
1 Einleitung

Die Anforderungen an Leichtbaumaterialien sind sehr vielfältig. Sie beinhalten unter anderem den Ressourcenverbrauch sowie die Kosten von Herstellung und Betrieb, die Gewährleistung der Materialsicherheit, die Durchführung von verschiedenen Fertigungstechnologien und die Recyclingfähigkeiten [1]. Konstante Entwicklungen zu Faserverbundkunststoffen aus Naturfasern erweitern die Produktvielfalt in vielen industriellen Bereichen. Dabei werden hauptsächlich Bastfasern eingesetzt, aber auch Baumwollfasern sind vertreten. [2–5]

Ein wesentliches Merkmal von Materialien die Einsatz in der Automobilindustrie oder im Bausektor finden, ist die Schalldämmung, die sich jedoch bislang hauptsächlich auf Dämmmaterialien fokussiert. Strukturbauteile wie naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) tragen zwar zur Schalldämmung bei, werden bislang jedoch nicht konkret als Absorber betrachtet. Die geräuschreduzierenden Eigenschaften von Naturfasern werden jedoch bereits beispielsweise bei Vliesstoffen genutzt. [6] Die Verbesserung der Absorption von NFK ist jedoch ebenfalls erwägenswert, da dies zu deutlichen Geräuschreduzierungen führen kann. Die Durchführung von akustischen Messungen ist jedoch aufwendig, weshalb Modelle entwickelt wurden, die eine Prognose des Absorptionskoeffizienten liefern und den Prozess zur Bestimmung der akustischen Wirksamkeit vereinfachen.

Der Strömungswiderstand ist dabei ein wichtiger Parameter zur Einschätzung der akustischen Wirksamkeit, im Speziellen des Absorptionskoeffizienten, von Materialien. Die bisher in der Literatur vertretenen Modelle zur Prognose des Strömungswiderstandes betrachten eine Reihe unterschiedlicher Materialien wie beispielsweise Granulat, Schaumstoffe und, beim Einsatz von Fasermaterialien, hauptsächlich Vliesstoffe. Der Fokus der Studien liegt auf Absorbieren mit hoher Porosität, die durch den Einsatz von polymeren Chemiefasern, z. B. aus Polyester, meist homogene Faserstrahlen aufweisen. Ebenfalls werden keine Materialien mit PLA-Matrix und unterschiedlichen Mischungsverhältnissen betrachtet, wodurch die Hypothese aufgestellt werden kann, dass die bestehenden Modelle nicht für die in dieser Arbeit beschriebenen Materialien zielführend eingesetzt werden können. Infolgedessen soll ein Modell entwickelt werden, das für NFK anwendbar ist und die unterschiedlichen Faser-mischungsanteile berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird daher ein neues empirisches Modell zur Abbildung des Strömungswiderstandes konzipiert, das für NFK mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen der PLA-Matrix und den Naturfasern Bast und Baumwolle ausgerichtet ist. Der Bio-Kunststoff im Verbund mit den Naturfasern besteht aus nachwachsenden Rohstoffen und das Material kann ohne vorherige Trennung recycelt werden [7]. Die Modelle des Standes der Wissenschaft nutzen hauptsächlich den Faserdurchmesser, auch in Verbindung mit anderen Parametern, wie beispielsweise der Dichte, zur Modellfindung. Die Fasern sind jedoch bei NFK durch eine partielle Einbettung in

den Matrixanteil im Material eingebunden, was dazu beitragen kann, dass die direkte Relevanz des Faserdurchmessers im Modell reduziert wird. Dennoch hat der Parameter Faserdurchmesser bei NFK Auswirkungen auf die Materialbeschaffenheit, indem er die Größe und Anzahl der Poren beeinflusst, was ebenfalls durch die Einflussgrößen Dichte und Porosität berücksichtigt wird. Die möglicherweise reduzierte Auswirkung des Faserdurchmessers durch die Matrixkomponente hätte zur Folge, dass ein geeignetes Modell nicht nur auf dem Faserdurchmesser als Eingangsparameter basieren kann.

Dadurch ergibt sich die folgende Forschungsfrage: Inwiefern kann der Strömungswiderstand von NFK mit verschiedenen Naturfaseranteilen durch messbare Materialparameter modelliert werden? Die Lösung dieser Frage wird aufgrund der Komplexität des Materials durch einen empirisch-phänomenologischen Ansatz erarbeitet.

Leichtbauinnovationen bedingen oft negative wirtschaftliche Konsequenzen, da die Fertigungskosten durch erhöhte Werkzeug- und Prozesskosten um bis zu dreimal steigen können [8]. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der Faserdosierung ermöglicht die Fertigung auf den konventionell verwendeten Werkzeugen und Fertigungslinien von NFK, die durch Thermoformen hergestellt werden, wodurch die Prozesskosten unverändert bleiben.

Die Gewichtsreduzierung von Materialien bei Transportmitteln wird aufgrund der mit höherem Gewicht steigenden CO₂-Gas Emission immer wichtiger. Das Verhältnis der Dichte zur Festigkeit von Leichtbauwerkstoffen im Vergleich zu konventionellen Materialien ist günstiger, was sich positiv auf das Werkstoffgewicht auswirkt. [1]

Die in dieser Arbeit verwendeten Materialien ermöglichen eine Geräuschkinderung beispielsweise bei Anwendung im Fahrzeuginnenen durch den Einsatz von Baumwolle, wodurch ebenfalls eine Gewichtsreduzierung ermöglicht wird [3, 9]. Ein effizienter Einsatz von Werkstoffen verringert den Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß, was positive Auswirkungen auf die Umwelt zur Folge hat.

Für Strukturbauteile ist jedoch auch eine Belastbarkeit notwendig, die durch die im Vergleich zu Bastfasern feineren und kürzeren Baumwollfasern geschwächt wird [10]. Die Zugabe von Baumwolle muss daher aufgrund des funktionsbedingten Faktors der Stabilität mit Bedacht durchgeführt werden. Die Quantifizierung der akustischen Wirksamkeit mithilfe von Baumwolle kann durch das zu entwickelnde Modell durchgeführt werden, indem der ermittelte Strömungswiderstand als Grundlage zur Modellberechnung des Absorptionskoeffizienten dient, wodurch entschieden werden kann, welches Mischungsverhältnis der Naturfasern dem Anwendungszweck entsprechend am sinnvollsten ist, ohne aufwendige Prototypen-Herstellung und Versuchsdurchführungen. Deswegen ist es essentiell, den Forschungsstand mit einem neuen Modell zu erweitern, das auf NFK mit unterschiedlichen Fasermischungen ausgelegt ist.

In Abbildung 1 ist der Ablauf der Forschungsarbeit dargelegt. Zunächst werden die Modelle zur Quantifizierung des Strömungswiderstandes des Standes der Wissenschaft dargelegt, um einen Überblick über die Gesamtheit des Forschungsbereichs zu erlangen (Kapitel 2), wodurch verdeutlicht wird, dass sich die zuvor wissenschaftlich betrachteten Materialien stark von den in dieser Arbeit behandelten Werkstoffen unterscheiden. Ebenso werden die relevanten akustischen Modelle zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten dargestellt. Die daraus abgeleitete Zieldefinition ist in Kapitel 3 beschrieben. Der Herstellungsprozess der Werkstoffe sowie die Materialcharakterisierung zur Kennwertgenerierung folgen in Kapitel 4. Die Materialvariationen, die sich durch die PLA-Matrixanteile sowie die Naturfasermischungen aus Flachs und Baumwolle unterscheiden, werden vorgestellt und analysiert, um die für die Modellerstellung notwendigen Kennwerte zu generieren. Ebenfalls werden Verifizierungsproben mit unterschiedlichen Fasertypen und Flächengewichten hergestellt und charakterisiert, um die Funktionalität der Modellansätze zu überprüfen. Auf Basis der ermittelten Kennwerte werden in Kapitel 5 die in Kapitel 2 beschriebenen Modelle des Standes der Wissenschaft angewandt, um den Strömungswiderstand zu prognostizieren, wodurch sich bestätigt, dass eine Quantifizierung des Parameters mithilfe des aktuellen Forschungsstandes nicht umsetzbar ist. Es folgt, ebenfalls in diesem Kapitel, die empirische Modellentwicklung, indem die relevanten Einflussgrößen durch eine Potenzregression in Verbindung gesetzt werden, um Modellansätze zur Ermittlung des Strömungswiderstandes zu generieren. Diese werden beurteilt, sodass auf deren Grundlage Gesamtmodelle entwickelt werden können, was eine Ermittlung des Strömungswiderstandes von NFK mit beliebigen Naturfasermischungen ermöglicht. Die Validierung dieser bestimmt ein Gesamtmodell, das erfolgreich den Strömungswiderstand von NFK mit unterschiedlichen Fasermischungsverhältnissen modellieren kann. Die Bewertung der akustischen Wirksamkeit durch Abbildung des Absorptionskoeffizienten mithilfe von etablierten akustischen Modellen aus der Literatur und ein Vergleich mit den gemessenen Absorptionswerten schließen das Kapitel ab. Die Arbeit endet mit einer Diskussion, die die Grenzen des Modells aufzeigt und einer Zusammenfassung der wissenschaftlichen Erkenntnisse (Kapitel 6).

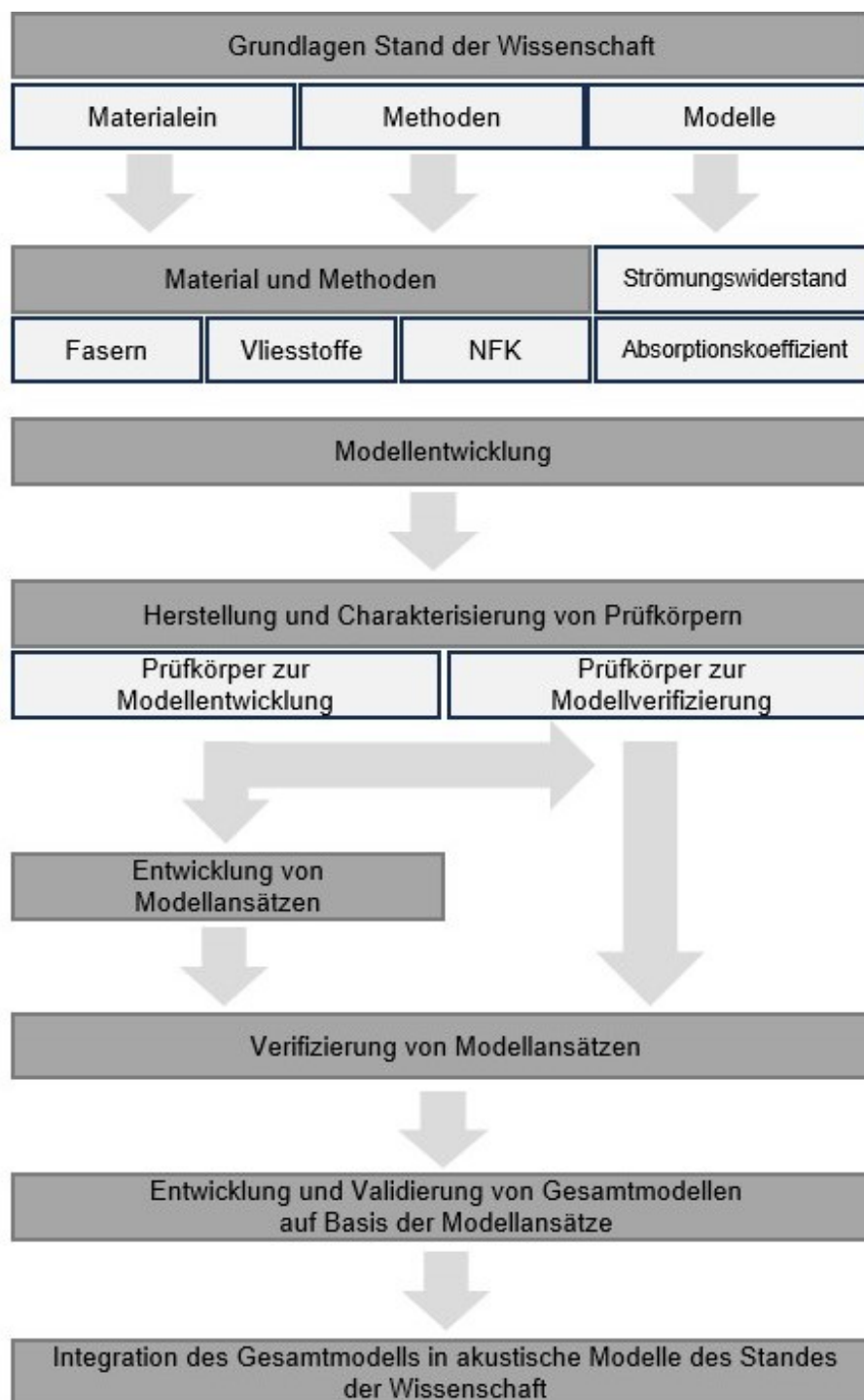


Abbildung 1: Ablaufplan der Forschungsarbeit

Das entwickelte Modell ermöglicht eine Darstellung des Strömungswiderstandes von NFK mit unterschiedlichen Naturfaseranteilen, die als Basis zur Berechnung der akustischen Leistungseinschätzung mithilfe des Absorptionskoeffizienten dienen können, was dazu führt, dass aufwändige Prototypenherstellungen und Messungen ersparlich werden. Diese Arbeit schafft damit einen wesentlichen Beitrag zur Erweiterung des Forschungsstandes von Strömungswiderstandsmodellen.

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Kapitel 2 umfasst die textilen Grundlagen, zu denen die Fasern, Vliesstoffe und NFK gehören sowie die Grundlagen der Materialcharakterisierung. Diese beinhaltet die Porosität und Tortuosität und weitere Materialeigenschaften wie die Materialmorphologie sowie die Grundlagen des Strömungswiderstands und der Akustik. Zuletzt werden verschiedene Strömungswiderstandsmodelle beschrieben, wie auch Modelle zur Abbildung der Akustik.

2.1 Textile Grundlagen

Das Kapitel behandelt verschiedene Naturfasern (Baumwolle und Bastfasern) sowie das Biopolymer PLA. Des Weiteren werden die Eigenschaften von Vliesstoffen aufgeführt, wobei sich das Kapitel 2.1.2 auf kardierte, mechanisch durch Vernadelung verfestigte Vliesstoffe beschränkt. Es folgt eine Beschreibung von Verbundwerkstoffen mit dem Fokus auf naturfaserverstärkte Kunststoffe und dem Heißpressverfahren.

2.1.1 Fasern

Fasern werden in „DIN 60000:1969-01 Textilien; Grundbegriffe“ als textile Faserstoffe, die eine textile Verarbeitung zulassen, definiert. Außerdem muss die Länge wesentlich größer als der Querschnitt sein. [11] Es wird zwischen Natur- und Chemiefasern unterschieden. Naturfasern können aus pflanzlichen, tierischen und mineralischen Rohstoffen bestehen. Die Kategorie der Chemiefasern wird in natürliche und synthetische Polymeren sowie in industriell anorganische Fasern aufgeteilt. [7, 12]

In dem Kapitel „Fasern“ werden Grundlagen der Naturfasern Baumwolle und Bastfasern, im Speziellen Flachs und Hanf, und deren Einflüsse auf den Strömungswiderstand und die Akustik beschrieben. Die Eigenschaften des Biopolymers PLA werden ebenfalls aufgeführt.

2.1.1.1 Bastfasern

Der Begriff „Bastfasern“ steht für verschiedene pflanzliche Hartfasern. Dazu gehören unter anderem Flachs (LI), Hanf (HA), Jute, Kokos, Ramie und Kenaf. [13] Diese Arbeit fokussiert sich im Wesentlichen auf die beiden zuerst genannten Fasern. In Abbildung 2 ist die Oberfläche von Flachs durch eine mikroskopische Aufnahme abgebildet.

Bastfasern bestehen hauptsächlich aus Cellulose (Hanf aus 67 bis 75 %, Flachs aus 62 bis 71 %). Weitere Bestandteile sind mit 16 bis 18 % Hemicellulose, Lignin mit 2 bis 3,3 %, Pektin (0,8 bis 2,0 %) und Wachs (ca. 1 %). [10, 14]

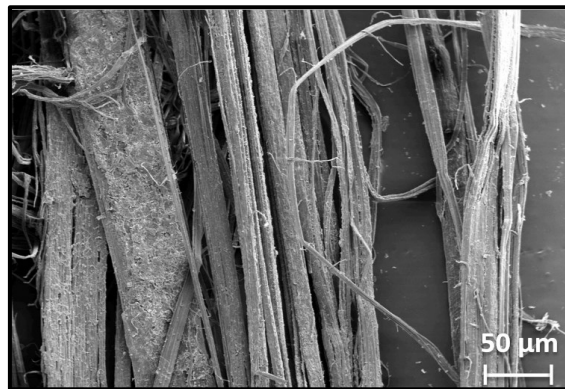
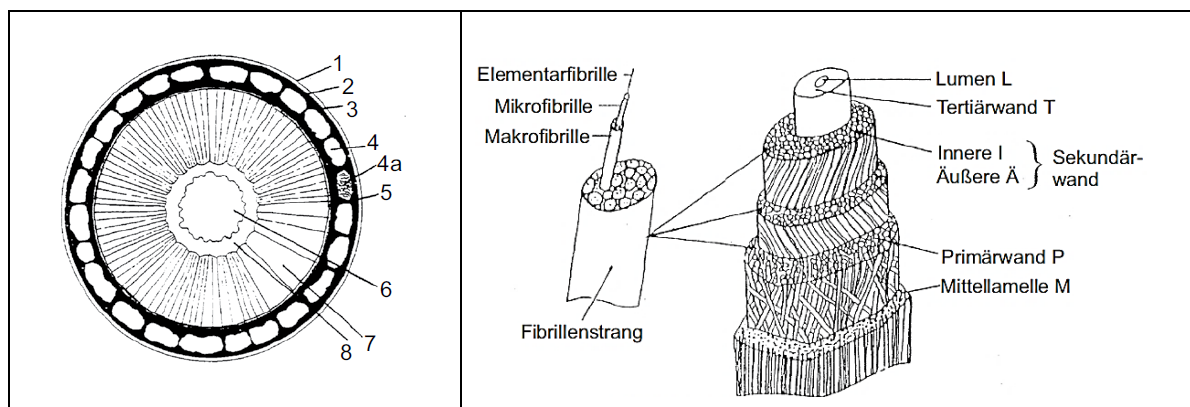


Abbildung 2: Mikroskopische Darstellung von Flachsfasern

Die Fasern werden aus dem Stängel der Pflanze gewonnen [7]. Der Querschnitt und Aufbau der Flachsfaser ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Cuticula, eine wachsähnliche Schicht, ummantelt den Stängel der Faser zur Oberhaut, genannt Epidermis, hin. Die Elementarfasern (10 bis 30 je Bündel) liegen bei Hanf und Flachs in Faserbündeln (20 bis 50 Bündel) mit Einzelfasern, die einen Ring in der Rindenschicht des Stängels formen. Die Fasern werden durch Mittellamellen, bestehend aus Hemicellulose und Lignin, in Bündeln zusammengehalten und können durch mechanische, chemische oder mikrobielle Prozesse gelöst und somit zu feineren Fasern aufgeschlossen werden. [10, 12, 13] Das Cambium ist für das Wachstum der Holzzellen und Rindenschicht verantwortlich. Die dünne Primärwand aus Fibrillen mit Cellulose und die Sekundärwand bestehen aus Cellulosefibrillen. An die Tertiärwand schließt das Lumen an, ein Hohlraum im Inneren der Faser, der entsteht, wenn das Mark der Pflanze abnimmt. [12, 15] Der Strömungswiderstand wird durch den Hohlraum der Fasern begünstigt [16].



1: Cuticula, 2: Epidermis, 3: Rindenschicht, 4: Sklerenchymzellen, 4a: Faserbündel und Einzelfaser, 5: Cambium, 6: Holzzellen, 7: Mark, 8: Lumen

Abbildung 3: Querschnitt (links) und Aufbau (rechts) des Stängels einer Flachsfaser nach [12, 15, 17]

Bastfasern weisen eine grobe Faserstruktur und starke Unregelmäßigkeiten auf: Die Größe der Durchmesser der Fasern ist stark unterschiedlich. Der Faserquerschnitt weist polygonale Muster auf, die sich ringförmig um einen runden oder schlitzzartigen Hohlkörper, das Lumen, legen. Die Faseroberfläche besitzt Rillen und Risse. [12, 18]

Die Querschnittsform der Fasern beeinflussen den Fließwiderstand nicht, da das Seitenverhältnis des Querschnitts geringer als 3:1 ist [19, 20].

Die Dichte von Flachs liegt bei $1,4 \text{ g/cm}^3$, die von Hanf zwischen $1,48$ und $1,5 \text{ g/cm}^3$ [7, 10]. Die relative hohe Dichte wirkt sich auf eine Steigerung des Strömungswiderstandes aus [21].

Flachs- und Hanffasern besitzen eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit von ca. 12 % [18]. Der Absorptionskoeffizient sinkt bei Materialien aus Hanf in einer Epoxidmatrix, wenn diese Feuchtigkeit aufgenommen haben [22].

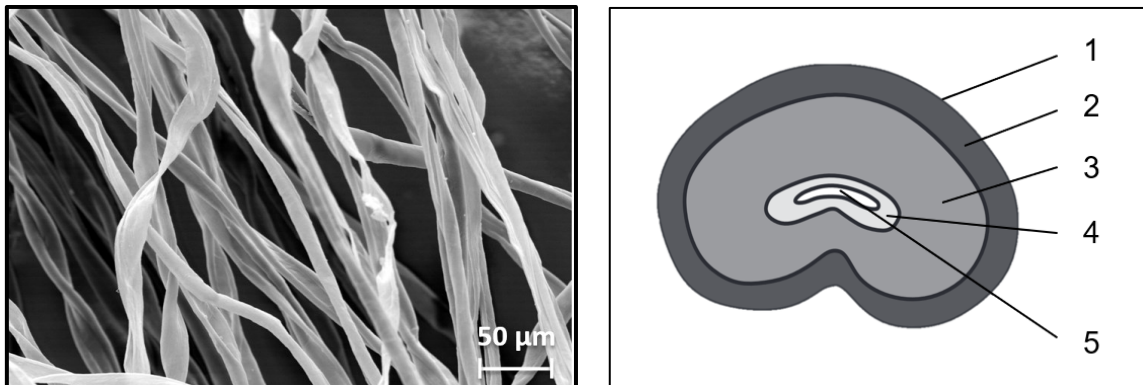
Die Faserfeinheiten können zwischen 2 bis 20 Denier (Hanf zwischen 3 bis 20 und Flachs zwischen 2 bis 16) liegen [10]. Befinden sich noch Einzelfaserbündel im Fasermaterial (technische Fasern), eignet sich der Einsatz für technische Anwendungen, wie beispielsweise für die Kunststoffverstärkung. [13, 23] Die technischen Fasern besitzen große Faserdurchmesser und bewirken dadurch eine Reduzierung des Strömungswiderstandes [16, 24, 25]. Das durchgeführte Entbasten von Hanffasern, das die Faserbündel voneinander separiert, reduziert den Durchmesser, was zu einer wesentlichen Erhöhung der Schallabsorption in der Studie von Hui und Fan [26] geführt hat. Technische Fasern besitzen typischerweise eine Länge von 100 bis 800 mm, was jedoch stark nach Sorte und Verarbeitung schwankt. Elementarfaserlängen betragen 25 bis 40 mm. [12] Singh et al. [22] untersuchten die Faserlänge von Hanf im Verbund mit einer Epoxidmatrix und kamen zum Ergebnis, dass längere Fasern die Dämpfungseigenschaften verbessern.

2.1.1.2 Baumwolle

Baumwolle ist eine Samenfaser von der Art der Malvengewächse und gehört zu den pflanzlichen Naturfasern [13, 23]. Zahlreiche verschiedene Gossypium-Spezies existieren, allerdings werden nur vier unterschiedliche Arten kultiviert, wobei Gossypium-Hirsutum 97 % aller Spezies ausmacht [13]. Es ist möglich, dass Baumwollfasern Samenrückstände, die als Trash bezeichnet werden, enthält [13, 27], was sich negativ auf den Strömungswiderstand auswirkt, wie Nichols [28] beschrieben hat. Eine manuelle Ernte der Fasern reduziert die unerwünschten Rückstände [27].

Der Hauptbestandteil von Baumwollfasern ist mit 92 bis 96 % Cellulose. Hemicellulose ist mit ca. 5,7 % in der Faser vertreten. Ein weiterer Bestandteil ist Pektin (ca. 1,2 % Anteil). Nur geringe Anteile, unter 1 %, haben Lignin und Wachs. [10, 27] Der morphologische Aufbau von Baumwolle ist in Abbildung 4, rechts, dargestellt: Außen befindet sich die Cuticula, die hauptsächlich aus Pektin und Wachs besteht. Danach schließt sich die Primärwand mit Fibrillen an, bestehend aus Cellulose, Wasser und Pektin. In der Sekundärwand befinden sich ebenfalls Fibrillen aus Cellulose. In der Tertiärwand sind Pektine, Wachse und Fette enthalten. Im Inneren der Faser befindet sich ein Hohlraum, der Lumen genannt wird und durch das Trocknen von Plasma nach der Pflanzenernte entsteht. [7, 12] Die Cellulose in den Zellwänden ist in mehr-

schichtigen Strukturen aus kristallinen Mikrofibrillen aufgebaut. Die meiste Cellulose befindet sich in der Sekundärwand der Faser. [18]



1: Cuticula, 2: Primärwand, 3: Sekundärwand, 4: Tertiärwand, 5: Lumen

Abbildung 4: Mikroskopische Darstellung reifer und unreifer Baumwollfasern (links), Bildliche Darstellung des Aufbaus des Faserquerschnittes nach Veit [7] (rechts)

Die Oberfläche von Baumwolle weist Verwindungen bzw. Verdrehungen auf [12]. Diese Oberflächenstruktur von reifer und unreifer Baumwolle ist auf der mikroskopischen Aufnahme in Abbildung 4 auf der linken Seite zu sehen. Der Reifegrad beeinflusst die Beschaffenheit der Faser, da die Reife die Gleichmäßigkeit und Dicke der Zellwände bestimmt, die bei unreifen Fasern nicht entwickelt sind. Das Lumen von Fasern im unreifen Zustand ist meist rund und die Verdrehung der Faser ist fast nicht vorhanden. [12, 18] Ein Hohlraum im Inneren der Faser trägt zu einer Erhöhung des Strömungswiderstandes bei [16], was bedeutet, dass unreife Fasern einen geringeren Strömungswiderstand besitzen als reife.

Der Micronaire-Wert ist ein wichtiges Maß für die Qualität von Baumwolle und wird durch den feinheitsabhängigen Luftwiderstand einer Faserflocke ermittelt [17]. Er gibt Auskunft über den Reifegrad und die Feinheit von Baumwolle, die die lineare Dichte der Fasern bestimmen. Ein Wert von unter drei steht dabei für sehr feine Baumwolle, also Baumwolle mit einem geringen Faserdurchmesser. Werte über sechs sind dagegen ein Indikator für grobe Baumwolle. [7, 18] Baumwolle mit geringeren Micronaire-Werten bedingen daher einen höheren Strömungswiderstand [16, 24, 25].

Die Faserfeinheiten von Baumwolle liegen gewöhnlich zwischen 1 und 3 Denier, die Festigkeit bei 3 bis 6 g/dtex [10]. Die Fasern besitzen im Verbund durch den geringen Faserdurchmesser einen hohen Strömungswiderstand im Vergleich mit beispielsweise technischen Bastfasern [16, 24, 25].

Bei einer Untersuchung des Absorptionskoeffizienten von drei verschiedenen Faserdurchmessern der Studie [21], wurde festgestellt, dass dieser mit abnehmendem Faserdurchmesser zunimmt. [25] ermitteln ebenfalls, dass ein geringer Faserdurchmesser die Schallabsorption erhöht. Dies ist auch bei den in [29] untersuchten Palm- und Kokosfasern der Fall. Die Schallabsorption von Baumwolle ist damit höher als diese von Hanffasern [30].

Feinere Baumwollfasern besitzen mehr Drehungen pro cm als gröbere Fasern. Meist liegt die Anzahl der Verwindungen zwischen 20 und 100 pro cm. Die Kräuselung der Faser, die die gewellte und gebogene Form der Faser ausdrückt, wirkt sich günstig auf die Haftfähigkeit aus: Die natürlichen Windungen stärken den Zusammenhalt bei der Weiterverarbeitung. [12, 31] Außerdem wird die Bauschigkeit der Faser, die die Voluminösität beschreibt, dadurch erhöht. Oft beeinträchtigt eine Faserkräuselung nicht nur den Verarbeitungsprozess positiv, die Dehnung und die Elastizität der Faser werden ebenfalls verbessert. [12] Die Kräuselung verbessert ebenfalls die akustische Wirksamkeit. Die Schalldämmung von künstlich gekräuselten Polyesterfasern konnte in der Arbeit von [16] durch eine Änderung der Kräuselung von mechanisch (sawtooth) zu einer spiralförmigen *Kräuselung*, verbessert werden. Die Studie von Panahi et al. [32] zeigt, dass bei Fasermatten aus Polypropylen (PP) eine größere Faserkräuselung auch eine höhere Absorption zur Folge hat.

Der Querschnitt der Faser ist nierenförmig, genauso wie das Lumen, der Hohlraum, der sich im Inneren der Faser befindet [12, 18]. Die Querschnittsform der Baumwollfasern hat nach [19, 20] keinen Einfluss auf den Strömungswiderstand.

Baumwolle kann je nach Sorte und Produktionsbedingungen wie beispielsweise Witterungseinflüsse, verschiedene Längen und Qualitäten besitzen. Die Längen der Baumwollfasern liegen zwischen 10 und 56 mm. Als Stapellänge bezeichnet man die mittlere Länge der Baumwollfaser. Diese kann manuell durch händisch vorbereitete Stapel oder maschinell bestimmt werden. [12, 27] Aufgeteilt werden die Fasern in Kurz-, Mittel-, Lang- und Extralangstapelfaserbaumwolle. Linters, Fasern mit einer Länge von unter 10 mm, entstehen meist als Nebenprodukt und sind nicht verspinnbar. [12] Mit „Upper Half Mean Length“, abgekürzt mit UHML, wird die durchschnittliche Länge der Hälfte der längsten Fasern bezeichnet. Die „Mean Length“ (ML) ist die durchschnittliche Länge der gesamten Fasern im Muster. [18, 27]

Eine Eigenschaft der Fasern ist die hohe Feuchtigkeitsaufnahme, was zum Aufquellen der Fasern bei Feuchtigkeit führt. Die Wasseraufnahme der Faser kann ca. 8,5 % betragen. [18, 23] Eine Studie von Sakthivel et al. [33] untersuchte die akustischen Eigenschaften von recycelten Vliesstoffen aus Baumwolle und Polyester und konnte keine Unterschiede bei einer hohen Luftfeuchtigkeit feststellen.

Aufgrund der eng aneinanderreihenden Cellulosemoleküle besitzt Baumwolle mit $1,52 \text{ g/cm}^3$ eine hohe Dichte im Vergleich zu anderen Naturfasern [12]. Eine zunehmende Dichte hat eine Steigerung des Strömungswiderstand zur Folge [21].

Baumwolle für Bekleidungstextilien ist ein großer Verarbeitungssektor der Fasern, jedoch werden diese auch für zahlreiche technische Anwendungen, wie beispielsweise in der Automobilbranche, eingesetzt [34].

2.1.1.3 Polylactid

Polylactid bzw. Polylactic-Acid gehört zu den Biokunststoffen. Dies bedeutet, dass das Polymer im Wesentlichen aus biobasierten Rohstoffen besteht. [35–37] Die bei-

den Begriffe für das Polymer werden durch den Herstellungsprozess bestimmt: Die direkte Verarbeitung von Milchsäure erzeugt Polylactic acid, während man bei der Gewinnung des Polymers über Dilactid von Polylactid spricht. [7]

Der Kunststoff gehört zu den aliphatischen Polyestern und wird durch Fermentation von Milchsäure hergestellt [37–39]. Das Polymer kann ebenfalls aus Polyglykolsäure gefertigt werden [40]. Als Ausgangsmaterialien dienen beispielsweise Zucker, Stärke, Pflanzenöle oder Zellulose. Des Weiteren können ebenfalls tierische Stoffe wie Chitin verwendet werden. [41] PLA in Faserform ist in Abbildung 5 dargestellt.

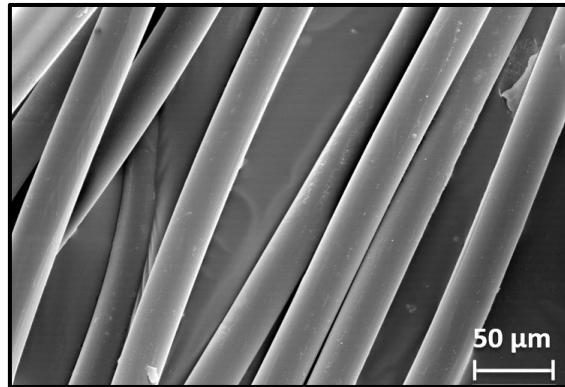


Abbildung 5: Mikroskopische Darstellung von PLA-Fasern

Die Eigenschaften von PLA, wie beispielsweise der Kristallinitätsgrad sind von den chemischen Strukturen abhängig. Die chemische Beschaffenheit des Milchsäure-Monomers bedingt die verschiedenen Möglichkeiten der Kohlenstoffatomanordnung und folgend die beiden Isomere D-Milchsäure und L-Milchsäure, was in die zwei unterschiedliche Polylactide PLLA (Poly-L-Lactid Acid) und PDLA (Poly-D-Lactid Acid) resultiert. Ersteres ist hochkristallin, hart und benötigt langwierige Abbauprozesse, letzteres hingegen ist amorph, weich und kann schnell biologisch abgebaut werden. Wird die Milchsäure, die aus D- und L-Milchsäure besteht, zu einem Polymer umgesetzt, entsteht Poly-DL-lactid (PDLLA). [39, 42, 43]

Polylactid als Thermoplast kann mithilfe des Schmelzspinnverfahrens zu einem Endlosfilament verarbeitet werden. Dabei entstehen die Fasern durch Schmelzen des Polymers, die dabei entstandene spinnfähige Masse durch Auspressen durch Spinnlöcher und einer anschließenden Faserverfestigung durch Abkühlen. [31] Die empfohlenen Verarbeitungstemperaturen betragen zwischen 190 - 210 °C [38, 44]. Eine Vortrocknung des Granulats ist durch die Feuchtigkeitsaufnahme notwendig [40]. Die Dichte von PLA beträgt je nach Type ca. 1,25 g/m³ [38].

Die Feuchtigkeitsaufnahme von Materialien aus PLA ist sehr gering [7].

PLA ist durch Hydrolyse biologisch nach *DIN EN 13432 Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau* [45] abbaubar, was bedeutet, dass der Kunststoff durch Mikroorganismen komplett abgebaut werden kann. Dabei werden CO₂, Wasser sowie Biomasse freigesetzt. [7, 23, 39, 41]