verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten dieser Parameter durchgespielt worden sind, war zu erkennen, dass weder eine homogene Verteilung der Fasern im Wasser noch ein Vliesbildung mit dieser Konfiguration der Anlage erreichbar war. Die in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Effekte waren nicht vollständig zu verhindern. Alleine durch das Entfernen des Siebes aus dem Behälter konnte eine homogene Fasersuspension erzeugt werden. Wie in Abbildung 42 in Kapitel 5.2.1 zu sehen ist, bildet sich im Inneren des Behälters eine zirkulierende Strömung, ganz ähnlich dem Strömungsbild wie sie im Druckluftmischer aus Kapitel 5.1.2 zu finden ist. Unabhängig von der Anordnung der Schläuche am Behälterboden, kommt es immer zur Ausbildung der vertikal zirkulierenden Strömung. Die Prinzipien die in dieser Anlage und in dem Druckluftmischer umgesetzt wurden ähneln sich stark. Es werden in beiden Fällen starke Turbulenzen erzeugt, mit denen die Fasern vereinzel werden und es kommt in beiden Fällen zu einer zirkulierenden Strömung, durch welche die Fasern immer wieder erneut den Turbulenzen zugeführt werden. Weiterhin verhindert ein Sieb im Strömungsverlauf den Effekt des Vereinzelns und des Mischens. Der Luftdruck-Blasen Mischer kann also prinzipiell das gleiche wie der Druckluftmischer, nur unter wesentlich höherem Aufwand (Befüllen mit Wasser) und mit deutlich längeren Prozesszeiten. Des Weiteren müssen die Fasern, sind sie einmal homogen im Wasser verteilt, einem hydrodynamischen Vliesbildungsprozess zugeführt werden, was hier nicht umgesetzt werden kann, da das Sieb entfernt wurde. Wird eine Möglichkeit gefunden ein Vlies aus der entstandenen Suspension zu bilden, kann auch dieses Verfahren zur Hybridvliesherstellung genutzt werden.

Pulper:

Wie in Kapitel 5.2.2 bereits erwähnt, war es nicht möglich diese Anlage ausgiebigen Tests zu unterziehen. Dennoch konnten einige Erkenntnisse aus der praktischen Umsetzung des Pulpers im Labormaßstab gewonnen werden. Die einstellbaren Parameter zu dieser Laboranlage waren die Folgenden:

1. Drehgeschwindigkeit des Rotors
2. Ausflussgeschwindigkeit des Wassers
3. Dauer des Prozesses

Bei zu hoher Drehgeschwindigkeit des Rotors überwiegt die erzeugte horizontale Strömungskomponente und die Fasern werden ausschließlich im Kreis in dem runden Behälter umherbewegt. Dabei wird nur eine geringe Vereinzelnung der Fasern erreicht, da die Strömung eher laminar als turbulent verläuft. Dreht der Rotor etwas langsamer, wird auch die Wirkung der vertikalen Strömungskomponente sichtbar, wie sie in Abb. Pulper 1 in Kapitel 5.2.2 dargestellt ist. Bei mittlerer Drehgeschwindigkeit von ca. 150 U/min werden die Fasern von oben von dem Rotor angesaugt und zur Seite wieder abgespült, was zur Ausbildung der zirkulierenden Strömung führt, die die Fasern immer wieder auf den Rotor treffen lässt. Dreht der Rotor zu langsam tritt dieser Effekt nicht auf. Nach einer Prozessdauer von ca. 5min kann eine Vereinzelnung der Fasern festgestellt werden. Aufgrund der niedrig gehaltenen Drehzahl kommt es während der Testläufe immer wieder dazu, dass Fasern, besonders Flachfasern, an Kanten des Rotors oder an kleinen Unebenheiten auf seiner Oberfläche hängen bleiben und sich mit anderen Fasern verknoten. Dies liegt zum einen an der unebenen Oberfläche des Rotors, die seinem Herstellungsprozess geschuldet ist, und zum anderen daran, dass manche Faserenden wie kleine Hacken umgeknickt sind. Da es sich um auf Länge geschnittene Fasern handelt, können diese kleinen Hacken am Ende der Fasern durch den Schneidprozess entstanden sein. Die Oberfläche des Rotors muss demnach so glatt wie möglich ausgeführt sein. Der Suspensionskanal und damit verschiedene Ausflussgeschwindigkeiten wurden nicht getestet. Ähnlich wie beim Luftdruck-Blasen Mischer kann auch hier eine Suspension erzeugt werden, die ebenfalls keinem Vliesbildungsprozess zugeführt werden kann. Im Gegensatz zum Luftdruck-Blasen Mischer sind Wasservolumen und damit auch die Fasermenge bestimmt von der Größe des Rotors. Dagegen kommt der Vorgang der Faservereinzelnung mit einer geringeren Prozesszeit aus.

Um die untersuchten Verfahren weiter zu vergleichen, werden diese in der Tabelle 5 in trockene und nasse Prozessführung unterteilt. Die Vorteile, die sich für die jeweilige Gruppe nach den durchgeführten Testläufen gegenüber der anderen Prozessführung ergeben, sind die folgenden:

Vorteile des nassen Verfahrens:	Vorteile des trockenen Verfahrens:
- Möglichkeit zur Erzeugung von gleichmäßigeren Vliesen	- Schnelleres Erzeugen von großen Mengen Fasergemisches
- Niedrigere mechanische Belastung für die Fasern	- Bessere Handhabung und schnellere Durchführbarkeit
- Besserer Schutz für Gesundheit und Technik, da kein Faserflug entsteht	- Leichtere Realisierbarkeit der Anlagen
- Möglichkeit des Beschichtens der Fasern während der Suspensionserzeugung	

Tabelle 5: Vergleich der unterschiedlichen Vorteile der nassen und trockenen Prozessführung

Auf Basis der in Kapitel 4.2.1 an die Anlagen gestellten primären und sekundären Anforderungen, werden die Laboranlagen in Tabelle 6 bewertet und in Relation zueinander gesetzt. Jede Anlage wird bezüglich jeder Anforderung bewertet, wobei die Punktezahl auf den Erfahrungen beruht, die während der Testläufe gesammelt werden konnten. Es werden Punkte von 0 bis 5 vergeben, wobei 5 die beste zu erreichende Punktezahl ist. Da die einzelnen Anforderungen unterschiedlich wichtig sind, müssen sie jeweils mit einem entsprechenden Gewichtungsfaktor in die Bewertung eingehen. Die Gewichtungsfaktoren sind von $x1$ bis $x4$ den jeweiligen Anforderungen zugeteilt. Die maximale Punktzahl beträgt 100 Punkte.

	Faser- verteilung ($x4$)	Faser- mischung ($x4$)	Vlies- bildung ($x3$)	Menge/ Zeit ($x2$)	Handhab- barkeit ($x2$)	Kosten günstig ($x1$)	Sicher- heit ($x3$)	Beanspruch- ung der Fasern ($x2$)	Max 105
Karde	1	1	5	4	3	4	2	2	51
Druckluft mischer	5	5	0	5	4	4	3	4	79
Luftdruck Blasen Mischer	4	3	0	1	2	3	4	5	59
Pulper	4	3	0	2	1	2	4	3	54

Tabelle 6: Bewertungstabelle zu den einzelnen Laboranlagen

Die rechte Spalte der Tabelle zeigt die aufaddierten Ergebnisse der Bewertungen der einzelnen Anlagen. Abgesehen von dem Druckluftmischer liegen die übrigen drei Anlagen dicht beieinander. Auf Basis dieser Bewertung wird das endgültige Verfahren zur Hybridvliesherstellung aus dem vorliegenden Fasermaterial festgelegt und im folgenden Kapitel vorgestellt.

6.2 Verfahren zur Mischvliesherstellung

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Mischvliesherstellung beinhaltet den Prozess des Vereinzeln und Mischens der Fasern durch den konstruierten Druckluftmischer, mit anschließender Kardierung des Materials durch die konstruierte Kardiermaschine. Obwohl die Ergebnisse aus Tabelle 6 zeigen, dass die Karde eine relativ geringe Punktezahl in der Gesamtbewertung der Anlagen hinsichtlich der gestellten Anforderungen erreichen konnte, stellt sie in dieser Arbeit die einzige realisierbare Möglichkeit da, ein Vlies nach dem trockenen Verfahren zu bilden. Die folgenden Abbildungen zeigen das entwickelte Herstellungsverfahren eines Hybridvlieses aus Flachs und recycelten Kohlenstofffasern:



Das unbehandelte Fasermaterial wird zunächst bereitgestellt und Portioniert

Die Fasern werden ohne weitere Vorbehandlung in Mengen von maximal 6g in den Druckluftmischer gegeben. Dabei werden die zwei Faserarten getrennt voneinander in zwei separaten Durchgängen verarbeitet. Ein Durchgang dauert maximal 10 Sekunden.

Nach dem Verteilungsprozess liegen die Fasern in einem sehr viel größeren Volumen vor. An dieser Stelle muss noch einmal die Menge des vorliegenden vereinzelt Fasermaterials bestimmt werden.

Je nach gewünschtem Mischverhältnis werden die vereinzelt Fasern der beiden Faserarten gemeinsam in den Druckluftmischer gegeben, dabei darf die Gesamtmenge der Fasern im Mischer 6g nicht übersteigen. Der Mischdurchgang dauert nicht länger als 15 Sekunden.

Nach dem Mischprozess ist eine gute Fasermischung zu erkennen. Die Fasern liegen sowohl vereinzelt als auch vermischt vor. Auch hier ist wieder die Menge zu bestimmen, da Fasermaterial im Mischer zurückbleibt.

Liegt nach einigen Durchgängen des zuvor beschriebenen Verfahrens eine Menge des Fasergemisches von mindestens 25g vor, kann dies dem Kardierprozess zugeführt werden. Der Prozess dauert bei dieser Menge ca. 30min.

Das entstehende Mischvlies weist ein Flächengewicht von 120 g/m² auf. Die Fasern sind der Länge nach ausgerichtet und gleichmäßig über die Fläche verteilt.

6.3 Bewertung

Aus den Vliesen, die während dieser Arbeit hergestellt wurden, sollen Prüfplatten gebaut werden, mit dem Ziel eine Aussage über die mechanischen Eigenschaften treffen zu können. Dazu ist es erforderlich, dass das Herstellungsverfahren einheitliche Vliese hervorbringen kann, die sich in ihren Eigenschaften und in der Verteilung der Fasern gleichen. Das Verfahren soll Vliese mit den immer gleichen Eigenschaften erzeugen können, die auch über die Fläche des Vlieses konstant sind, damit die gemessenen Materialwerte der Prüfplatten vergleichbar sind. Um die entstandenen Vliese hinsichtlich ihrer Gleichmäßigkeit kontrollieren zu können wird ein Lichttisch konstruiert.

Die Bedingungen für die Konstruktion des Tisches sind die folgenden:

1. Die Fläche muss groß genug sein, um die nach den genannten Verfahren erzeugten Vliese darauf in vollem Umfang untersuchen zu können.
2. Der Lichttisch soll klein genug sein, um ihn transportieren zu können.
3. Das erzeugte Licht soll über die ganze Fläche des Tisches gleichmäßig verteilt sein, es darf keine Bereiche geben, die heller sind als andere.
4. Die Leuchtkraft muss hoch genug sein, um die erzeugten Vliese durchleuchten zu können.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden für die Konstruktion Leuchtstoffröhren verwendet, da diese schon von sich aus ein diffuses Licht abgeben und gleichzeitig Leuchtstark sind. Der Effekt einer gleichmäßig leuchtenden Oberfläche wird durch die Verwendung einer dünnen, weißen Schaumstoffplatte erreicht, die oben auf dem Tisch befestigt ist. Je weiter die Leuchtstoffröhren dabei von der Schaumstoffplatte entfernt sind, desto gleichmäßiger ist die Lichtverteilung. Da der Tisch transportierbar sein soll, wird ein Abstand von 20cm zwischen Platte und Leuchtstoffröhren umgesetzt. Dieser Abstand stellt auch einen guten Kompromiss zwischen gleichmäßiger Lichtverteilung und Leuchtkraft da. Der Innenraum des Tisches ist weiß lackiert, um das Licht gut zu reflektieren. Die Abbildung 50 zeigt den konstruierten Lichttisch.



Abbildung 50: Lichttisch

Die Fotos, die im Rahmen der Untersuchung der erzeugten Vliese bezüglich der Faserverteilung entstanden sind, werden im Folgenden gezeigt. Die Vliese werden hierbei auf den Lichttisch gelegt

und senkrecht von oben fotografiert. Hierbei wird das, während dieser Arbeit erzeugte Vlies mit anderen Vliesen, die aus vorherigen Arbeiten hervorgingen, verglichen.

Die folgende Abbildung zeigt ein Vlies, das zwar aus der Fasermischung besteht, die mit dem Druckluftmischer erzeugt wurde, anschließend aber nicht über die Karde gebildet wurde. Hierbei wurden über die ganze Fläche gleichmäßig verteilte Wasserstrahle auf die lose Fasermasse gegossen, um diese zu verfestigen und so zu einem Vlies zu bilden.



Abbildung 51: Lichttisch Bilder eines durch Wasserstrahl-Verfestigung erzeugten Vlieses

Das mittels Wasserstrahlen verfestigte Vlies zeigt auf dem Lichttisch große Ungleichheiten in der Faserverteilung. Die folgenden Fotos zeigen Lichttisch Bilder von Vliesen die auf verschiedene Weise hergestellt wurden:



Abbildung 52: Lichttisch Bilder verschiedener Vliese

- A. Durch Wasserstrahl verfestigtes Vlies aus nicht vereinzelt reinen Flachfasern
- B. Durch Wasserstrahl verfestigtes Vlies aus reinem rC60, welches zuvor mit dem Druckluftmischer vereinzelt wurde
- C. Ansatzweise Vliesbildung während der Testläufe mit dem Luftdruck-Blasen Mischer

Es ist zu erkennen, dass sich zu allen der zuvor gezeigten Vliese Ungleichmäßigkeiten in der Faserverteilung nachweisen lassen. Abbildung 53 zeigt das Mischvlies, das während dieser Arbeit mittels Kardierens aus dem zuvor erzeugten Fasergemisch gebildet wurde.

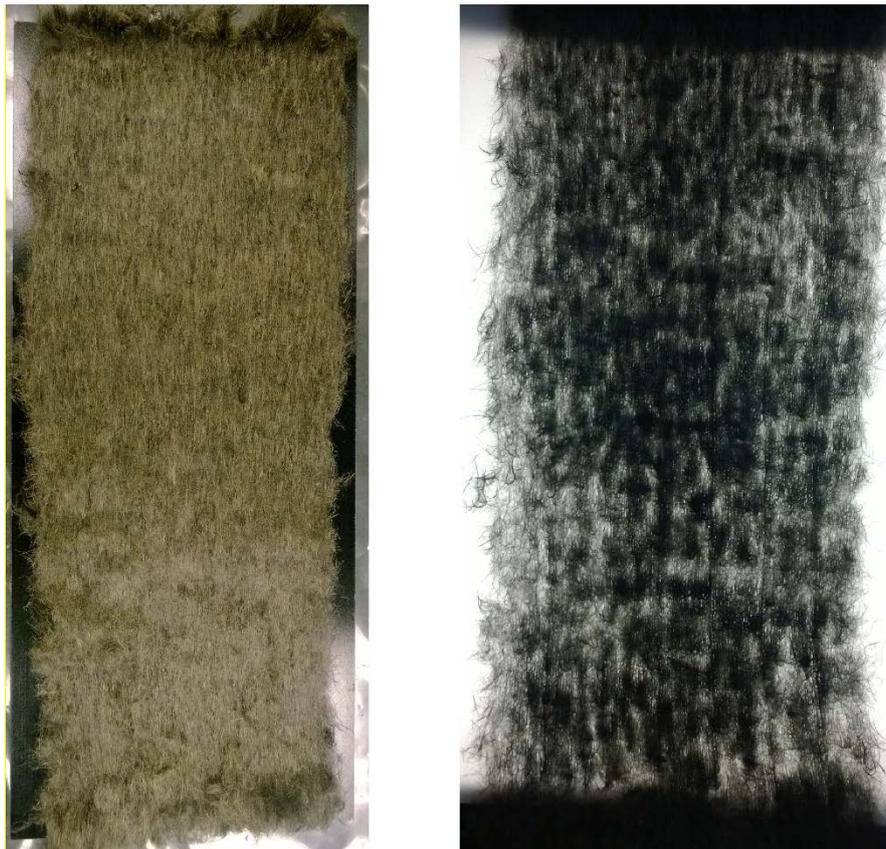


Abbildung 53: Lichttisch Bilder des erzeugten Mischvlieses

Wie zu erkennen ist, kann zwar keine optimale aber eine bessere Faserverteilung im Vlies mittels Kardieren erzeugt werden. Die so erzeugten Vliese zeichnen sich sowohl durch eine gute Mischung der Fasern miteinander, als auch durch eine gleichmäßigere Verteilung des Fasermaterials über die Fläche des Vlieses aus. Daher stellen die in dieser Arbeit entwickelten Hybridvliese eine Verbesserung gegenüber den vorherigen Verfahren dar.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Hybridvliese aus 15mm langen Flachsfasern und 15mm oder 6mm – 60mm langen recycelten Kohlenstofffasern. Da dieses Ziel, sowohl mit einer nassen als auch mit einer trockenen Prozessführung von zwei vorangegangenen Arbeiten bereits verfolgt wurde, findet in der vorliegenden Arbeit zunächst eine umfangreiche Recherche zu Herstellungsverfahren von Hybridvliesen in Industrie und Forschung statt. Der Fokus wurde dabei auf die Prozessschritte des Vereinzeln und Mischens der beiden Faserarten gelegt, da dies während der Bemühungen in den vorherigen Arbeiten die größte Schwierigkeit darstellte. Die zahlreichen recherchierten Möglichkeiten Fasern zu vereinzeln und zu vermischen wurden bezüglich ihrer Anwendbarkeit auf das vorliegende Fasermaterial und bezüglich ihrer Umsetzbarkeit im Labormaßstab unter gewissen Anforderungen bewertet. Nach den Ergebnissen dieser Bewertung wurden vier Laboranlagen konstruiert, um die gefundenen Methoden der Vereinzeln und Mischung praktisch zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Die Karde und der Druckluftmischer folgen dabei einer trockenen Prozessführung, der Luftdruck-Blasen Mischer und der Pulper nutzen nasse Methoden. Es zeigt sich, dass es mit der Kardiermaschine nicht möglich ist vereinzeln oder mischende Prozesse durchzuführen, dies aber die einzige Laboranlage ist, mit der eine gerichtete Vliesbildung vorgenommen werden kann. Die beiden nassen Methoden erwiesen sich in der Umsetzung als Laboranlagen als kompliziert. Das Problem hier lag weniger in der Vereinzeln oder Mischung der Fasern, als darin die Fasern anschließend zu einem Vlies zu bilden. Eine perfekte Fasermischung nutzt nichts, wenn sie keinem Vliesbildungsprozess zugeführt werden kann. Das Prinzip des Mischens der Fasern mittels Druckluft wurde erfolgreich in dem Druckluftmischer umgesetzt. Mit dieser Laboranlage war es möglich Fasermischungen zu erzeugen, die auch in einem Vliesbildungsprozess weiterverarbeitet werden können. Die Entwicklung der vier Anlagen wurde hinsichtlich Konstruktion und Funktionsweise dokumentiert. Auf Basis der durchgeführten Testläufe konnten Aussagen darüber getroffen werden, welches Verfahren sich in Zukunft für die Hybridvliesherstellung unter Verwendung des vorliegenden Fasermaterials eignet. Nachdem die vorliegenden Fasern in dem Druckluftmischer vereinzelt und gemischt worden waren, wurde das entstandene Fasergemisch anschließend einem Kardierprozess zuzuführen, um ein gleichmäßiges, gerichtetes Vlies zu bilden. Das so entwickelte Verfahren zur Mischvliesherstellung kann in Zukunft die Grundlage zur Herstellung von Hybridvliesen aus Flachsfasern und rC-Fasern im Labormaßstab darstellen. Die Notwendigkeit dafür wird deutlich, wenn bedacht wird, wozu diese Hybridvliese gebraucht werden und welches Ziel damit verfolgt wird. Das Ziel besteht darin, nachzuweisen, dass recycelte Kohlenstofffasern dazu genutzt werden können, die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundhalbzeugen zu verbessern. Ein großer Nutzen ergäbe sich aus der stufenlosen Regelbarkeit des Kohlenstofffasergehaltes in den Faserverbundhalbzeugen, da so die mechanischen Eigenschaften individuell auf die Anforderung an das Bauteil eingestellt werden können. Hierzu müssen die rC-Fasern zunächst in ein Faserhalbzeug eingebracht werden, wobei dafür, aufgrund der begrenzten Länge der recycelten Fasern, nur ein Vlies als Faserhalbzeug in Frage kommt. Um einen positiven Effekt der rC-Fasern auf die mechanischen Eigenschaften nachweisen zu können, müssen aus den erzeugten Mischvliesen anschließend Prüfplatten hergestellt

werden, um daraus Probenkörper zu sägen, die zur Analyse den verschiedenen Prüfverfahren zugeführt werden. Unter Berücksichtigung dieser Ziele werden im folgenden Ausblicke auf mögliche zukünftige Untersuchungen und Vorgehensweisen angestellt.

Ausblick:

Damit während der Materialprüfungen die beigemischten recycelten Kohlenstofffasern ihre guten Mechanischen Eigenschaften geltend machen können, ist eine gute Faser-Matrix Anbindung vorausgesetzt. Jüngste Untersuchungen zeigen, dass die in dieser Arbeit verwendeten rC-Fasern in Faserverbunden nahezu keine Anbindung an die Matrix aufweisen und die Last somit nicht von der Matrix an die Fasern weitergeleitet werden kann. Somit können keine Aussagekräftigen Materialtests durchgeführt werden, bevor die Anbindung nicht verbessert wurde. Die schlechte Anbindung ist darin Begründet, dass die rC-Fasern aufgrund des zuvor durchlaufenden Pyrolyseprozesses über keine Schlichte mehr verfügen. Um die Anbindung der Fasern an die Matrix zu verbessert, müssen die Fasern in zukünftigen Verfahren beschichtet werden, bevor sie dem in dieser Arbeit entwickelten Herstellungsverfahren für Mischvliese zugeführt werden können. Zur Beschichtung der Fasern können Dispergiermittel genutzt werden. In der Industrie werden Fasern durch ein nasses Verfahren mit Dispergiermitteln versehen. Dabei wird das Mittel im flüssigen Medium gelöst und legt sich um die Fasern, was auch einen positiven Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Suspension ausübt. Da sich die Fasern in einem nassen Verfahren leichter beschichten lassen, sind weiterführende Untersuchungen zu den in dieser Arbeit betrachteten nassen Prozessen sinnvoll. Ansätze zu weiteren Untersuchungen könnten folgende sein:

- Der Luftdruck-Blasen Mischer könnte mit einem dickeren Schlauch am Wasserausfluss versehen werden, um die entstandene Suspension in einen anderen Behälter füllen zu können, in dem eine Vliesbildung erfolgen kann.

- Das Prinzip des Pulpers könnte in einer anderen, weniger komplizierten Anordnung verwirklicht werden, da erste Testläufe viel versprechend waren. Auch hier muss eine andere Verbindung zwischen Vereinzeln- und Mischprozess mit dem Vliesbildungsprozess gefunden werden.

Aufgrund der in der Arbeit genannten theoretischen Vorteile des nassen Verfahrens, bieten sich weiterführende Untersuchungen in dieser Richtung an.

Um ohne weiteren Forschungsaufwand akzeptable Prüfplatten zu fertigen, wird dennoch das trockene Verfahren empfohlen. Dabei könnten die Fasern in einem nassen Verfahren beschichtet und anschließend wieder getrocknet werden, um sie dem entwickelten Herstellungsprozess zuzuführen. Dies wäre allerdings sehr zeitaufwendig. Weiterhin wäre es denkbar, das Dispergiermittel über eine Zerstäubung mit Druckluft dem Prozess des Druckluftmischers

zuzuführen. Diese Überlegung ist sinnvoll, da das Prinzip des Druckluftmischers von den in dieser Arbeit getesteten Methoden am besten funktioniert hat.

In Zukunft muss also zunächst eine Lösung für das Problem des Beschichtens der rC-Fasern gefunden werden, um die Fasern anschließend der in dieser Arbeit entwickelten Mischvliesherstellung zuführen zu können. Daran wird sich die Fertigung der Prüfplatten anschließen. Nachfolgende Untersuchungen müssen zeigen, wie gut sich die erzeugten Mischvliese zur Herstellung von Prüfplatten eignen und ob sich durch die beigemischten recycelten Kohlenstofffasern ein positiver Effekt auf die mechanischen Eigenschaften der Faserverbundhalbzeuge nachweisen lässt.

Literaturverzeichnis

AGO Hydroair GmbH. *agoberlin.de*. 2015.

http://www.agoberlin.de/hydroair/gew_anl_schutz/ago_gwa003.html (Zugriff am 02. 07 2015).

Albrecht, W. *Vliesstoffe – Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000.

AVK –, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. *Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen-Verarbeitung-Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2010.

Bonnet, Martin. *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage, 2009.

Dittmar, Harri. Verfahren zur Herstellung eines thermoplastisch verformbaren faserverstärkten Halbzeugs auf Basis von Polyetherimiden. Lenzburg (CH) Patent DE10114554 A1. 09. 03 2001.

Emmerich, Rudolf, und Jan Kuppinger. „Kohlenstofffasern wiedergewinnen – welches ist der richtige Weg für das Recycling von CFK?“ *Kunststoffe*, 06 2014: 92 – 97.

Erb, Wilfried, und Peter Übelmesser. Faservliesmatte, Verfahren zu dessen Herstellung und Faserverbundwerkstoff. Neu-Ulm, Bayreuth Patent EP1618252 B1. 16. 08 2006.

Fischer, Holger, und Hubert Schmid. „Qualitätskontrolle für rezyklierte Carbonfasern.“ *Kunststoffe*, 11 2013: 88 – 91.

GmbH, Lenzing Technik. *lenzing-technik.com*. 2011. <http://www.lenzing-technik.com/engineering/products/viskose-und-fasertechnik/viskosetechnologie/alkalisierung/pulper.html> (Zugriff am 02. 07 2015).

Hackl, Gerrit. *Optimierung des Interfaces in kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen durch CVD-Beschichtung von Kohlenstoffkurzfasern*. Erlangen-Nürnberg, 2007.

Heinick, Daniel. *Hybride Faserverbunde aus Natur- und Kohlenstofffasern*. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012.

Hofmann, Marcel, Bernd Gulich, und Heike Illing-Günther. *Aufbereitung von Carbonabfällen und deren Wiedereinsatz in textilen Strukturen unter Nutzung des Kardierprozesses*. Tagungsbericht, Chemnitz: Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., 2012.

- Hornbogen, Erhard, Gunther Eggeler, und Ewald Werner.** *Werkstoffe – Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen.* Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- Kroll, Lothar, Lars Ulke, und Holger Seidlitz.** *Analytische Berechnung von Schichtverbunden.* Vortrag, Chemnitz: Chemnitz University of Technology, 2010.
- Lützkendorf, Renate.** *Werkstoff- und Prozessentwicklung für thermoförmbare hochleistungsfaserverstärkte Halbzeuge in Serienprozessen.* Schlussbericht, Rudolstadt-Schwarza: Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V., 2014.
- Mieck, K.** Hybridvliese mit haftungsverbessernden Eigenschaften für faserverstärkte Kunststoffe. Thüringen Patent DE19506083A1. 22. 02 1995.
- Mieck, K., R. Lützkendorf, und T. Reussmann.** *Needle-Punched Hybrid Nonwovens of Flax and PPFibers – Textile Semiproducts for Manufacturing of Fiber Composites.* Rudolstadt: Thüringisches Institut für Textile- und Kunststoff-Forschung e.V., 1996.
- Neumann, Malte.** *Mischung unterschiedlicher Faserarten für die Vliesherstellung mit Hilfe einer einfachen Laboranlage.* Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2014.
- Pimenta, Soraia, und Silvestre Pinho.** *Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook.* London: Elsevier, 2010.
- Rademacker, Tim.** „Recycled Carbon Fibres & Potential Applications.“ Vortrag, Achen, Dresden, 2012.
- Rawal, Amit.** *Mechanical properties and damage analysis of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles.* New Delhi, India: Department of Textile Technology, Indian Institut of Technology, 2013.
- Rawal, Amit, Alamgir Sayeed, und Harshvardhan Sarawat.** *A comparison of wide-width tensile strength to its axi-symmetric tensile strength of hybrid needlepunched nonwoven geotextiles.* New Delhi, India: Department of Textile Technology, Indian Institute of Technology, 2012.
- Ruch, Joachim, Hans-Gerhard Fritz, und Erwin Bürkle.** *Innovative Direktverarbeitung von Naturfasern.* Stuttgart, 2002.
- Schürmann, Helmut.** *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden.* Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- Sparrins, Edgars.** *Mechanical properties of flax fibers and their composites.* Lulea, Schweden, 2006.

Weinekötter, Ralf, und Hermann Gericke. *Mischen von Feststoffen – Prinzipien, Verfahren, Mischer.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.

Ziegmann, G. *Werkstoffkunde der Polymere.* Vorlesung, Clausthal: Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, 2001.