

Charakterisierung, Modellierung und Simulation des Materialverhaltens von Papierfaserprodukten unter Verpackungsbedingungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Björn Palm

aus

Haltern am See

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Stumpf

Dortmund, 2017

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Aus Zellstoff hergestellte Konstruktivpolster | 1 |
| 1.2 | Geometrie von Konstruktivpolstern | 2 |
| 1.3 | Motivation | 3 |
| 1.4 | Zielsetzung | 4 |
| 1.5 | Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 | Stand der Technik | 7 |
| 2.1 | Bestimmung von Materialparametern | 7 |
| 2.1.1 | Verpackungsrelevante mechanische Grenzwerte | 7 |
| 2.1.2 | Verpackungsprüfung und Normen | 9 |
| 2.1.3 | Universalprüfmaschine | 14 |
| 2.1.4 | Dynamische Materialuntersuchungen | 17 |
| 2.1.5 | Dehnratenabweichung | 20 |
| 2.1.6 | Übersicht bekannter Versuchsaufbauten für Hochgeschwindigkeitsversuche | 21 |
| 2.2 | Bekanntes Materialverhalten von Faserformmaterialien | 22 |
| 2.3 | Materialmodellierung | 24 |
| 2.3.1 | Materialgesetze | 25 |
| 2.3.2 | Materielle Zwangsbedingungen | 27 |
| 2.3.3 | Materielle Symmetrien | 28 |
| 2.4 | Rohstoff für Konstruktivpolster aus Naturfasern | 28 |
| 2.4.1 | Klassifizierung von Zellstofffasern | 28 |
| 2.4.2 | Kenngößen | 29 |
| 2.4.3 | Herkunft und Aufbau der Cellulosefaser | 29 |
| 2.4.4 | Zusammenhalt von Cellulosefasern | 34 |
| 2.4.5 | Aufbereitung | 35 |
| 2.5 | Faserformverfahren | 36 |
| 2.5.1 | Anformvorgang | 37 |
| 2.5.2 | Pressen und Trocknen | 38 |
| 2.5.3 | Werkstoffverhaltenbeeinflussende Herstellungsparameter | 39 |
| 2.6 | Simulation von Zellstoffen | 42 |
| 3 | Theoretische Grundlagen | 43 |
| 3.1 | Signalverarbeitung und Digitalisierung | 43 |
| 3.1.1 | Nyquist-Shannon Abtasttheorem | 43 |
| 3.1.2 | Fourier-Transformation | 45 |
| 3.2 | Numerische Zeitintegrationsverfahren | 46 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Parameteridentifikation | 49 |
| 4.1 | Materialgesetze | 49 |
| 4.1.1 | Definition der Zielgrößen | 49 |
| 4.1.2 | Definition der Einflussgrößen | 50 |
| 4.2 | Materielle Zwangsbedingungen | 52 |
| 4.3 | Materielle Symmetrien | 53 |
| 5 | Bereitstellung der Prüfmöglichkeiten | 55 |
| 5.1 | Evaluation und Optimierung der Universalprüfmaschine | 55 |
| 5.1.1 | Probenspannvorrichtung | 55 |
| 5.1.2 | Messtechnik | 56 |
| 5.1.3 | Evaluierung des Prüfgeschwindigkeitsverhaltens | 59 |
| 5.1.4 | Optimierung bzgl. anlagenelastizitätsbedingter Abweichung | 61 |
| 5.1.5 | Optimierung der beschleunigungsbedingten Abweichung | 63 |
| 5.1.6 | Ergebnisse der Evaluation und Optimierung | 65 |
| 5.2 | Entwicklung einer Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 66 |
| 5.2.1 | Auswahl des Anlagenprinzips | 66 |
| 5.2.2 | Auswahl der Messtechnik | 67 |
| 5.2.3 | Konstruktion des Versuchsaufbaus | 69 |
| 5.3 | Vergleich der bestehenden Prüfmöglichkeiten | 75 |
| 5.4 | Steuerungssoftware | 76 |
| 5.5 | Probenerstellung | 77 |
| 5.5.1 | Rohstoff | 78 |
| 5.5.2 | Vlieserstellung | 78 |
| 5.5.3 | Probenfertigung | 79 |
| 5.5.4 | Probenkonditionierung | 82 |
| 6 | Versuchsplanung, -durchführung und Datenaufbereitung | 85 |
| 6.1 | Versuchsplanung | 85 |
| 6.2 | Versuchsdurchführung | 87 |
| 6.2.1 | Druck- und Zugversuche zur Bestimmung der Zielgrößen | 87 |
| 6.2.2 | Versuche zur Bestimmung der materiellen Zwangsbedingungen | 89 |
| 6.2.3 | Versuche zur Bestimmung der materiellen Symmetrien | 89 |
| 6.3 | Datenaufbereitung der Zug- und Druckversuche | 89 |
| 6.3.1 | Kanalsynchronisierung | 90 |
| 6.3.2 | Berechnung der Anregungsfunktion und Korrektur der Versuchsdaten | 91 |
| 6.3.3 | Dehnung | 100 |
| 6.3.4 | Spannung | 101 |
| 6.3.5 | Technische Elastizitätsgrenze | 101 |
| 7 | Datenauswertung und Modellierung | 105 |
| 7.1 | Isotropie in der Ebene | 105 |
| 7.2 | Querkontraktion | 106 |
| 7.3 | Elastisches Verhalten / technische Elastizitätsgrenze | 107 |
| 7.4 | Plastizität | 110 |
| 7.5 | Zug- und Druckfestigkeit | 115 |
| 7.6 | Spannungs-Dehnungsverhalten | 119 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8 | Simulation | 121 |
| 8.1 | Softwareauswahl | 121 |
| 8.2 | Materialmodellauswahl | 121 |
| 8.3 | Bestimmung der modellspezifischen Werkstoffkennwerte | 123 |
| 8.3.1 | Querkontraktionszahl | 123 |
| 8.3.2 | Elastizität | 123 |
| 8.3.3 | Plastizität | 124 |
| 8.3.4 | Versagen | 126 |
| 8.4 | Durchführung der Simulation | 127 |
| 9 | Validierung | 129 |
| 9.1 | Angleichung der Simulationsdaten an die Modellierungsdaten | 129 |
| 9.2 | Parametersatz 1 | 129 |
| 9.3 | Parametersatz 2 | 130 |
| 9.4 | Parametersatz 3 | 131 |
| 9.5 | Parametersatz 4 | 131 |
| 9.6 | Bewertung der Simulationsergebnisse | 132 |
| 9.7 | Sicherheitsfaktor | 132 |
| 9.7.1 | Messketten | 133 |
| 9.7.2 | Modellunsicherheiten | 135 |
| 9.7.3 | Simulationsabweichungen | 135 |
| 9.7.4 | Bestimmung der maximal benötigten Sicherheitsfaktoren | 136 |
| 10 | Zusammenfassung und Ausblick | 139 |
| 11 | Literatur | 141 |
| | Abbildungsverzeichnis | 147 |
| | Tabellenverzeichnis | 152 |
| | Symbolverzeichnis | 155 |
| | Anhang | 162 |
| A | Tabellen und Diagramme der Konstruktionssystematik | 163 |
| B | Genauigkeiten der Messketten | 167 |

1 Einleitung

„We want to go green“ ist eines der Leitmotive der modernen Industriegesellschaft. Namhafte Firmen wie *General Electric*, *Coca Cola*, *Dell* und *HP*, aber auch Automobilhersteller wie *Tesla Motors*, *Toyota* und *Honda* werben mit ihren klimafreundlichen Unternehmenszielen [Bus08]. Auch Logistikunternehmen wie beispielsweise *DHL* [Deu13] haben dieses Ziel in ihre Firmenphilosophie integriert. Der Klimawandel soll gestoppt bzw. verlangsamt werden, um die globale Erderwärmung abzubremesen und ein nachhaltiges und natürliches Gleichgewicht wieder herzustellen. Hierzu ist vor allem der Ausstoß von Treibhausgasen und die Verwendung von fossilen Ressourcen zu reduzieren. Mit 63,8% wurde im Jahr 2013 der größte Teil des weltweit verwendeten Öls im Transportsektor verbraucht [Int15]. Aber auch die Produktion von Kunststoff trägt ihren Beitrag zum Ölverbrauch bei. Um den Verbrauch der fossilen Ressourcen zu reduzieren, sollten diese effizienter genutzt oder durch naturbasierte Stoffe substituiert werden. Somit scheint dem in den 1960er Jahren aufgekommenen Kunststoff-Boom [Poh97] ein Ende bevor zu stehen.

Zur Eingrenzung der stetig wachsenden Müllberge ist bei der Entwicklung von innovativen Werkstoffen besonders auf die Möglichkeit des Recyclings bzw. die natürliche Abbaubarkeit zu achten. Die Substitution von Kunststoff durch bereits bekannte naturverträglichere Werkstoffe würde auch hier einen Beitrag zur Abfallvermeidung leisten.

In der Verpackungsindustrie wird heutzutage auf zwei wesentliche Rohstoffe zurückgegriffen: Zell- und Kunststoff. Zellstoff wird in Form von Wellpappe hauptsächlich zur Herstellung einer leicht handhabbaren Hüllgeometrie eingesetzt. Die Fixierung des zu transportierenden Gutes in dieser äußeren Form wird jedoch zumeist durch Kunststoffe realisiert. Diese Kunststoffe können zur Dämpfung als Schüttgut in den Zwischenraum zwischen Produkt und äußerer Hülle gefüllt oder als dreidimensionales Formelement entsprechend auf das Produkt individuell angepasst werden. Diese Konstruktivpolster genannten Elemente werden heutzutage zwar bereits teilweise aus Zellstoff hergestellt, verglichen mit Kunststoff jedoch nur in einem geringen Anteil. Eine Erhöhung dieses Anteils würde den Verbrauch an fossilen Rohstoffen reduzieren. Durch die Möglichkeit des Recyclings und die natürliche Abbaubarkeit erfolgt eine zusätzliche Reduktion des Abfallvolumens.

Die vorliegende Arbeit soll Lösungswege aufzeigen, wie eine ausgedehntere und zielgerichtete Nutzung von naturfaserbasierten Verpackungselementen realisiert werden kann.

1.1 Aus Zellstoff hergestellte Konstruktivpolster

Da das äußere Design der meisten Produkte mehr den Idealen des menschlichen Geschmacks als den Ansprüchen der logistischen Lieferkette folgt, ist es nötig, eine Umverpackung zu schaffen, die für die Zeit des Transports die Anforderungen der Logistik erfüllt. Um beispielsweise eine gute Stapelbarkeit zu erreichen, sind quaderförmige Gebilde prädestiniert. Folglich müssen die zu

transportierenden Güter in dieser quaderförmigen Umverpackung fixiert werden. Hierzu stellen die Konstruktivpolster den formschlüssigen Übergang zwischen Ware und Umverpackung her. Es existieren jedoch auch integrale Bauweisen, die das Konstruktivpolster und die Umverpackung vereinen. Als bekanntes Beispiel sei an dieser Stelle die umgangssprachlich als Eierkarton bekannte Verpackung für Hühnereier genannt (vgl. Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Integralbauweise von Konstruktivpolster und Umverpackung (Eierkarton)

Die primäre Anforderung an Konstruktivpolster ist neben der Fixierung die Fähigkeit, die verpackten Gegenstände vor Stößen, die eine Beschädigung des Gegenstands nach sich ziehen, zu schützen. Hierzu ist es nötig, die von außen auf das Konstruktivpolster einwirkende Stoßenergie derart umzuwandeln und dem verpackten Gegenstand zuzuführen, dass dieser keine bleibende und schädigende Verformung erfährt. Die eingebrachte Energie ist folglich zeitlich wie auch örtlich so zu verteilen, dass Spitzenlasten auf ein Maß gedämpft werden, welches für das verpackte Gut unschädlich ist.

Aufgrund des Herstellungsprozesses weisen aus Zellstoff hergestellte Konstruktivpolster eine Art Netz- oder Gitterstruktur aus einzelnen Fasern auf. Das Ergebnis ist mit einem hoch porösen Schaum vergleichbar, der als Bindungselemente einzelne Zellstofffasern aufweist. Die Zwischenräume dieser Schaumstruktur sind mit Luft gefüllt. Dieser Aufbau begünstigt die Dämpfungseigenschaften des Werkstoffs, da bei Belastung lediglich die Netzstruktur verformt wird, aber kein solider Körper. Aufgrund der Nachgiebigkeit ist der Werkstoff in der Lage, auftretende punktuelle Belastungen über seine Gitterstruktur großflächig zu verteilen und punktuelle Belastungen des verpackten Guts zu verhindern.

1.2 Geometrie von Konstruktivpolstern

Konstruktivpolster aus Kunststoff füllen die Zwischenräume zwischen Umverpackung und verpacktem Gut meist vollständig aus. Somit wirken mögliche Beschleunigungskräfte auf die Oberflächen großer Volumina, in denen sich die entstehenden Drücke innerhalb kürzester Distanz groß-

räumig verteilen. Dementsprechend benötigt diese Art von Konstruktivpolstern keine hohen Festigkeitseigenschaften. Es kommen folglich meist Kunststoffschäume zum Einsatz, die sehr weiche Materialeigenschaften haben.

Zellstoffbasierte Konstruktivpolster können jedoch bedingt durch ihren Herstellungsprozess nur begrenzte Volumina bzw. Dicken erreichen. Auch variierende Dicken sind nur unter extremem Aufwand bei der Herstellung realisierbar. Daher sind zellstoffbasierte Konstruktivpolster im Gegensatz zu den Konstruktivpolstern aus Kunststoffen eher als Freiformflächen mit konstanter Dicke anzusehen.

1.3 Motivation

Eine vom *Verband der Wellpappen-Industrie e.V.* initiierte Studie der *DRICON Managing Consultants AG* (Frankfurt am Main, Deutschland) ermittelte das Effizienzpotential durch die Verwendung anforderungsgerechter Transportverpackungen im deutschen Einzelhandel [VWI04]. Diese diagnostizierte einen jährlichen Schaden von über 300 Mio. € durch Transportverpackungen, die nicht allen Anforderungen der Lieferkette genügen. Folglich ist es erstrebenswert, dass die Transportverpackungen die Anforderungen der Lieferkette einhalten.

Aufgrund der ökologischen Vorteile der naturfaserbasierten Konstruktivpolster soll versucht werden, die Substitution von kunststoffbasierten Konstruktivpolstern durch naturfaserbasierte voranzutreiben, indem bestehende Hemmnisse aufgedeckt und Lösungen hierfür erarbeitet werden. Jedoch benötigt die Herstellung von naturfaserbasierten Konstruktivpolstern verglichen mit kunststoffbasierten deutlich komplexere Werkzeuge. Gründe hierfür sind z. B. die Notwendigkeit, Wasser während des Fertigungsprozesses durch feinste Kanäle abzuleiten.

Um sicherzustellen, dass eine Verpackung den Anforderungen an ihre Belastbarkeit genügt, existieren genormte Prüfverfahren. Diese werden dazu genutzt, fertige Verpackungen inklusive des zu verpackenden Gutes experimentell mit normierten Kräften zu belasten und im Anschluss zu prüfen, ob die Verpackung den Anforderungen gerecht wird. Die Dimensionierung der Verpackung findet demzufolge iterativ statt. Eine Optimierung in Bezug auf Rohstoffmenge und Anforderungserfüllung würde mehrere Iterationsschritte mit immer wieder kehrendem Werkzeugbau benötigen. Wirtschaftlich stünde dieser Aufwand in keinem Verhältnis zu den Vorteilen, die durch eine Optimierung erreicht werden könnten. Folglich werden Konstruktivpolster meist überdimensioniert.

Eine Möglichkeit der Auslegung besteht in der Berechnung des Bauteils. Für geometrisch primitive Bauteile wie z. B. Stahlträger existieren Berechnungsverfahren zur Bestimmung der vorhandenen Spannung σ_{vorh} . In Kombinationen mit einem Tabellenwerk kann diese mit der dem Werkstoff eigentümlichen zulässigen Spannung σ_{zul} verglichen werden. Hierdurch wird es ermöglicht, auf die Haltbarkeit der Konstruktion zu schließen. Da Konstruktivpolster jedoch meist komplexen Freiformflächen entsprechen, ist diese Art der Auslegung nicht umsetzbar.

Eine weitere Möglichkeit, ein Bauteil auf seine Festigkeit hin zu überprüfen, besteht in der Simulation mittels Finite-Elemente-Methode (FEM). Hierbei können beliebig geformte Geometrien auf ihre Belastbarkeit untersucht werden. Für diese Methode sind Kenntnisse über das Materialverhalten und deren Modellierung nötig. Diese sind mittels entsprechender Versuche zu ermitteln.

Bestünde eine Möglichkeit, die mechanischen Eigenschaften eines Verpackungselementes zu prüfen, bevor das entsprechende Werkzeug gebaut wird, würde hiermit erstmalig eine Möglichkeit geschaffen, den Gestaltungsprozess einer wirtschaftlich vertretbaren Optimierung zu unterziehen. Wenn die zu erwartenden Belastungen und die Geometrie inklusive der Massenverteilung des zu verpackenden Guts bekannt sind, könnten durch eine Simulation Bereiche großer und kleiner Belastungen aufgezeigt und die Topologie der Verpackung dementsprechend optimiert werden. Eine Simulationsmöglichkeit ist demzufolge eine Notwendigkeit zur Erstellung eines optimierten Konstruktivpolsters aus Naturfaserstoffen. Für eine Simulation sind jedoch Kenntnisse über das Materialverhalten von Naturfaserstoffen unter den gegebenen Bedingungen, Dehnrate und Klima, und deren Modellierung nötig, die bis dato nicht vollständig untersucht sind.

1.4 Zielsetzung

Um eine wirtschaftliche Optimierung von Konstruktivpolstern aus Naturfasern zu ermöglichen, ist eine Möglichkeit zur numerischen Simulation unerlässlich. Nur so werden kostengünstige Prognosen auf Anforderungserfüllung ermöglicht. Eine praktische Verpackungsprüfung muss nur noch zur Verifizierung durchgeführt werden, wenn bereits davon ausgegangen werden kann, dass die Anforderungen erfüllt werden. Somit können Kosten für den iterativen Werkzeugbau deutlich eingespart werden.

Zur erfolgreichen und realitätsnahen Simulation sind zwei Faktoren von maßgeblicher Bedeutung: Zu Beginn ist es notwendig, das Materialverhalten und seine relevanten Einflussgrößen zu charakterisieren. Hierzu sollen Prüfmöglichkeiten geschaffen werden, welche eine Prüfung des Materials unter den zu erwartenden Bedingungen ermöglicht.

Im Folgenden soll passend zu dem Materialverhalten eine Modellbildung stattfinden. Es existiert bereits eine Vielzahl von Materialmodellen für diverse Werkstoffe, die mit unterschiedlichsten Eigenschaften bzw. Abhängigkeiten versehen sind. Hieraus ist eine Auswahl zu treffen, die dem charakterisierten Materialverhalten weitestgehend entspricht.

Als Ergebnis soll eine Kombination aus Materialparametern und einem Materialmodell erarbeitet werden, welches zur Simulation des Materialverhaltens unter Verpackungsprüfbedingungen dient. Signifikante Einflussgrößen sollen hierbei berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sollen validiert und in eine FEM-Software implementiert werden, so dass eine fertige Lösung zur Simulationsanwendung entsteht.

1.5 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden die Voraussetzungen zur Charakterisierung des Materialverhaltens geschaffen. Hierzu gehört die Bereitstellung entsprechender Prüfmittel. Bereits vorhandene Prüfmittel werden auf Ihre Eignung hin überprüft und ggf. optimiert. Lücken in den Prüfmöglichkeiten werden durch entsprechende Gerätschaften geschlossen.

Einflussgrößen auf das Materialverhalten werden detektiert, quantifiziert und modelliert. Hierzu werden experimentelle Versuche durchgeführt und ausgewertet. Aus bisher geleisteten Arbeiten

und eigenen Vorversuchen ist eine Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens bekannt [Baa06]. Daher wird diese bei der Materialcharakterisierung mit berücksichtigt.

Um eine Entscheidung über das zu verwendende Materialmodell treffen zu können, werden anhand der ermittelten Materialkenndaten und des daraus abzuleitenden Materialverhaltens Kriterien für das benötigte Modell abgeleitet. Aus einer anzufertigenden Auswahl von in Frage kommenden Modellen wird anhand von Bewertungskriterien ein passendes Modell ausgewählt. Nach der Implementierung des Materialverhaltens in das gewählte Modell wird eine Validierung der FEM-Simulation als Nachweis der Realitätsnähe durchgeführt. Abschließend wird diese beurteilt.

2 Stand der Technik

Zu Beginn dieses Kapitels werden die im Allgemeinen benötigten Maßnahmen zur Bestimmung von Materialparametern und deren Einordnung diskutiert.

Zur Identifikation der auf das Werkstoffverhalten einwirkenden Einflussgrößen werden bekannte Zusammenhänge bezüglich des Materialverhaltens von Zellstoffen beschrieben.

Um eine Auswahl eines Materialmodells treffen zu können, werden bekannte Zusammenhänge des Materialverhaltens von Faserformmaterialien genannt und in bestehende Modellzusammenhänge eingeordnet. Hierzu gehören neben den physikalischen Gleichgewichtsbedingungen auch die Stoffgleichungen.

Zur Vermittlung eines grundlegenden Verständnisses des betrachteten Naturfasermaterials wird die Herkunft und der Aufbau von Cellulosefasern, deren Zusammenhalt sowie deren Aufbereitung und Verwendung beschrieben. Dabei erfolgt eine Klassifizierung der Zellstofffasern inkl. ihrer Kenngrößen. Im Anschluss folgt eine Erläuterung des Faserformverfahrens und dessen Einfluss auf das Werkstoffverhalten.

Abschließend werden bekannte Simulationen von Faserformmaterial diskutiert.

2.1 Bestimmung von Materialparametern

Materialparameter beschreiben die materialspezifischen mechanischen Eigenschaften. Die Kenntnis dieser ist grundlegende Voraussetzung dafür, um Verpackungen den im Folgenden erläuterten verpackungsrelevanten Grenzwerten gemäß auslegen zu können. Zur Überprüfung der Anforderungserfüllung von Verpackungen existieren Verfahren zur Verpackungsprüfung. Diese sind in entsprechenden Normen standardisiert und werden im Anschluss vorgestellt.

Zur Ermittlung von Materialparametern sind Prüfmethoden nötig. Daher werden vorhandene Prüfmöglichkeiten beschrieben. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der Eigenheiten von dynamischen Materialuntersuchungen und eine Übersicht bekannter Versuchsaufbauten für dynamische Materialprüfungen.

2.1.1 Verpackungsrelevante mechanische Grenzwerte

Um Verpackungen für einen zerstörungsfreien Transport von Gütern auszulegen, sind Kenntnisse der maximal ertragbaren Belastungen des zu transportierenden Gutes erforderlich. Im Falle des Aufpralls einer Verpackung wirken starke Beschleunigungen auf die Verpackung und ggf. auch auf das verpackte Gut. Zur Festlegung der maximal zulässigen Beschleunigung, unter welcher noch keine Zerstörung des Gutes stattfindet, existieren zwei Möglichkeiten. Entweder werden, sofern vorhanden, Werte des Produktherstellers als Grundlage angenommen, oder die zulässige

Beschleunigung a_{zul} muss anhand der ertragbaren Kraft F_{zul} errechnet werden. Für die zulässige Beschleunigung a_{zul} ergibt sich aus der ertragbaren Kraft F_{zul} auf eine definierte Fläche des verpackten Gegenstandes und der Masse m desselben:

$$a_{zul} = \frac{F_{zul}}{m} \quad (2.1)$$

Im Verpackungsleitfaden der Firma *UPS* [UPS04] sind beispielhaft zulässige Beschleunigungen in Form eines Vielfachen der Erdbeschleunigung angegeben (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Zulässige g-Werte für unverpackte Produkte. g-Wert: Vielfaches der einfachen Erdbeschleunigung [UPS04].

| Empfindlichkeit/ Robustheit | Produkt: | g-Wert: (1 g = 9,81 m/s ²) |
|--------------------------------|--|---|
| Extrem empfindlich | Plasmaschirme, Präzisionsmessinstrumente mit empfindlicher mechanischer Lagerung, z. B. Kreiselkompass | 0–20 |
| Sehr empfindlich | LCD-TV, Raumfahrt/Luftfahrt Navigationsgeräte, Lampen, optisches Gerät | 20–40 |
| Empfindlich | Computer/EDV, Elektro-feinmechanische Geräte, Kassensysteme, Schaltanlagen, Kühlanlagen | 40–60 |
| Mäßig empfindlich | Rundfunk- und Fernsehgeräte, Eier (Hart gekocht, seitlich), elektrische Ausrüstung und Messgeräte, elektrische Haushaltgeräte | 60–80 |
| Mäßig robust | Waschmaschinen, Kühlschränke, Akkumulatoren, Telefonapparate | 80–110 |
| Robust | Glasflaschen, Maschinen, Werkzeuge, Motoren | über 110 |

Diese reichen bei extrem empfindlichen Produkten von 0 g bis 20 g. Robuste Produkte wie Glasflaschen, Werkzeuge und Maschinen erlauben eine maximale Beschleunigung von über 110 g.

In dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen herausgegebenen Verkehrsblatt CTU-Packrichtlinien mit der Dokumenten-Nr. B 8087 [Fro99] werden für den Straßen-, Schienen- und Seeschiffverkehr die in Tabelle 2.2 gezeigten maximal zu erwartenden Kräfte in Abhängigkeit vom Beförderungsmittel genannt. Diese Werte repräsentieren ebenfalls Vielfache der Erdbeschleunigung, die für die Verpackungsauslegung empfohlen werden.

Damit gewährleistet werden kann, dass die verpackten Gegenstände bei einer in Tabelle 2.2 genannten Belastung keinen Schaden nehmen, ist eine Begrenzung der auftretenden Beschleunigungen sicherzustellen. Die bei einem Aufprall auftretende Beschleunigung a_{Aufp} hängt, abgesehen von der Aufprallgeschwindigkeit v_{Aufp} , ausschließlich von dem Verzögerungsweg s_{verz} nach dem folgenden Zusammenhang ab:

Tabelle 2.2: Zulässige g-Werte nach [Fro99]

| Beförderungsmittel | Vorwärts wirkende Kräfte | Rückwärts wirkende Kräfte | Seitwärts wirkende Kräfte |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Straßenfahrzeug | 1,0 g | 0,5 g | 0,5 g |
| Eisenbahn | | | |
| Rangierverkehr* | 4,0 g | 4,0 g | 0,5 g (a) |
| Kombinierter Verkehr** | 1,0 g | 1,0 g | 0,5 g (a) |
| Seeschiff | | | |
| Ostsee | 0,3 g (b) | 0,3 g (b) | 0,5 g |
| Nordsee | 0,3 g (c) | 0,3 g (c) | 0,7 g |
| Weltweite Fahrt | 0,4 g (d) | 0,4 g (d) | 0,8 g |

$1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$

Die obengenannten Werte sind mit der nach unten wirkenden Schwerkraft von 1,0 g sowie mit einer dynamischen Schwankung wie folgt zu verbinden:

(a) = $\pm 0,3\text{ g}$ (b) = $\pm 0,5\text{ g}$ (c) = $\pm 0,7\text{ g}$ (d) = $\pm 0,8\text{ g}$

* Der Einsatz besonders ausgerüsteten rollenden Materials ist ratsam (zum Beispiel Langhub-Stoßdämpfer; Beschriftung der Waggons mit Einschränkungen für den Rangierbetrieb).

** Der Ausdruck „Kombinierter Verkehr“ steht hier als Kürzel für „Waggons mit Containern, Wechselbehältern, Sattelanhängern und Lastwagen sowie Ganzzüge (UIC (Union internationale des chemins de fer) und RIV(Regolamento Internazionale Veicoli))“.

$$a_{\text{Aufp}} = \frac{v_{\text{Aufp}}^2}{s_{\text{verz}}} \quad (2.2)$$

Dabei wird mit dem Verzögerungsweg s_{verz} die Distanz bezeichnet, in der der zu sichernde Gegenstand von der Aufprallgeschwindigkeit v_{Aufp} zum Stillstand $v = 0$ verzögert wird.

Durch die korrekte Auslegung der Verpackung ist es möglich, die Aufprallverzögerung a_{Aufp} zu reduzieren bzw. den Anforderungen anzupassen.

2.1.2 Verpackungsprüfung und Normen

Um einheitliche Bedingungen zur Prüfung der Funktionserfüllung von Verpackungen während des Transports zu schaffen, wurden Prüfnormen vom *Normenausschuss Verpackungswesen* (NAVp) entwickelt, in denen die jeweiligen Prüfverfahren eindeutig beschrieben sind. All diese Prüfnormen sind für die Prüfung von versandfertigen Verpackungen vorgesehen. Eine Übersicht dieser Prüfverfahren bietet das *DIN-Taschenbuch 490/6 - Verpackung 6* [Deu12]. Anhaltswerte für die

jeweiligen Prüfparameter sind in DIN EN 24180-2 zu finden. Die genormten Prüfverfahren beziehen sich auf die Klimatisierung des zu transportierenden Gutes, auf statische oder dynamische Belastungen.

Verpackungen werden den unterschiedlichsten Klimabedingungen ausgesetzt. Im Zeitalter der globalen Logistik begegnet eine Verpackung auf dem Seeweg von Grönland (−20 °C, 60 % relative Luftfeuchtigkeit) nach Kamerun (30 °C, 85 % relative Luftfeuchtigkeit) einem breiten Spektrum von Klimabedingungen. Um die Funktionserfüllung der Verpackung für diesen Fall zu gewährleisten, ist diese entsprechenden Tests zu unterziehen. Klimatische Prüfbedingungen (DIN EN ISO 2233) und Sprühwasserprüfungen (DIN EN ISO 2875) wurden entsprechend festgelegt.

Belastungen, die im eingelagerten Ruhezustand der Verpackung auftreten, werden mittels statischer Prüfverfahren untersucht. Der Einfluss von allgemeinen Belastungen wird durch die Stauch- bzw. Kompressionsprüfung DIN EN ISO 12048 untersucht. Für die Stapelbarkeit von mehreren Verpackungen übereinander ist ein Prüfverfahren in DIN EN ISO 2234 festgelegt. Wird die Verpackung per Luftfracht transportiert, treten in großen Höhen verminderte Luftdrücke auf. Um hierdurch hervorgerufene Beschädigungen zu vermeiden, ist eine Unterdruckprüfung in DIN EN ISO 2873 festgelegt. Die Standfestigkeit einer Verpackung kann mittels einer Umkipprückprüfung nach DIN EN ISO 22876 getestet werden.

Der Einfluss von dynamischen Belastungen kann anhand folgender Prüfverfahren ermittelt werden: Horizontale und vertikale Stoßprüfungen sind in DIN EN ISO 2244 und DIN EN ISO 22248 beschrieben; die Einflüsse periodischer Belastungen können anhand einer Schwingprüfung nach DIN EN ISO 2247 ermittelt werden.

Die in DIN EN ISO 4180 genannten Prüfschärfen (vgl. Tabelle 2.3) gelten für übliche Beanspruchungen eines allgemeinen Verteilungssystems, in denen die auftretenden Belastungen unbekannt sind. Sie sind in 3 Stufen unterteilt:

- Stufe 1:
Sehr langer Transportweg (> 2500 km), oder in Erwartung schlechter Transport- und Infrastrukturverhältnisse;
- Stufe 2:
Langer nationaler Transportweg oder internationaler Transportweg, mit hinreichenden Bedingungen (Straße und Schiene), im gemäßigten Klima;
- Stufe 3:
Kurzer nationaler Transportweg (< 200 km), ohne besondere schädigende Einwirkungen.

Tabelle 2.3: Fallhöhe nach DIN EN ISO 4180

| Masse (kg) | Prüfschärfe (Höhe in cm) | | |
|---------------|-----------------------------|----|-----|
| | 3 | 2 | 1 |
| 0 bis 10 | 60 | 80 | 100 |
| 10,1 bis 20 | 45 | 60 | 80 |
| 20,1 bis 30 | 30 | 45 | 60 |

Als maximale Aufprallgeschwindigkeit ist unter Stufe 1 eine Geschwindigkeit von 2 m/s angegeben, wie aus Tabelle 2.4 ersichtlich. Die maximale Fallhöhe ist mit 400 mm beziffert. Zusätzlich sind abhängig vom Gewicht Fallhöhen von bis zu 1000 mm in Tabelle 2.4 angegeben.

Tabelle 2.4: Prüfpläne und -schärfen für Packstücke mit einer Produktmasse $> 30\text{ kg}$ und $\leq 100\text{ kg}$ nach DIN EN ISO 4180

| Standardreihenfolge | Prüfung | Normative Verweisung | Prüfschärfe | | | Bemerkungen |
|---------------------|---|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | | | geringste 3 | 2 | höchste 1 | |
| Vorbehandlung | Klimatisch | ISO 2233 | 23 °C bei 50 % relativer Luftfeuchte | | | Wenn andere Vorklimatisierungen gewünscht sind, sind atmosphärische Bedingungen aus Tabelle 1 zu wählen. |
| Stoß | Horizontale Stoßprüfung | ISO 2244 | 1 m/s | 1,5 m/s | 2 m/s | Ausführung Stoß auf jede Seitenfläche |
| Kompression | Statische Last | ISO 12048 | Maximallast | Maximallast $\times 2$ | Maximallast $\times 3$ | Maximallast [Packstückmasse \times (Anzahl gestapelter Elemente – 1)] Belasten mit Auflast und Halten |
| Transportschwingung | Schwingung | Rauschen PSD ISO 13355 | Nominal PSD ISO 13355 15 min | Nominal PSD ISO 13355 90 min | Nominal PSD ISO 13355 180 min | Bevorzugte Prüfung Durchführung der Prüfung in vertikaler Achse Wenn die vertikale Achse nicht definiert ist und die Lage des Packstückes während des Transports nicht vorhersehbar ist, ist die Prüfung in drei Achsen durchzuführen (die Prüfzeit beträgt pro Achse 5 min, 30 min oder 60 min). |
| | | ISO 8318 Sinus | 7 m/s ² 15 min | 7 m/s ² 90 min | 7 m/s ² 180 min | Es wird empfohlen, die Prüfung mit variabler Frequenz durchzuführen. |
| Transportschwingung | Wiederholender Stoß | Rauschen PSD ISO 13355 | Nominal PSD ISO 13355 10 min | Nominal PSD ISO 13355 20 min | Nominal PSD ISO 13355 30 min | Anwendung Rauschen PSD ohne den Prüfling auf dem Schwingtisch zu befestigen |
| Kompression | Statische Last | ISO 12048 | Belasten mit Maximallast für 24 h | | | Beaufschlagen mit der zu erwartenden Maximallast [Packstückmasse \times (Anzahl gestapelter Elemente – 1)] |
| Stoß | für Packstücke $\leq 70\text{ kg}$ | ISO 2248 Vertikaler Stoß | 15 cm | 30 cm | 40 cm | Es ist ein Stoß auf den Boden, ein Stoß auf jede Bodenkante und ein Stoß auf jede Bodenecke durchzuführen. |
| Stoß | Fallprüfung für Packstücke $> 70\text{ kg}$ | EN 14149 Kippfall | 10 cm | 20 cm | 30 cm | Es ist je ein Stoß an zwei aneinander liegende Bodenkanten aus vorgeschriebener Höhe auszuführen. |

Nach den Formeln für Geschwindigkeit und Beschleunigung

$$a = \frac{dv}{dt}, v = \frac{ds}{dt} \quad (2.3)$$

errechnet sich nach

$$v = \sqrt{2 \cdot s \cdot a} \quad (2.4)$$

eine Aufprallgeschwindigkeit von 2 m/s bei 400 mm Fallhöhe und 3,1 m/s bei 1000 mm Fallhöhe.

In DIN EN 24180-2 werden die Belastungsarten nach Straßen-, Schienen-, Wasser- und Luftverkehr und Lagerung aufgeteilt. Für die horizontale Stoßprüfung wird das Maximum im Schienenverkehr erwartet und mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 5 m/s beziffert. Auch der höchste Richtwert wird im Schienenverkehr mit 1,8 m/s angenommen. Bei der vertikalen Stoßprüfung wird von einem freien Fall ausgegangen und somit eine Fallhöhe angegeben. Diese orientiert sich an der manuellen Handhabung des Packstücks und wird somit mit einem Maximum von 1200 mm (Aufprallgeschwindigkeit: 3,4 m/s) unabhängig von der Transportart angegeben. Als Richtwert ist eine Fallhöhe von 500 mm angegeben, was einer Aufprallgeschwindigkeit von 2,2 m/s entspricht (vgl. Tabelle 2.5). Das Logistikunternehmen UPS geht in seinem Verpackungsleitfaden [UPS04] aufgrund von Untersuchungen von einer Fallhöhe von 800 mm aus, woraus eine Aufprallgeschwindigkeit von 2,8 m/s resultiert.

Tabelle 2.5: Bezugsprüfschärfen nach DIN EN 24180-2

| Prüfverfahren | Prüfparameter | Einheit | Transportart | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------|-------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------------|--|--|
| | | | Straße | | Schiene | | Wasser | | Luft | | Lagerung | | | | |
| | | | Richtwert | Bereich | Richtwert | Bereich | Richtwert | Bereich | Richtwert | Bereich | Richtwert | Bereich | | | |
| Durch Ausrüstung des Transportmittels und Umwelt bedingte Prüfungen Klima-Regen Temperatur Relative Luftfeuchte Unterdruck | | | in Untersuchung | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schwingprüfung | Dauer | min | 20 | 10 bis 60 | 20 | 10 bis 60 | kurz: 20 lang: 60 | 10 bis 60 | 10 bis 60 | in Untersuchung | in Untersuchung | | | | |
| | ggf. Höhe des Stapels | m | 2,5 | 1,5 bis 3,5 | 2,5 | 1,5 bis 2,5 | 3,5 | 1,5 bis 2,5 | 3,5 bis 7 | | | | | | |
| Stapelprüfung | Dauer | wie angegeben | 1 Tag | 1 Tag bis 1 Woche | 1 Tag | 1 Tag bis 1 Woche | kurz: 1 Tag lang: 1 Woche | 1 Tag bis 1 Woche | 1 Tag bis 4 Wochen | 1 Tag | keiner | kurz: 1 Tag lang: 1 Woche | 1 Tag bis 4 Wochen | | |
| | Höhe | m | 2,5 | 1,5 bis 3,5 | 2,5 | 1,5 bis 2,5 | 3,5 | 1,5 bis 2,5 | 3,5 bis 7 | 1,8 | keiner | 3,5 | 1,5 bis 7 | | |
| Horizontale Stoßprüfung | Geschwindigkeit | m/s | 1,5 | 1,5 bis 2,7 | 1,8 | 1,3 bis 5 | — | — | — | — | — | — | — | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| Durch manuelle Handhabung bedingte Prüfung | Vertikale Stoßprüfung | mm | 500 | 100 bis 1 200 | 500 | 100 bis 1 200 | 300 | 100 bis 1 200 | 100 bis 1 200 | 500 | 100 bis 1 200 | — | — | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1) Geeignete Prüfverfahren werden Gegenstand zukünftiger Internationaler Normen sein. | | | | | | | | | | | | | | | |

Eine Übersicht über die festgelegten Aufprallgeschwindigkeiten bietet Tabelle 2.6. Hieraus sind eine maximale Aufprallgeschwindigkeit von 5 m/s und ein arithmetisches Mittel des Richtwerts von ca. 2,3 m/s ersichtlich und werden für das weitere Vorgehen ausgewählt.

Tabelle 2.6: Aufprallgeschwindigkeiten

| Schrift | Richtwerte | Maximalwerte |
|---------------------------|------------|--------------|
| DIN EN 24180-2 horizontal | 1,8 m/s | 5 m/s |
| DIN EN 24180-2 vertikal | 2,2 m/s | 3,4 m/s |
| UPS Verpackungsleitfaden | 2,8 m/s | |
| DIN EN ISO 4180 | 2 m/s | 3,1 m/s |

Um aus den gewählten Aufprallgeschwindigkeiten v und der Bauteillänge l die werkstofftechnisch relevante Dehnrates $\dot{\epsilon}$

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l} \quad (2.5)$$

zu bestimmen, sind Kenntnisse über die Geometrie der Fasergusselemente notwendig. Eine Untersuchung von unterschiedlichen Konstruktivpolstern ergab einen Mindestabstand des zu verpackenden Gutes zur äußeren Verpackung von ca. 35 mm. Demzufolge ergeben sich für den gewählten Richtwert eine Dehnrates von 65,7 1/s und für den gewählten Maximalwert eine Dehnrates von 142,9 1/s.

2.1.3 Universalprüfmaschine

Zur Untersuchung von Materialeigenschaften steht eine Universalprüfmaschine zur Verfügung. Im Folgenden wird deren Aufbau inkl. der Probenspannvorrichtung und der verwendeten Messtechnik erläutert. Abschließend werden die Prüfmöglichkeiten und Grenzen beschrieben.

Aufbau

Die Universalprüfmaschine besteht aus einer vertikal ausgerichteten Lineareinheit (vgl. Abbildung 2.1a), deren Kugelumlaufspindel durch einen Synchronmotor (*Indramat* MKD 071B-061-KG1-KN) inklusive Absolutwertgeber angetrieben wird. Eine numerische Mehrachs-Steuerung (*Indramat* CLM01.3-X-0-2-0-FW) betreibt mit Hilfe eines Regelgerätes (*Rexroth* DKC 11.1-040-7-FW) den Synchronmotor im Positionsregelungsbetrieb, in welchem per Befehl vorgegebene Positionen angefahren werden. Im Gegensatz hierzu werden im Momentenregelungsbetrieb vorgegebene Momente auf die Kugelumlaufspindel übertragen.

Die numerische Steuerung ist frei programmierbar, so dass beliebige Positionen und Geschwindigkeiten vorgegeben werden können. Hierdurch können Einspannlängen von 0 mm bis 250 mm aufgenommen und belastet werden. Die Grenzen der Parameter des Regelgerätes werden vom mechanischen Aufbau und seiner Trägheit und dem maximal zur Verfügung stehenden elektrischen Strom bestimmt.

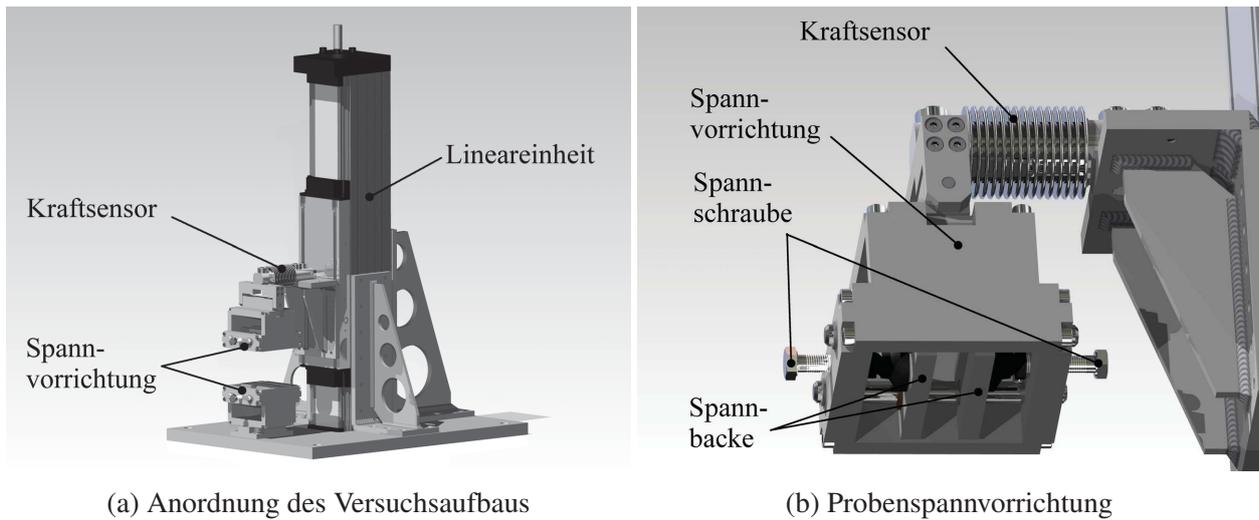


Abbildung 2.1: Aufbau der Universalprüfmaschine

Probenspannvorrichtung der Universalprüfmaschine

Die Probenspannvorrichtung ist an dem Schlitten der Lineareinheit mittels des als Kragarm angeordneten Kraftsensors montiert (vgl. Abbildung 2.1). Zur Probenfixierung werden Spannbacken verwendet, die durch das Aufbringen einer Normalkraft auf die Klemmflächen die Probe fixieren. Dies geschieht mittels einer zentrischen Verschraubung. Wären hierzu mehrere Schrauben jeweils außerhalb der Probe vorgesehen (vgl. Abbildung 2.2), könnte nur sehr aufwendig eine gleichmäßige Vorspannung aller Schrauben gewährleistet werden. Andernfalls verteilt sich die Klemmkraft inhomogen auf die Probe. Um diesen Effekt zu vermeiden, ist eine einzelne Spannschraube mittig in der Klemmfläche platziert. Zusätzlich wird die Parallelität der Spannbacken durch zwei Führungen pro Spannbacke gewährleistet.

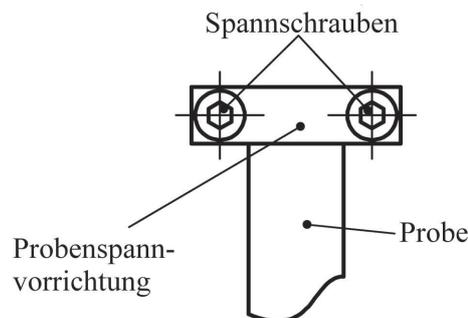


Abbildung 2.2: Beidseitige Einspannung

Messtechnik

Als Kraftaufnehmer kommt ein Biegebalkenaufnehmer der Marke *Hottinger Baldwin Messtechnik* mit der Bezeichnung Z6-4 mit einer Nennlast von 50kg zum Einsatz. Der Weg wird mittels eines induktiven Wegaufnehmers (*Rheinmetall Mess- und Prüftechnik TK-50*) mit einem Nennmessweg von ± 50 mm aufgenommen. Die Verstärkung beider Signale erfolgt jeweils durch einen Trägerfrequenzmessverstärker der Marke *Elan Schaltelemente* mit der Bezeichnung DD5A. Digitalisiert

werden die Daten durch eine A/D-Wandler-Karte (*Adlink PCI-9113A*) in einem Messrechner mit einer Abtastrate von 100Hz pro Kanal. Die Messkarte wäre in der Lage, Daten bis zu einer Summenabtastrate von 100kHz zu erfassen. Dies ist in der vorhandenen Software jedoch nicht vorgesehen. Hier ist die maximale Abtastrate auf 100Hz pro Kanal beschränkt.

Prüfmöglichkeiten

Die Lineareinheit ist in der Lage, Geschwindigkeiten von bis zu 375 mm/s mit einer Beschleunigung von 6000 mm/s^2 zu erreichen. Idealerweise ergeben sich hieraus die in Abbildung 2.3 dargestellten, auf die Endgeschwindigkeit bezogenen Geschwindigkeit-Weg-Verläufe.

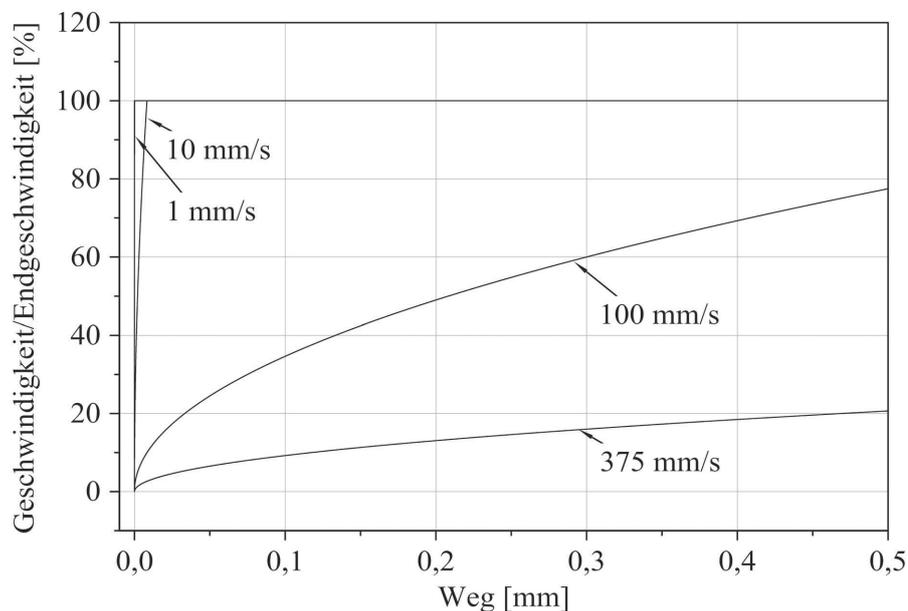


Abbildung 2.3: Ideale Geschwindigkeits-Weg Verläufe der gegebenen Lineareinheit

Aufgrund von Störgrößen und beschränkten Regelungsparametern weichen die realen Verläufe hiervon ggf. ab. Störgrößen sind in diesem Zusammenhang die Reibung zwischen bewegten Teilen (Spindel, Schlitten) und die Massenträgheiten des Aufbaus. Die Regelungsparameter beschränken die Beschleunigung und den Ruck der Anlage sowie die Regelgenauigkeit. All diese Einflussgrößen führen zu Beschränkungen im Geschwindigkeits-Weg-Verlauf und zu einer Abweichung von der Sollwertkurve.

Eine Steigerung der Lineareinheitodynamik wäre nur durch eine Änderung der Hardware möglich, um ein höheres Antriebsmoment bzw. eine schnellere Regelung zu ermöglichen. Jedoch zeigt die theoretische Betrachtung des Geschwindigkeitsverlaufs ab 10mm/s aufgrund der begrenzten Beschleunigung bereits starke Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit. Folglich besteht ein großes Optimierungspotential, die mögliche Maximalgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine von 375 mm/s für Versuche nutzbar zu machen.

2.1.4 Dynamische Materialuntersuchungen

Dynamische Materialuntersuchungen grenzen sich von quasistatischen Untersuchungen durch ihre höhere Geschwindigkeit ab. Hieraus resultieren Effekte, die sowohl die Messdaten als auch das Material selbst beeinflussen können. Diese Effekte gilt es einzuordnen und ihren Einfluss bzw. ihre Verfälschung der Messergebnisse abzuschätzen und ggf. zu eliminieren. Zur Vereinfachung soll ein normaler Zugversuch angenommen werden, bei dem die Probe zwischen zwei Spannvorrichtungen fixiert ist. Eine der beiden Spannvorrichtungen ist hierbei ortsfest. Die andere Spannvorrichtung verformt die Probe durch eine Bewegung parallel zur Probenlängsachse mit der Abzugsgeschwindigkeit v_{Abzug} .

Die resultierende Dehnrates kann in verschiedene Bereiche eingeteilt werden [Ble+04] (vgl. Abbildung 2.4). In dem langsamsten Bereich bis ca. 10×10^{-6} 1/s treten typischerweise Kriechvorgänge und Spannungsrelaxationen auf. Es folgt der quasistatische Bereich. Der dynamische Bereich beginnt bei 10×10^{-2} 1/s und endet bei einer Dehnrates von 10×10^4 1/s. Crashvorgänge, z. B. in der Automobilindustrie, werden im Allgemeinen als dynamisch angesehen. Dehnrates darüber werden als Ballistik bezeichnet. Hierzu gehören durch Geschosse hervorgerufene und explosionsartige Deformationen.



Abbildung 2.4: Klassifizierung der Dehnratesbereiche [Ble+04]

Um die Abhängigkeit einer Materialeigenschaft von der Dehnrates zu charakterisieren, ist es zielführend, die Dehnrates von Versuch zu Versuch zu variieren, innerhalb eines Versuchs jedoch konstant zu halten. Zu Versuchsbeginn muss demnach eines der zuvor eingespannten Probenenden seine Geschwindigkeit sprunghaft von null auf die gewünschte Versuchsgeschwindigkeit ändern. Für einen solchen Sprung der Geschwindigkeit müssten alle Ableitungen der Geschwindigkeit (Beschleunigung, Ruck, usw.) gegen unendlich streben. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Beschleunigung a , Masse m und Kraft F in Gleichung 2.1 muss für eine unendliche Beschleunigung a die Beschleunigungskraft F unendlich sein oder die beschleunigte Masse m gegen null gehen (vgl. Abbildung 2.5a). Abgesehen von der Eigenmasse der Probe an der Einspannstelle ist die Masse der Spannvorrichtung zu berücksichtigen. Die Beschleunigung ist folglich begrenzt (vgl. Abbildung 2.5b). Da keine unendlichen Ruckkräfte zur Verfügung stehen können, ist der praktisch mögliche Ruck begrenzt. Hierdurch wird der Geschwindigkeitsverlauf zwangsläufig differenzierbar (vgl. Abbildung 2.5c). Da zu Beginn eines jeden Versuches die Geschwindigkeit null ist, wird erst nach einer gewissen Zeit die gewünschte Geschwindigkeit erreicht.

Für dynamische Versuche sind Geschwindigkeiten nötig, bei denen die auf 10g begrenzte Beschleunigung von Linearantrieben [HK14] zu nicht mehr akzeptablen Geschwindigkeitsverläufen führt. Daher sind alternative Anlagenprinzipien nötig, welche entweder mittels sehr hohem Energieaufwand oder per Impulsübertragung [Keu06] die gewünschten Geschwindigkeiten erreichen

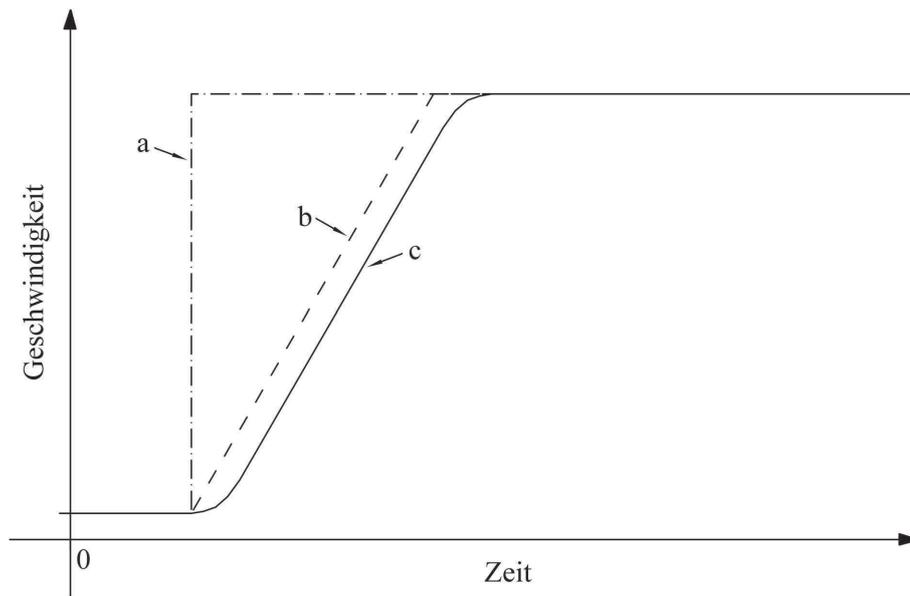


Abbildung 2.5: Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Beschleunigung und dem Ruck: a ideale, unendliche Beschleunigung und idealer unendlicher Ruck; b reale Beschleunigung und idealer unendlicher Ruck; c reale Beschleunigung und realer Ruck.

können. Da die Bereitstellung entsprechend hoher Energien sehr aufwändig ist, wird meist die Methode der Impulsübertragung verwendet.

Das Ziel bei der Impulsübertragung ist die Beschleunigung der zuvor ruhenden Spannvorrichtung innerhalb kürzester Zeit auf die gewünschte Abzugsgeschwindigkeit. Hierfür wird eine zusätzliche Vorrichtung benötigt, die innerhalb eines Freilaufs beschleunigt werden kann und somit einen Impuls aufbaut. Dieser Impuls wird mittels eines schlagartigen Einkoppelns an die ruhende Spannvorrichtung in Form eines elastischen Stoßes übertragen. Durch das schlagartige Einkoppeln erfolgt eine Anregung des gesamten Messaufbaus und somit auch des Kraftmessstrangs. Da der Kraftmessstrang vereinfacht als Schwingungssystem aus Feder und Masse betrachtet werden kann, resultiert aus der Anregung des Systems eine mechanische Schwingung im Kraftmessstrang.

Zur Abschätzung des Einflusses der mechanischen Schwingung auf die Kraftmessung sollen die Messprinzipien zur Kraftmessung erläutert werden. Zu den gängigen Kraftmessprinzipien gehört die Messung der durch die Kraft hervorgerufenen elastischen Verformung eines definierten Prüfkörpers [GG13]. Mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) wird diese Verformung durch eine Widerstandsänderung in ein elektrisches Signal gewandelt. Ein weiteres Kraftmessprinzip ist die Messung der Ladungsverschiebung in einem piezoelektrischen Prüfkörper. Wird ein piezoelektrischer Kristall mit einer Kraft belastet, wird dieser zusammengedrückt, und die Ladungen verschieben sich innerhalb des Kristalls. Diese Ladungsverschiebung bewirkt eine Spannung an den Kristalloberflächen, die gemessen werden kann.

Die mechanische Schwingung im Kraftmessstrang erzeugt demzufolge eine Schwingung im elektrischen Messsignal. Kraftaufnehmer sind so konstruiert, dass sie eine hohe Steifigkeit aufweisen, damit der Einfluss ihrer belastungsbedingten Verschiebung auf das Messsystem möglichst gering ausfällt. Kleinste Auslenkungen eines Kraftaufnehmers, wie z. B. die schlaginduzierte Schwingung, führen hierdurch zu Schwankungen im Messsignal und überlagern die Materialantwort des

Versuchs. Die nachträgliche Extraktion der Schwingung aus den aufgenommenen Daten des Versuchs gestaltet sich als aufwändig, da sie teils schwer von der Materialantwort abzugrenzen ist.

Daher haben Bleck u. a. [Ble+04] drei Varianten zur Schwingungsreduktion untersucht. Die erste Möglichkeit besteht in der Platzierung der Sensorik außerhalb des Schwingungseinflusses, direkt auf der Probe. Diese Variante lieferte gute Ergebnisse in der Reduktion der Schwingung im Messsignal und beeinflusste das Beschleunigungsverhalten nicht. Bei Werkstoffen, die sich im Materialverhalten sehr von dem der DMS und deren Kleber unterscheiden, kann es jedoch zur Beeinflussung der Messung kommen. Die Probe und der DMS inkl. seinem Kleber sind als Verbundwerkstoff zu betrachten. Für den Fall, dass das Verhältnis der Elastizitätsmoduln zwischen Probe und DMS sehr klein ist, verfälscht der applizierte DMS die Messwerte durch seine eigene Steifigkeit.

Eine weitere Möglichkeit zur Schwingungsreduktion besteht in der Dämpfung des Einkopplungsvorgangs. Hierdurch wird die Zeit für die Beschleunigungsänderung verlängert und somit der Ruck und die Schwingung in ihrer Amplitude reduziert. Keuerleber [Keu06] hat hierfür folgende Materialien zwischen die aufeinander prallenden Maschinenteile eingefügt: Bleidraht, Leder, Schaumstoff, Knete und ein thermoplastisches Elastomer. All diese Maßnahmen haben den unerwünschten Nebeneffekt, dass sie durch die Dämpfung des Rucks auch das Beschleunigungsverhalten dämpfen. Hierdurch wird die Dehnrates im elastischen Bereich reduziert und die gewünschte Dehnrates erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht.

Als dritte Variante wird die Veränderung der Massen bzw. Steifigkeiten des Kraftmessstrangs genannt. Ein in den Kraftfluss des Messaufbaus integrierter Sensor bildet zusammen mit dem Aufbau ein Schwingungssystem. Dieses besteht im Wesentlichen aus Steifigkeiten (Federn), Massen und Dämpfern [Göt71] und kann zu einem theoretischen Ersatzabbild zusammengefügt werden. Im einfachsten Fall besteht dieses aus einer Parallelschaltung einer Feder mit der Federsteifigkeit c , einem Dämpfer mit der Dämpfungskonstante d und einer Masse m . Für dieses Ersatzabbild des Systems kann nach Jäger [JMK13] eine Bewegungsgleichung aufgestellt werden. Zu einem beliebigen Zeitpunkt t sei die Masse m um s ausgelenkt. Auf die Masse wirken die Federrückstellkraft F_{Feder} :

$$F_{\text{Feder}} = cs \quad (2.6)$$

und die Dämpfungskraft $F_{\text{Dämpfer}}$:

$$F_{\text{Dämpfer}} = d\dot{s}. \quad (2.7)$$

Somit gilt nach *Newton*:

$$-cs - d\dot{s} = m\ddot{s} \quad (2.8)$$

bzw.:

$$m\ddot{s} + d\dot{s} + cs = 0. \quad (2.9)$$

Dividiert durch die Masse m ergibt sich:

$$\ddot{s} + \frac{d}{m}\dot{s} + \frac{c}{m}s = 0, \quad (2.10)$$

wobei $\frac{c}{m}$ die Eigenkreisfrequenz ω_0 des ungedämpften Systems und $\frac{d}{2m}$ die Abklingkonstante δ darstellt. Dementsprechend ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega_0^2s = 0. \quad (2.11)$$

Durch eine Veränderung des Systems sind folglich Änderungen der Eigenschwingungen in Frequenz und Amplitude zu erwarten. Die Amplitude der Schwingung hängt hierbei von der Dehnrates des Versuchs sowie der Masse der Einspannung und die Frequenz der Schwingung von der Steifigkeit des Messstranges ab [Ble+04].

Zusammenfassend zeigt sich, dass dynamische Materialuntersuchungen vielerlei Zusatzkenntnisse benötigen, um realitätsnahe Parameter zu identifizieren. Es sind Probleme zu erwarten, die aus quasistatischen Versuchen nicht bekannt sind und für die optimale Lösungen nicht existieren.

2.1.5 Dehnratenabweichung

Die Dehnrates ist erst direkt während des Versuchs einstellbar. Die hierbei auftretende Problematik der benötigten sprunghaften Geschwindigkeitsänderung wurde bereits in Kapitel 2.1.4 erläutert. Ein Belastungsversuch wird demzufolge so konstruiert, dass der Fehler durch eine zu geringe Beschleunigung minimiert wird.

Nur in den Bereichen, in denen die gewünschte Dehnrates bereits vorhanden ist, kann eine Auswertung der Daten stattfinden. Demzufolge sollte die gewünschte Dehnrates möglichst früh erreicht sein. Zur Abschätzung dieser Einschränkung soll die Anwendbarkeit von linearen Direktantrieben in Kombination mit bekanntem Faserformverhalten betrachtet werden.

Reale Werkstoffe weisen zwei aufeinander folgende Grundverhalten auf: Die Elastizität und die Plastizität. Um ein Produkte als dauerhaft auszulegen, müssen sich deren Belastungen ausschließlich im elastischen Bereich befinden. Plastische Verformungen würden frühzeitig zum Versagen des Werkstoffs führen. Folglich sind für eine dauerhafte Auslegung bereits die rein elastischen Verformungen aus der Ursprungsgestalt heraus von Interesse. Diese enden mit der Fließspannungsdehnung.

Aus dem Stand der Technik sind Fließspannungsdehnungen von Faserformmaterialien ab 0,3% bekannt [Baa06]. Lineare Direktantriebe können Beschleunigungen von bis zu 10 g [HK14] leisten. Unter der vereinfachten Annahme eines unendlichen Rucks gelten für gleichförmig beschleunigte Bewegungen folgende Zusammenhänge zwischen der zeitabhängigen Geschwindigkeit $v(t)$, der Beschleunigung a , der Ursprungsgeschwindigkeit v_0 bzw. dem zeitabhängigen Weg $s(t)$ und dem Ursprungsweg s_0 :

$$v(t) = at + v_0 \quad (2.12)$$

und

$$s(t) = \frac{a}{2}t^2 + v_0t + s_0. \quad (2.13)$$

Nach Gleichung 2.12 und 2.13 folgt für den zurückgelegten Weg $s(t)$ in Abhängigkeit von der Beschleunigung a und der Endgeschwindigkeit $v(t)$

$$s(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{v(t)^2}{a} - \frac{v_0^2}{a} \right) + s_0. \quad (2.14)$$

Unter der Annahme, dass die Probe aus dem Stillstand heraus beschleunigt wird ($v_0 = 0$) und die Einspannung sich an ihrer ursprünglichen Position befindet ($s_0 = 0$), vereinfacht sich Gleichung 2.14 zu

$$s(t) = \frac{1}{2} \frac{v(t)^2}{a} \quad (2.15)$$

bzw. mit Hilfe von Gleichung 2.5 zu

$$s(t) = \frac{1}{2} \frac{(\dot{\epsilon}l_0)^2}{a}. \quad (2.16)$$

Für einen quasistatischen Versuch mit einer Dehnrates von 0,0001 1/s ergibt sich für den benötigten Weg eines linearen Direktantriebs zum Erreichen der gewünschten Dehnrates bei einer Einspannlänge von 100 mm ein Wert von 0,5 μm . Bezogen auf den elastischen Bereich von Faserformmaterialien (0,3 mm) beträgt der Anteil des zur Beschleunigung benötigten Wegs somit $1,7 \times 10^{-12} \%$. Dieser Fehler ist sehr klein und kann vernachlässigt werden.

Anders ist der Fehler bei der Betrachtung von dynamischen Versuchen zu bewerten: Bei einer Dehnrates von 10 1/s würde eine wie oben beschriebene Lineareinheit mit Direktantrieb einen Weg von 5,1 mm zurück legen müssen, um die gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen. An diesem Ort wäre der elastische Bereich von Faserformmaterialien bereits um den Faktor 167 überschritten. Somit wird deutlich, dass lineare Direktantriebe für dynamische Versuche mit Faserformmaterialien nicht ohne weiteres geeignet sind.

2.1.6 Übersicht bekannter Versuchsaufbauten für Hochgeschwindigkeitsversuche

Eine Auswahl von Prinziplösungen für Kurzzeittests von Materialproben wurde bereits von Keulerleber [Keu06] zusammengestellt. Eine Möglichkeit, die Anfangsbeschleunigung zu erhöhen, besteht darin, die Spannvorrichtung mittels Impulsübertragung zu beschleunigen. Hierbei wird ein Mitnehmer über eine Freilaufstrecke mit einer hohen kinetischen Energie versehen, bevor dieser die Spannvorrichtung der Klemme per Stoß mitnimmt. Solche Prinzipien wurden bereits in den 30er Jahren entwickelt und in Form einer rotierenden Scheibe umgesetzt [KZI85]. Diese war vertikal gelagert, hatte einen Durchmesser von 2 m und einen radial am Umfang angeordneten Mitnehmer. Die Probenaufnahme war tangential zur Scheibe angeordnet und schwenkbar gelagert. Die abzuziehende Spannvorrichtung war in Form eines Jochs ausgeführt und konnte an die Scheibe heran geschwenkt werden. Nachdem die Scheibe auf die gewünschte Drehzahl gebracht worden

war, konnte das Joch zur Scheibe geschwenkt werden, wo es durch den Mitnehmer stoßartig beschleunigt und die Probe belastet wurde.

Eine weitere Möglichkeit, Kurzzeittests durchzuführen, bietet die Split-Hopkins-Bar. Sie wurde in der Literatur erstmals von Kolsky im Jahre 1949 [Kol49] erwähnt. Hierbei wird die Eigenschaft der Wellenausbreitung innerhalb massiver Werkstücke genutzt. In einen langen Stab wird mittels schlagartiger Belastung (z. B. durch Aufschlag eines Projektils) eine elastische Verformung eingebracht, die sich in Form einer Wellenfront durch den Stab bewegt. Am Ende des Stabs ist eine Seite der Probe befestigt. Trifft die Wellenfront auf die Probe, wird die Probe entsprechend der Wellenamplitude ausgelenkt. Die andere Seite der Probe ist wiederum an einem Stab befestigt, durch den die Wellenfront wieder ausgeleitet wird. Die hierfür benötigten Stäbe sind bis zu mehrere Meter lang. Es werden Dehnraten von 100 1/s bis 10000 1/s [Keu06] erreicht.

Um schlagartige Beschleunigungen hervorzurufen, können auch Treibladungen verwendet werden. Durch den sich schlagartig aufbauenden Druck kann ein Zylinder gefüllt werden, der hierdurch in eine axiale Bewegung versetzt wird. Die Probe ist bei diesem Aufbau zwischen dem Zylinder und einem Festlager gespannt. Da die Explosion zeitlich schwer zu kontrollieren ist, ist eine variable Abzugsgeschwindigkeit zu erwarten. Des Weiteren sind sicherheitstechnische Vorkehrungen zu treffen. [Keu06]

Demgegenüber ist hydraulische Energie gezielter steuerbar. Diese ist in Speichern vorhaltbar und mittels schneller Ventile innerhalb kurzer Zeit abrufbar. Hierzu sind Ventile nötig, die große und schnell schaltbare Querschnitte aufweisen, damit die Drosselverluste gering gehalten werden. Eine Geschwindigkeitsregelung ist durch Proportionalventile möglich. Aufgrund der durch die hohen hydraulischen Drücke benötigten massiven Ausführung der hydraulischen Elemente weisen diese hohe Massenträgheiten auf. Daher sind anfängliche Beschleunigungen begrenzt. Um diese weiter zu erhöhen, werden Freilaufstrecken integriert, die die Probe erst nach der Beschleunigung des Zylinders schlagartig einkoppeln. [Keu06]

2.2 Bekanntes Materialverhalten von Faserformmaterialien

Erste Erkenntnisse über das Materialverhalten des Faserformwerkstoffs wurden am *Fachgebiet Maschinenelemente* der *Technischen Universität Dortmund* bereits durch Willms [Wil02], Baar [Baa06] und Stumpf [Stu10] erlangt. In diesen Arbeiten sind grundlegende Zusammenhänge dargestellt und die gewonnenen Materialkennwerte in einer FEM-Software implementiert worden. Neben Elastizitätsmoduln wurden Kenndaten für Fließgrenzen, Bruchspannungen und Tangentenmoduln in Zug- und Druckrichtung ermittelt. Des Weiteren wurden Abhängigkeiten dieser Kenngrößen von folgenden Einflussgrößen quantifiziert:

- **Pressdruck** (0 N/mm^2 bis 11 N/mm^2)
- **Umgebungsfeuchte** (30 % bis 90 %)
- **Abzugsgeschwindigkeit** (1 mm/min bis 21 mm/min)
- **Rohstoffkonzentration** (1 % bis 2,4 %).

Auch die Abhängigkeit der Kenngrößen von chemischen Zusätzen wurde hierbei untersucht. Als Rohstoff wurde in diesen Arbeiten Zell- und Holzstoff verwendet.

In der Arbeit von Chen u. a. [Che+08] wurden Druckversuche mit Faserformproben durchgeführt, um entsprechende Kennwerte zu ermitteln. Variiert wurde hierbei der Verdichtungsgrad der Proben ($378,6 \text{ kg/m}^3$ und $535,2 \text{ kg/m}^3$) und die Abzugsgeschwindigkeit ($0,5 \text{ mm/min}$ bis 20 mm/min). Als Klimaumgebung wurde eine Temperatur von ca. $28,4^\circ\text{C}$ und eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 80% gewählt. Die Untersuchung zeigte deutliche Abhängigkeiten der Zielgrößen Elastizitätsmodul (100 MPa bis 160 MPa) und maximale Druckspannung (210 MPa bis 320 MPa) von den gewählten Einflussgrößen.

All diese Untersuchungen sind in einem begrenztem Geschwindigkeitsbereich durchgeführt worden. Unter der Annahme einer Einspannlänge von 100 mm entspräche ein Bereich der Abzugsgeschwindigkeit v von $0,5 \text{ mm/min}$ bis 21 mm/min nach Gleichung 2.5 einer Dehnrates von $\dot{\epsilon}$ ($3,5 \times 10^{-3} \text{ 1/s}$ bis $8,3 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$). Nach Bleck u. a. [Ble+04] wird dieser Dehnratenbereich als quasistatisch bezeichnet (vgl. Abbildung 2.4).

Weitere Erkenntnisse des Materialverhaltens unter Druckbelastung wurden in der Studie von Wang u. a. [Wan+09] erarbeitet. Hierbei konnten folgende Zusammenhänge festgestellt werden: Bei steigendem Verdichtungsgrad sind steigende Werte für den Elastizitätsmodul und die Bruchspannung zu beobachten. Bei steigender Dehnrates stellen sich sinkende Werte für den Elastizitätsmodul sowie steigende Werte für die Bruchspannung ein. In den Studien von Lin u. a. [LCZ08] und Wang u. a. [Wan+01] wurden die Verformungsarten des Werkstoffs klassifiziert und modelliert. Hierbei wurde unterteilt in elastische und viskoplastische Deformation sowie Bruchvorgänge. Wang u. a. [Wan+01] beziffert die Fließspannung auf ca. 80% der Bruchspannung.

Bereits Göttsching [Göt71] führte erste Kurzzeitversuche mit unterschiedlichen Papieren durch. Hierbei entstanden papierspezifische Kennwerte wie z. B. Bruchlast, -dehnung, -arbeit und Reißlänge bei Versuchsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s .

Eine Studie von Eagleton u. a. [EM94] verglich die Dämpfungseigenschaften von Faserform-Pyramidenstümpfen mit denen von EPS-Schaum. Hierzu wurden diese Materialien einmaligen und wiederkehrenden Falltests unterzogen. Eine Annäherung der einmaligen Dämpfungseigenschaften von Pyramidenstümpfen aus Faserform an EPS-Schaum konnte durch eine Verschachtelung der Pyramidenstümpfe ineinander erreicht werden. Die geringen Dämpfungseigenschaften bei erneuter Belastung der Pyramidenstümpfe wurden durch einen geringen elastischen Anteil der Verformung begründet. Hoffmann [Hof00] beschäftigte sich mit den Dämpfungseigenschaften von Faserformelementen. Er untersuchte die Abhängigkeit der Dämpfungseigenschaften von der Geometrie und dem Verdichtungsgrad des Werkstoffs. Hierbei wurden runde und viereckige Stümpfe mit einer Variation in ihren Winkeln und Höhen getestet. Die statische Festigkeit wurde durch Kompressionstests und die dynamische Festigkeit durch Fallversuche quantifiziert. Hierbei ergaben die runden Formen im Gegensatz zu den eckigen eine höhere Kompressionsfestigkeit.

Das feuchteabhängige Kriech- und Spannungsrelaxationsverhalten des Faserformwerkstoffs unter Druckbelastung ist anhand von Stapelversuchen von Sorensen [Sor04] untersucht und quantifiziert worden. Hierzu fanden Untersuchungen bei konstanter relativer Luftfeuchte (91% bis 94%) und wechselnden relativen Luftfeuchten (33% , 94%) über 18 Tage statt. Obwohl keine Schädigung bei beiden Versuchsreihen festzustellen war, lieferten die Versuche der konstanten Feuchte eine 10 bis 20 fach höhere Kriechrate und eine 1,3 bis 1,6fache Kriechdehnung

Die erstmalige mikroskopische Betrachtung des Faserverbunds wurde von Ji u. a. [Ji+04] beschrieben. Hierbei sind der Elastizitätsmodul und die Poisson'sche Zahl bestimmt worden. Von Ji u. a. [JWC08] wurde das Werkstoffverhalten unter Belastung mikroskopisch untersucht. Hierbei zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der lokalen Dehnung und der Faserlängenverteilung.

Viele Untersuchungen beschäftigten sich zusätzlich mit der Frage, wie eine Faserformverpackung in Bezug auf Ihre Dämpfungseigenschaften geplant und optimiert werden kann bzw. wie einzelne Eigenschaften simuliert werden können. Es wurden Grundlagen zu einzelnen Abhängigkeiten geschaffen. Diese Abhängigkeiten von Einflussgrößen und deren gegenseitige Wechselwirkungen wurden jedoch nicht im Ganzen und über den zu erwartenden Bereich hinaus charakterisiert. Eine anwendungsbezogene Simulation ist somit nicht möglich. Aus den genannten Arbeiten gehen maßgeblich folgende Einflussgrößen des Materialverhaltens hervor: Die relative Luftfeuchtigkeit, die Dehnrate und der Verdichtungsgrad.

2.3 Materialmodellierung

Die mathematische Abbildung der physikalischen Zusammenhänge eines Materials wird im Allgemeinen als Materialmodellierung bezeichnet. Hierbei handelt es sich um Zusammenhänge aus den Bereichen der Kontinuumsmechanik und der Thermodynamik. Die folgenden Grundlagen der Materialmodellierung basieren auf [Kra86]. Mathematische Gleichungen, welche Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften eines Materials beschreiben, können in zwei verschiedene Gruppen unterteilt werden: Bilanzen und Stoffgleichungen.

Die Bilanzen beschreiben die aus der Physik bekannten Gleichgewichtsbedingungen. Diese sind meist mechanischer Natur, können aber auch elektrischer, magnetischer oder thermischer Natur sein. Sie gelten grundsätzlich für alle Materialien. Beispielhaft können hier genannt werden:

- Impulserhaltung
- Massenerhaltung
- Energieerhaltung
- Maxwell-Gleichungen

Im Gegensatz zu den Bilanzen gelten die Stoffgleichungen nicht für alle Materialien, sondern sind stoffabhängig. Zu den Stoffgleichungen gehören

- Materialgesetze
- materielle Zwangsbedingungen
- materielle Symmetrien

2.3.1 Materialgesetze

Die Materialgesetze, auch konstitutive Gleichungen genannt, bilden den Zusammenhang zwischen den phänomenologischen Größen wie Belastung, Verformung und Temperatur und der Zeit ab. Der Inhalt der Gleichungen kann in Einflussgrößen (Konstitutivvariablen) und Reaktionsgrößen (Materialgrößen) unterteilt werden. Zu den Einflussgrößen zählen die Verformung, die Zeit und die Temperatur. Eine hieraus resultierende Materialgröße ist z. B. die Belastung. Als Beispiel kann an dieser Stelle die Abhängigkeit der Spannung von der Dehnung eines Materials genannt werden, welche vielfach als Spannungs-Dehnungsdiagramm abgebildet wird.

Die Berücksichtigung aller Einflussgrößen eines Materials würde die Handhabbarkeit der Stoffgleichungen unmöglich machen. Um die Gleichungssysteme möglichst überschaubar zu halten, werden deshalb nur die jeweiligen für den Anwendungsfall relevanten Einflussgrößen betrachtet. Für nicht relevante Einflussgrößen werden Stoffgleichungen idealisiert. Beispielhaft wird bei der Modellierung von Karosserieblechen für Fahrzeug-Crashtests der Einfluss von Temperaturen nahe des Schmelzpunktes von Metallen auf das Materialverhalten des Blechs außer Acht gelassen. Der Grund hierfür ist, dass diese Temperaturen in dem vorgesehenen Anwendungsfall nicht zu erwarten sind.

Rheologische Modelle

Rheologische Modelle charakterisieren grundlegende Materialverhaltensweisen. Auf Ihnen beruht der Aufbau der Materialgesetze. Es existieren drei Grundmodelle, auf die im Weiteren näher eingegangen wird: Die ideale Elastizität, die ideale Plastizität und die ideale Viskosität.

Ein ideal elastischer Körper reagiert unmittelbar und ohne zeitlichen Verzug auf eine einwirkende Deformation ε mit einer Spannung σ . Diese Spannung hängt proportional von der Deformation ab. Wird die einwirkende Deformation revidiert, bewegt sich der Körper unmittelbar in seine Ausgangslage zurück und weist keinerlei Restspannung auf. Somit ist die Deformation reversibel. Die Proportionalität der Spannung von der Deformation wird durch das *Hookesche Gesetz* [Hoo78] beschrieben, wobei die Konstante E als Elastizitätsmodul bezeichnet wird:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2.17)$$

Beispielhaft kann das *Hooke-Modell* durch eine Feder dargestellt werden. Hierbei ergibt sich die Gesetzmäßigkeit für die benötigte Kraft F , um die Feder zusammen zu drücken, aus dem Produkt von Federkonstante c und der Auslenkung der Feder Δl aus ihrer Ruhelage l_0 . Die Auslenkung Δl wird hierbei durch die Differenz zwischen ausgelenkter Federlänge l und unbelasteter Federlänge l_0 beschrieben:

$$F = c \cdot (l - l_0) \quad (2.18)$$

Ein ideal plastischer Körper verformt sich erst bei Überschreitung eines festgelegten Spannungsniveaus. Dieses Spannungsniveau wird als Fließgrenze σ_F bezeichnet. Bei Überschreitung der Fließgrenze tritt eine bleibende und somit irreversible Deformation ein. Somit ergibt sich für die plastische Deformation ε

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & \text{für } \sigma < \sigma_F \\ \varepsilon(t), & \text{für } \sigma \geq \sigma_F. \end{cases} \quad (2.19)$$

Das rheologische Modell für die plastische Verformung wurde nach *St.-Venant* benannt. Als eindimensionale Modellvorstellung dient ein masseloses Trockenreibungselement, bei dem die Koeffizienten der Haft- und Gleitreibung als gleich angenommen werden. Bleibt die auf das Trockenreibungselement einwirkende Kraft F unterhalb der Reibkraft F_R , findet keinerlei Auslenkung statt. Das Trockenreibungselement verhält sich wie ein ideal starrer Körper. Ist die Reibkraft erreicht, folgt das Trockenreibungselement der aufgeprägten Auslenkung. Es gilt:

$$\begin{aligned} |F| &\leq F_R && \wedge s = 0 && \text{für } \dot{s}(t) = 0 \text{ und} \\ F &= F_R \operatorname{sgn}(\dot{s}(t)) && \wedge s = s(t) && \text{für } \dot{s}(t) \neq 0. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Ein Körper mit ideal viskosen Eigenschaften weist eine lineare Abhängigkeit der Spannung σ von der Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ auf. Im Gegensatz zur idealen Elastizität ist hier die Spannung σ unter der Voraussetzung einer gleichbleibend einwirkenden Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ bei variierender Deformation $\varepsilon(t)$ konstant. Endet die Deformationseinwirkung jedoch und die Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ ist gleich null, wird auch die Spannung σ zu null. Die Deformation ε bleibt folglich bestehen und ist somit wie bei der Plastizität irreversibel. Die viskositätsbedingte Spannung σ_v ergibt sich nach dem *Newton-Modell* [NH87] aus dem Produkt der Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ und der materialabhängigen Konstante der dynamischen Viskosität η :

$$\sigma_v = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (2.21)$$

Im Eindimensionalen dient ein linearer Dämpfer als Modellvorstellung. Dieser besteht aus einem Kolben, der sich in einem mit zäher Flüssigkeit gefüllten Zylinder befindet. Die aufzubringende Kraft F um den Kolben auszulenken ist proportional zur Auslenkungsgeschwindigkeit $\Delta \dot{l}$. Zur Berechnung der aufzubringende Karft F wird die Auslenkungsgeschwindigkeit $\Delta \dot{l}$ mit der Dämpfungskonstante d skaliert. Analog zur Plastizität sind Auslenkungen Δl irreversibel. Der Kolben vollführt jedoch im Gegensatz zur Plastizität schon bei der geringsten Belastung eine Auslenkung Δl .

$$F = d \cdot \Delta \dot{l} \quad (2.22)$$

Viskoses Verhalten kann im Alltag in Form von Kriechvorgängen beobachtet werden. Beim Kriechen ändert sich die Verformung bei gleichbleibender Belastung über der Zeit. Beispielhaft kann hier eine Kunststofftragetasche genannt werden, die über einen längeren Zeitraum einer Belastung durch ihren Inhalt ausgesetzt ist und deren Länge der Tragegriffe über die Zeit zunimmt. Aber auch die Dehnratenabhängigkeit eines Materials lässt sich durch viskose Vorgänge erklären.

Kombinationen rheologischer Modelle

Reale Materialien weisen meist ein Verhalten auf, welches auf der Kombination mehrerer rheologischer Modelle beruht. Modelle, die nahezu alle Werkstoffcharakteristiken abbilden, würden die Handhabbarkeit jedoch erschweren. Daher ist es zielführend, ein anforderungsgerechtes Modell für den jeweiligen Anwendungsfall zu nutzen. Ist beispielsweise eine Stahlkonstruktion auf ihre Dauerhaltbarkeit hin zu untersuchen, reicht die Betrachtung des elastischen Verhaltens aus. Plastische Verformungen sind in diesem Fall unerwünscht. Wird bei der Simulation die Fließgrenze überschritten, weicht das Ergebnis stark von der Realität ab, da die Plastizität nicht mit berücksichtigt wird. Dies ist jedoch unkritisch, da alles oberhalb der Fließgrenze in diesem Fall per Definition unerwünscht ist. Trotzdem existieren Anwendungsfälle, in denen Kombinationen der rheologischen Modelle benötigt werden. Daher werden im Folgenden exemplarisch einige dieser Kombinationen genannt. Grundsätzlich können die Modelle entweder mittels Reihen- oder mittels Parallelschaltung kombiniert werden.

Eine Kombination aus Elastizität und Viskosität wird als viskoelastisch bezeichnet. Eine Reihenschaltung aus Feder (elastisch) und Dämpfer (viskos) zeigt das *Maxwell-Modell* [Max67]. Aus einer Parallelschaltung dieser beiden Grundmodelle besteht das *Kelvin-Modell* [Sic02]. Als Beispiel für viskoelastische Materialien seien Elastomere genannt, welche sich z. B. in Schaumstoffmattressen finden. Diese passen sich den Körperkonturen an, kehren jedoch nach längerer Entlastung wieder in Ihren Ursprungszustand zurück.

Das klassische Materialverhalten von Stahl wird durch eine Kombination aus Elastizität und Plastizität abgebildet. Eine Reihenschaltung dieser beiden Grundmodelle führt zu dem *Prandtl-Modell* [Pra95]. Diese Reihenschaltung berücksichtigt jedoch noch keine Verfestigung. Um eine Verfestigung abzubilden, existieren nach Rust [Rus09] hauptsächlich zwei Möglichkeiten, d. h. die isotrope Verfestigung und die kinematische Verfestigung. Die isotrope Verfestigung hat in Abgrenzung zum *Prandtl-Modell* eine von der Deformation abhängige Plastizität. Die Fließgrenze steigt also mit der Plastizitätsdehnung an. Das rheologische Modell der kinematischen Verfestigung besteht aus einer Reihenschaltung einer Feder mit der Parallelschaltung einer Feder und eines Trockenreibelements. Letztere Parallelschaltung führt ab der Fließgrenze zu einem elastischen Materialverhalten ohne Rückstellkraft.

2.3.2 Materielle Zwangsbedingungen

Die bekannteste materielle Zwangsbedingung ist die Inkompressibilität. Sie sagt aus, dass das Volumen des Materials zu jedem Zeitpunkt und unabhängig von der Belastung konstant bleibt. Hieraus folgt, dass die Reaktionsgrößen zusätzlich durch die Zwangsbedingung der Inkompressibilität beeinflusst werden. Wird beispielsweise ein inkompressibler Würfel in einer Hauptachse deformiert, müssen die anderen beiden Hauptachsen durch Anpassung ihrer Länge die Volumenkonzanz sicherstellen.

Liegt jedoch eine Kompressibilität vor, ist das Maß dieser unter Belastung durch das Verhältnis zwischen Längs- und Querdehnung bestimmt. Die sogenannte Querkontraktion bewirkt eine Änderung des Probenquerschnitts und somit eine Änderung der aus der Kraft berechneten Spannung. Das Verhältnis aus Längs- ε_x und Querdehnung ε_y wird Querkontraktionszahl oder auch Poissonzahl genannt und berechnet sich nach

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}. \quad (2.23)$$

2.3.3 Materielle Symmetrien

Eine weitere Art von Stoffgleichungen ist die materielle Symmetrie, welche festlegt, in welchen Richtungen der Belastung ein Stoff gleiche Eigenschaften aufweist. Hier wird grundsätzlich zwischen isotropen und anisotropen Materialeigenschaften unterschieden. Ein isotropes Materialverhalten bedeutet, dass das Material in allen Raumrichtungen gleiche Eigenschaften aufweist bzw. das Materialverhalten rotationssymmetrisch bezüglich zweier Achsen ist. Sobald das Material in einer Raumrichtung ein anderes Verhalten aufweist als in allen anderen Richtungen, gilt es im Allgemeinen als anisotrop. Im Speziellen wird die Anisotropie noch weiter differenziert: Ein anisotroper Körper wird als orthotrop bezeichnet, wenn er bezüglich zweier Ebenen ein symmetrisches Materialverhalten aufweist. Die transversale Isotropie hingegen beschreibt Körper, welche rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse sind. Diese Einschränkungen der Anisotropie haben einen Einfluss auf die benötigte Parameterzahl für das Materialmodell, um dessen Verhalten eindeutig zu beschreiben.

2.4 Rohstoff für Konstruktivpolster aus Naturfasern

Für Konstruktivpolster aus Naturfaserstoffen kommen unterschiedliche Faserrohmaterialien zum Einsatz. Die Fasern können aus verschiedenen Gewächsen gewonnen oder durch Wiederverwertung bereits verwendeter Fasern einem neuen Produktentstehungsprozess zugeführt werden. Im Folgenden wird ein Überblick über Klassifizierungen und Kenngrößen sowie die Herkunft, den Aufbau, den Zusammenhalt und die Aufbereitung der Fasern gegeben.

2.4.1 Klassifizierung von Zellstofffasern

Grundsätzlich können Naturfasern in frisch aus der Pflanze gewonnene oder recycelte Fasern unterteilt werden. Fasern, die noch nie Anwendung in einem Produkt gefunden haben, werden Primärfasern genannt. Fasern hingegen, die bereits den Produktentstehungsprozess durchlaufen haben und über den Weg des Recyclings wieder aufgeschlossen wurden, werden Sekundärfasern genannt. Hierzu zählen auch Fasern, die aus Altpapier zurück gewonnen wurden. Da es sich bei Altpapier zumeist um eine durch den Verbraucher gemischte Art von Papieren handelt, ist es schwierig, diese in ihre ursprünglichen Sorten zurück zu sortieren. Daher sind Sekundärfasern meist von schwankender Qualität. Auch können nicht immer alle zuvor eingebrachten Additive wie z. B. Farbpartikel restlos entfernt werden.

Primärfasern können aus den unterschiedlichsten Pflanzen gewonnen werden. Hierzu gehören neben den Holzfasern wie Zell- und Holzstoff auch Pflanzenfasern aus z. B. Baumwolle, Flachs und Hanf. Tabelle 2.7 fasst beispielhafte Eigenschaften einiger verschiedener Pflanzenarten zusammen. Ihnen gemein ist jedoch immer der gleiche Grundstoff, die Cellulose.

Bei Gehölzen sind die Fasern über große Querschnitte eng gepackt. Dadurch ist bei der Rohstoffbeschaffung der Aufwand bei Gehölzen wesentlich geringer als bei anderen feingliedrigeren

Tabelle 2.7: Charakteristische Werte für Dichte, Durchmesser und mechanische Eigenschaften von Pflanzenfasern nach [MMD05] und [MK99]

| Faser | Dichte kg/m ³ | Durchmesser µm | Länge mm | Zugfestigkeit N/mm ² |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------|------------------------------------|
| Zellstoff (Nadelholz) | 1,3 | 20-35 | 1,5-4 | 440 |
| Baumwolle | 1,5-1,6 | 12-38 | 20-30 | 287-800 |
| Flachs | 1,5 | 40-600 | 20-40 | 345-1500 |
| Hanf | 1,47 | 25-500 | 5-55 | 690 |

Pflanzenarten (z. B. Baumwolle). Baumwolle ist durch Ihre Wachstumsart als Kraut oder Strauch aufwendiger zu ernten. Für den gleichen Ertrag an Fasern ist der Aufwand somit um ein Vielfaches höher als bei der Ernte von Gehölzen. Somit sind Hölzer die wirtschaftlichsten Naturfaserlieferanten. Fasern aus Gehölzen sind im Gegensatz zu den Fasern aus anderen Pflanzen eher kurz (vgl. Tabelle 2.7). Aufgrund der großen, bei der Papierherstellung verwendeten Menge an Fasern wird in der Papierindustrie standardmäßig auf Cellulose aus Hölzern zurückgegriffen. Im Bereich der Konstruktivpolster wird aus Kostengründen meist auf Sekundärfaserstoffe zurückgegriffen. Konstruktivpolster aus Sekundärfaserstoffen weisen jedoch aufgrund ihrer Inhomogenität der Fasern und der ggf. verbliebenen Farbpartikel keine homogene Optik auf. Daher werden nur Konstruktivpolster, die keinen optischen Ansprüchen genügen müssen, aus Sekundärfasern hergestellt. Wenn das Konstruktivpolster optischen Ansprüchen genügen soll, sind vorzugsweise Primärfasern zu verwenden, die auch zur Papierherstellung genutzt werden.

2.4.2 Kenngrößen

Aufgrund des großen Marktanteils der Papierherstellung im Bereich der Naturfaserindustrie haben sich viele papierspezifische Verfahren, Prozesse und Kenngrößen etabliert. Diese Kenngrößen werden im Folgenden erläutert. Grundsätzlich kann eine Faser anhand ihrer äußeren Gestalt beschrieben werden. Hierzu gehören Daten über die Länge der Faser und über ihre Dicke. Hinzu kommt eine Größe, die die Glattheit einer Faser beschreibt und sich Mahlgrad nennt. Bei einem hohen Mahlgrad weisen die Fasern an ihrer Oberfläche viele kleine abstehende Härchen (Fibrillen) auf. Ein niedriger Mahlgrad hingegen bedeutet, dass wenige Fibrillen von der Faser abstehen und ihre Oberfläche nahezu glatt ist.

Eine weitere Kenngröße zur Beschreibung der Zusammensetzung einer Vielzahl von Fasern ist die Faserlängenverteilung, bzw. auch Faserlängenfraktionierung genannt. Diese Kenngröße gibt Auskunft über die Anteile der jeweiligen Faserlängen in der Gesamtheit der betrachteten Fasern. Hierdurch kann erkannt werden, welche Länge in einer Faserzusammensetzung dominiert und wie groß die Variation der Faserlängen ist. Beispielhaft ist in Abbildung 2.6 eine Faserlängenverteilung von Zellstofffasern zu sehen.

2.4.3 Herkunft und Aufbau der Cellulosefaser

Cellulose, das am meisten auf der Welt vorkommende organische Polymer [Wüs13], ist der Hauptbestandteil von Pflanzen. Sie bildet die Gerüstbausubstanz der Zellwand. Ihr Verhältnis zu an-

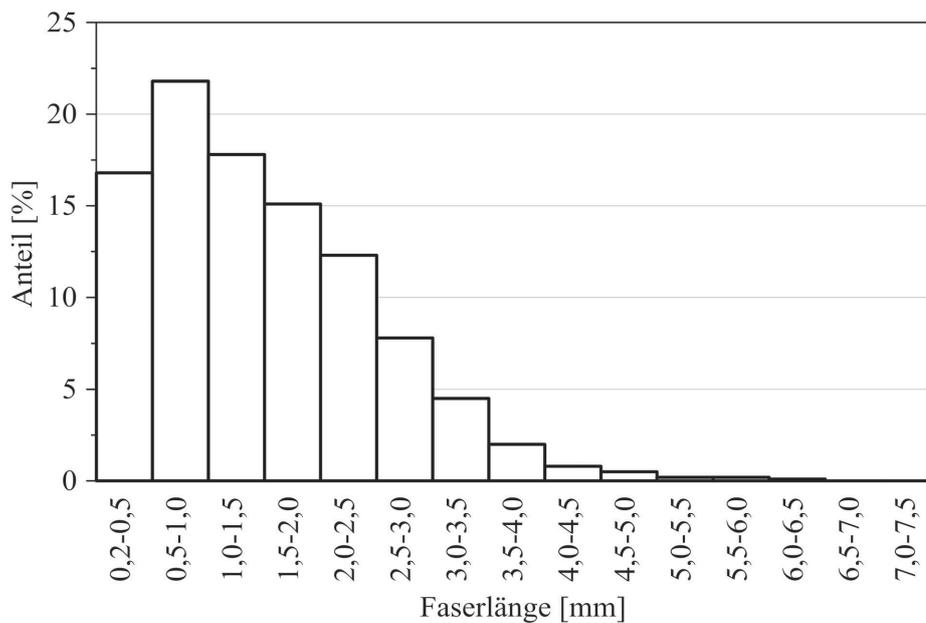


Abbildung 2.6: Beispiel einer Faserlängenverteilung von Zellstofffasern

deren Pflanzenmaterialien kann jedoch in Abhängigkeit der Pflanzenart variieren. Auszugsweise ist in Tabelle 2.8 die Zusammensetzung einiger Pflanzenarten dargestellt. Aufgrund der Variation der Bestandteile in Abhängigkeit von der Pflanzenart und beispielsweise dem Standort sind hier Durchschnittswerte angegeben. Zu den Hauptbestandteilen des Pflanzenmaterials gehören neben der Cellulose auch die Hemicellulose und das Lignin. Der Aufbau und der Zweck der Bestandteile werden in diesem Kapitel näher betrachtet.

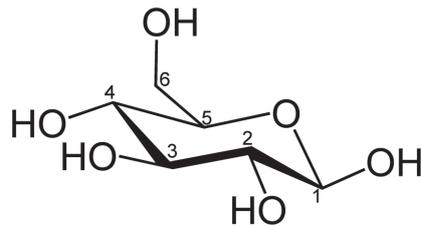
Tabelle 2.8: Chemische Zusammensetzung von Pflanzen nach [Wüs13]

| Pflanze | Zusammensetzung [%] | | | |
|-----------|---------------------|---------------|--------|-----------------------|
| | Cellulose | Hemicellulose | Lignin | Sonstige Bestandteile |
| Hartholz | 43-47 | 25-35 | 16-24 | 2-8 |
| Weichholz | 40-44 | 25-29 | 25-31 | 1-5 |
| Baumwolle | 95 | 2 | 1 | 2 |

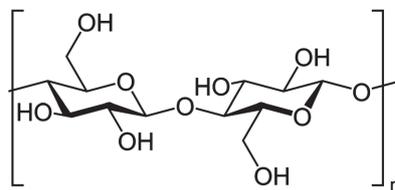
Cellulose ist ein Biopolymer und gehört zu den Polysacchariden. Als Polysaccharide werden Glycane (Kohlenhydrate) bezeichnet, die aus einer großen Anzahl von Monosacchariden (Einfachzucker) bestehen und über glycosidische Bindungen zu einer langen Molekülkette verbunden sind. Als glycosidische Bindung wird u. a. die chemische Bindung zwischen einem bestimmten Kohlenstoffatom zweier Glycane bezeichnet.

Der Grundbaustein der Cellulose ist ein β -D-Glycopyranose Molekül ($C_6H_{12}O_6$) (vgl. Abbildung 2.7). Dieses besteht u. a. aus 5 Kohlenstoffatomen und einem Sauerstoffatom, die zusammen in einem Hexagon angeordnet sind. An den Kohlenstoffatomen 1-4 (vgl. Abbildung 2.7) ist jeweils eine OH-Gruppe und ein zusätzliches Wasserstoffatom angehängt. Das C-Atom 5 besitzt neben der Bindung zum Wasserstoffatom auch eine Bindung zu einer Hydroxymethyl-Gruppe.

Unter Abspaltung von Wassermolekülen werden die ringförmigen Glycosemoleküle miteinander verbunden [Str99]. Es entstehen Cellulosemoleküle, die aus vielen zu einer Kette aneinander ge-

Abbildung 2.7: β -D-Glucopyranose Molekül ($C_6H_{12}O_6$) [Png07]

reihent β -D-Glucosemolekülresten ($C_6H_{10}O_5$)_n bestehen. Diese sind konsequent 1-4-glycosidisch verbunden (vgl. Abbildung 2.8) und hydrophob. Die Hydroxymethyl-Gruppe ist an der Molekülbildung nicht beteiligt, so dass keine Verzweigung der Kette entsteht. Aufgrund der β -(1-4)-glycosidischen Bindung sind die aufeinander folgenden Glucosemoleküle jeweils um die C1-C4-Achse um 180° gegeneinander verdreht. Hierdurch entsteht eine langgestreckte und nicht tordierte Molekülkette [Son08].

Abbildung 2.8: Grundbaustein von Cellulosemolekülketten ($C_6H_{10}O_5$)_n [NEU07]

Eine Wasserstoffbrückenbindung entsteht durch ein kovalent gebundenes Wasserstoffatom. Dieses weist eine anziehende Wechselwirkung auf freie Elektronenpaare anderer Atome, in diesem Fall Sauerstoff, auf [Geo97]. Durch intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen zwischen der Hydroxymethyl-Gruppe bzw. dem freien Sauerstoffatom und einer Hydroxylgruppe des benachbarten Glucosebausteins kommt es zu einer Versteifung der Makromolekülkette (vgl. Abbildung 2.9) [Son08].

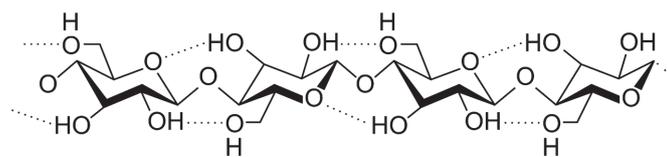


Abbildung 2.9: Intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen eines Cellulosemoleküls [Lag13]

In der Natur auftretende Cellulosemoleküle haben einen Polymerisationsgrad, d. h. Anzahl der Monomereinheiten im Polymermolekül, zwischen 300 und 10.000. Atomar besteht Cellulose aus den in Tabelle 2.9 genannten Elementen.

Aufgrund der Langgestrecktheit und Geradlinigkeit der Cellulosemakromoleküle eignen sie sich hervorragend, um dicht nebeneinander zu liegen. Durch zusätzliche, an den Längsseiten der Molekülketten freie Hydroxylgruppen, sind sie in der Lage, über ihre komplette Länge intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen aufzubauen [Son08]. In Abbildung 2.10 bzw. 2.11c sind mehrere horizontale Cellulosemakromolekülketten übereinander dargestellt, die über ihre freien Hydroxylgruppen mit Hilfe von Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind. Dabei sind die

Tabelle 2.9: Atomare Zusammensetzung von Cellulose in Gew.-% nach [Wüs13]

| Element | Gewichtsanteil |
|-----------------|-----------------|
| Kohlenstoff (C) | 44 % bis 45 % |
| Wasserstoff (H) | 6 % bis 6,5 % |
| Sauerstoff (O) | 48,5 % bis 50 % |

intermolekularen Wasserstoffbrücken von den Cellulosemakromolekülketten selbst von den intramolekularen Brückenbindungen zwischen den Makromolekülen zu unterscheiden. Aufgrund der regelmäßigen Anordnung ergibt sich ein geordnetes kristallines Gitter zwischen den Makromolekülen. Diese kristallinen Bereiche werden in Abbildung 2.11d als Micellen bezeichnet. Aufgrund der Steifigkeit der einzelnen Cellulosemakromoleküle können keine einzelnen intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen aufgebrochen werden. Um zwei Makromoleküle voneinander zu separieren, müssten nahezu alle ihre intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zur gleichen Zeit gelöst werden. Die kristallinen Bereiche sind somit hydrophob [Son08].

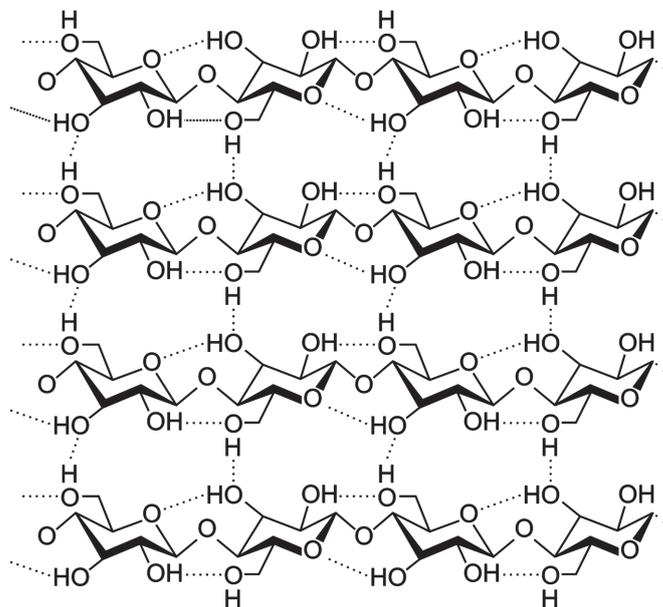


Abbildung 2.10: Kristalliner Aufbau von Cellulosemolekülketten mit intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen (gestrichelt dargestellt) [Lag13]

Cellulosemakromoleküle müssen sich aber nicht zwangsläufig kristallin zueinander anordnen. Im Vergleich zu kristallinen Bereichen liegen die Makromolekülketten in den parakristallinen Bereichen weniger geordnet nebeneinander. Ihre grobe Orientierung ist jedoch immer noch die gleiche, so dass leicht verknäulte Bereiche entstehen. In diesen Bereichen sind Hydroxylgruppen der Cellulosemoleküle frei, woran sich Wassermoleküle mittels Wasserstoffbrückenbindung anlagern können. Die parakristallinen Bereiche besitzen somit hydrophile Eigenschaften. Des Weiteren bestehen in den parakristallinen Bereichen verglichen mit den kristallinen nur einzelne intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen, welche durch Wasser aufgebrochen werden können. Hierdurch werden die Cellulosemoleküle auseinandergedrückt, die Fasern quellen auf und erhalten somit eine wesentlich höhere Flexibilität. Da die Molekülketten in den Fasern hauptsächlich in Längsrichtung ausgerichtet sind, findet die Quellung fast ausschließlich in Querrichtung zur Faser statt.

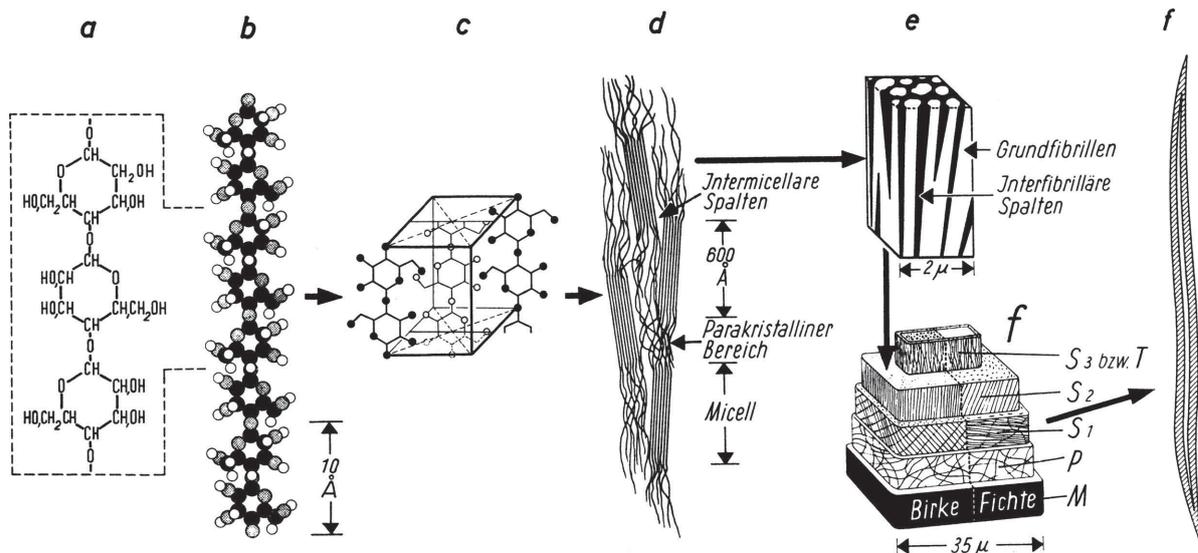


Abbildung 2.11: Verbindung der Cellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand; a/b: Cellulose Makromolekül, c: Kristalliner Bereich einer Elementar- bzw. Grundfibrille, d: Elementar-/Grundfibrille mit kristallinen- (Micellen) und parakristallinen Bereichen, e: Mikrofibrille aus Grundfibrillen, f: Schichten einer hölzernen Faser mit (S_3) Sekundärwand Innenschicht/(T)ertiärwand, (S_2) Sekundärwand Mittelschicht, (S_1) Sekundärwand Außenschicht, (P)rimärwand, (M)ittellamelle [KS66]

Die Kombination aus den kristallinen und den parakristallinen Bereichen wird als Grund- oder Elementarfibrille bezeichnet. Diese weisen meist eine langgestreckte flache Blockform auf, an deren Enden die Makromolekülketten ähnlich wie Fransen herausstehen [Wüs13], [Tür14].

Die Matrix, in die die Grundfibrillen eingebettet sind, wird als Hemicellulose bezeichnet. Dieser Matrixverbund besteht aus einem Gemisch von Polysacchariden und bildet die Mikrofibrille. Ein Bund aus Mikrofibrillen bildet eine Makrofibrille, welche wiederum als Bund zusammengefasst die eigentliche Fibrille bildet [Fra91].

Die Zusammensetzung der Fibrillen zu einer Faser ist bei Pflanzen vom Aufbau her im Grunde immer gleich. Die Faser besitzt mehrere Schichten. Innerhalb dieser Schichten sind die Fibrillen unterschiedlich angeordnet, um entsprechende mechanische Aufgaben übernehmen zu können. Diese Schichten werden in Primär- und Sekundärschichten klassifiziert. Im Kern der Faser befindet sich ein mit Luft gefüllter Hohlraum, der als Lumen bezeichnet wird [Wei99]. Dieses dient zum Wassertransport und als Wasserspeicher. Durch die Kapillarwirkung wird das Wasser durch das Lumen an sein Ziel transportiert.

Die Anordnung der einzelnen Schichten innerhalb einer Faser wird von Weigert [Wei99] wie folgt von innen nach außen beschrieben. Das Lumen wird von der ersten Schicht der Sekundärwand, der Innenschicht (S_3) oder auch Tertiärwand (T) genannt, umgeben. Die Innenschicht der Sekundärwand ist ca. $0,1\mu\text{m}$ dick und besteht aus um mehr als 50° zur Faserrichtung gedrehten Fibrillen, die spiralförmig um das Lumen verlaufen. Die Mittelschicht der Sekundärwand (S_2) ist mit einer Dicke zwischen $1\mu\text{m}$ und $5\mu\text{m}$ die dickste Schicht der Sekundärwand. In ihr sind die Fibrillen streng parallel und unter einem Steigungswinkel von maximal 30° zur Faserrichtung spiralförmig angeordnet. Die Fibrillen sind hier sehr eng gepackt und in eine Matrix eines Hemicellulose-Gels

eingebettet. Die Außenschicht der Sekundärwand (S_1) ist mit $0,1\ \mu\text{m}$ bis $0,2\ \mu\text{m}$ ähnlich dünn wie die Innenschicht der Sekundärwand. In ihr verlaufen die Fibrillen in zwei sich gegeneinander kreuzenden Spiralrichtungen, die einen Winkel von 70° zur Faserrichtung aufweisen. Die Primärwand (P) besteht aus einer $0,1\ \mu\text{m}$ bis $0,3\ \mu\text{m}$ dicken Schicht von ungeordneten bzw. einer netzähnlichen Struktur folgenden Fibrillen. Als Schutz liegt die Mittellamelle (M) um die Primärwand. Diese besteht jedoch mit 60% bis 70% zum Hauptteil aus Lignin und bildet die Verbindung zwischen den einzelnen Fasern. Sie ist kein integraler Bestandteil der Zellwand [Wei99]. Abbildung 2.11 stellt schematisch den Aufbau von Holz ausgehend von der molekularen Ebene bis zu der hölzernen Faser dar.

2.4.4 Zusammenhalt von Cellulosefasern

In der Pflanze werden Cellulosefasern durch Lignin, ein stark vernetztes und amorphes Polymer aus Phenylpropaneinheiten [Wei99], zusammengehalten. Bei der Zellstoffherstellung wird diese Substanz jedoch weitgehend von den Fasern entfernt, so dass andere Mechanismen die einzelnen Cellulosefasern zusammenhalten müssen. Hierbei handelt es sich um rein physikalische Bindungen zwischen den einzelnen Fasern. Diese Bindungen können in adhäsive und kohäsive Bindungen eingeordnet werden. Zu den adhäsiven gehören folgende Bindungen: Aufgrund ihrer nicht immer geradlinigen Geometrie und Steifigkeit der einzelnen Faser treten Verknäulungskräfte auf, durch die sich einzelne Fasern an benachbarten Fasern abstützen bzw. verhaken können. Zusätzlich stehen einzelne Fibrillen von den Fasern ab, die sich im Kontaktbereich der Fasern ineinander verschlingen können. Hierdurch entsteht eine Verfilzung in der Kontaktzone, durch welche Kräfte von Faser zu Faser übertragen werden.

Zu den kohäsiven Bindungen zählen Van-der-Waals-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen. Diese Wechselwirkungen hängen im Wesentlichen von der Bindungsfläche der Fasern untereinander ab. Je größer die Bindungsfläche zweier Fasern ist, desto mehr physikalische Wechselwirkungen können zwischen den Fasern entstehen. In einem großen Netzwerk von Fasern hängt die Anzahl und Größe der Bindungsflächen stark von der Flexibilität der einzelnen Fasern ab. Mit steigender Flexibilität sind die Fasern in der Lage, einzelne Kontaktflächen zu vergrößern. Außerdem kann durch eine steigende Flexibilität eine Komprimierung des Netzwerks stattfinden, wodurch einzelne Fasern mit weiteren Fasern Bindungsflächen ausbilden können, zu denen vor der Kompression kein Kontakt bestand.

Auf die Einflussfaktoren der Faserflexibilität, wie von Weigert [Wei99] beschrieben, soll im Folgenden eingegangen werden. Wird eine Cellulosefaser in Wasser platziert, ist eine Quellung der Faser zu beobachten. Diese Wasseraufnahme findet in den parakristallinen Bereichen der Elementarfibrille, in den Poren der Zellwände und im Hemicellulose-Lignin-Gel, welches die Matrix für die Cellulosestränge bildet, statt. Wasser wirkt hier als Lösungsmittel der Wasserstoffbrückenbindungen. Einzelne intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Cellulosemolekülketten werden durch Wassermoleküle aufgebrochen, die als Ersatz für das benachbarte Cellulosemolekül an dessen Stelle treten. Somit werden die parakristallinen Bereiche der Elementarfibrillen aufgeweitet. Da nun nur noch kleine Wassermoleküle an den Cellulosemolekülketten gebunden sind und diese viel kleiner sind als die Celluloseketten, kann eine Relativbewegung zwischen den Cellulosemolekülketten viel leichter stattfinden. Durch diesen Effekt erhöht sich die Faserflexibilität.

Wasserstoffbrückenbindungen an den Bindungsflächen zwischen zwei Fasern werden bei Kontakt mit zusätzlichen Wassermolekülen durch diese aufgebrochen. Hierbei lagert sich jeweils ein Wassermolekül an einem der beiden Bindungspartner der ehemaligen Wasserstoffbrückenbindung an und bricht diese auf. Da zwei Wassermoleküle mehr Platz benötigen als die ursprüngliche Wasserstoffbrückenbindung, findet hier auch eine Quellung zwischen den Fasern statt. Folglich werden die Fasern auseinander gedrückt und die adhäsiven Bindungskräfte überwunden. Es resultiert eine Trennung der Fasern voneinander und eine Auflösung der vorherigen Produktgestalt. Der chemische Prozess der Lösung von Wasserstoffbrückenbindungen ist durch Wasserentzug vollständig reversibel. Durch den Entzug der Wassermoleküle werden die OH-Gruppen der Cellulosemoleküle, an denen zuvor ein Wassermolekül gebunden war, wieder für Wasserstoffbrückenbindungen zwischen einzelnen Fasern verfügbar. Um jedoch den ursprünglichen Faserzusammenhalt wieder herzustellen, ist ein mechanischer Eingriff nötig, der die Quellung reversiert. Die Fasern müssen folglich wieder angenähert werden, damit die ursprüngliche Bindungsfläche wieder hergestellt werden kann.

Die Wiederverwendung von Cellulosefasern basiert auf diesem quasi-reversiblen Prozess. Hierdurch können aus Cellulosefasern hergestellte Produkte wie beispielsweise Konstruktivpolster wiederverwertet werden. Zu diesem Zweck dient das Sammeln von Altpapier, um hieraus wieder neue Produkte herzustellen. Als Einschränkung ist hierbei jedoch zu nennen, dass bei der Wiederverwertung eine mechanische irreversible Belastung und ggf. auch Schädigung der einzelnen Fasern stattfindet.

2.4.5 Aufbereitung

Zur Rohstoffgewinnung (vgl. Abbildung 2.12) existieren grundlegend zwei unterschiedliche Verfahren zur Aufschließung von Fasern aus Gehölzen. Es kann zwischen mechanisch und chemisch aufgeschlossenen Fasern unterschieden werden. Bei dem mechanisch aufschließenden Verfahren werden die Hölzer nach der Entrindung (vgl. Abbildung 2.12a) stirnseitig durch eine rotierende Scheibe bei erhöhten Temperaturen und unter Zugabe von Wasser grob zu Hackschnitzeln zerteilt (vgl. Abbildung 2.12b). Im Anschluss werden die Hackschnitzel in einen Refiner geleitet. Dieser besteht aus zwei Scheiben, die eine rotatorische Relativbewegung ausführen. Die Hackschnitzel werden nun durch ein zentrisches Loch in einer der beiden Scheiben dem Schlitz zwischen den beiden Scheiben zugeführt, so dass unter Zugabe von Wasser eine weitere Zerkleinerung der Hackschnitzel stattfindet (vgl. Abbildung 2.12c). Bei einem optional nachfolgenden Bleichprozess wird durch das Entfernen bestimmter Stoffe ein späteres Vergilben des Endproduktes reduziert. Hierbei wird der Anteil des für das Vergilben verantwortlichen Lignins verringert (vgl. Abbildung 2.12d). Da jedoch immer Reste von Lignin verbleiben, sind diese Fasern demzufolge aufgrund ihrer Eigenschaft zu vergilben nicht für hochwertiges Papier geeignet. Diese mechanisch aufgeschlossenen Fasern werden als Holzstoff bezeichnet [UPM11].

Um das Lignin vollständig entfernen zu können, sind chemische Verfahren notwendig. Das chemische Aufschlussverfahren beginnt analog zum mechanischen Aufschlussverfahren mit der Entrindung des Gehölzes und der Zerteilung der Stämme in Hackschnitzel. Anschließend werden diese jedoch nicht wie bei der Holzstoffherstellung weiter mechanisch aufgeschlossen, sondern chemisch verarbeitet. Es existiert eine Vielzahl von chemischen Prozessen, die jeweils unterschiedliche Endprodukte liefern. Daher wird hier nur das allgemeine, übergreifende Verfahren beschrieben. Die Hackschnitzel werden mit einer Säure in einem Kocher ggf. mehrstufig so lange gekocht

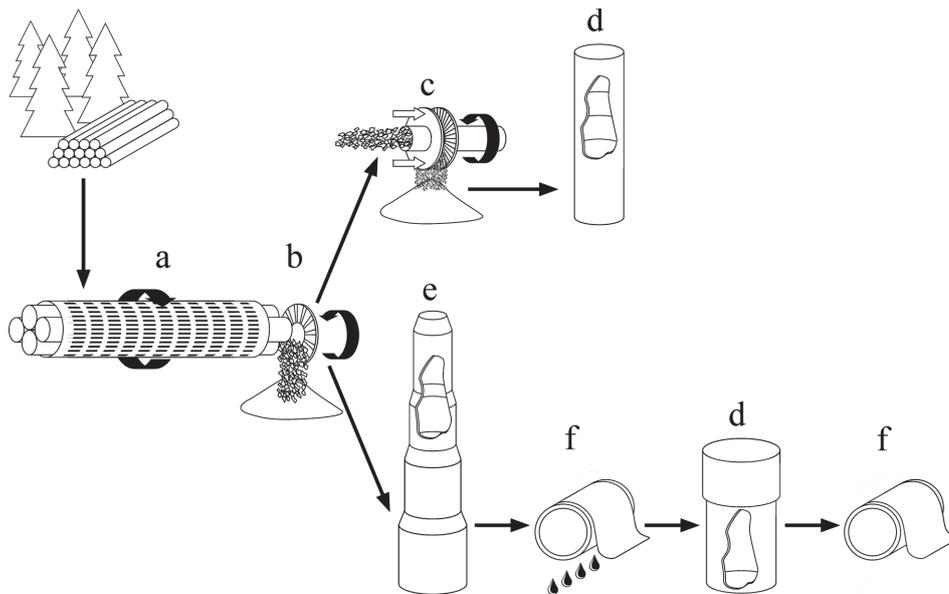


Abbildung 2.12: a-d: Holzstoffherstellung; a-f: Zellstoffherstellung; a: Entrindung, b: Hackschnitzel, c: Refiner, d: Bleichen, e: Kochen, f: Waschen [UPM11]

bzw. gebleicht, bis sich eine vollständige Aufschließung der Fasern eingestellt hat und sich sämtliche unerwünschte Bestandteile, beispielsweise das Lignin, von den Fasern gelöst haben. Nach jedem Koch- oder Bleichprozess erfolgt das Auswaschen der in Lösung befindlichen unerwünschten Stoffe aus den Fasern (vgl. Abbildung 2.12 e-f). Diese chemisch aufgeschlossenen Fasern werden als Zellstoff bezeichnet.

Nach dem erfolgreichen Aufschluss der einzelnen Fasern und den anschließenden Auswaschprozessen weisen die so erhaltenden Suspensionen einen Stoffgehalt von 5 % bis 10 % auf. Soll der Rohstoff nicht vor Ort verarbeitet werden, wird ihm abschließend das Prozesswasser wieder teilweise entzogen, um das Transportgewicht und -volumen zu reduzieren. Hierfür wird die Suspension so weit filtriert, bis sich ein Stoffgehalt von über 80 % einstellt [KS66].

2.5 Faserformverfahren

Zur Herstellung von Faserformteilen werden folgende Verfahrensschritte durchlaufen [Wil02]:

- Anformen
- Pressen
- Trocknen

Der Anformvorgang und das abschließende Trocknen sind in jedem Fall prozessbedingt durchzuführen. Das Pressen kann optional, je nach Anforderungen an das fertige Produkt, erfolgen. Der Transport der Faserformteile zwischen den einzelnen Stationen wird durch spezielle Übergabewerkzeuge realisiert. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte näher beschrieben und deren Einfluss auf das Werkstoffverhalten diskutiert.

2.5.1 Anformvorgang

Essentiell für das Anformen ist ein Werkzeug, welches in der Regel aus dem Grund- und dem Siebkörper besteht (s. Abb. 2.13). Diese zwei Komponenten übernehmen die Funktionen der Formgebung und der Filtration der Fasersuspension. Während des Anformvorganges wird die Fasersuspension durch eine Druckdifferenz zwischen Werkzeugoberfläche und -innenraum in eine Strömung durch das Anformwerkzeug versetzt, wobei sich die Fasern an dem Siebkörper anlagern und ein nasses Faservlies entsteht [Wil02].

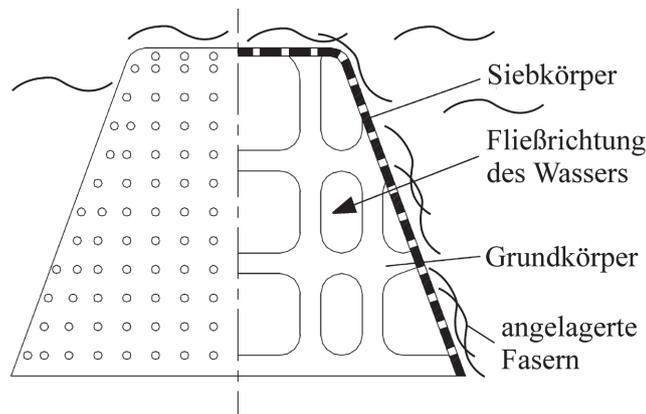


Abbildung 2.13: Prinzipdarstellung eines Anformwerkzeugs nach [Wil02]

Beim Bau des Anformwerkzeuges kommen in der Regel langjährige Erfahrungen in der Faser-gussbranche zum Tragen, da zwischen den zueinander entgegengesetzt proportionalen Variablen des Lochdurchmessers und -abstandes im Siebkörper abgewogen werden muss. Diese Variablen bestimmen die Güte des Filtrationsergebnisses, die erreichbare Wandstärke und die Prozesszeit bis zur vollständigen Entwässerung.

In der industriellen Fertigung sind zwei Anform- bzw. Anlagenprinzipien bekannt:

| | | |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Druckverfahren | $(p_O > p_{Atm}, p_I = p_{Atm})$ | |
| Saugverfahren | $(p_O = p_{Atm}, p_I < p_{Atm})$ | (Rotations-, Vertikalverfahren) |
| mit | | |
| p_O | = Druck an Werkzeugoberfläche | |
| p_I | = Druck im Werkzeuginnenraum | |
| p_{Atm} | = Atmosphärendruck | |

Abbildung 2.14 zeigt die verschiedenen Anformprinzipien sowie deren Eigenarten und die Restriktionen in der Formgebung der Produkte. Allen dargestellten Verfahren gemein ist der negative Druckgradient zwischen Werkzeugoberfläche und dem Innenraum.

Charakteristische Eigenschaft des Druckverfahrens ist der erhöhte Druck an der Werkzeugoberfläche. Folglich handelt es sich um ein Überdruckverfahren. Bei dieser Verfahrensart liegt am Innenraum Atmosphärendruck ($p_I = p_{Atm}$) und an der Werkzeugoberfläche Überdruck ($p_O > p_{Atm}$) an. Um dies zu realisieren, ist ein abgeschlossener Raum erforderlich, in dem sich sowohl das Werkzeug als auch die Fasersuspension befindet. Dieser Raum wird unter Druck gesetzt, so dass das

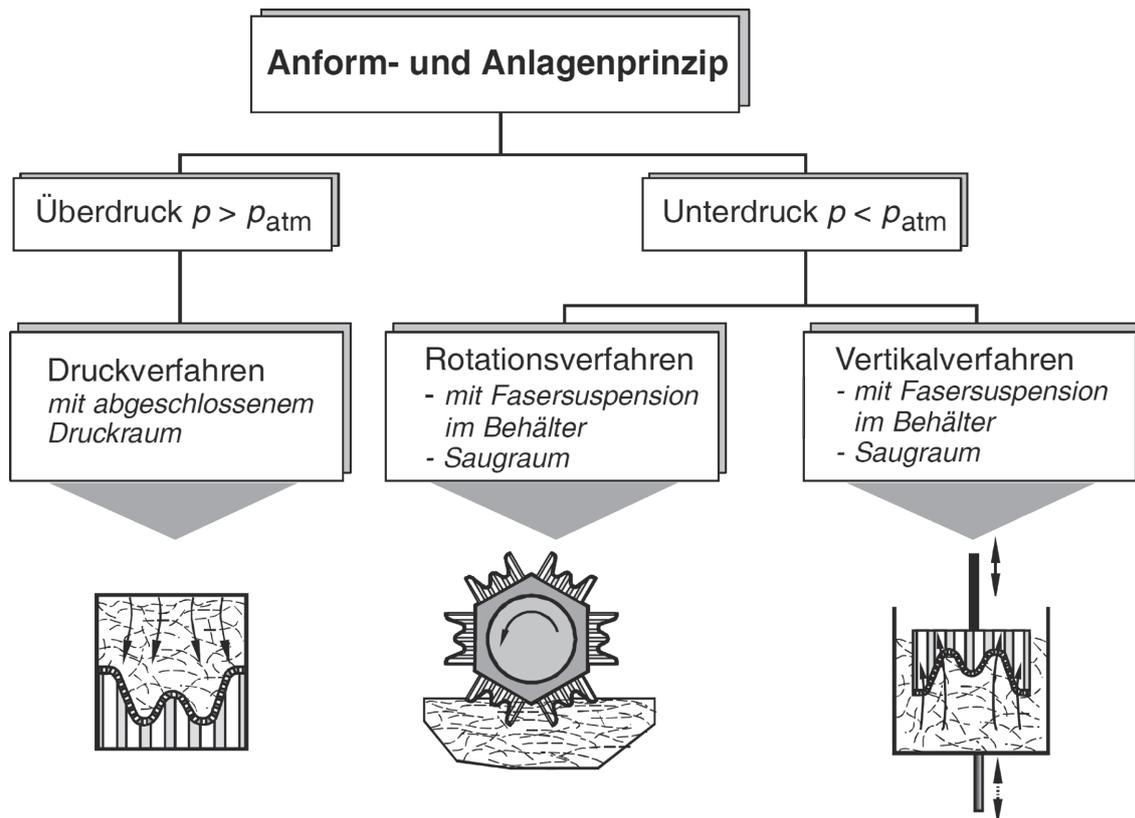


Abbildung 2.14: Anform- und Anlagenprinzipien in der industriellen Faserformherstellung nach [Wil02]

Wasser durch die Sieboberfläche in den Innenraum strömt und sich die Fasern aus der Suspension, Pulpe genannt, an der Sieboberfläche anlagern. Die Anformdrücke können bei diesem Verfahren ein Vielfaches des Atmosphärendruckes erreichen.

Rotations- und Vertikalverfahren hingegen beruhen auf der Erzeugung eines Unterdrucks im Werkzeuginnenraum ($p_O = p_{Atm}$, $p_I < p_{Atm}$). Sie unterscheiden sich lediglich in der Anordnung bzw. der Bewegungsrichtung des Anformwerkzeugs oder des Fasersuspensionsbehälters und der Ausbringungsrate. Diese Anlagenprinzipien erfordern keinen abgeschlossenen Druckraum. Die Fasersuspension befindet sich in einem offenen Behälter, aus dem sie durch Eintauchen des Anformwerkzeuges mit anliegendem Unterdruck angesaugt werden kann.

2.5.2 Pressen und Trocknen

Pressvorgänge können dem Anformen nachgelagert sein, sind aber für die Herstellung eines dreidimensionalen Formteils aus Faserstoffen nicht unbedingt erforderlich. Sie sind sinnvoll, um die Oberfläche oder die Festigkeitseigenschaften zu verbessern, und werden je nach Produkthanforderung angewendet. Hierbei werden teils beheizte Presswerkzeuge eingesetzt, welche die Geometrie des Endprodukts als Negativform abbilden.

Der Trocknungsprozess hingegen ist für das Faserformverfahren unabdingbar. Das nach dem Anformen vorliegende nasse Faservlies mit einem Wassergehalt von 75–85 Gew.-% hat nur geringe

Festigkeit [Stu10]. Es muss unter Erhaltung der Bauteilgeometrie nachfolgend auf einen Wassergehalt von 5–10 Gew.-% getrocknet werden, um ein gebrauchsfähiges Produkt zu erhalten. Gegen das einfache Trocknen an der Luft sprechen zum einen die zu lange Trocknungsdauer und zum anderen die evtl. auftretenden Geometrieänderungen aufgrund der durch den Wasserentzug hervorgerufenen ungleichmäßigen Volumenänderung. Aus diesen Gründen ist eine Trocknung in Werkzeugen vorzuziehen, wozu häufig beheizte Presswerkzeuge verwendet werden. Auf diese Weise werden die Verfahrensschritte Pressen und Trocknen zusammengefasst.

2.5.3 Werkstoffverhaltenbeeinflussende Herstellungsparameter

Verschiedene Parameter des Herstellungsprozesses können das spätere Werkstoffverhalten maßgeblich beeinflussen. Insbesondere Parameter, die Einfluss auf die Verdichtung des Fasernetzwerkes sowie die Faserausrichtung haben, müssen während der Herstellung Beachtung finden.

Verdichtung des Fasernetzwerks

Ein wichtiger, das Werkstoffverhalten beeinflussender Herstellungsparameter ist die Verdichtung des Faservlieses und die hiermit einhergehende Änderung der Faserbindungsfläche. Aufgrund der hohen Steifigkeit von trockenen Cellulosefasern stellt sich bei zufällig aufeinandergeschichteten Fasern ein Mikado-ähnliches Netzwerk ein. Hierbei entstehen verhältnismäßig kleine Bindungsflächen, welche dem Fasernetzwerk kaum Festigkeit verleihen. Eine mechanische Kompression des trockenen Faservlieses hingegen würde die Bindungsflächen erhöhen.

Durch die mit steigendem Wassergehalt zunehmende Faserflexibilität (vgl. Kapitel 2.4.4) wird die Steifigkeit der Fasern herabgesetzt, und eine Verdichtung des Fasernetzwerks wird begünstigt. Im Gegensatz zur trockenen Kompression erhöht sich somit unter Feuchtigkeitseinfluss der Verdichtungsgrad und damit auch die Faserbindungsflächen bei gleichbleibendem Verdichtungsdruck. In Folge dessen verändern sich auch die Materialeigenschaften des entstandenen Faserformproduktes.

Die Kompression des Faservlieses findet bereits bei der Entwässerung der Fasersuspension statt. Da die Drosselwirkung des Faservlieses auf das durchströmende Wasser einen Druck senkrecht zur Entwässerungsebene ausübt, resultiert hieraus eine Komprimierung des Faservlieses. Der Grad der Kompression kann weiter gesteigert werden, indem das feuchte Faservlies mechanisch verdichtet wird. Für den Verdichtungsgrad ist ein asymptotisches Verhalten der Festigkeitseigenschaften bekannt [Baa06]. Ab dem Zeitpunkt, an dem die Zwischenräume des Fasernetzwerks bzw. zwischen den Cellulosemolekülen vollständig eliminiert sind, findet keine weitere Zunahme der Bindungsfläche statt. Überlagert wird dieser Effekt mit einer zunehmenden Zerstörung der Fasern, so dass nach einem Maximum der Festigkeitseigenschaften ein erneuter Abfall zu verzeichnen ist [Baa06].

Bei der Entwässerung entsteht ein Druckgefälle über die Dicke des Faservlieses, welches Einfluss auf den Verdichtungsgrad hat. Die Fasern an der dem Sieb abgewandten Vliesoberfläche erfahren nur eine geringe Kompression, da an dieser Stelle die Drosselwirkung des Netzwerks auf das Wasser geringer ist. Die siebnahen Fasern erfahren jedoch die Summe der Kräfte, die auf die darüber liegenden Fasern wirken. Bei einer nachträglichen mechanischen Kompression kann dieses Verdichtungsgefälle durch den von außen einwirkenden Druck ausgeglichen werden.

Verdichtungsgeschwindigkeitsbedingte Schädigungen

Durch einen steigenden Verdichtungsgrad werden die Hohlräume des Fasernetzwerks verringert. Das in den Hohlräumen befindliche Wasser wird verdrängt und muss durch die noch zur Verfügung stehenden Hohlräume nach außen strömen. Sind diese durchströmten Hohlräume in ihrer Querschnittsfläche schon stark reduziert, treten hohe Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers innerhalb des Fasernetzwerks auf. Im Falle einer raschen Kompression können somit aufgrund der Drosselwirkung der durchströmten Hohlräume Drücke innerhalb des Fasernetzwerks auftreten, die den Faserzusammenhalt beeinflussen. Im Extremfall überschreitet der Druck die Bindungskräfte des Fasernetzwerks und lässt Fehlstellen in Form von senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufenden Rissen entstehen. Um solche Fehlstellen zu vermeiden, soll der Prozess der Vliesverdichtung möglichst langsam erfolgen.

Faserausrichtung

Ein weiterer, das Werkstoffverhalten beeinflussender Faktor ist die Faserausrichtung innerhalb des Fasernetzwerks. Von anderen Faserwerkstoffen z. B. faserverstärkten Kunststoffen ist die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Faserausrichtung bekannt [Sch07]. Die Festigkeit eines Faserwerkstoffes ist in Faserrichtung meist deutlich höher als senkrecht zu den Fasern. Ist die Verteilung der Faserorientierung innerhalb eines Werkstoffs in allen drei Raumrichtungen homogen, so ist ein isotropes Werkstoffverhalten zu erwarten. Ist die Faserorientierungsverteilung innerhalb eines Faserwerkstoffes jedoch inhomogen und somit gerichtet, so wird auch das Materialverhalten richtungsabhängig und damit anisotrop.

Bei manchen Herstellungsprozessen ist eine Orientierung der Fasern bzw. die Ausrichtung der mechanischen Eigenschaften durchaus gewünscht. Beispielsweise treten bei der Papierherstellung auf einer Papiermaschine starke Zugbelastungen auf das Papier in Förderrichtung bzw. Maschinenrichtung auf [Ble13]. Diese durch die Förderung hervorgerufenen Kräfte müssen von der Papierbahn aufgenommen werden können, da ansonsten durch einen Riss der Papierbahn die Produktion der Papiermaschine unterbrochen wird. Aus wirtschaftlichen Gründen ist der Betreiber einer Papiermaschine bestrebt, die Maschine mit möglichst hoher Geschwindigkeit produzieren zu lassen, wodurch die Belastungen auf die Papierbahn steigen. Folglich ist eine hohe Belastbarkeit der Papierbahn in Maschinenrichtung (vgl. Abbildung 2.15a) notwendig. Dagegen spielt die Festigkeit quer zur Maschinenrichtung eine untergeordnete Rolle. Daher ist bei der Papierherstellung eine Faserausrichtung in Maschinenrichtung gewünscht. Hierzu wird gezielt eine Scherströmung erzeugt, um die Fasern auszurichten. Gesteuert wird diese Scherströmung durch die Richtung des Auflaufs der Fasersuspension auf das Sieb der Papiermaschine sowie durch die Suspensionsstrahlstärke, die Wasserführung und die Siebgeschwindigkeit [Göt90].

Eine zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualifizierung der erzielten Faserausrichtung bietet die Messung des Zugsteifigkeitsindex (Tensile-Stiffness-Index) bzw. der Zugsteifigkeitsorientierung (Tensile-Stiffness-Orientation) [LF07]. Hierzu werden in unterschiedlichen Winkeln Ultraschallwellen durch eine Papierprobe gesendet und wieder empfangen. In Abhängigkeit von der Faserorientierung werden diese unterschiedlich stark abgeschwächt, so dass hierdurch eine messbare Größe entsteht. Die Achsen des Koordinatensystems, in dem die Messergebnisse dargestellt werden, repräsentieren die Maschinenrichtungen: MD (machine-direction) und CD (cross direction). Als Zugsteifigkeitsindex (TSI MD, TSI CD) wird der betreffende Achsenabschnitt bezeichnet. Die

Zugsteifigkeitsorientierung (TSO) stellt den Winkel zwischen der maximalen Festigkeit und der Maschinenrichtung dar. Als Beispiel sind in Abbildung 2.15b die Zugsteifigkeitsindizes (TSI MD, TSI CD) und die Zugsteifigkeitsorientierung (TSO) von 80 g/m^2 -Papier dargestellt. Die Messung erfolgte am *Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik* der *TU-Darmstadt*. Hierbei ist eine deutliche Anisotropie zu erkennen.

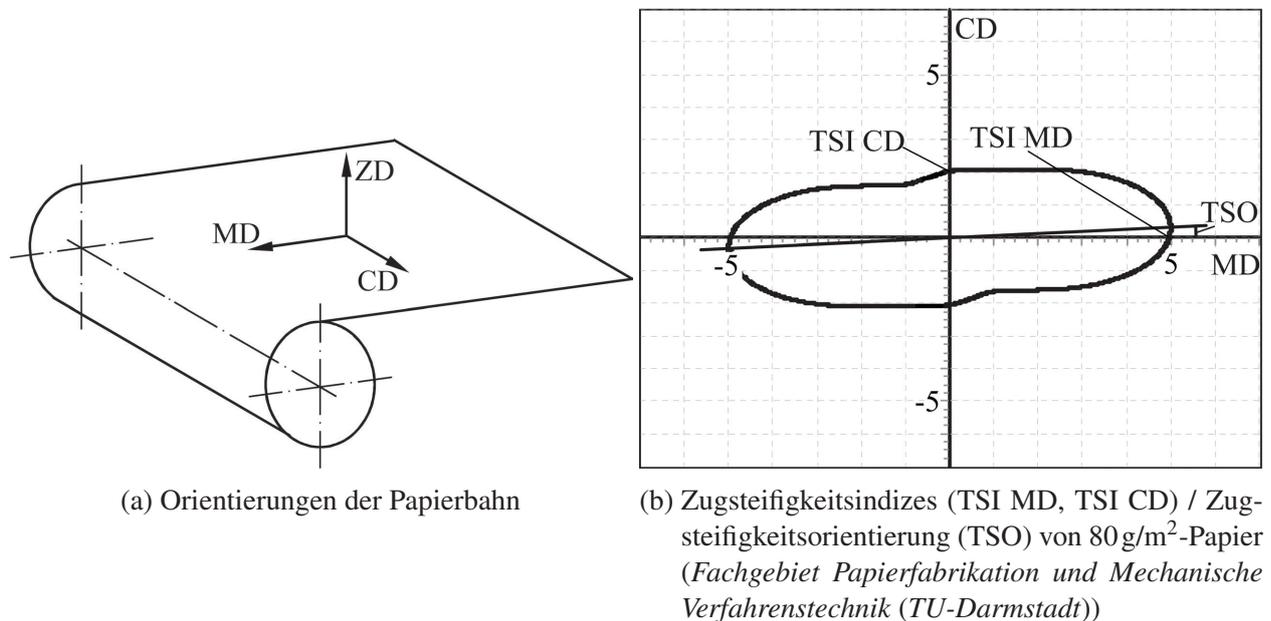


Abbildung 2.15: Papierherstellungsbezogene Orientierungen: MD = Maschinenrichtung, CD = Querrichtung, ZD = Normalenrichtung

Bei Faserformprodukten wird diese gezielte Faserausrichtung nicht angewendet. Nennenswerte Scherströmungen würden hier nur bei sehr zerklüfteten Werkzeuggeometrien entstehen. Hierzu müsste das Verhältnis zwischen der Zuström- und Entwässerungsfläche sehr klein sein. Als Zuströmfläche wird in diesem Zusammenhang die Fläche bezeichnet, durch die die Fasersuspension fließen muss, um anschließend auf der Entwässerungsfläche in seine Bestandteile Wasser und Fasern separiert zu werden.

Um ein besseres Verständnis für die Orientierungen der Fasern zu erhalten, soll der Prozess des Entwässerns bzw. des Eindickens der Pulpe auf dem Sieb betrachtet werden. Zu Beginn befinden sich die Fasern in der Pulpe in Schwebelage vor dem Anformsieb. Sobald ein Druckgradient über das Sieb entsteht, beginnt das Wasser der Pulpe durch das Sieb zu strömen. Erste Fasern erreichen die Sieboberfläche, bleiben an einem Draht des Siebes hängen und werden durch die Strömung flach auf das Sieb gedrückt. Normal zur Sieboberfläche ausgerichtete Fasern gleiten zu diesem Zeitpunkt noch ungehindert durch das Sieb hindurch und tragen nicht zur Vliesbildung bei. Das entstehende Faservlies beinhaltet folglich in der Ebene ausgerichtete Fasern. Erst zu einem späteren Zeitpunkt, wenn das entstandene Vlies dichter wird und die Zwischenräume zwischen den bereits abgelagerten Fasern zu eng sind, um normal zur Siebebene ausgerichtete Fasern hindurch zu lassen, ändert sich die Orientierung. Nun können sich auch vermehrt Fasern normal zur Siebebene anlagern, da sie nicht mehr durch die Zwischenräume hindurchgleiten. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Ausrichtung der Fasern in der Ebene dominant bleibt. Die hieraus resultierende Isotropie in der Ebene ist jedoch bislang nicht belegt.

2.6 Simulation von Zellstoffen

Lavrykov u. a. [Lav+12] simulierten Hochgeschwindigkeitsumformvorgänge von Papier. Hierbei wurden Durchstoßtests mit einer maximalen Geschwindigkeit von 2 m/s durchgeführt. Als Vergleich diente eine mit der kommerziellen Software *LS-Dyna 971*, *Hallquis 2005* durchgeführte Simulation. Als Materialparameter wurden Werte aus der Literatur und aus Experimenten verwendet. Die auftretenden mehrachsigen Spannungszustände wurden mit den Versuchsergebnissen verglichen und Rückschlüsse auf die Realitätsnähe gezogen. Hierbei zeigte sich, dass die Simulation mit den Versuchsergebnissen ausreichend genau übereinstimmte.

In der Arbeit von Ma [Ma04] ist der Ansatz für einen Strukturfaktor dargelegt worden, der eine modulare Konstruktionsmethode für Faserformverpackungen zum Ziel hat. Hierzu wurden in der kommerziellen Software *ABAQUS/Explicit* (*Simulia (Dassault Systèmes)*, Vélizy-Villacoublay, Frankreich) unterschiedliche dünnwandige Geometrien unter statischer Beanspruchung (Belastungsgeschwindigkeit: 0,1 m/s) miteinander verglichen. Durch die erlangten Daten wurde die Belastbarkeit unterschiedlicher Strukturelemente dargelegt. Dieser Zusammenhang kann in der Konstruktion als Grundlage zur Auslegung von Verpackungselementen dienen.

3 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen beleuchtet, die als Basis für das Verständnis der weiteren Arbeit dienen. Hierzu werden neben Eigenheiten und Werkzeugen der Messtechnik numerische Integrationsverfahren für die FEM behandelt.

3.1 Signalverarbeitung und Digitalisierung

Bei der Digitalisierung wird in erster Linie das analoge kontinuierliche Signal durch periodische Abtastung in eine Reihe von einzelnen Messwerten gewandelt. Diese einzelnen Messwerte haben keine unendliche Genauigkeit. Bei der Digitalisierung wird das aktuell anliegende Messsignal vielmehr in die Stufen der verfügbaren Auflösung einsortiert. Die Auflösung muss demzufolge so gewählt werden, dass genügend Abstufungen im zu betrachtenden Messbereich zur Verfügung stehen, damit sich die Änderung, die sichtbar gemacht werden soll, nicht zwischen zwei Auflösungsstufen maskiert. Des Weiteren ist das *Nyquiste-Shannon* Abtasttheorem, welches Aussagen über Mindestanforderungen in Bezug auf das abzutastende Signal und die verwendete Digitalisierungshardware festlegt, einzuhalten. Außerdem sind bestimmte Werkzeuge notwendig, um an Informationen zu gelangen, welche aus den Rohdaten nicht direkt ablesbar sind. Dies kann mittels der Fourier-Transformation erfolgen. Im Folgenden sollen das Nyquist-Shannon Abtasttheorem und die Fourier-Transformation näher erläutert werden.

3.1.1 Nyquist-Shannon Abtasttheorem

Eine ungewollte Eigenschaft der Digitalisierung sind potentielle Alias-Effekte. Hierbei handelt es sich um Datenpunkte im abgetasteten Signal, die zwar dem Verlauf des ursprünglichen analogen Signals entsprechen, jedoch bei einer Interpolation zwischen den einzelnen abgetasteten Punkten eine Frequenz widerspiegeln, die nicht mit der eigentlich abgetasteten in Zusammenhang steht. Zur besseren Visualisierung ist in Abbildung 3.1 ein Alias- oder auch Phantomsignal dargestellt, welches durch eine fehlerhaft gewählte Abtastrate entstehen würde.

Nyquist [Nyg28] und Shannon [Sha49] beschäftigten sich ursprünglich mit dieser Problematik. Hieraus entwickelte sich eine Vorschrift zur Festlegung der minimalen Abtastrate, das Nyquiste-Shannon Abtasttheorem. Es besagt, dass ein bandbegrenztetes Signal mit mindestens der doppelten Frequenz abgetastet werden muss, um eindeutig rekonstruiert werden zu können. Mit der maximal im Signal auftretenden Frequenz f_{\max} und der Abtastfrequenz f_{Abtast} folgt hieraus:

$$2 \cdot f_{\max} < f_{\text{Abtast}} \quad (3.1)$$

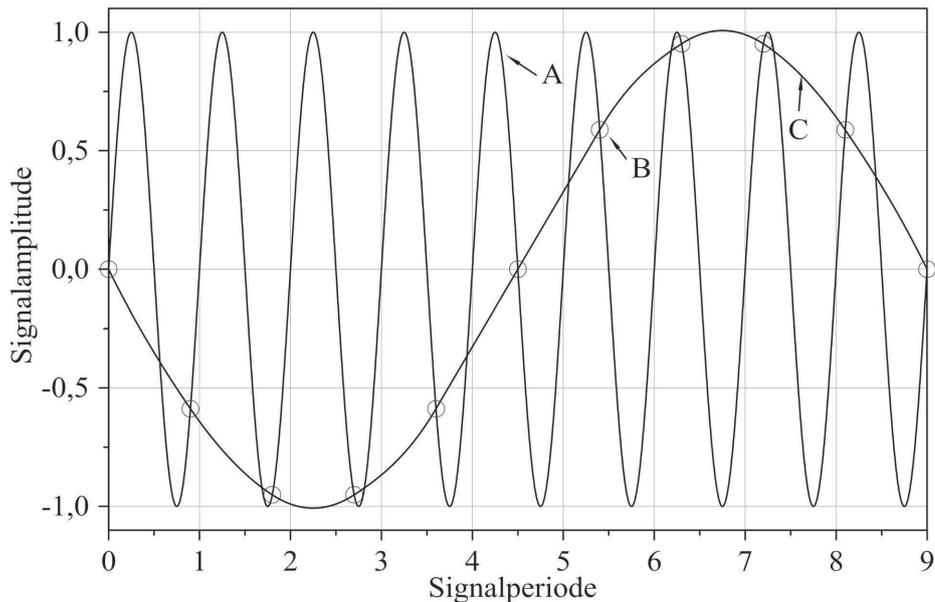


Abbildung 3.1: Alias-Effekt: (A) Ursprüngliche Frequenz, (B) Abtastpunkte, (C) Aliasfrequenz

Falls die maximale Frequenz des Ausgangssignals die halbe Abtastfrequenz übersteigt, kann es aufgrund der bereits beschriebenen Alias-Effekte nicht mehr korrekt rekonstruiert werden und wird unwiderruflich verfälscht. Auch nachträgliches digitales Filtern würde in diesem Fall den Fehler nicht korrigieren. Es ist also vor der Digitalisierung für die Einhaltung des Nyquiste-Shannon Abtasttheorems zu sorgen.

Dies ist theoretisch auf zwei verschiedenen Weisen möglich: Entweder ist die Abtastfrequenz genügend hoch zu wählen, um Alias-Effekte ausschließen zu können. Oder es ist sicherzustellen, dass keinerlei Frequenzen in dem abzutastenden Signal vorhanden sind, die höher als die doppelte Abtastfrequenz sind und somit zu Alias-Effekten führen würden. In der Praxis ist die Vorhersage der Bandbreite eines Signals und somit die Wahl einer genügend hohen Abtastfrequenz nicht möglich. Dies beruht auf den elektromagnetischen Einflüssen der Umwelt auf den in der Messtechnik eingesetzten elektrischen Leitern, welche Spannungen mit unvorhersehbaren Frequenzen induzieren können. Folglich muss ausgeschlossen werden, dass das abzutastende Signal Frequenzen beinhaltet, die das Abtasttheorem verletzen.

Um alle Frequenzen, die das Abtasttheorem verletzen, aus dem elektrischen Signal vor seiner Digitalisierung herauszufiltern, werden analoge Tiefpassfilter verwendet, die ab einer bestimmten Grenzfrequenz das Eingangssignal dämpfen.

Ein idealer Tiefpassfilter würde bis zu einer bestimmten Grenzfrequenz das Signal gar nicht dämpfen und ab dieser Grenzfrequenz das Signal unendlich dämpfen (vgl. Abbildung 3.2 Kurve C). In der Praxis sind solche idealen Verläufe der Amplitude über der Frequenz, auch Frequenzgang genannt, nicht oder nur nahezu zu realisieren. Hiermit ist jedoch ein erheblicher technischer Aufwand verbunden. Typische Tiefpassfilter der Signalverarbeitung sind z.B. der Bessel-Thomson Filter [Tho49] benannt nach dem deutschen Mathematiker Friedrich Bessel (1784-1846) (vgl. Abbildung 3.2 Kurve A) oder der Butterworth-Filter [But30] (vgl. Abbildung 3.2 Kurve B) benannt nach dem britischen Physiker Stephen Butterworth (1885-1958).

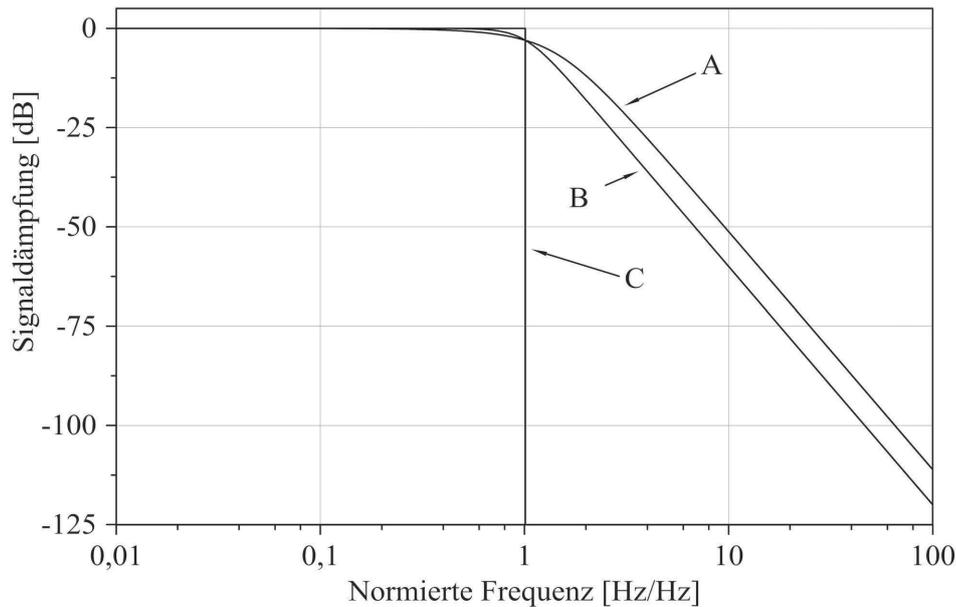


Abbildung 3.2: Amplitudengang des Eingangssignals in Abhängigkeit des Quotienten aus Eingangs- und Grenzfrequenz eines Bessel-Filters 3. Ordnung (A), eines Butterworth-Filters 3. Ordnung (B) und eines idealen Rechteckfilters (C)

Aufgrund der Charakteristiken der genannten Filter werden Signalanteile mit nur einer gering höheren Frequenz als der Grenzfrequenz in Ihrer Amplitude nur um 30 % (-3 dB) (vgl. Abbildung 3.2) gedämpft und tauchen mit 70 % ihrer ursprünglichen Amplitude als Alias-Effekt im digitalisierten Signal auf. Um eine Dämpfung der Amplitude um 50 % (-6 dB) zu erreichen, muss die Signalfrequenz 30% über der Grenzfrequenz liegen. Erst bei Signalfrequenzen, die 2,5-fach höher sind als die Grenzfrequenz des Filters, tritt eine Dämpfung von 90 % (-20 dB) ein. Folglich ist bei Verwendung solcher Filter die Abtastfrequenz mehr als doppelt so hoch wie die Grenzfrequenz des Filters zu wählen, um zu hohe Frequenzen zuverlässig herausfiltern zu können und somit Alias-Effekte sicher zu vermeiden.

3.1.2 Fourier-Transformation

Zur Analyse von schwingungsbehafteten Signalen bietet sich eine Betrachtung des Frequenzspektrums an, welches mit Hilfe der Fourier-Transformation berechnet wird. Hierbei wird das zeitabhängige Amplitudensignal aus dem Ortsbereich (Amplitude des Signals über der Zeit) in ein Amplitudensignal des Frequenzbereichs (Amplitude der Frequenz über der Frequenz) transformiert. Diese Integraltransformation ist nach dem Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier benannt. Er führte bereits 1822 die Fourier-Reihen ein [Fou22]. Das Amplitudensignal im Frequenzbereich quantifiziert die Anteile der einzelnen Frequenzen, aus denen das Amplitudensignal im Ortsbereich in der Summe besteht, und bildet somit das Frequenzspektrum des transformierten Signals. Im Umkehrschluss ist die Summe aller im Frequenzbereich dargestellten Frequenzen mit ihrer jeweiligen Amplitude das Signal im Ortsbereich. Zu berücksichtigen ist hierbei zusätzlich die Phase jeder Frequenz, die angibt, um welchen Teil einer jeweiligen Periode der betrachteten Frequenz das Signal verschoben ist.

Das Ergebnis der Fourier-Transformation, die kontinuierliche Fourier-Transformierte \mathcal{F} ist mit der Kreisfrequenz ω definiert durch

$$\mathcal{F}(\omega) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (3.2)$$

Die Fourier-Transformation wird symbolisiert durch

$$f(t) \circ \longrightarrow \bullet \mathcal{F}(\omega). \quad (3.3)$$

Die Rücktransformation vom Frequenzbereich in den Ortsbereich erfolgt durch die inverse Fourier-Transformation

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (3.4)$$

Die inverse Fourier-Transformation wird symbolisiert durch

$$\mathcal{F}(\omega) \bullet \longrightarrow \circ f(t). \quad (3.5)$$

Da es sich in dieser Arbeit bei den behandelten Messdaten immer um diskrete Daten und nicht um kontinuierliche Daten handelt, lautet hierfür die diskrete Fourier-Transformierte X mit einer endlichen Anzahl N von Messwerten $x(n)$ und den Stützstellen des Frequenzspektrums k

$$X(k) = \sum_{n=-\infty}^{N-1} x(n)e^{-jk2\pi/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.6)$$

und die Rücktransformation

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-\infty}^{N-1} X(k)e^{jk2\pi/N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.7)$$

3.2 Numerische Zeitintegrationsverfahren

Zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen der Materialmodellierung wird als numerisches Verfahren die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Standardverfahren, welches ein breites Anwendungsfeld im Ingenieurwesen hat. Das Ziel dieser Berechnung ist die Abbildung des zeitlichen Materialverhaltens. Hierzu erfolgt eine schrittweise Lösung des Gleichungssystems. Um möglichst schnell zu einer Lösung zu kommen, ist ein geringer Rechenaufwand anzustreben. Gleichzeitig ist es wünschenswert, eine hohe Genauigkeit zu erzielen, um eine möglichst realitätsnahe Lösung zu erhalten. Hierfür stehen zwei Integrationsverfahren

zur Verfügung, d. h. die explizite und die implizite Zeitintegration [Nas10], [Kle12]. Diese Verfahren sollen im Folgenden erläutert und miteinander verglichen werden.

Um die Matrizen des Gleichungssystems der Materialmodellierung aufstellen zu können, werden die Eigenschaften des Bauteils in einem n -ten Zeitschritt verwendet. Graphisch entsprechen diese Eigenschaften einer Tangente durch den Punkt des n -ten Zeitschritts mit der in diesem Punkt vorliegenden Steigung. Mit Hilfe dieser Tangente wird eine Lösung (Iteration) für den $(n + 1)$ -ten Zeitschritt berechnet (s. Punkt A1 in Abb. 3.3).

Bei der impliziten Zeitintegration wird von diesem errechneten $(n + 1)$ -ten Zeitschritt aus eine Rückrechnung zum Punkt des n -ten Zeitschritts durchgeführt und durch Kontrollmechanismen z. B. einer Kontrolle des Gleichgewichts (Summation aller inneren und äußeren Kräfte) die Abweichung zwischen aktuellem Funktionswert und angenommenem Funktionswert bestimmt. Aus einer gegebenen Abweichung werden notwendige Änderungen der Annahmen des Ausgangspunktes bestimmt. Mit Hilfe der Verwendung dieser neuen Annahmen in den Matrizen wird eine neue Iteration für den $(n + 1)$ -ten Zeitschritt berechnet (vgl. Punkt A2 in Abb. 3.3). Nach erneuter Rückrechnung sollte sich die Abweichung dieser neuen Iteration im Verhältnis zur vorherigen Iteration verringert haben. Diese aus Schrittberechnung, Rückrechnung und Abweichungsbestimmung bestehenden Iterationsschritte werden so lange wiederholt, bis die Abweichung geringer als ein Grenzwert (Konvergenzkriterium) ist. In diesem Fall ist Konvergenz erreicht und die Berechnung des $(n + 1)$ -ten Zeitschritts erfolgreich (vgl. Punkt Ak in Abb. 3.3). Starke Nichtlinearitäten führen jedoch in der Regel zu Konvergenzproblemen.

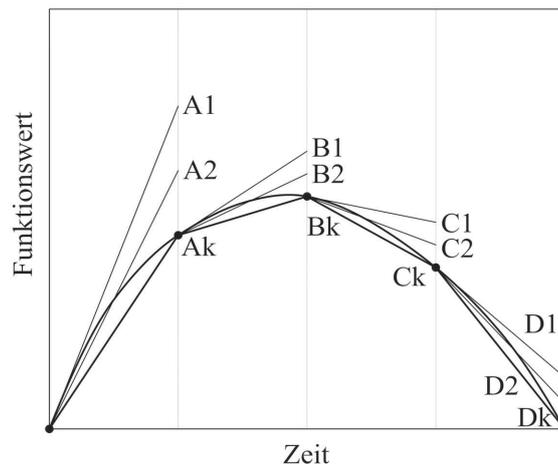


Abbildung 3.3: Visualisierung der impliziten Zeitintegration

Um zum Ergebnis des $(n + 2)$ -ten Zeitschritts zu gelangen, wird analog vorgegangen. Auch hier werden Kontrollen und weitere Iterationen berechnet, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist und Konvergenz erreicht ist (vgl. Punkte Ak und Bk in Abb. 3.3). Dieses iterative Vorgehen wird für jeden Zeitschritt fortgesetzt, bis die gewünschte zeitliche Lösung (s. Punkt Dk in Abb. 3.3) erreicht ist. Es ist zu erkennen, dass sich eine vom Konvergenzkriterium abhängige Abweichung einstellt. Außerdem bauen die Zeitschritte auf der Konvergenz des vorherigen Zeitschritts auf. Somit ist das Erreichen der Zielzeit bzw. des Zielzustands davon abhängig, dass in jedem Schritt Konvergenz erreicht wird.

Im Gegensatz zur impliziten Zeitintegration werden bei der expliziten Zeitintegration keine Iterationsschritte zur Verbesserung der Lösung eines Zeitschritts durchgeführt. Es wird direkt der

$(n + 1)$ -te Zeitschritt berechnet (vgl. Punkt A in Abb. 3.4a). Als Grundlage für die Aufstellung der Matrizen zur Berechnung des $(n + 1)$ -ten Zeitschritts dienen die Eigenschaften zum Zeitpunkt des n -ten Zeitschritts (s. Tangente mA in Abb. 3.4a). Somit ist keine Iteration nötig, und Nichtlinearitäten sind einfach abzubilden. Da beim expliziten Verfahren ein Lösungsschritt immer linear von einem Zeitschritt zum darauffolgenden führt, besteht ein Zusammenhang zwischen der Größe des Zeitschritts und der Abweichung des berechneten Ergebnisses vom Sollwert. Je eher sich die Sollkurve durch die Starttangente eines n -ten Zeitschritts abbilden lässt, desto geringer ist die Abweichung der errechneten Lösung von der Sollkurve. Die Genauigkeit des expliziten Verfahrens hängt demnach von der Größe des Zeitschritts ab (vgl. Abb. 3.4a und 3.4b). Auch wenn die Abweichung durch die Wahl eines kleinen Zeitschritts minimiert werden kann, wird eine gewisse Restabweichung bleiben (vgl. Abb. 3.4b). Um diese Restabweichung zu korrigieren bzw. weiter zu minimieren, besteht z. B. die Möglichkeit der Kontrolle der Energie-Summen des Modells.

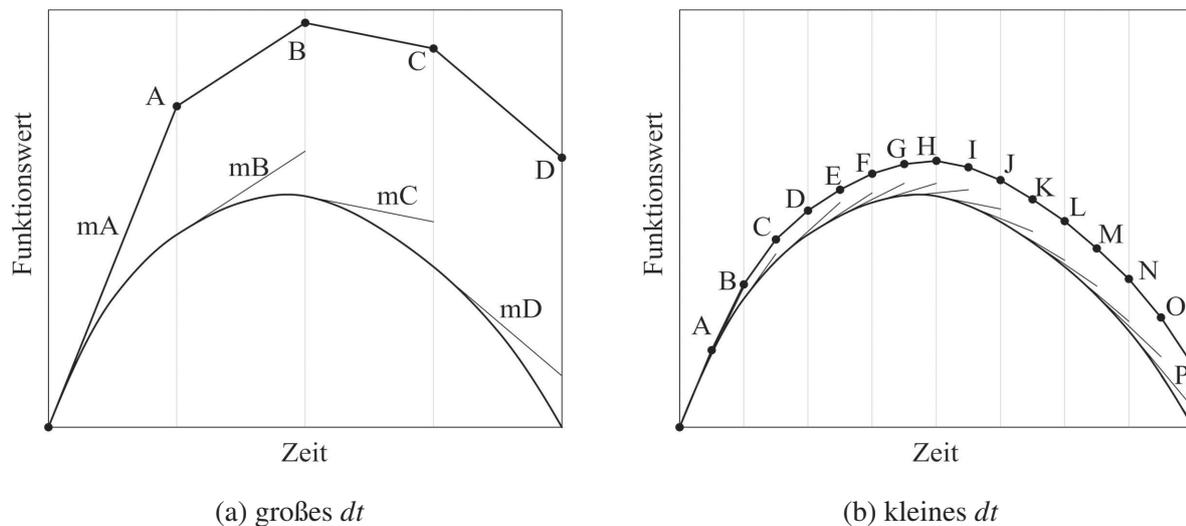


Abbildung 3.4: Visualisierung der expliziten Zeitintegration

Das implizite Verfahren beruht folglich auf einem Gleichgewicht zur Zeit t_{n+1} , wohingegen das explizite Verfahren auf einem Gleichgewicht zur Zeit t_n beruht. Des Weiteren werden für das implizite Verfahren mehrere Iterationsschritte benötigt. Somit ist der Rechenaufwand je Zeitschritt wesentlich höher. Dafür sind im Gegensatz zum expliziten Verfahren keine Genauigkeitseinbußen bei zu großer Zeitschrittwahl zu erwarten. Starke Nichtlinearitäten (Plastische Verformungen, Versagen) hingegen führen bei der impliziten Zeitintegration zu Konvergenzproblemen, so dass keine Lösung des Gesamtsystems möglich ist. Die Simulation von Hochgeschwindigkeitsverformungen benötigen ein kleines Δt , um die Materialeigenschaften und die Geometrie zu jeder Zeit korrekt zu berechnen ([Liu08]). Daher ist für eine Simulation von Hochgeschwindigkeitsumformungen mit nichtlinearen Eigenschaften eine explizite Berechnung zu bevorzugen.

Heutzutage steht eine Vielzahl von Programmen zur Berechnung von Simulationen nach der FE-Methode zur Verfügung. Beispielhaft seien hier einige kommerzielle Programme genannt. Zu den impliziten Solvern gehören *Abaqus/Standard* (Simulia (Dassault Systèmes), Vélizy-Villacoublay, Frankreich), *ANSYS* (ANSYS Inc., Canonsburg, USA) und *Nastran* (div. Hersteller). Als explizite Solver können *Abaqus/Explicit* (Simulia (Dassault Systèmes), Vélizy-Villacoublay, Frankreich), *LS-DYNA* (Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA) und *PAM-CRASH* (ESI, Paris, Frankreich) genannt werden.

4 Parameteridentifikation

Um ein vorhandenes Materialmodell auszuwählen und zu parametrieren, sind Kenntnisse über das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung nötig, die im Folgenden erläutert werden. Im Anschluss werden weitere Auswahlkriterien für ein Materialmodell in Form von materiellen Zwangsbedingungen und Symmetrien beschrieben. Hierzu gehören die Kompressibilität und die Anisotropie eines Werkstoffs.

4.1 Materialgesetze

Zur Bestimmung des Verhaltens zwischen Spannung und Dehnung eines Materials ist der Zusammenhang dieser beiden Größen zu untersuchen. Hierzu wird die Dehnung diskretisiert und die resultierenden Spannungen und Dehnungen als Zielgrößen bezeichnet. Anhand der Ausprägung der Zielgrößen wird die Wirkung der sogenannten Einflussgrößen beurteilt. Einflussgrößen sind nicht Gegenstand der Messung, beeinflussen jedoch die Messgrößen. Folglich wird die Wechselwirkung zwischen den Ziel- und Einflussgrößen bestimmt.

4.1.1 Definition der Zielgrößen

Zur Charakterisierung des Materialverhaltens werden Zug- und Druckversuche durchgeführt. Jeder dieser Versuche stellt in Abhängigkeit der Abzugsgeschwindigkeit, der Abtastfrequenz und der Bruchdehnung eine Anzahl von Datenpunkten zur Verfügung. Um diese miteinander vergleichen zu können, sind charakteristische Messpunkte zu definieren und diese einer statistischen Auswertung zuzuführen. Diese charakteristischen Messpunkte werden als Zielgrößen bezeichnet. Die gewonnenen Daten enthalten Zugehörigkeiten zwischen Spannungs- und Dehnungswerten. Dementsprechend sind charakteristische Punkte dieser Zugehörigkeit zu detektieren.

Technische Elastizitätsgrenze

Nach Versuchsbeginn erfolgt aufgrund der Elastizität ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Dieser endet bei der so genannten Streckgrenze (vgl. DIN EN ISO 6892), und es beginnt der plastische Bereich der Verformung. Daher ist die Streckgrenze eine zu betrachtende Zielgröße. Bei Werkstoffen, deren plastischer Anteil der Verformung nur geringfügig mit der Dehnung zunimmt, ist aufgrund der geringen Änderung der Tangentensteigung die Streckgrenze schwer zu identifizieren. Daher wird in der Regel die Elastizitätsgrenze $R_{p0,2}$ (vgl. DIN EN ISO 6892) statt der Streckgrenze angegeben, welche in diesem Fall einen plastischen Dehnungsanteil von 0,2 % enthält und somit eindeutig identifizierbar ist. Als technische Elastizitätsgrenze (σ_{tE} , ϵ_{tE}) definiert DIN 501445 eine Dehnung mit einem plastischen Anteil von 0,01 %,

welche auch in dieser Arbeit Anwendung findet. Aus dem Quotienten der resultierenden Spannungen σ_{tE} und der dazugehörigen Dehnungen ε_{tE} ergibt sich der Elastizitätsmodul (vgl. Gleichung 2.17). Aufgrund der Zug-Druck-Anisotropie wird die technische Elastizitätsgrenze unter Zug- (σ_{tEz} , ε_{tEz}) und Druckbelastung (σ_{tEd} , ε_{tEd}) bestimmt.

Festigkeit

Ein weiterer charakteristischer Punkt im Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, und somit eine zu ermittelnde Zielgröße, ist das als Zugfestigkeit [GHW09] σ_z bezeichnete Maximum der Spannung und die dazugehörige Dehnung ε_z . Da bei den zu betrachtenden Zellstoffproben unter Zugbelastung keine signifikante Entfestigung bekannt ist und somit die bei anderen Werkstoffen auf die Zugfestigkeit folgende Bruchspannung mit der Zugfestigkeit identisch ist, kann auf die separate Betrachtung der Bruchspannung verzichtet werden.

Unter Druckbelastung erfolgt nach einem Spannungshochpunkt eine geringe Entfestigung. Diese ist durch das Ausknicken der Fasern und somit durch die Schädigung der Fasermatrix begründet. Anschließend folgt eine fortwährende Spannungszunahme durch die Einklemmung der ausgeknickten Fasern zwischen den Spannbacken. Da der Spannungsanstieg durch die eingeklemmten Fasern keine Informationen über das eigentliche Werkstoffverhalten liefert, gilt der erste Spannungshochpunkt als Zielgröße Druckfestigkeit.

Plastizität

Um die Plastizität bzw. das Fließverhalten beschreiben zu können, sind weitere Punkte zwischen der technischen Elastizitätsgrenze und der Zugfestigkeit als Zielgrößen zu bestimmen. Hierzu ist das Spannungs-Dehnungsverhalten in diesem Bereich zu diskretisieren und die resultierenden Daten auszuwerten. Da Vorversuche zwischen der technischen Elastizitätsgrenze und der Bruchspannung keinerlei Wendepunkte des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens sowie seiner Ableitung zeigen, ist das Verhalten durch zwei weitere Punkte jeweils für Zug- (σ_{fz1} , σ_{fz2} , ε_{fz1} , ε_{fz2}) und für Druckbelastungen (σ_{fd1} , σ_{fd2} , ε_{fd1} , ε_{fd2}) ausreichend charakterisierbar.

4.1.2 Definition der Einflussgrößen

Physikalische Größen, die Einfluss auf das Materialverhalten nehmen, werden als Einflussgrößen bezeichnet. Aus dem Stand der Technik gehen die drei Haupteinflussgrößen des Faserformverhaltens hervor: Verdichtung, Feuchte und Dehnrage.

Verdichtung

Durch die Kompression der Zellstofffasermatrix werden die Faserbindungsflächen erhöht und somit die Werkstoffeigenschaften beeinflusst. Der Grad der unter konstantem Druck erreichbaren Verdichtung hängt maßgeblich von der Faserflexibilität ab, da sehr steife Fasern sich schlecht an die

Form benachbarter Fasern anpassen können. Die Faserflexibilität ist, wie in Kapitel 2.4.4 beschrieben, von der Feuchtigkeit der Faser abhängig. Daher findet statt einer Trocken- eine Nassverdichtung der Proben statt. Bedingt durch die Druckdifferenz während des Anformvorgangs (2,5 bar) stellt sich eine Mindestverdichtung des Fasernetzwerks ein. Ist mit steigender mechanischer Komprimierung ein Punkt erreicht, an dem keinerlei Luft mehr innerhalb des Fasernetzwerks vorhanden ist, würde die Kompressibilität alleine auf dem Kompressionsmodul von Zellstoff beruhen. Daher ist ein degressiver Verlauf des Verdichtungsgrades mit steigendem Pressdruck zu erwarten, da der Anteil der sich im Fasernetzwerk befindlichen Luft im Laufe der Verdichtung immer mehr abnimmt. Anhand von Versuchen kann diese Annahme bestätigt werden (vgl. Abbildung 4.1).

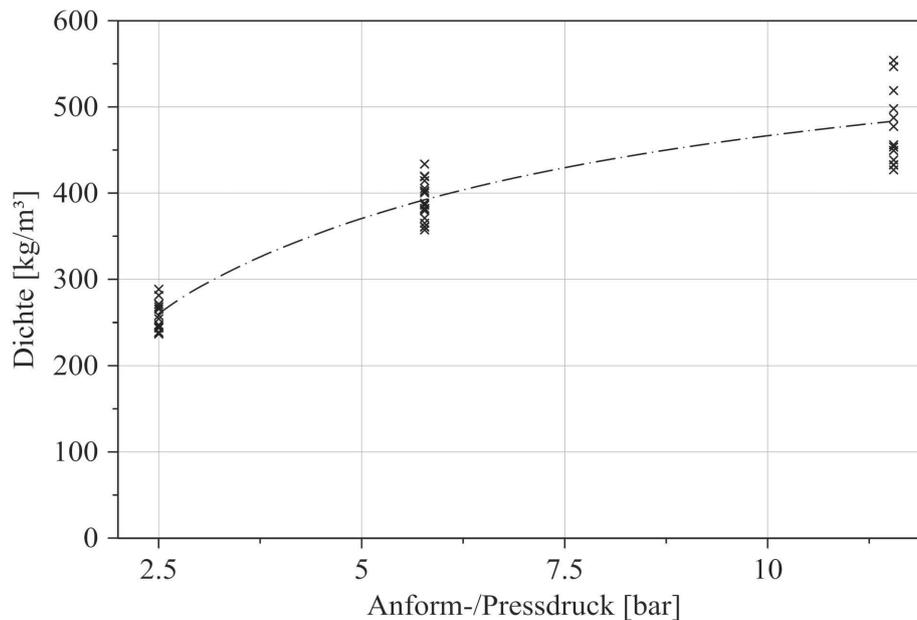


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen der Dichte von 600 kg/m^3 Faserformblättern und dem Anform-/Pressdruck (=Kraft pro Faserformfläche, eigene Vorversuche)

Zur Charakterisierung ist es zweckmäßig, die Einfluss- und Zielgrößen so zu wählen, dass ein möglichst einfacher funktionaler Zusammenhang (z. B. linear) ermittelt werden kann. Beispielsweise ist der Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsdruck und dem Verdichtungsgrad asymptotisch zu erwarten. Des Weiteren hängen erfahrungsgemäß die erreichbaren Spannungen vom Verdichtungsgrad ab. Ein Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsdruck und einer Spannung wäre demzufolge auch mindestens asymptotisch. Da ein asymptotischer Verlauf durch z. B. ein Polynom nur angenähert werden kann, ist es sinnvoller, die Abhängigkeit zwischen der Spannung und dem Verdichtungsgrad zu charakterisieren, anstatt zwischen der Spannung und dem Verdichtungsdruck.

Daher wird der Grad der Verdichtung anhand der Dichte beurteilt, anstatt anhand des Pressdrucks. Der Nassverdichtungsgrad und die daraus resultierende Dichte ist daher eine der zu betrachtenden Einflussgrößen. Da die äußeren Abmessungen bekannt sind, ist noch das Gewicht der Probe zur Berechnung der Dichte zu bestimmen. Der minimal auftretende Druck entspricht dem Anformdruck. Dieser beträgt in der verwendeten Faserformanlage 2,5 bar, was einer mittleren Dichte von 257 kg/m^3 entspricht. Der maximal mögliche Verdichtungsdruck ist durch den Maximaldruck der Hydraulik bestimmt, welche die Presse antreibt. Umgerechnet auf die Fläche des Papiers ergibt sich ein Maximaldruck von 11,5 bar. Hieraus resultiert eine mittlere Dichte von 473 kg/m^3 .

Bauteilfeuchte

Verpackungen sind während ihres Transports einer Vielzahl von klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Die DIN EN 20187 benennt für die Prüfung von Papier, Karton und Zellstoff in hiesigen Breitengraden eine Temperatur von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ und eine relative Luftfeuchte von $(50 \pm 2)\%$ als Normalklima. In tropischen Gebieten erhöhen sich die Werte auf $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$ und $(65 \pm 2)\%$. Durch die relative Luftfeuchtigkeit wird die Bauteilfeuchtigkeit beeinflusst (vgl. Kapitel 5.5.4). Aufgrund der feuchtigkeitsabhängigen Bindungsmechanismen der Cellulosefasermatrix ist ein direkter Zusammenhang zwischen Bauteilfeuchtigkeit und Materialeigenschaften zu erwarten. Da die Bauteilfeuchte jedoch zusätzlich von der Umgebungslufttemperatur abhängt, soll nicht die temperaturabhängige und nichtlinear mit der Bauteilfeuchte zusammenhängende relative Luftfeuchtigkeit als Einflussfaktor gewählt werden, sondern die Bauteilfeuchte selbst. Aufgrund von klimatischen Einflüssen können die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft stark schwanken. Daher umfasst der zu untersuchende Wertebereich der relativen Luftfeuchten 30 % bis 90 %.

Dehnrage

Der dritte Einflussfaktor in dieser Arbeit ist die Dehnrage. Anhand der in Kapitel 2.1 aufgeführten Normen ergibt sich eine maximale Dehnrage von ca. 140 1/s. Um einen möglichst weiten Bereich der Dehnrage betrachten zu können, wird die minimale Dehnrage auf 0,001 1/s begrenzt. Laut Abbildung 2.4 können Dehnraten in diesem Bereich als quasistatisch bezeichnet werden. Zur Einstellung der Dehnrage (0,001 1/s bis 150 1/s) wird die Geschwindigkeit des Versuchs von $3,5 \times 10^{-5}$ m/s bis 5,25 m/s bei Zugversuchen und von 3×10^{-6} m/s bis 0,45 m/s bei Druckversuchen variiert.

4.2 Materielle Zwangsbedingungen

Zur Materialmodellauswahl sind die materiellen Zwangsbedingungen zu bestimmen. Bei Konstruktivpolstern aus Faserform sind die Hauptbelastungen in Ebenenrichtung zu erwarten. Zusätzlich können keinerlei Zugkräfte in Normalenrichtung aufgebracht werden. Um das Dämpfungspotential des zwischen Gut und Umverpackung angeordneten Konstruktivpolsters zu maximieren, ist das verpackte Gut mittig in der Umverpackung angeordnet und der Abstand zwischen verpacktem Gut und Umverpackung maximal. Im unverformten Zustand existieren keinerlei Bereiche, in denen das Konstruktivpolster zwischen verpacktem Gut und Umverpackung direkt eingeklemmt und belastet werden kann. Daher können auch keinerlei Druckkräfte in Normalenrichtung auftreten. Somit ist das geometrische Verhalten des Materials in Normalenrichtung für die Anwendung nicht von Relevanz. Es bleibt die Interaktion der Längs- und Querdehnung, die das Materialverhalten maßgeblich beeinflusst. Um die hieraus resultierende Querkontraktion zu bestimmen, ist neben der Längsdehnung der Probe zusätzlich die Querdehnung zu bestimmen.

4.3 Materielle Symmetrien

Die in Kapitel 2.5.3 erwähnte Anisotropie von Papier in der Ebene würde bei Faserformprodukten zu einer orts aufgelösten Anisotropie führen. Zur Modellierung dieser orts aufgelösten Anisotropie wäre jedoch eine Simulation der Pulpenströmung notwendig, um entsprechende Parameter für die orts aufgelöste Anisotropie zu erhalten. Da im Gegensatz zur Papierherstellung beim Faserformverfahren keine erzwungene Scherströmung an der Sieboberfläche herrscht, ist nicht vorauszusehen, ob und wie stark eine ggf. auftretende Anisotropie in Ebenenrichtung des Materials ist. Daher ist diese zu untersuchen. Die zu erwartende Anisotropie in Normalenrichtung kann dagegen aus den in Kapitel 4.2 genannten Gründen vernachlässigt werden.

5 Bereitstellung der Prüfmöglichkeiten

Um das Materialgesetz für einen Werkstoff formulieren zu können, sind Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Belastung und Verformung nötig. Hierzu dienen im einfachsten Fall einachsige Belastungsversuche, aus denen der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung modelliert werden kann. Hinzu kommen Abhängigkeiten des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von signifikanten Einflussgrößen. Diese sind bei dem zu betrachtenden Werkstoff laut dem Stand der Technik die Dehnrage, die relative Luftfeuchtigkeit und der Verdichtungsgrad. Hierbei sollten die Abhängigkeiten der Spannung von den Einflussgrößen über den gesamten, zu erwartenden Bereich der Dehnung quantifiziert werden.

Hierzu wird die Evaluierung und die auf die Anforderungen bezogene Optimierung der aus dem Stand der Technik bekannten Universalprüfmaschine beschrieben. Es folgt die Konstruktion einer Erweiterung der Prüfmöglichkeiten, welche die weiterhin bestehenden Defizite der vorhandenen Universalprüfmaschine ausgleicht. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung der für die Versuche benötigten Probenerstellung.

5.1 Evaluation und Optimierung der Universalprüfmaschine

Die vorhandene Universalprüfmaschine bietet mit der maximalen Geschwindigkeit von 375 mm/s ein starkes Optimierungspotential, da aufgrund der begrenzten Beschleunigung der Nutzbereich auf 10 mm/s limitiert ist. Zunächst wird die erfolgte Anpassung der Universalprüfmaschine an die Steigerung der Dynamik beschrieben. Hierzu gehörte die Optimierung der Probenspannvorrichtung in Form einer Gewichtsreduzierung und einer gleichzeitigen Steifigkeitserhöhung. Außerdem wird die Messtechnik der erhöhten Dynamik angepasst.

Anschließend wird erläutert, wie eine Freilaufstrecke in die Universalprüfmaschine integriert wird, um der Lineareinheit die Möglichkeit einzuräumen, auf ihre Endgeschwindigkeit zu beschleunigen, bevor die Probe belastet wird. Hierdurch wird erst beim Erreichen des Freilaufstreckenendes die Probenspannvorrichtung schlagartig eingekoppelt und unmittelbar nach dem Einkopplungsvorgang mit der Endgeschwindigkeit der Lineareinheit bewegt. Durch diese Maßnahme kann die benötigte Beschleunigungsstrecke drastisch reduziert werden.

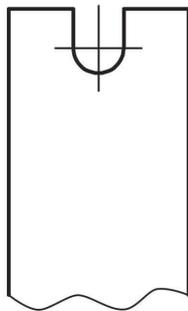
Im Anschluss wird die Validierung der erzielten Optimierungen beschrieben.

5.1.1 Probenspannvorrichtung

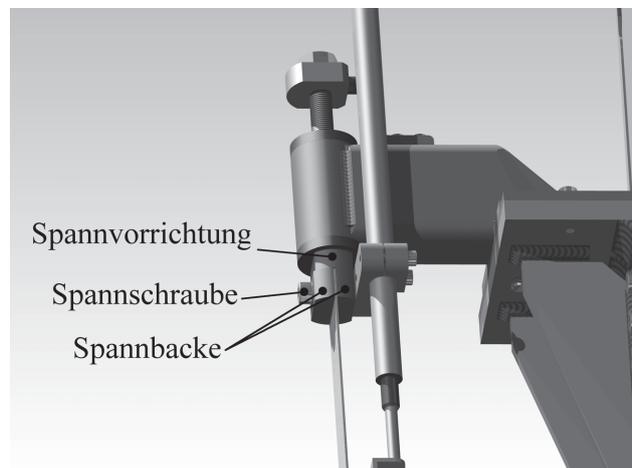
Durch den Einkopplungsvorgang der Freilaufstrecke wird der gesamte Kraftmessstrang mechanisch angeregt. Die hieraus entstehenden Schwingungen überlagern das Kraftsignal und sind daher durch konstruktive Maßnahmen zu minimieren.

Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Probenklemmkraft soll weiterhin nur eine Schraube zur Aufbringung der Vorspannkraft verwendet werden. Da die bisherige Kraftumleitung (vgl. Abbildung 2.1a) jedoch aufwendig und gewichtsintensiv ist, wird die Probenspannvorrichtung in Bezug auf die zukünftige dynamische Anwendung optimiert. Dafür wird die Schraube durch die Probe hindurch geführt. Zur schnellen Montage der Probe ist eine Aussparung in der Probe nötig, durch welche die Spannschraube geführt wird (vgl. Abbildung 5.1a). Ohne diese Nut wäre die Klemmschraube durch ein Loch in der Probe zu führen und bei jeder De- bzw. Montage einer Probe vollständig aus ihrem Gewinde zu entfernen bzw. neu einzuschrauben.

Zur Reduktion der Schwingungsamplitude wird die Masse der Spannvorrichtung reduziert. Die ursprüngliche Probenspannvorrichtung wiegt 2447 g. Da die zentrische Einleitung der Spannkraft bereits eine homogene Kraftverteilung der Spannbacken auf die Probe gewährleistet, wird auf die zusätzlichen Führungen (vgl. Abbildung 2.1b) verzichtet. Hierdurch vereinfacht sich der Aufbau erheblich, und das Gewicht der neuen Spannvorrichtung (vgl. Abbildung 5.1b) kann auf 89 g reduziert werden.



(a) Zentrale Einspannung mit Montagenuf



(b) Klemme mit reduziertem Gewicht

Abbildung 5.1: Probenspannvorrichtung

Zusätzlich wird die Steifigkeit der Spannvorrichtung erhöht, um die Eigenfrequenz in Frequenzbereiche zu verschieben, die oberhalb der Tiefpassfrequenz der Messtechnik liegen. Bei der alten Spannvorrichtung wird die Kraft über die Führungsstäbe ausgeleitet, die als Biegebalken fungieren. Da die Führungen nicht mehr benötigt werden, konnte dieser Einfluss auf die Steifigkeit eliminiert werden. Die Kraft wird nun direkt in das Maschinengestell ausgeleitet. Die Steifigkeit erhöht sich hierdurch von 3,3 kN/mm auf 465,5 kN/mm.

Die Klemmfläche entspricht in der Breite der Probenbreite (25 mm) und ist 15 mm lang (vgl. Abbildung 5.2). Die Oberfläche ist zur Erhöhung des Reibbeiwerts mit senkrecht zur Belastungsrichtung angeordneten Rillen versehen.

5.1.2 Messtechnik

Als Kraftaufnehmer wird anstatt des Kraftaufnehmers in klassischer Biegebalkenform ein Biegebalkenaufnehmer in Ringform der Marke *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)* mit der Bezeichnung U10M mit einem Nennmessbereich von 2,5 kN verwendet. Diese Bauform zeichnet sich im

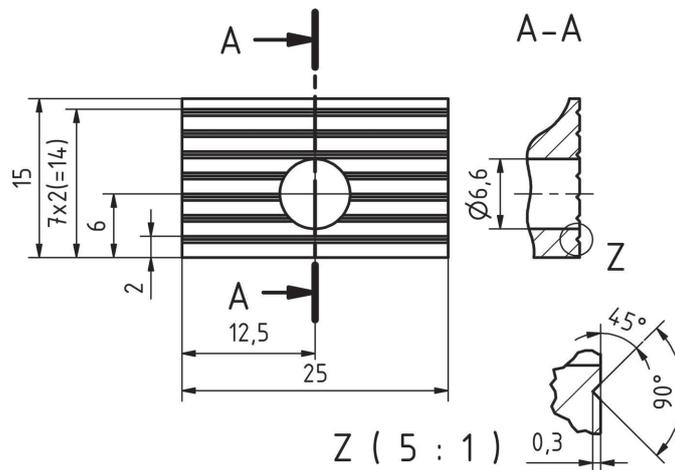


Abbildung 5.2: Gestaltung der Klemmfläche

Gegensatz zu herkömmlichen Biegebalkenaufnehmern durch ihre hohe Steifigkeit aus. Aufgrund der vertikalen Rotationssymmetrie des mechanischen Aufbaus und der zentrischen Kraftein- und -ausleitung treten unter Belastung nur einachsige Verformungen auf. Verdrehungen des Aufbaus, wie sie bei klassischen Biegebalken auftreten, sind somit ausgeschlossen. Der Sensor besteht aus zwei konzentrisch zueinander angeordneten Ringen, welche die Kraft über den ersten Ring in den Sensor einleiten und über den zweiten Ring ausleiten. Verbunden sind die beiden Ringe über einen elastischen Steg, auf welchem Dehnungsmessstreifen die kraft-proportionale Verformung detektieren. Wird der Steg als elastische Feder idealisiert, kann der Sensor als Zweimassenschwinger betrachtet werden. Würde eine Beschleunigung des vollständigen Sensors erfolgen, muss die Kraftübertragung zur Beschleunigung des zweiten Ringes über den Steg erfolgen. Dieser Effekt wäre in Form einer Resonanzschwingung im Messsignal sichtbar, obwohl keinerlei externe Belastung des Sensors stattfindet. Um solche dynamische Effekte zu vermeiden, wird der Kraftsensor in den feststehenden Teil der Anlage montiert.

Zur Messung der zeitlichen Längenänderung der Probe kommt ein induktiver Wegsensor (*HBM WA T*) mit einer Nennmesslänge von 20 mm für Zugversuche und mit einer Nennlänge von 2 mm für Druckversuche zum Einsatz. Um Fehlerquellen bei der Wegmessung auszuschließen, wird der Sensor möglichst nah an der Spannvorrichtung montiert. Alle im Kraftfluss befindlichen Bauteile der Universalprüfmaschine erfahren bei Belastung durch ihre Elastizität eine Verformung. Je weiter der Sensor in Kraftleitungsrichtung von der Einspannvorrichtung entfernt ist, desto mehr Bauteile tragen zur Verfälschung der Wegmessung durch ihre elastische Eigenverformung bei. Der Sensor misst folglich die Summe aller durch die Belastung hervorgerufenen Verformungen. Soll jedoch nur die Verformung der Probe gemessen werden, ist die Wegmessung unmittelbar an der Probe oder zumindest so nah wie möglich an der Probe durchzuführen. Speziell ist es zu vermeiden, weiche Bauteile zwischen Probe und Wegmesseinrichtung zu montieren. Daher wird die Wegmessung an der optimierten Universalprüfmaschine unmittelbar an der Spannvorrichtung vorgesehen.

Zur Bestimmung der minimal zur Verfügung stehenden Anzahl von Datenpunkten ist die kleinste Versuchsdauer t_{Versuch} zu bestimmen und mit der Abtastrate f_{Abtast} zu vergleichen. Als kleinste Versuchsstrecke kann die des Druckversuchs betrachtet werden. Wird diese mit 0,5 % bei einer Einspannlänge von 3 mm angenommen, beträgt bei einer Versuchsgeschwindigkeit von 375 mm/s die Versuchsdauer 0,04 ms. Unter Berücksichtigung der Abtastrate f_{Abtast} des vorhandenen Messprogramms von bis zu 100 Hz ergeben sich für einen Druckversuch 0,004 Datenpunkte. Da die

Messkarte jedoch bis zu 100kHz in der Summe abtasten könnte, ergäben sich bei 50kHz pro Kanal 2 Datenpunkte.

Zur Datenaufnahme und Digitalisierung wird daher ein kombinierter Messverstärker inklusive Digitalisierung der Firma *HBM* verwendet. Dieser Universalmessverstärker *QuantumX 410* verfügt über 4 analoge Eingänge und kann diese mit einer Abtastfrequenz von bis zu 96kHz digitalisieren und filtern. Durch Reduktion der Anzahl der Eingangskanäle auf 2 Kanäle ist eine Erhöhung der maximalen Abtastfrequenz auf 192kHz möglich. Hierdurch ergeben sich für den betrachteten Druckversuch im Vierkanalbetrieb bereits 3,84 Datenpunkte und im Zweikanalbetrieb 7,68 Datenpunkte. Des Weiteren ermöglicht dieser Messverstärker im Gegensatz zu der bisher verwendeten Digitalisierung eine höhere Auflösung von 24bit anstatt 12bit.

Da Messsignale vor der Digitalisierung tiefpassgefiltert werden müssen, um Alias-Effekte zu verhindern, jedoch von Seiten des Herstellers keine Daten zum Frequenzgang des Messverstärkers zur Verfügung stehen, wird der Frequenzgang experimentell ermittelt. Hierzu wird bei abgeschalteten digitalen Filtern ein Signal ansteigender Frequenz (Sweep) an den Messeingang angelegt. Diese Messung wird jeweils für den 4-Kanal-Betrieb (low speed) und den Betriebsmodus mit erhöhter Messrate inkl. Reduktion der Eingangskanäle (high-speed) durchgeführt (vgl. Abbildung 5.3). Das Ergebnis zeigt, dass die Eingangssignale mit weniger als der Hälfte der maximalen Abtastfrequenz als Grenzfrequenz tiefpassgefiltert werden. So können Alias-Effekte bei den höchsten Messraten der jeweiligen Geschwindigkeitsmodi ausgeschlossen werden. Bei geringeren Abtastfrequenzen sind jedoch zusätzliche digitale Filter nötig, um Alias-Effekte auszuschließen.

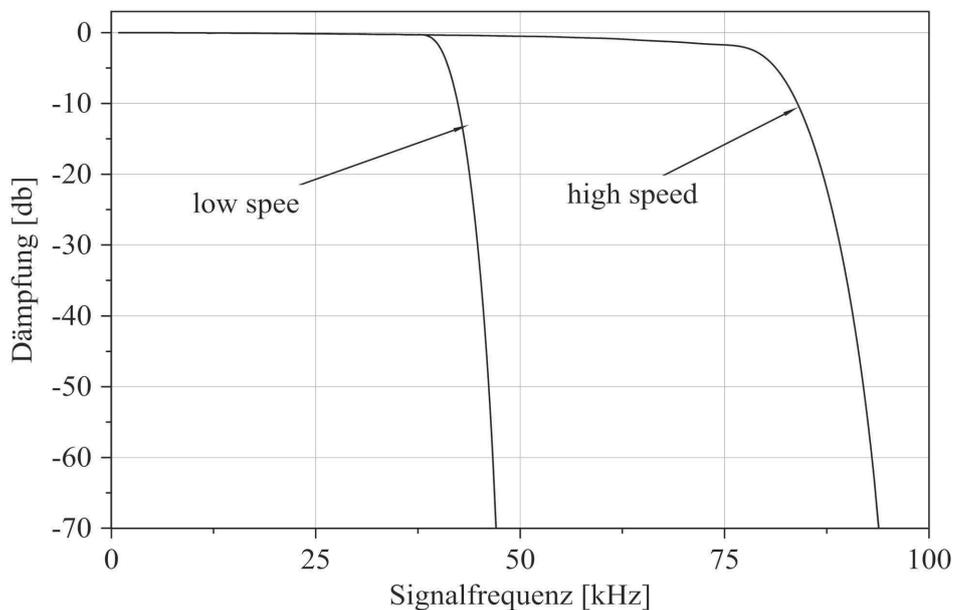


Abbildung 5.3: Frequenzgang des Messverstärkers *HBM QuantumX 410*

Zur Probenvermessung wird eine Bügelmessschraube (*Mahr*, Micromar 40 EWS) zur Dickenmessung und eine Präzisionswaage (*Mettler Toledo*, Moisture Analyser HB43) zur Gewichtsbestimmung verwendet. Beide Geräte verfügen über eine serielle Schnittstelle, so dass eine automatisierte Datenaufnahme dieser Probandaten erfolgt. Hierdurch werden Fehler bei der Ablesung bzw. Eingabe der Daten ausgeschlossen.

5.1.3 Evaluierung des Prüfungsgeschwindigkeitsverhaltens

Um die Eignung der Universalprüfmaschine im Hinblick auf konstante Abzugsgeschwindigkeiten abschätzen zu können, werden exemplarisch geschwindigkeitsabhängige Zug- und Druckversuche durchgeführt. Hierbei wird das zeitabhängige Wegsignal aufgenommen, um durch Differenzierung Daten über die Geschwindigkeit zu erhalten. Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Quotient aus tatsächlicher Geschwindigkeit und Sollgeschwindigkeit berechnet.

Problematisch hierbei ist das Rauschen des Wegmesssignals. Bedingt durch die mathematische Ableitung unterliegen Quotienten aus Messwert und Zeit >1 einer Verstärkung. Mit einer Standardabweichung des Wegsignals in der Größenordnung von $0,002\text{ mm}$ und einer Abtastperiode von beispielsweise $4,166 \times 10^{-4}\text{ s}$ ergibt sich im Mittel ein Rauschen des errechneten Geschwindigkeitssignals von ca. $4,8\text{ mm/s}$. Dieser Effekt ist unabhängig vom durchgeführten Versuch. Sollen Geschwindigkeiten gemessen werden, die nahe an bzw. unterhalb dieses Rauschens im Geschwindigkeitssignal liegen, können diese nur durch eine Filterung aus dem verrauschten Signal extrahiert werden.

Die Filterung des Wegsignals führt zu einer Rundung aller kurzzeitig auftretenden Änderungen. Ziel der Evaluierung des Geschwindigkeitsverhaltens ist es deshalb, die Sprunghaftigkeit des Anstiegs der Geschwindigkeit zu Beginn des Versuchs zu quantifizieren und in Bezug auf die geplanten Versuche zu bewerten. Aufgrund der anlagentechnisch begrenzten Beschleunigung ist mit steigender Geschwindigkeit eine steigende Abweichung von einem ideal unendlich beschleunigten Geschwindigkeitsverlauf zu erwarten. Folglich sollte bei hohen Geschwindigkeiten die Filterung des Signals eher gering ausfallen, um den realen Verlauf der Geschwindigkeit möglichst wenig zu verfälschen.

Daher werden die Wegsignale einer Mittelung unterzogen, die eine Reduzierung der Standardabweichung des Quotienten aus Geschwindigkeit und Sollgeschwindigkeit unter 5% bewirkt. Zur Durchführung dieser Berechnung werden Datenpunkte verwendet, zu deren Zeitpunkt der Versuch noch nicht begonnen hatte. Hierdurch wird sichergestellt, dass es sich um reines Rauschen des Signals handelte und nicht etwa um versuchsinduzierte Signalschwankungen. Diese Geschwindigkeitsabhängigkeit der Mittelung führt zu einer starken Mittelung und somit ggf. Verfälschung des Signalverlaufs bei kleinen Geschwindigkeiten, da durch die Quotientenbildung aus Geschwindigkeit und Sollgeschwindigkeit das verstärkte Rauschen vermehrt durch die Mittelung gedämpft werden muss. Da hier jedoch das Verhältnis aus Beschleunigung und Geschwindigkeit klein ist, ist auch die Abweichung von dem ideal beschleunigten Geschwindigkeitsverlauf gering. Rein technisch ist hier keine große Abweichung zu erwarten. Die hingegen kritisch zu beleuchtenden höheren Geschwindigkeiten werden dem zu Folge auch weniger gemittelt. Somit fällt die Verfälschung hier geringer aus.

Die Testgeschwindigkeiten erstrecken sich hierbei in Zehnerpotenzen von $0,1\text{ mm/s}$ bis 100 mm/s . Zusätzlich wird die durch die Lineareinheit vorgegebene Maximalgeschwindigkeit von 375 mm/s als Testgeschwindigkeit mit aufgenommen (vgl. Abbildung 5.4 und 5.5).

Die Ergebnisse der Versuche zeigen bei Zugversuchen mit einer Sollgeschwindigkeit von bis zu 1 mm/s vernachlässigbar kleine zurückzulegenden Wege bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeiten. Jedoch bereits ab einer Sollgeschwindigkeit von 10 mm/s wird ein Weg von ca. $0,15\text{ mm}$ zurückgelegt, um 80% der Endgeschwindigkeit zu erreichen. Geschwindigkeiten oberhalb von 10 mm/s benötigen mehr als $0,5\text{ mm}$ Anlaufstrecke.

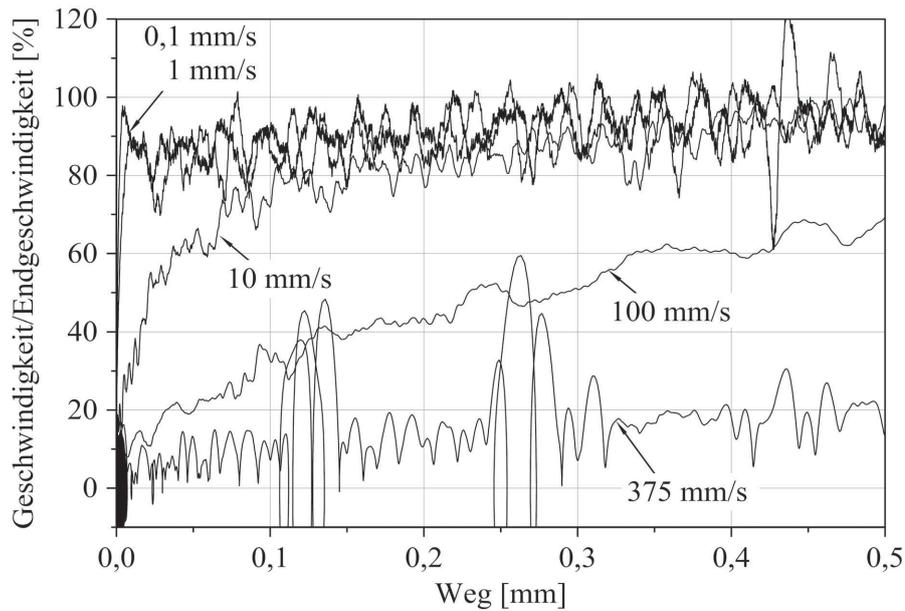


Abbildung 5.4: Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Universalprüfmaschine im Ausgangszustand über dem Beschleunigungsweg abhängig von der Sollgeschwindigkeit: Verdeutlichung der benötigten Anlaufstrecke bei Zugversuchen

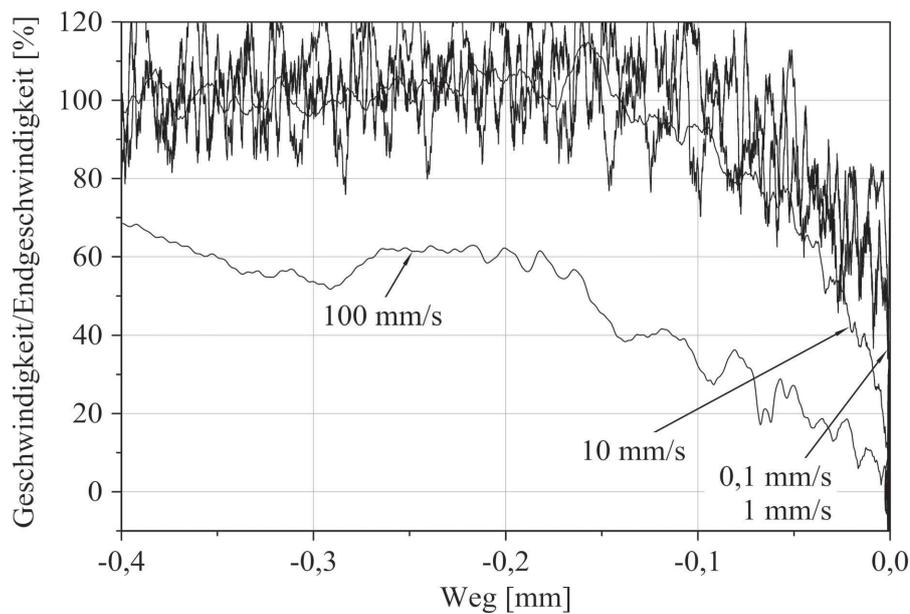


Abbildung 5.5: Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Universalprüfmaschine im Ausgangszustand über dem Beschleunigungsweg abhängig von der Sollgeschwindigkeit: Verdeutlichung der benötigten Anlaufstrecke bei Druckversuchen

Auch bei den Druckversuchen ist zwischen 0,1 mm/s und 1 mm/s kaum ein Unterschied im Anlaufverhalten erkennbar. Geschwindigkeiten oberhalb von 100 mm/s sind mit dem vorhandenen Aufbau bei einer gewählten Einspannlänge von 3 mm nicht möglich, da der Weg für die Linear- einheit zum Beschleunigen und Abbremsen nicht ausreichen würde. Ab einer Endgeschwindigkeit von 10 mm/s weicht der Geschwindigkeitsverlauf von den Verläufen bei niedrigeren Endgeschwin-

digkeiten ab. Bei Betrachtung der Kurvenverläufe langsamer Geschwindigkeiten (unterhalb von 100mm/s) fällt auf, dass diese zu Beginn nicht dem erwarteten idealen Geschwindigkeits-Weg Verlauf (vgl. Abbildung 2.3) entspricht. Die Endgeschwindigkeit wird erst nach 0,1 mm erreicht, trotz anfänglicher Beschleunigung auf ca. 60% der Endgeschwindigkeit. Diese Abweichung ist auch bei den Zugversuchen zu erkennen, hier jedoch wesentlich geringer ausgeprägt.

Als Grund für die dargestellte Abweichung wird die Elastizität der Anlage bzw. ihres Kragarmes angenommen. Zur Quantifizierung dieser Annahme wird die Federsteifigkeit über den Verfahrensweg der Anlage während eines Druck- und Zugversuchs bestimmt. Ist die Federsteifigkeit über den Anlagenweg konstant, wäre die Voraussetzung der Elastizität erfüllt. Die Federsteifigkeit der Anlage $c_{\text{Anlage}}(t)$ setzt sich aus dem Quotienten der durch die Probe auf die Anlage aufgeprägten Kraft $F_{\text{Probe}}(t)$ und der Differenz zwischen dem Weg der Anlage $s_{\text{Anlage}}(t)$ und dem Weg der Probe bzw. der beweglichen Einspannung $s_{\text{Einsp}}(t)$ zusammen:

$$c_{\text{Anlage}}(t) = \frac{F_{\text{Probe}}(t)}{s_{\text{Anlage}}(t) - s_{\text{Einsp}}(t)}. \quad (5.1)$$

Mittels dieses Zusammenhangs wird für einen Zug- und Druckversuch die Konstanz der errechneten Federsteifigkeit über den gesamten Versuchsweg erkennbar (vgl. Abbildung 5.6). Die Federsteifigkeit beträgt ca. 3500N/mm.

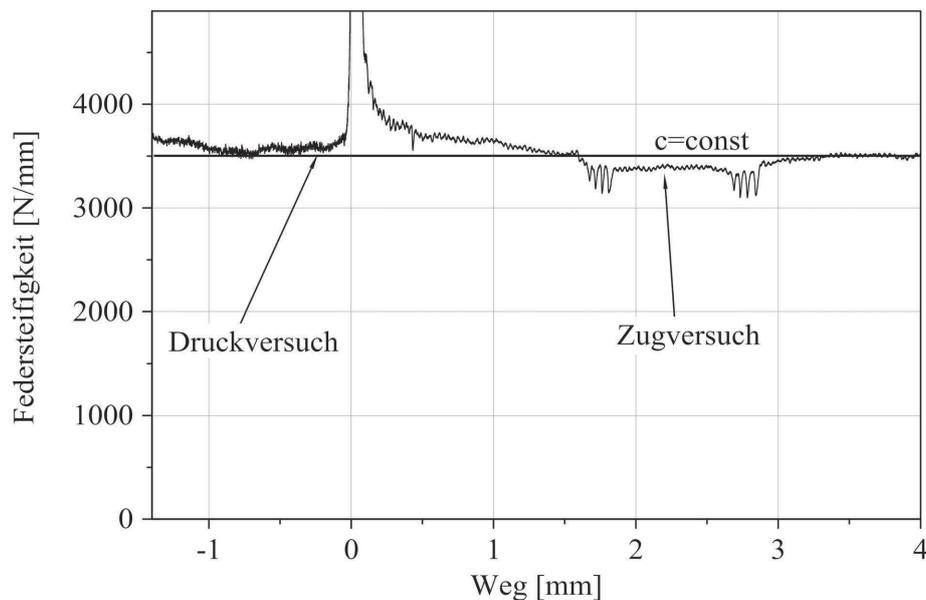


Abbildung 5.6: Zug- und Druckversuche zur Federsteifigkeitsermittlung

5.1.4 Optimierung bzgl. anlagenelastizitätsbedingter Abweichung

Zur Optimierung der durch die Elastizität der Anlage hervorgerufenen Abweichung sind die Einflussgrößen zu detektieren. Als Zielgröße gilt hierbei die Differenzgeschwindigkeit der Probe $\Delta v_{\text{Probe}}(t)$ zwischen der eigentlichen Anlagengeschwindigkeit $v_{\text{Anlage}}(t)$ und der Probengeschwindigkeit $v_{\text{Probe}}(t)$. Aus Gleichung 5.1 folgt für den Differenzweg $\Delta s_{\text{Einsp}}(t)$ zwischen Anlagen $s_{\text{Anlage}}(t)$ und Verfahrensweg der Probeneinspannung $s_{\text{Einsp}}(t)$:

$$\Delta s_{\text{Einsp}}(t) = s_{\text{Anlage}}(t) - s_{\text{Einsp}}(t) = \frac{F_{\text{Probe}}(t)}{c_{\text{Anlage}}}. \quad (5.2)$$

Durch Differenzierung folgt für die Differenzgeschwindigkeit der Probe $\Delta v_{\text{Probe}}(t)$:

$$\Delta v_{\text{Probe}}(t) = \frac{1}{c_{\text{Anlage}}} F_{\text{Probe}}(t) \frac{d}{dt} \quad (5.3)$$

oder durch Verkettung auf den Probenweg $s_{\text{Einsp}}(t)$ bezogen:

$$\Delta v_{\text{Probe}}(s_{\text{Einsp}}(t)) = \frac{1}{c_{\text{Anlage}}} F_{\text{Probe}}(s_{\text{Einsp}}(t)) \frac{d}{ds_{\text{Einsp}}(t)}. \quad (5.4)$$

Die Abweichung der Geschwindigkeit ist folglich ausschließlich auf die Änderung der Kraft der Probe F_{Probe} zurückzuführen. Unter der Annahme eines elastischen Bereichs zu Beginn eines jeden Versuchs hängt die Probenkraft F_{Probe} von der Federkonstante der Probe c_{Probe} ab. Aus der Definition des Elastizitätsmoduls E in Abhängigkeit von der Kraft F , der Querschnittsfläche A , der Probenlänge l und der Probenursprungslänge l_0 :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l_0}{l} \quad (5.5)$$

ergibt sich für die Federkonstante der Probe c_{Probe} :

$$c = \frac{E \cdot A}{l_0}. \quad (5.6)$$

Da zu Beginn des Versuchs von Elastizität ausgegangen wird, kann der Elastizitätsmodul E als konstant angesehen werden. Die Ursprungslänge l_0 kann bei Zugversuchen unter Berücksichtigung des Einflusses auf die Dehnrage geändert werden. Bei Druckversuchen ist die Ursprungslänge jedoch nicht beliebig änderbar, da ab einer bestimmten Länge durch das konstante Flächenträgheitsmoment I ein Ausknicken der Probe zu erwarten ist. Der Unterschied in der Ursprungslänge l_0 und deren Effekt auf den Geschwindigkeitsverlauf ist im Vergleich zwischen Zug- und Druckversuchen in Abbildung 5.4 und 5.5 deutlich zu erkennen. Es blieben als Einflussfaktoren die Querschnittsfläche der Probe A_{Probe} und die Anlagensteifigkeit c_{Anlage} . Da die Änderung der Querschnittsfläche im Vergleich zur Optimierung der Anlagensteifigkeit ohne Einbuße der Dynamik der Universalprüfmaschine ein höheres Optimierungspotenzial bietet, werden Druckversuche mit einer verminderten Querschnittsfläche durchgeführt (vgl. Abbildung 5.7).

Im Vergleich zu Abbildung 5.5 ist eine deutliche Verbesserung der Geschwindigkeitsverläufe langsamer Geschwindigkeiten in Richtung des idealen Geschwindigkeitsverlaufs zu verzeichnen. Bereits nach kürzestem Weg (0,01 mm) ist bei Geschwindigkeiten bis 1 mm/s die gewünschte Sollgeschwindigkeit erreicht. Es bleiben jedoch die durch die begrenzte Beschleunigung resultierenden Abweichungen bestehen.

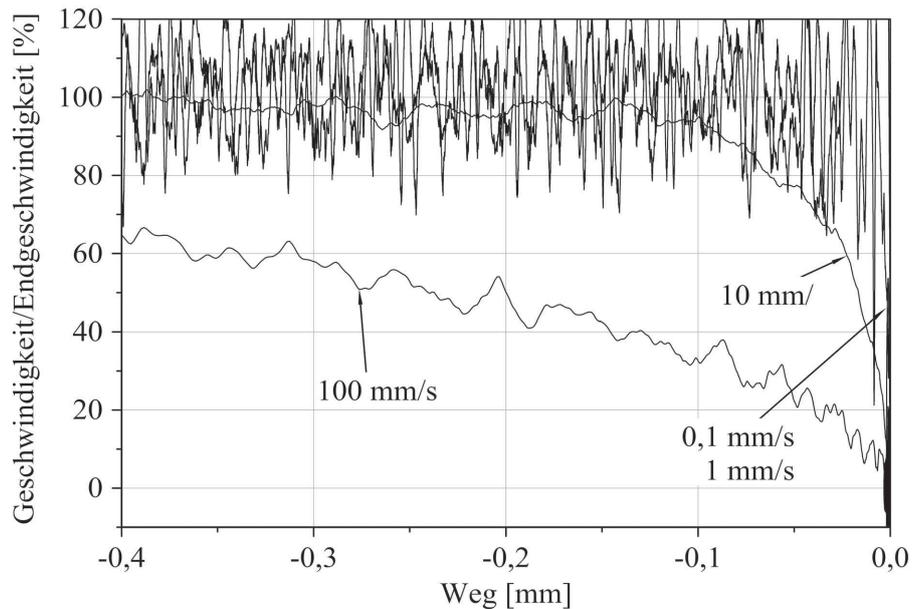
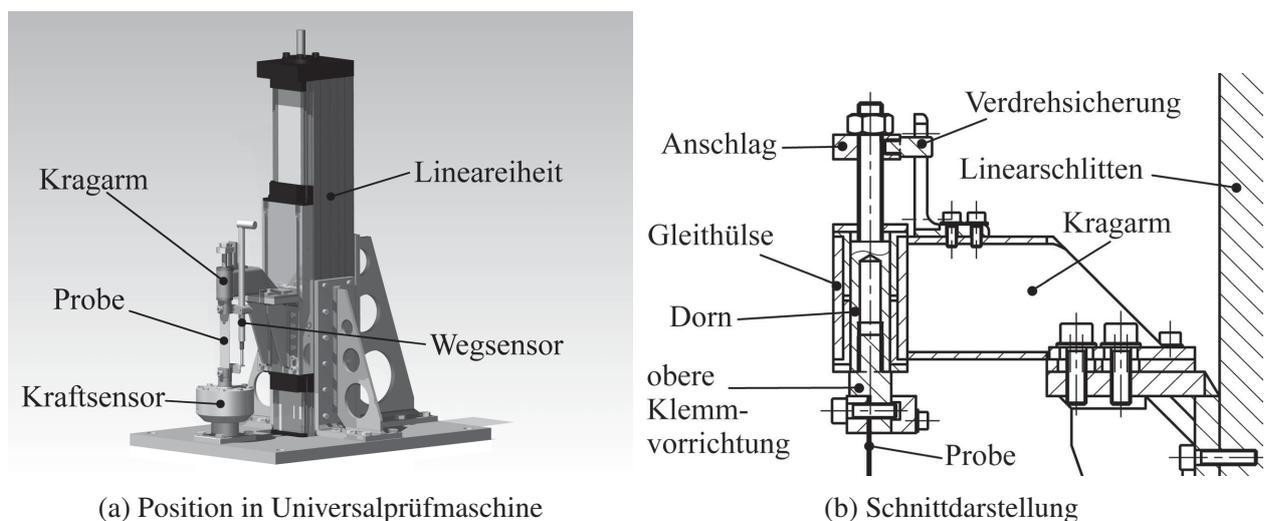


Abbildung 5.7: Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Druckversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 100 mm/s mit um 80 % reduzierter Probenbreite

5.1.5 Optimierung der beschleunigungsbedingten Abweichung

Eine weitere Optimierung in Bezug auf das Geschwindigkeitsverhalten ist durch höhere Beschleunigungen zu Beginn des Versuchs möglich. Anlagentechnisch ist hier jedoch kein Optimierungspotential vorhanden, da eine Überlastung der Lineareinheit und deren Antriebsmotor nicht erwünscht ist. Das in Kapitel 2.1.4 erläuterte Prinzip der Impulsübertragung wird hier deshalb mittels einer Freilaufstrecke realisiert (vgl. Abbildung 5.8). Hierdurch wird die benötigte Beschleunigungsstrecke reduziert. Der Freilauf wird in Form einer gleitgelagerten und verdrehgesicherten Welle umgesetzt. Dieser ermöglicht der Linearführung die Beschleunigung bis auf ihre Endgeschwindigkeit, bevor die Probenspannvorrichtung eingekoppelt wird.



(a) Position in Universalprüfmaschine

(b) Schnittdarstellung

Abbildung 5.8: Freilauf der Universalprüfmaschine

Die obere Klemmvorrichtung wird in einer parallel zur Bewegungsrichtung der Lineareinheit angeordneten und am Kragarm befestigten Gleithülse radial gelagert. Eine Verdrehsicherung gewährleistet die Fluchtung zwischen oberer und unterer Klemmvorrichtung. Durch die Gleithülse wird es der Lineareinheit ermöglicht, eine Bewegung auszuführen, ohne diese auf die Probe zu übertragen. Der in der Gleithülse befindliche Dorn endet auf seiner Unterseite in der oberen Klemmvorrichtung und auf seiner Oberseite in einem mittels Gewinde verstellbaren Anschlag. Die zwischen oberer Klemmvorrichtung und dem Anschlag befindliche axiale Beweglichkeit der Gleithülse ermöglicht es der Lineareinheit, auf die gewünschte Geschwindigkeit zu beschleunigen, bevor eine Belastung der Probe erfolgt. Erst wenn die Lineareinheit die Geschwindigkeit erreicht hat, wird mittels des Anschlags die obere Klemmvorrichtung abrupt eingekoppelt und ihr somit die Geschwindigkeit der Lineareinheit aufgeprägt. Bei Druckversuchen dient die obere Klemmvorrichtung als Anschlag.

Um die durch den Beschleunigungsvorgang benötigte Strecke so gering wie möglich zu halten, wird bewusst auf dämpfende Elemente (vgl. Kapitel 2.1.4) verzichtet. Bei Druckversuchen ist zu beachten, dass die Spannvorrichtungen der Probe zum Ende des Versuchs auf Block fahren und hierdurch den Kraftaufnehmer beschädigen können. Um dies zu verhindern, darf bei der gegebenen Beschleunigung von 6000 mm/s und einer Einspannlänge von 3 mm abzüglich einer angenommenen Versuchsstrecke von maximal 1 mm nach Gleichung 2.15 theoretisch eine Geschwindigkeit von ca. 155 mm/s nicht überschritten werden. Daher wird die Geschwindigkeit bei Druckversuchen mit Freilauf sicherheitshalber auf 100 mm/s beschränkt. Zur Untersuchung des Optimierungspotentials durch die Freilaufstrecke werden Zug- und Druckversuche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten analog zu den Versuchen zuvor durchgeführt (vgl. Abbildung 5.9 und 5.10).

Während bei den Zugversuchen ohne Freilauf eine Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/s bereits ca. 0,1 mm Weg benötigt, um 80 % der Endgeschwindigkeit zu erreichen (vgl. Abbildung 5.4), benötigt mit Freilauf selbst die maximal mögliche Geschwindigkeit von 375 mm/s weniger als 0,3 mm

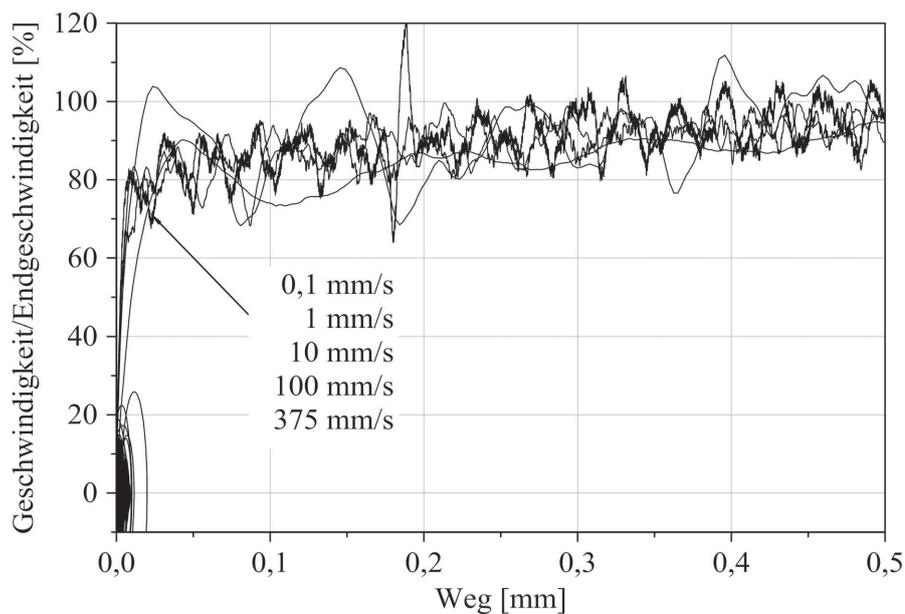


Abbildung 5.9: Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Zugversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 375 mm/s im Vergleich zu Abbildung 5.4 mit Freilaufstrecke

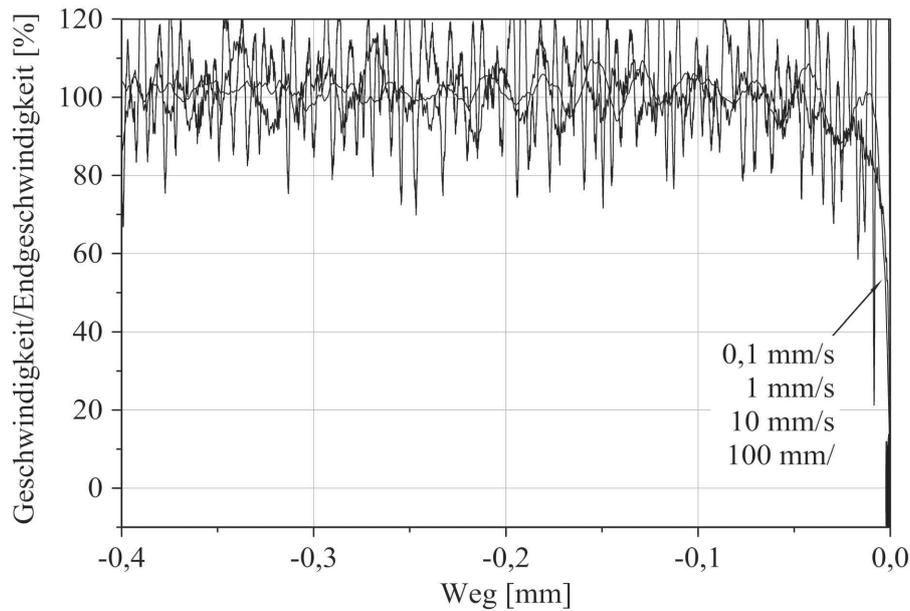


Abbildung 5.10: Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Druckversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 100 mm/s im Vergleich zu Abbildung 5.5 mit Freilaufstrecke

Beschleunigungsweg. Auch bei den Druckversuchen bewirkt die Freilaufstrecke eine Optimierung des Beschleunigungswegs bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s um 50% von $-0,08\text{ mm}$ auf $-0,04\text{ mm}$.

5.1.6 Ergebnisse der Evaluation und Optimierung

Mit der betrachteten Universalprüfmaschine können sowohl Zug- als auch Druckversuche für den zu betrachtenden Werkstoff durchgeführt werden. Die möglichen Versuchsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 5.1 ersichtlich.

Tabelle 5.1: Maximal erreichbare Versuchsgeschwindigkeiten der Universalprüfmaschine

| Belastungsrichtung | Versuchsgeschwindigkeiten | Dehnraten (Einspannlängen) |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| Zug | 375 mm/s | 10,71 1/s (35 mm) |
| Druck | 100 mm/s | 33,34 1/s (3 mm) |

Da die Sensoren nur begrenzte Nennbereiche haben, ergeben sich hieraus die maximal messbaren Werte (vgl. Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Maximal erfassbare Messgrößen der Universalprüfmaschine

| Messgröße | Nennbereich |
|-----------|--------------|
| Kraft | 2500 N |
| Weg | 2 mm / 20 mm |

Mit den Optimierungen kann der abdeckbare Geschwindigkeitsbereich der Universalprüfmaschine erweitert werden. Da die maximale Geschwindigkeit von 375 mm/s nicht ausreicht, um die in

Kapitel 2.1 genannte Maximalgeschwindigkeit von 5 m/s zu erreichen, ist diese Lücke zu schließen. Hierzu ist eine weitere Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten zu konstruieren, die es ermöglicht, Versuche mit Geschwindigkeiten zwischen 0,375 m/s bis 5 m/s durchzuführen.

5.2 Entwicklung einer Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten

Aufgrund der begrenzten Prüfgeschwindigkeit der Universalprüfmaschine ist eine Möglichkeit zu schaffen, das Materialverhalten des Faserformmaterials bei höheren Geschwindigkeiten zu quantifizieren. Hierzu ist eine entsprechende Kinematik nötig, welche die in Normen, Leitfäden und Handbüchern der Transportlogistik geforderten Geschwindigkeiten abdeckt. Zu Beginn wird hierzu die grundlegende Auswahl des Anlagenprinzips dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Auswahl der Messtechnik und die Konstruktion des Versuchsaufbaus.

5.2.1 Auswahl des Anlagenprinzips

Zur Auswahl des Anlagenprinzips wird eine Nutzwertanalyse zur Detektion der optimalen Lösung durchgeführt. Zu bewerten sind hierbei die Möglichkeiten des Anlagenprinzips (Impulsübertragung, Wellenausbreitung, Treibladung, Hydraulik) anhand der Kriterien Bauraum (Grundfläche und Höhe), Sicherheit, Geschwindigkeitskonstanz und Energiebedarf. Die Erfüllungsgrade der Kriterien mit der dazugehörigen Punktezahl sind im Anhang in Tabelle A.1 und die Gewichtungsmatrix im Anhang in Tabelle A.2 ersichtlich. Die resultierende technische Wertigkeit (vgl. Tabelle A.3) ergibt zusammen mit der wirtschaftlichen Wertigkeit (vgl. Tabelle A.4) die Stärke der Lösung (vgl. Abbildung A.1). Um die Lösungen miteinander vergleichen zu können, wird die Gesamtwertigkeit nach dem Geradenverfahren und dem Hyperbelverfahren bestimmt [Pah+07] (vgl. Tabelle A.5). Dabei besitzt das Prinzip der Impulsübertragung mit 84,9% (Geradenverfahren) bzw. 84,48% (Hyperbelverfahren) in beiden Verfahren die höchste Gesamtwertigkeit. Daher findet dieses im Folgenden Anwendung.

Eine Lösung zur Impulsübertragung wäre eine rotierende Scheibe. Hierbei ist diese jedoch vor Versuchsbeginn auf die gewünschte Geschwindigkeit zu beschleunigen. Diese Beschleunigungsenergie kann z. B. per elektromagnetischer oder fluidischer Energie aufgeprägt werden. Eine rotierende Scheibe weist, bedingt durch die Kreisbewegung des Mitnehmers, immer eine Abweichung von einer linearen Bewegung auf. Um diesen Fehler bei der Durchführung axialer Versuche möglichst zu minimieren, ist ein entsprechend großer Radius der Kreisbahn zu wählen. Beispielsweise wäre nach der Formel zur Berechnung eines Kreissegments mit dem Radius r , der Kreissekante s_k und der Höhe zwischen Kreissekante und Kreis

$$r = \frac{4h^2 + s_k^2}{8h} \quad (5.7)$$

bei einer Versuchsstrecke von 10 mm der Durchmesser der Scheibe 2,5 m.

Um jedoch die benötigte Grundfläche für den Versuchsaufbau möglichst gering zu halten, wird eine vertikale Versuchsanordnung gewählt, mit der lineare Bewegungen induziert werden können. Hierbei wird die potentielle Energie genutzt, um einen Mitnehmer in Bewegung zu versetzen. Zu beachten ist eine entsprechende von der benötigten Versuchsgeschwindigkeit abhängige Fallhöhe sowie genügend vertikaler Raum, um die nach einem Versuch noch vorhandene kinetische Energie abzubauen.

5.2.2 Auswahl der Messtechnik

Die Messtechnik ist dafür zuständig, die benötigten Daten während des Versuchs aufzunehmen. Hierzu sind physikalische Größen in digitale Signale zu wandeln und zu speichern. In diesem Fall gehören hierzu die beiden Größen des Versuchswegs s und der Probenkraft F . Daten dieser beiden Größen sind in ausreichender Zahl in zeitlich reproduzierbarer Reihenfolge aufzunehmen. Die Anzahl der Datenpunkte muss so gewählt werden, dass durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Datenpunkten keine zu großen Abweichungen von dem realen kontinuierlichen Signal auftreten. Nur so kann später in der Modellierung das Materialverhalten ausreichend genau wiedergegeben werden. Zur Bestimmung der benötigten Abtastrate ist die Versuchszeit t_{Vers} und die zeitliche Auflösung des Versuchs zu betrachten. Die Versuchszeit t_{Vers} ergibt sich in Abhängigkeit der Bruchdehnung ϵ_{Bruch} , der Ursprungslänge l_0 und der Versuchsgeschwindigkeit v_{Vers} zu:

$$t_{\text{Vers}} = \frac{\epsilon_{\text{Bruch}} \cdot l_0}{v_{\text{Vers}}}. \quad (5.8)$$

Dies in den Zusammenhang zwischen Abtastwerten (Samples) S , der Versuchszeit t_{Vers} und der Abtastrate

$$f_{\text{Abtast}} = \frac{S}{t_{\text{Vers}}} \quad (5.9)$$

eingesetzt und nach S umgeformt, ergibt unter Berücksichtigung von Gleichung 2.5 für die Anzahl der Samples S

$$S = \frac{f_{\text{Abtast}} \cdot \epsilon_{\text{Bruch}}}{\dot{\epsilon}_{\text{Versuch}}}. \quad (5.10)$$

Es wird ein exemplarischer Versuch bei der maximal geplanten Dehnrate $\dot{\epsilon}_{\text{Versuch}}$ von 142,9 1/s und einer Bruchdehnung (Druck) ϵ_{Bruch} von 0,5 % betrachtet. Weiterhin wird eine Abtastrate f_{Abtast} von 192 kHz für den Messverstärker angenommen. Diese entspricht dem in Kapitel 5.1 genannten und auch in der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten verwendeten Universalmessverstärker (*HBM QuantumX MX410*). Nach Gleichung 5.10 ergibt sich hierbei eine Sampleanzahl von ca. 7 Samples. Messungen ergeben, dass der Frequenzgang des Messverstärkers von der gewählten Messrate abhängt (vgl. Abbildung 5.3). Im „high speed Modus“ (192 kHz) beträgt die Eckfrequenz (−3 dB) ca. 79,3 kHz. Alle Messraten unterhalb von 192 kHz („low speed Modus“) weisen eine Eckfrequenz von ca. 40,6 kHz auf. Frequenzen oberhalb der jeweiligen Eckfrequenzen werden anhand der in Abbildung 5.3 dargestellten Verläufe gedämpft.

Gerade bei hochdynamischen Messungen ist sicherzustellen, dass das Frequenzspektrum der Sensorik ausreichend hoch ist. Ist die Trägheit des Sensors zu groß, entsteht ein zeitlicher Verzug zwischen physikalischer Größe und gemessenem Signal. Liegt die Resonanzfrequenz des Sensors im Bereich der zu erwartenden Frequenzen, würde eine Verfälschung der Messwerte durch Verstärkung oder Auslöschung stattfinden. Um diesen Effekt zu vermeiden, ist es sinnvoll, das Signal unterhalb der Resonanzfrequenz zu filtern. Höher gelegene Frequenzbereiche besitzen aufgrund ihrer Verfälschung keine Aussagekraft. Maßgeblich für das Frequenzspektrum ist folglich die Eigenfrequenz der Sensorik, da für Frequenzen nahe der Eigenfrequenz nicht sichergestellt werden

kann, dass deren Phase und Amplitude realitätsnah abgebildet werden. Da die Eigenkreisfrequenzen ω_0 eines mechanischen Schwingensystems folgendermaßen von der Federsteifigkeit c und der Masse m abhängen (vgl. Gleichung 5.11)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (5.11)$$

ist eine geringe Eigenmasse und eine hohe Federsteifigkeit vorteilhaft, um eine möglichst hohe Eigenfrequenz zu erzielen. Daher wird als Kraftaufnehmer ein Sensor nach dem piezoelektrischen Prinzip (*HBM CFT 5kN*) mit einem Nennmessbereich von 5kN gewählt. Laut Datenblatt [Hotb] weist dieser bei hoher Steifigkeit (450N/ μ m) ein verhältnismäßig geringes Gewicht (8 g) auf. Die axiale Resonanzfrequenz des Sensors beträgt 40kHz. Um keine Verfälschung des Signals durch Frequenzanteile, die nah an der Resonanzfrequenz liegen, befürchten zu müssen, besitzt der zugehörige Ladungsverstärker (*HBM CMC 5kN*) laut Datenblatt [Hota] einen Tiefpass mit einer Eckfrequenz von 10kHz (−3 dB). Die weitere Angabe einer Dämpfung von −1 dB bei einer Frequenz von 5 kHz lässt auf einen Tiefpassfilter 1. Ordnung schließen.

Die Anbringung eines taktilen Wegmesssystems ist aufgrund der zu erwartenden hohen Beschleunigung nicht empfehlenswert. Daher wird auf eine optische Lösung zurück gegriffen. Probleme durch mechanische Schwingungen werden somit systembedingt ausgeschlossen. Optisch besteht die Möglichkeit der Wegmessung per digitaler Bildverarbeitung oder per Triangulationsverfahren. Ein Bildverarbeitungsverfahren bietet den Vorteil, senkrecht zur Verschiebungsrichtung montiert werden zu können, ist jedoch um ein Vielfaches teurer. Triangulationssensoren, die klassischerweise mit einem Laser ausgerüstet sind, müssen hingegen in Verschiebungsrichtung montiert werden. Dies gestaltet sich bei der gewählten Lösung einer vertikalen Linearbewegung schwierig. Um den Sensor nicht zu beschädigen, muss das Fallgewicht zum Stillstand gebracht werden, bevor es den Sensor berührt. Das Fallgewicht könnte aufgrund seiner hohen Energie jedoch nur unter hohem Leistungsaufwand innerhalb einer kurzen Strecke abgebremst werden.

Um diese Problematik zu umgehen, betrachtet der Sensor nicht eine senkrecht zur Bewegungsrichtung stehende Fläche als Messfläche, sondern eine um einen bestimmten Winkel geneigte (vgl. Abbildung 5.11). So wird es ermöglicht, den Laserstrahl senkrecht zur Bewegungsrichtung auszurichten und den Sensor außerhalb des Bereichs zu platzieren, welches durch das Fallgewicht erreichbar wäre. Hierdurch wird die abrupte Abbremsung des Fallgewichts überflüssig. Daher kann trotzdem der im Vergleich zur digitalen Bildverarbeitung kostengünstigere Lasertriangulationssensor (*Microepsilon ILD2300*) verwendet werden.

Um das ortsauflösende Element (CMOS) des Lasertriangulationssensors auszulesen und digital zu verarbeiten, ist eine bestimmte Laufzeit nötig. Diese bewirkt eine zeitliche Verschiebung der Messsignale für Kraft und Weg. Da dieser Zusammenhang jedoch von elementarer Bedeutung für das Materialverhalten ist, muss eine Lösung gefunden werden, um die Kanäle nachträglich zu synchronisieren. Hierzu wird die Laufzeit des Wegsignals bestimmt, um anschließend die beiden Datenkanäle mittels eines Datenshifts wieder ihrer Zugehörigkeit zuzuführen. Der gewählte Lasertriangulationssensor besitzt laut Hersteller eine Laufzeit von 5 Taktzyklen der Ausgabefrequenz. Um den Datenshift möglichst präzise durchführen zu können, ist auch die Laufzeit der piezoelektrischen Kraftmesskette bestehend aus Sensor und Ladungsverstärker zu berücksichtigen. Da diese nicht bekannt ist, wird die Differenz zwischen den beiden Kanälen anhand eines Probenmaterials mit bekanntem Verhalten ermittelt. Hierzu werden die Daten der beiden Kanäle eines Versuchs so

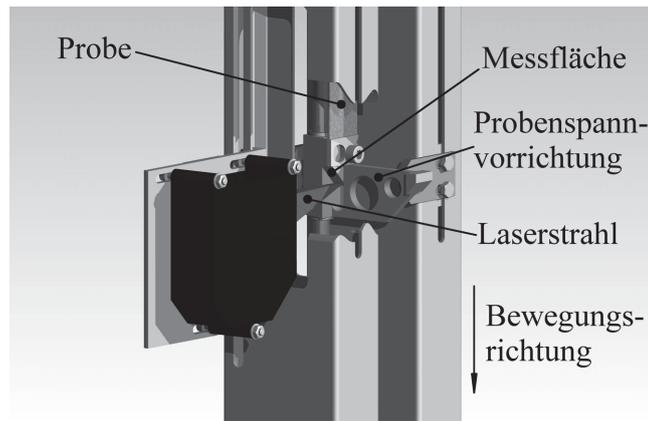


Abbildung 5.11: Sensoranordnung senkrecht zur Bewegungsrichtung

weit gegeneinander verschoben, bis der zeitliche Anstieg zu Beginn des Versuchs übereinstimmt. Hierbei ergibt sich eine Differenz von 0,135 ms. Um diese Differenz auszugleichen, ist es notwendig, den Verzug des Datenkanals des Weges nachträglich um die zeitliche Differenz ins Frühe zu verschieben.

5.2.3 Konstruktion des Versuchsaufbaus

Da es sich bei der Sensorik um Zukaufteile handelt, sind deren Geometrie und Montagemöglichkeit bereits vorbestimmt. Daher wird im Folgenden die Konstruktion der Verbindungselemente zwischen Probe und Sensorik in Form von Probenspannvorrichtungen unter Berücksichtigung der geometrischen Gegebenheiten der Sensorik beschrieben. Des Weiteren wird die Umsetzung der Energiebereitstellung in Form eines Fallgewichts erläutert.

Probenspannvorrichtung

Zur Übertragung der für den Versuch benötigten Energie vom Fallgewicht auf die Probe ist eine bewegliche Probenspannvorrichtung nötig, die als Mitnehmer fungiert. Hierzu wird beschrieben, wie die Beschleunigung auf eines der Probenenden übertragen und im Anschluss mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig weiter bewegt wird. Es folgt die Erläuterung der sensorischen Detektion des zeitlich abhängigen Wegs der beweglichen Spannvorrichtung.

Um den aus der hohen Beschleunigung der Spannvorrichtung resultierenden Stoß nicht durch die Kraftmessensorik zu leiten, ist die Sensorik zur Messung der Kraft an der ortsfesten Probenspannvorrichtung vorgesehen. Daher wird diese den geometrischen Bedingungen der Sensorik angepasst und den dynamischen Anforderungen gemäß ausgelegt.

Bewegliche Probenspannvorrichtung Um die Vergleichbarkeit der beiden Prüfmaschinen zu gewährleisten, wird die Klemmfläche analog zur Universalprüfmaschine (vgl. Kapitel 5.1.1) gestaltet. Um eine axiale Bewegungsrichtung der beweglichen Spannvorrichtung gewährleisten zu

können, wird diese möglichst reibungsfrei geführt. Hierzu wird eine Gleitlagerung entlang einer Führung gewählt (vgl. Abbildung 5.12a). Zur Detektion der Verschiebung wird eine geneigte Messfläche zentrisch unterhalb der Spannfläche vorgesehen.

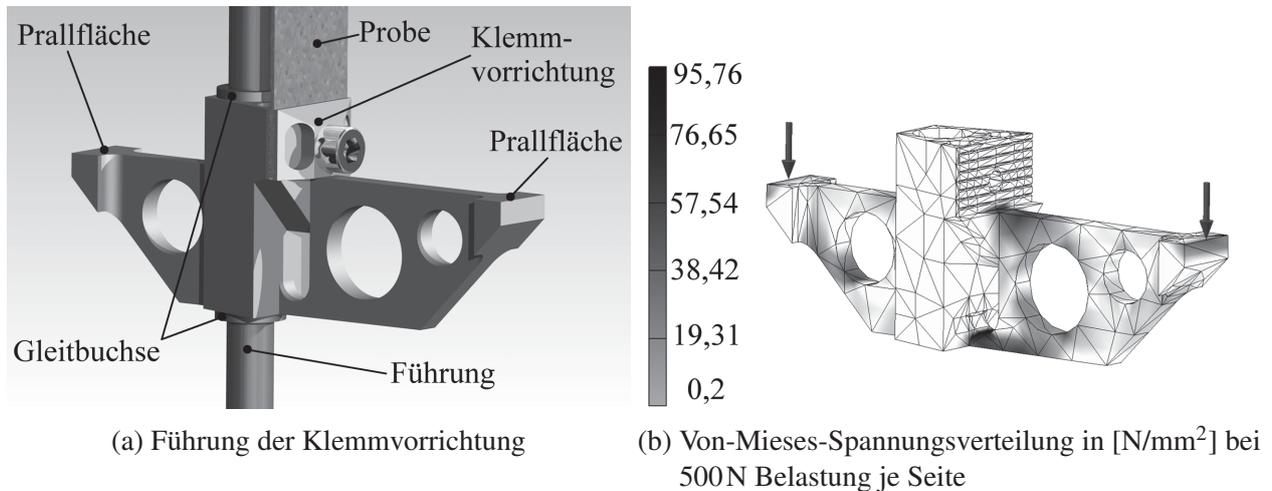


Abbildung 5.12: Untere Klemmvorrichtung

Da die Spannvorrichtung zur Krafteinleitung während des Zugversuchs hohen Belastungen ausgesetzt ist, muss diese ausreichend dimensioniert werden. Es sind Prallflächen notwendig, die den Stoß des Fallgewichts aufnehmen und an die Probe weiterleiten. Diese werden so dimensioniert, dass sie die wiederholten Stöße ohne plastische Verformung ertragen. Entsprechend wird die Leitung der Kraft von der Krafteinleitungsstelle zur Probe dimensioniert. Eine Belastungsanalyse ergibt bei einer Belastung der Klemmvorrichtung von beidseits 500N eine maximale Vergleichsspannung von $95,76 N/mm^2$ (vgl. Abbildung 5.12b). Somit weist die Klemmvorrichtung bei Verwendung von S235 eine Sicherheit von ca. 2,4 auf.

Um einen Druckversuch zu ermöglichen, bei dem der Aufbau keinerlei Schaden nimmt, ist es nötig, die Krafteinleitung nach erfolgtem Versuch auszukoppeln. Es ist folglich ein klares Ende des Versuchs zu definieren, anhand dessen der Auskopplungsvorgang ausgelöst werden kann. Hier bietet sich ein mechanischer Anschlag der beweglichen Spannvorrichtung an, welcher einen Aufschlag der Spannvorrichtung auf den Sensor ausschließt. Ist dieser Anschlag entsprechend dimensioniert, kann die Auskopplung kraftgesteuert erfolgen. Hierzu wird die Kraft zur Triggerung des Auskopplungsvorgangs deutlich oberhalb der erwarteten Versuchskraft gewählt. So ist eine Auskopplung mittels federbelasteter Rastfunktion möglich. Zur Steuerung der Auslösekraft wird eine einstellbare Vorspannung der Federkraft vorgesehen.

Ortsfeste Probenspannvorrichtung Grundsätzlich richtet sich der Entwurf der ortsfesten Probenspannvorrichtung unter Beachtung der geometrischen Einschränkungen der Sensorik (Bauraum, Messflächen) nach dem Ziel, die aufgrund der Eigendynamik des Systems auftretende Beeinflussung des Messsignals zu minimieren. Hierzu sollten die im Kraftmessstrang befindlichen Elemente möglichst hohe Eigenfrequenzen aufweisen, um eine mögliche Verzögerung des Messsignals zur physikalischen Größe zu minimieren und ggf. auftretende Resonanzfrequenzen über die Tiefpassfrequenz der Messtechnik zu verschieben und somit aus dem Messsignal herauszufiltern. Nach Gleichung 2.11 ist zu diesem Zweck die Steifigkeit zu maximieren bei gleichzeitiger Reduktion der Masse.

Für einen Druckversuch gestaltet sich die Probenaufnahme als verhältnismäßig einfach. Es wird lediglich eine Verbindung zwischen der Flanschfläche des Sensors und der Probe hergestellt (vgl. Abbildung 5.13a).

Ein Nachteil des piezoelektrischen Kraftsensors ist die unipolare Krafteinleitung. Hierdurch können piezoelektrische Sensoren nur auf Druck belastet werden, solange sie nicht entsprechend vorgespannt werden. Der Kraftsensor (*HBM CFT 5 kN*) weist eine Vorspannung von 500 N auf. Belastungen im Bereich der Vorspannung sind vom Hersteller „nicht kalibriert“. Da diese Vorspannung für Zugversuche nicht ausreicht und außerdem nicht kalibriert ist, wird ein Aufbau gewählt, welcher bei Zug- und bei Druckversuchen den Sensor jeweils nur auf Druck belastet. Daher wird die Kraft für den Zugversuch umgelenkt, um sie zentrisch in Form einer Druckkraft in den Sensor einleiten zu können. Hierzu wird der Sensor abgestützt und die Probenaufnahme unterhalb des Sensors und der Abstützung vorgesehen. Zur Verbindung der Krafteinleitungsfläche mit der Probenaufnahme wird die Kraft an der Abstützung vorbei geleitet (vgl. Abbildung 5.13b).

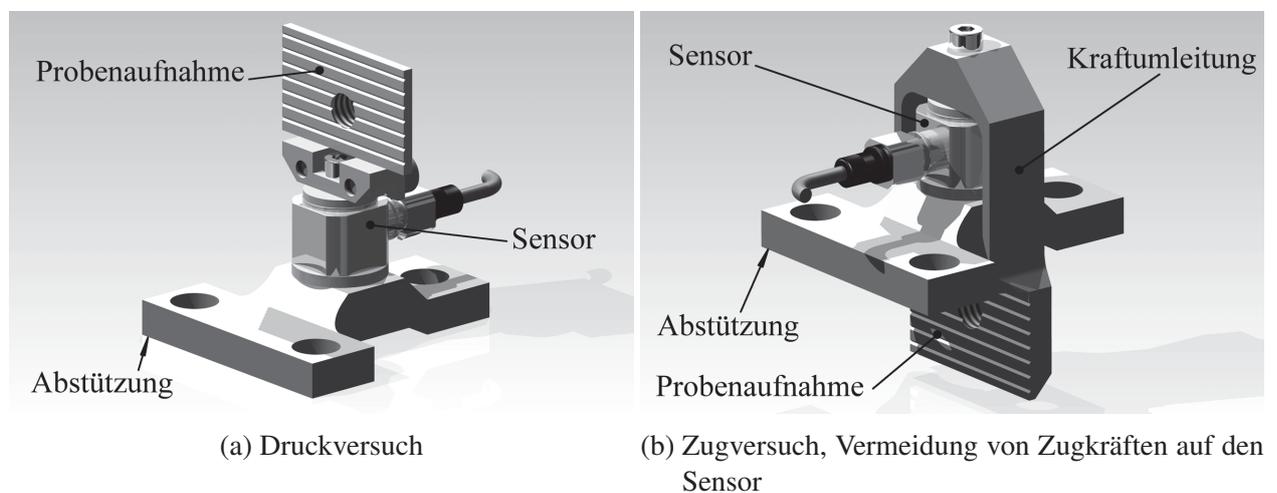


Abbildung 5.13: Sensorpositionierung

Fallgewicht

Zur Auslegung des Fallgewichts wird nachfolgend die Energiebilanz während des Versuchs betrachtet. Als Ziel wird hierbei eine möglichst konstante Geschwindigkeit während des Versuchs gesehen. Es folgt die Beschreibung der Konstruktion einer Einrichtung zum Transport des Fallgewichts auf die gewünschte Fallhöhe. Um die Restenergie des Fallgewichts nach dem Versuch abzubauen, wird die Dämpfungsvorrichtung erläutert, die diese Energie in eine möglichst Umfeldfreundliche Energie wandelt. Zur Führung des Fallgewichts wird eine Linearführung vorgesehen.

Auslegung Für die Auslegung des Fallgewichts sind zwei Phasen des späteren Versuchs relevant. Die erste Phase beinhaltet die Impulsübertragung des Fallgewichts auf die zu bewegende Klemme und damit die initiale Beschleunigung. Die zweite Phase besteht aus dem eigentlichen Versuch und den dabei wechselwirkenden Energien.

In Phase 1 ist die Energie des Fallgewichts mittels eines Stoßes auf die zu bewegend Klemme zu übertragen. Ziel hierbei ist eine steuerbare Anfangsdehnrate des Versuchs. Hierzu sind der Stoß zwischen der Masse des Fallgewichts und der Masse der Klemme näher zu betrachten. Nach der Stoßtheorie von Gross u. a. [Gro+12] existiert folgender Zusammenhang zwischen den Anfangs- und Endgeschwindigkeiten v_A und v_E der Masse des Fallgewichts m_{Fg} und der Klemme m_{Kl} und der Stoßzahl k :

$$v_{E\ Kl} = \frac{m_{Fg}v_{A\ Fg} + m_{Kl}v_{A\ Kl} + km_{Fg}(v_{A\ Fg} - v_{A\ Kl})}{m_{Fg} + m_{Kl}}. \quad (5.12)$$

Hieraus ergibt sich für die benötigte Masse des Fallgewichts m_{Fg} :

$$m_{Fg} = m_{Kl} \frac{v_{A\ Kl} - v_{E\ Kl}}{v_{E\ Kl} - v_{A\ Fg} - k(v_{A\ Fg} - v_{A\ Kl})}. \quad (5.13)$$

Als Anfangsbedingung des Stoßvorgangs kann vom Stillstand der Klemme ($v_{A\ Kl} = 0$) ausgegangen werden. In diesem Fall ergibt sich nach Gleichung 5.12 für das Verhältnis aus Endgeschwindigkeit der Klemme $v_{E\ Kl}$ und Anfangsgeschwindigkeit des Fallgewichts $v_{A\ Fg}$:

$$\frac{v_{E\ Kl}}{v_{A\ Fg}} = \frac{1 + k}{1 + (m_{Kl}/m_{Fg})}. \quad (5.14)$$

Mit einer Stoßzahl für elastische Stöße von 1 ergibt sich für das Verhältnis aus Endgeschwindigkeit der Klemme $v_{E\ Kl}$ und Anfangsgeschwindigkeit des Fallgewichts $v_{A\ Fg}$ ein Wertebereich von 0 bis 2 für beliebige Massenverhältnisse der Klemme und des Fallgewichts. Soll die Klemme nach erfolgtem Stoß die gleiche Geschwindigkeit $v_{E\ Kl}$ wie das Fallgewicht vor dem Stoß $v_{A\ Fg}$ haben, ist ein Verhältnis zu wählen, welches der Stoßzahl entspricht. Die Masse des Fallgewichts m_{Fg} ergibt sich in diesem Fall aus dem Quotienten der Masse der Klemme m_{Kl} und der Stoßzahl k :

$$m_{Fg} = \frac{m_{Kl}}{k}. \quad (5.15)$$

Für einen rein elastischen Stoß muss die Masse des Fallgewichts m_{Fg} folglich mit der Masse der Klemme m_{Kl} übereinstimmen. Für Stoßzahlen mit plastischem Anteil ($0 < k < 1$) ist die Masse des Fallgewichts m_{Fg} größer als die Masse der Klemme m_{Kl} zu wählen.

In Phase 2 folgt die Wechselwirkung zwischen der von dem Fallgewicht an die Spannvorrichtung abgegebenen und von der Probe aufgenommenen Energie. Um den Bereich der dehnratenabhängigen Versuchsdaten möglichst vollständig erfassen zu können, ist es erstrebenswert, eine konstante Geschwindigkeit über die gesamte Versuchsdauer zu erzielen. Abgesehen von äußeren Eingriffen in den Ablauf während des Versuchs besteht die Möglichkeit, durch einen Energieausgleich die Geschwindigkeit konstant zu halten. Hierzu ist die aus der Erdbeschleunigung resultierende Energie an die während des Versuchs von dem zu testendem Material aufgenommene Energie anzupassen. Somit ist eine Steuerung der Geschwindigkeit während des Versuchs möglich. Zur Aufstellung der Energiebilanz sind drei Arten von Energien nötig. Hierzu gehören die kinetischen und die potentiellen Energien sowie die durch die plastische Verformung der Probe aufgenommene Energie.

Die mit dem Weg zunehmende kinetische Energie des Fallgewichts $E_{kin\ Fg}$ hängt von der Masse des Fallgewichts m_{Fg} und der zeitlich veränderlichen Geschwindigkeit v_{Fg} ab und folgt der Gesetzmäßigkeit:

$$E_{kin\ Fg}(v_{Fg}) = \frac{1}{2} \cdot m_{Fg} \cdot v_{Fg}^2. \quad (5.16)$$

Als potentielle Energie gilt im Allgemeinen das Produkt aus dem Gewicht einer Masse m , welches sich in einer Höhe h befindet und der Erdbeschleunigung g ausgesetzt ist:

$$E_{\text{pot}}(h) = m \cdot g \cdot h. \quad (5.17)$$

Hierbei sind die Massen des Fallgewichts und der Klemmvorrichtung, welche durch das Fallgewicht später mitgenommen wird, zu berücksichtigen. Die Energie der plastischen Verformung entspricht dem Integral der Kraft F_{Vers} über den Weg s_{Vers} :

$$E_{\text{Vers}} = \int F_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}}) ds_{\text{Vers}}. \quad (5.18)$$

Zur Erfüllung der Energiebilanz müssen die in einem abgeschlossenen System befindlichen Energien zu jeder Zeit gleich sein. D.h. zum Startzeitpunkt, zu welchem das Fallgewicht und die Klemmvorrichtung in ihrer vorgesehenen Höhe still stehen, existieren die potentiellen Energien beider Massen. Die Gesamtenergie des Systems beträgt zu diesem Zeitpunkt 1 die Summe der potentiellen Energien des Fallgewichts $E_{\text{pot Fg}}$ und der Klemmvorrichtung $E_{\text{pot Kl}}$:

$$E_1 = E_{\text{pot Fg}} + E_{\text{pot Kl}}. \quad (5.19)$$

Durch Einsetzen der Gleichung für die potentielle Energie 5.17 mit der Ausgangshöhe des Fallgewichts h_{Fall} und der Höhe des Versuchsbeginns $h_{\text{Vers Beg}}$ sowie der Masse der Klemmvorrichtung m_{Kl} folgt:

$$E_1 = m_{\text{Fg}} \cdot g \cdot h_{\text{Fall}} + m_{\text{Kl}} \cdot g \cdot h_{\text{Vers Beg}}. \quad (5.20)$$

Während des Versuchs (Zeitpunkt 2) kommen zu den potentiellen Energien E_{pot} des Ausgangszustands die kinetischen Energien E_{kin} und die Versuchsenergie E_{Vers} hinzu:

$$E_2 = E_{\text{pot Fg}} + E_{\text{pot Kl}} + E_{\text{kin Fg}} + E_{\text{kin Kl}} + E_{\text{Vers}}. \quad (5.21)$$

Unter der Annahme, dass Klemmvorrichtung und Fallgewicht während des Versuchs die gemeinsame Geschwindigkeit $v_{\text{Fg Kl}}$ besitzen und die gleiche Höhe $h_{\text{Fg Kl}}$, lässt sich die kinetische sowie die potentielle Energie der beiden Massen zusammenfassen. Entsprechend ergibt sich:

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Fg}} + m_{\text{Kl}}) \cdot v_{\text{Fg Kl}}^2 + (m_{\text{Fg}} + m_{\text{Kl}}) \cdot g \cdot h_{\text{Fg Kl}} + \int F_{\text{Vers}} ds_{\text{Vers}}. \quad (5.22)$$

Aus der Energiebilanz ($E_1 = E_2$) ergibt sich für den Geschwindigkeitsverlauf $v_{\text{Vers}} (= v_{\text{Fg Kl}})$:

$$v_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}}) = \sqrt{\frac{2(m_{\text{Fg}} \cdot g \cdot h_{\text{Fall}} - (m_{\text{Fg}} + m_{\text{Kl}}) \cdot g \cdot (h_{\text{Vers Beg}} - s_{\text{Vers}}) - \int_0^{s_{\text{Vers}}} F_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}}) ds_{\text{Vers}})}{m_{\text{Fg}} + m_{\text{Kl}}}}. \quad (5.23)$$

Um nun die Abweichung der Versuchsgeschwindigkeit während des Versuchs zu minimieren, wird die Masse des Fallgewichts m_{Fg} bestimmt, für welches das Integral der Versuchsgeschwindigkeit $v_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}})$ über den Versuchsweg s_{Vers} gleich null ist. Hierfür ergibt sich eine Masse des Fallgewichts m_{Fg} von ca. 23 kg. Diese ist nahezu unabhängig von der Fallhöhe h_{Fall} . Hierbei werden die Massen des Fallgewichts m_{Fg} und der Masse Klemmvorrichtung m_{Kl} jedoch ab ca. $\frac{2}{3}$ des Versuchs abgebremst. Diese Abbremsung ist stärker als die Beschleunigung zu Beginn des Versuchs. Um

zu verhindern, dass bei geringen Geschwindigkeiten die Massen zum Stillstand kommen und der Versuch nicht zu Ende geführt werden kann, ist eine minimale Masse zu bestimmen, für die

$$\Delta v_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}}) \geq 0 \forall s_{\text{Vers}} \quad (5.24)$$

gilt. Hierfür wäre eine Masse von ca. 28 kg erforderlich.

Auf diese Weise kann alleine durch die Änderung der Masse des Fallgewichts m_{Fg} eine Regulierung der Versuchsgeschwindigkeit $v_{\text{Vers}}(s_{\text{Vers}})$ erreicht werden.

Aus den dargelegten Zusammenhängen in Phase 2 des Versuchs ist die Masse des Fallgewichts in Abhängigkeit von der Versuchsenergie bestimmbar. Diese Masse ist um ein Vielfaches größer als die Masse der Klemmvorrichtung. Daher würde aus Phase 1 des Versuchs eine Endgeschwindigkeit der Klemmvorrichtung nach dem Stoß folgen, die ca. um den Faktor 2 höher ist als die Geschwindigkeit des Fallgewichts. Unmittelbar anschließend erfolgt jedoch der Energieabbau durch den Versuch. Zur Abschätzung der Wechselwirkung der beiden Phasen sind Vorversuche durchgeführt worden. Diese ergaben, dass die Effekte aus Phase 2 überwiegen, so dass die weitere Konstruktion auf den Auslegungsdaten dieser Berechnungen basierte und ein Fallgewicht von 28 kg berücksichtigt.

Transport Zum Transport des Fallgewichts wird ein zusätzlicher Laufwagen auf der Lineareinheit montiert (vgl. Abbildung 5.14). Dieser wird mittels eines Hubseils bewegt, welches auf einer von einem Elektromotor angetriebenen Seilwinde aufgewickelt wird. Bei dem Elektromotor handelt es sich um einen mittels Frequenzumrichter drehzahlsteuerbaren Drehstromasynchronmotor. Die Höhe des Hubwagens wird mittels eines inkrementellen Seilzugsensor detektiert. Zur Referenzierung dieses Sensors dient ein Homingsensor in Form einer Lichtschranke. Die Kopplung zwischen Hubwagen und Fallgewicht erfolgt mittels eines Elektromagneten.

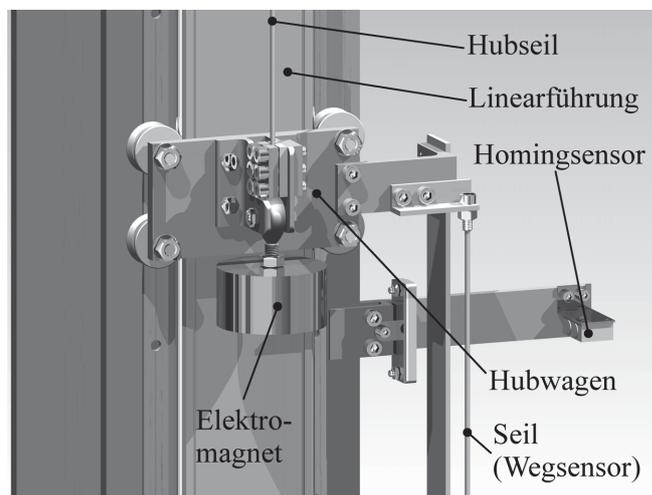


Abbildung 5.14: Hubwagen zum Transport des Fallgewichts

Energieabbau Nachdem das Fallgewicht den für den Versuch benötigten Weg zurück gelegt hat, verfügt es über eine nicht mehr benötigte kinetische Energie. Diese gilt es abzubauen. Hierzu wird ein hydraulischer Dämpfer vorgesehen. Um die beim Abbremsvorgang entstehenden Reaktionskräfte auf die Lineareinheit möglichst gering zu halten, wird der Dämpfer mittig unter dem

Schwerpunkt des Fallgewichts vorgesehen. Mit Hilfe einer progressiven Dämpferkennlinie wird eine über den Dämpferhub ansteigende Bremskraft erzeugt. Hierdurch wird es ermöglicht, die Anfangsbremskraft und somit den Stoß beim Aufprall des Fallgewichts auf den Dämpfer zu reduzieren. Der gewählte Dämpfer verfügt über einen maximalen Hub von 600 mm und kann eine Bremskraft von bis zu 110 kN zur Verfügung stellen.

Führung Zur Auslegung der Linearführung wird die benötigte Fallhöhe bestimmt. Aus dem in Kapitel 2.1.2 zusammengefassten Daten ergibt sich aus der Energiebilanz der potentiellen Energie E_{pot} (vgl. Gleichung 5.17) und der kinetischen Energie E_{kin} (vgl. Gleichung 5.16) für die benötigte Fallhöhe h

$$h = \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} \quad (5.25)$$

ein Richtwert von 0,27 m und ein Maximalwert von 1,27 m. Hinzu kommt die Strecke, die zur Verzögerung des Fallgewichts bis zum Stillstand benötigt wird, und die Länge des Laufwagens. Durch den Luftwiderstand während des freien Falls und die Führungsreibung entstehen Verluste, die sich in einer verringerten Endgeschwindigkeit auswirken. Daher ist die Fallhöhe weiter zu erhöhen, um die Verluste auszugleichen und die gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen. Schlussendlich wird eine Länge von 3 m gewählt.

5.3 Vergleich der bestehenden Prüfmöglichkeiten

Mit der Entwicklung einer Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten stehen zwei Prüfmaschinen zur Verfügung. Die in Kapitel 5.1 beschriebene Universalprüfmaschine ist in der Lage, mit einer Geschwindigkeit v zwischen 1×10^{-7} m/s und 0,375 m/s zu verfahren. Die neu entwickelte Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten ist aufgrund ihrer Fallhöhe theoretisch in der Lage, Versuchsgeschwindigkeiten von bis zu ca. 5 m/s zu realisieren, wobei die durch die Messtechnik und den mechanischen Aufbau bedingten Abweichungen durch Versuche einzuordnen sind. Unter der Annahme der Einspannlängen von 35 mm für Zugversuche und 3 mm für Druckversuche ergeben sich für die Dehnraten $\dot{\epsilon}$ die in Tabelle 5.3 und Abbildung 5.15 dargestellten Bereiche. Es wird deutlich, dass eine gewisse Überlappung der Geschwindigkeitsbereiche der beiden Prüfmaschinen existiert, so dass keine Interpolation zwischen den beiden Prüfmaschinen nötig ist.

[a]

Tabelle 5.3: Abdeckbare Geschwindigkeits- bzw. Dehnratenbereiche mit $l_0 = 35$ mm für Zug- und $l_0 = 3$ mm für Druckversuches

| | Universalprüfmaschine | neu konstruierte Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|-------------------------------------|---------------------------|---|
| v_{min} | 1×10^{-7} m/s | 0,1 m/s |
| v_{max} | 0,375 m/s | 5 m/s |
| $\dot{\epsilon}_{\text{Zug min}}$ | $2,85 \times 10^{-6}$ 1/s | 5,71 1/s |
| $\dot{\epsilon}_{\text{Zug max}}$ | 10,71 1/s | 142,86 1/s |
| $\dot{\epsilon}_{\text{Druck min}}$ | $3,33 \times 10^{-5}$ 1/s | 33,33 1/s |
| $\dot{\epsilon}_{\text{Druck max}}$ | 33,33 1/s | 142,86 1/s |

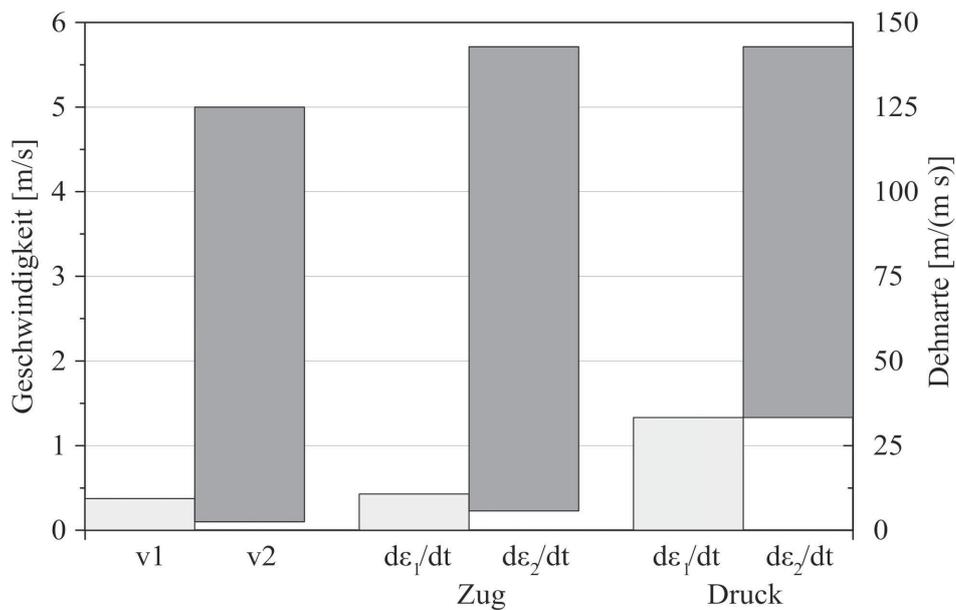


Abbildung 5.15: Abdeckbare Geschwindigkeits- bzw. Dehnratenbereiche der Universalprüfmaschine (1, hellgrau) und der neu entwickelten Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten (2, dunkelgrau) mit $l_0 = 35$ mm für Zug- und $l_0 = 3$ mm für Druckversuche

5.4 Steuerungssoftware

Zur Steuerung der benötigten Prüfkomponenten wird eine Software in der Programmiersprache *Labview* von *National Instruments* erstellt. Diese kommuniziert mit den Steuerungen beider Prüfmaschinen, der Messtechnik und den zur automatisierten Vermessung der Proben vorgesehenen Messgeräten. Hierzu zählen die Bügelmessschraube und die Waage. Die Kommunikation mit der Messtechnik erfolgt über das TCP/IP Protokoll. Mit allen anderen Kommunikationspartner wird seriell kommuniziert.

Die Bügelmessschraube (*Mahr*, Micromar 40 EWS) verfügt über ein Bedienelement, über welches der aktuell vorliegende Wert an die Steuerungssoftware übertragen wird.

Um den Wiegevorgang möglichst komfortabel und schnell zu gestalten, wird dieser vollautomatisiert. Die hierzu verwendete Halogentrocknungswaage (*Mettler Toledo*, Moisture Analyser HB43) verfügt über die Möglichkeit, das aktuelle Gewicht mit einer Genauigkeit von 3 mg auszugeben. Zusätzlich kann abgefragt werden, ob die Messung eingeschwungen ist und als „stabil“ bezeichnet werden kann. Wenn eine Messung durchgeführt werden soll, überprüft die Steuerungssoftware fortwährend das aktuelle Gewicht. Wird eine Probe auf die Waage gelegt, beginnt das gemessene Gewicht zu steigen. Erreicht es eine mit 0,1 g festgelegte Schwelle, beginnt die Steuerung abzufragen, ob die Messung einen stabilen Wert erreicht hat. Dieser wird als Probengewicht an die Steuerungssoftware übertragen. Durch das Warten auf eine stabile Messung wird sichergestellt, dass die Steuerungssoftware nur den Wert als Gewicht übernimmt, der dem statischen Gewicht entspricht. Nachdem das Gewicht übertragen wurde, wartet die Steuerungssoftware, bis das aktuelle Gewicht unterhalb der Schwelle von 0,1 g fällt. Hiermit ist die Wägung abgeschlossen.

Zur Steuerung der Universalprüfmaschine werden der NC-Steuerung Verfahrbefehle mitgeteilt. Diese Befehle bestehen aus der anzufahrenden Position und der Geschwindigkeit, mit der die gewünschte Position anzufahren ist.

Die Steuerung der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten besitzt eine SPS. Mittels dieser findet eine Positionsregelung des Hubwagens mit Hilfe eines Seilzugsensors statt. Als Rückmeldung an die Steuerungssoftware quittiert die SPS das Erreichen einer gewünschten Position. Die Steuerungssoftware muss folglich lediglich Positionen übermitteln, Quittierungen abwarten und die Steuerung des am Fallgewichtstransportwagen montierten Magneten übernehmen. Zur Vereinfachung der Versuchsdurchführung wurde ein Ablauf implementiert, mit dem das automatisierte Verfahren des Fallgewichtstransportwagen für einen Versuch ermöglicht wird. Hierzu gehört das Absenken des Fallgewichtstransportwagens, bis der Magnet mit dem Fallgewicht in Kontakt kommt. Nach dem Einschalten des Magneten ist der Fallgewichtstransportwagen inkl. dem Fallgewicht auf die gewünschte Höhe zu befördern. An diesem Punkt angelangt, muss die Datenaufnahme gestartet werden, bevor der Magnet abgeschaltet wird und der Versuch beginnt.

Prüfmaschinenunabhängig ist in der Steuerungssoftware der Ablauf der Versuchsdurchführung implementiert. Vor der Versuchsdurchführung ist die Versuchsart festzulegen. Hierdurch werden Positionen und Verfahrrichtungen festgelegt. Im Anschluss wird die Kommunikation und die Parametrierung der Messtechnik durchgeführt. Vor jedem Versuch erfolgt die Erfassung der Probandaten. Hierzu gehört die Länge und Breite der Probe. Da die Probenspannvorrichtungen bei allen Versuchen die gleiche Geometrie aufweisen, kann die Einspannlänge automatisiert berechnet werden. Zusätzlich wird die Herstellcharge der Rohteilvliese vermerkt. Nachdem die Versuchsgeschwindigkeit gewählt wurde, ist der Dateiname für die spätere Datenspeicherung festzulegen. Nun folgt die automatisierte Dicken- und Gewichtsbestimmung. Nachdem die Probe in die Spannvorrichtung montiert wurde, erfolgt vor dem Versuchsbeginn in der Universalprüfmaschine eine Ausregelung der klemmkraftinduzierten Verspannung der Probe. Die Datenaufnahme wird gestartet und im Anschluss der Befehl an die jeweilige Steuerung des Versuchsaufbaus erteilt, den Versuch zu beginnen. Um das Versuchsende zu detektieren, werden die Daten bereits während des Versuchs ausgewertet. Ist dies geschehen, wird die Datenaufnahme beendet, und die Daten werden zur Speicherung vorbereitet.

Die aufgenommenen Versuchsdaten (Kraft, Weg und Zeit) werden zusammen mit den versuchsspezifischen Daten (Versuchsart, Abzugsgeschwindigkeit, Abtaste) und den Probandaten (Länge, Breite, Dicke, Einspannlänge, Klimatisierung, Gewicht) sowie den Pulpe- und Vliesdaten (Wassermenge, Rohstoffmenge, Prozesszeiten, Rohstoff, Flächengewicht, Anformdruck, Pressdruck) in einem speziell entwickelten Dateiformat abgelegt. Hierdurch ist gewährleistet, dass bei einer anschließenden Auswertung sämtliche benötigte Daten direkt zur Verfügung stehen und keine Verwechslung möglich ist. Manuelle Zuordnungen von Daten entfallen so vollständig.

5.5 Probenerstellung

Zur Erstellung der Proben wird ein Zelluloserohstoff verwendet. Eine vollautomatisierte Faserformanlage verarbeitet diesen zu einem Halbzeugvlies, aus welchem im Anschluss die Probenvliesgeometrien entnommen werden. Bevor diese den Versuchen unterzogen werden, erfolgt eine klimatische Konditionierung.

5.5.1 Rohstoff

Der verwendete Rohstoff wird von der ehemals zu *Norske Skog* gehörenden Papierfabrik *Walsum Papier* in Duisburg zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um nach dem Sulfatverfahren chemisch aufgeschlossenen Zellstoff, der direkt bei der Papierherstellung kurz vor dem Auflauf auf die Papiermaschine PM4 entnommen wurde. Der Zellstoff weist die in Diagramm 5.16a dargestellte Faserlängenverteilung sowie eine durchschnittliche Faserdicke von 28 μm (vgl. Diagramm 5.16b) auf.

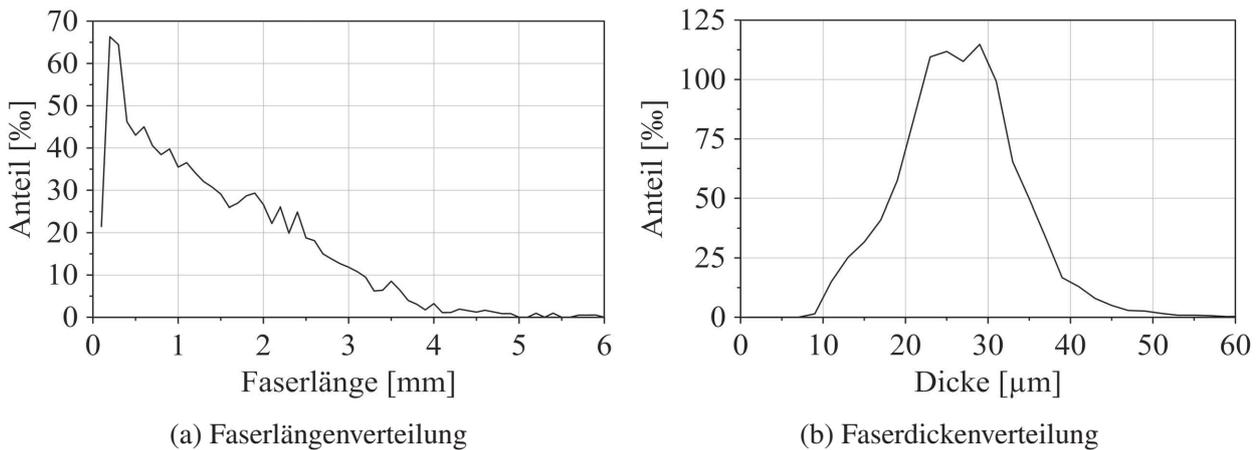


Abbildung 5.16: Daten des verwendeten Zellstoffs

Der Mahlgrad wurde von *Norske Skog* anhand des kanadischen Norm-Mahlgrades (Canadian Standard Freeness, kurz CSF) mit 242 mL angegeben, was nach Diagramm 5.17 ca. 47 Schopper Riegler (SR) entspricht.

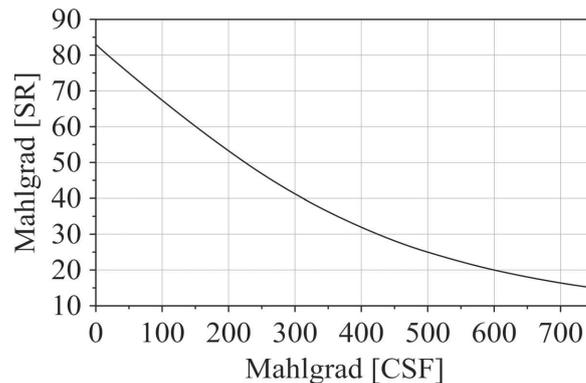


Abbildung 5.17: Zusammenhang zwischen Grad Schopper-Riegler (SR) und Canadian standard freeness (CSF) [Gru11]

5.5.2 Vlieserstellung

Es steht eine vollautomatisierte Überdruck-Faserformanlage zur Verfügung. Die Pulpe wird in einem Pulper mit einem Fassungsvermögen von 400L hergestellt und mit Hilfe einer Kreiselpumpe

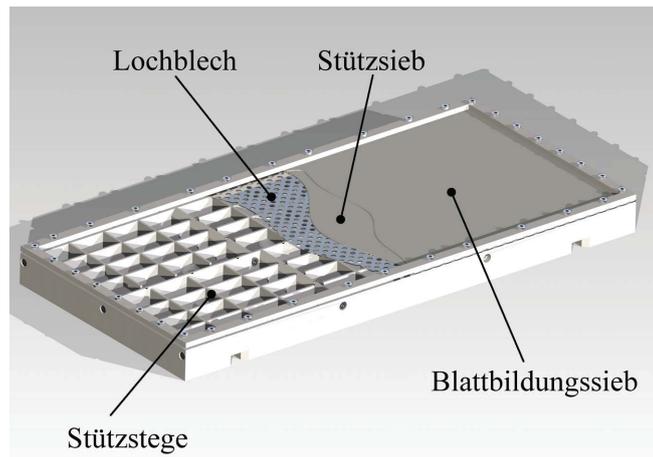


Abbildung 5.18: Verwendetes ebenes Anformwerkzeug

dem Anformkasten zugeführt. Dieser ist in der Lage, beliebige Anformwerkzeuge aufzunehmen. Zur Herstellung der Prüfrohlinge wird ein ebenes Werkzeug verwendet (vgl. Abbildung 5.18).

Dieses Anformwerkzeug besitzt die Maße 475 mm x 210 mm und weist somit eine Fläche von 0,099 75 m² auf. Die Gestaltung des Anformsiebs richtet sich nach dem *Rapid-Köthen-Blattbildner* (EN ISO 5269-2). Das Blattbildungssieb leitet die bei dem Anformvorgang auftretenden Kräfte an ein gröberes Stützsieb. Dieses wird durch ein Lochblech gestützt. Das Lochblech liegt wiederum auf schmalen Stegen auf, so dass ein Durchbiegen während des Anformens weitestgehend ausgeschlossen werden konnte. Die Daten des Blattbildungs- und des Stützsiebs können Tabelle 5.4 entnommen werden.

Tabelle 5.4: Blattbildungs- und Stützsiebdaten

| | Blattbildungssieb | Stützsieb |
|-------------------------|-------------------|------------|
| Siebmaschenweite Kette | 0,125 mm | 1,4 mm |
| Siebmaschenweite Schuss | 0,224 mm | 1,4 mm |
| Drahtdurchmesser | 0,08 mm | 0,315 mm |
| Werkstoff | Ni99,2 | Zinnbronze |

Über dem Sieb befindet sich ein verschließbares Anformvolumen von 34 L, in welches die Pulpe geleitet wird, um im Anschluss mit Hilfe von Druckluft durch das Anformsieb gepresst zu werden. Bei einem für Faserformverpackungen üblichen Flächengewicht von 600 g/m² ergibt sich für die Pulpe bei vollständig ausgenutztem Anformvolumen eine Massenkonzentration von ca. 0,176 %.

Nach dem Blattbildungsprozess wird der Grad der Nassverdichtung eingestellt, bevor der Probenrohling der Trocknung zugeführt wird. Die Trocknung erfolgte bei 20 °C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit.

5.5.3 Probenfertigung

Der nun trocken vorliegende Probenrohling wird mit Hilfe einer Stanze (*NAEF B/36-AL*) auf die gewünschten Maße gebracht. Hierdurch wird die Reproduzierbarkeit der Probengeometrie sicher-

gestellt. Gleichzeitig wird der Aufwand zur Herstellung der Proben minimiert, da die Nuten an den Enden der Proben in einer manuellen Fertigung sehr viel Zeit in Anspruch genommen hätten.

Zugprobe

Im Bereich der metallischen Werkstoffe ist die Probengeometrie für einen Zugversuch in Form einer taillierten Probe in DIN EN ISO 6892-1 festgelegt. Die Taillierung dient hierbei der Spannungsreduktion an der Einspannung. Dagegen könnte ein konstanter Probenquerschnitt aufgrund des durch die Spannvorrichtung hervorgerufenen mehrachsigen Spannungszustands im Bereich der Spannfläche zum Bruch direkt an der Spannstelle und somit zur Verfälschung der Versuchsergebnisse führen. Ein Nachteil der taillierten Probenform ist jedoch die aufgrund der inhomogenen Querschnittsfläche inhomogene Dehnung der Probe. Eine Bestimmung der Dehnung über den Klemmenabstand ist daher nicht möglich. Die Dehnung muss entweder lokal oder im Bereich eines konstanten Probenquerschnittes ermittelt werden.

In DIN ISO 1924-3 wird für Papier und Pappe eine rechteckige Probenform angenommen. Versuche von Baar [Baa06] mit Faserformproben zeigten bereits, dass im Gegensatz zu metallischen Proben Materialien aus Zellstofffasern trotz konstantem Querschnitt bis in die Spannvorrichtung nicht direkt an dem Übergang zur Spannstelle reißen. Dies scheint darin begründet, dass durch die Kompression des Spannens die einzelnen Fasern nicht beschädigt werden, sondern vielmehr ihre Reibung bzw. Bindung untereinander erhöht wird. Die Faserbindungsfläche steigt, was die Festigkeit im Bereich der Einspannung erhöht und somit einen Riss an der Einspannstelle verhindert.

Damit besteht bei Faserformproben kein Grund für eine Taillierung der Proben. Der Mehraufwand bei der Erstellung der Stanzwerkzeuge vermindert sich hierdurch, und es wird eine Dehnungsmessung zwischen den Spannvorrichtungen ermöglicht. Zur Probenerstellung kommt eine Stanze mit wechselbaren Stanzmessern zum Einsatz (*NAEF B/36-AL*). Hierdurch kann eine Reproduzierbarkeit der Probengeometrien und im Speziellen die in DIN ISO 1924-3 geforderte maximale Parallelitätsabweichung der langen Kanten von $\pm 0,1$ mm sichergestellt werden.

In Anlehnung an DIN ISO 1924-3 wird für den Zugversuch eine rechteckige Probenform verwendet. Die Breite beträgt hierbei 25 mm. Die Einspannlänge ist in DIN ISO 1924-3 mit 100 mm vorgeschrieben. Um möglichst hohe Dehnraten zu erzielen, ist es zweckmäßig, die Einspannlänge möglichst kurz zu gestalten. Hierbei ist jedoch auszuschließen, dass eine Verringerung der Einspannlänge das Materialverhalten beeinflusst.

Tests zur Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Einspannlänge fielen positiv aus (vgl. Abbildung 5.19). Abnehmende Einspannlängen führen im Bereich der vorhandenen Faserlängen (vgl. Abbildung 5.16a) zu deutlich erhöhten Bruchspannungen und -dehnungen. Oberhalb von 20 mm Einspannlänge ist jedoch keinerlei Änderung des Spannungs-Dehnungsverhaltens erkennbar. Da die Dehnraten antiproportional zur Einspannlänge ist und der Bereich der erzielbaren Dehnraten möglichst groß zu gestalten ist, wird die Einspannlänge unter Berücksichtigung einer Sicherheitsreserve auf 35 mm verringert.

Um die Abweichung des Feuchtegehalts der Probe von dem ursprünglichen Konditionierungszustand möglichst gering zu halten, ist die Zeit zwischen der Entnahme aus dem Klimaschrank und der Versuchsdurchführung zu minimieren. Bei der Konstruktion wird dies bereits berücksichtigt, indem die Spannvorrichtung mit nur einer einzigen Schraube bedient wird (vgl. Kapitel 5.1.1). Um

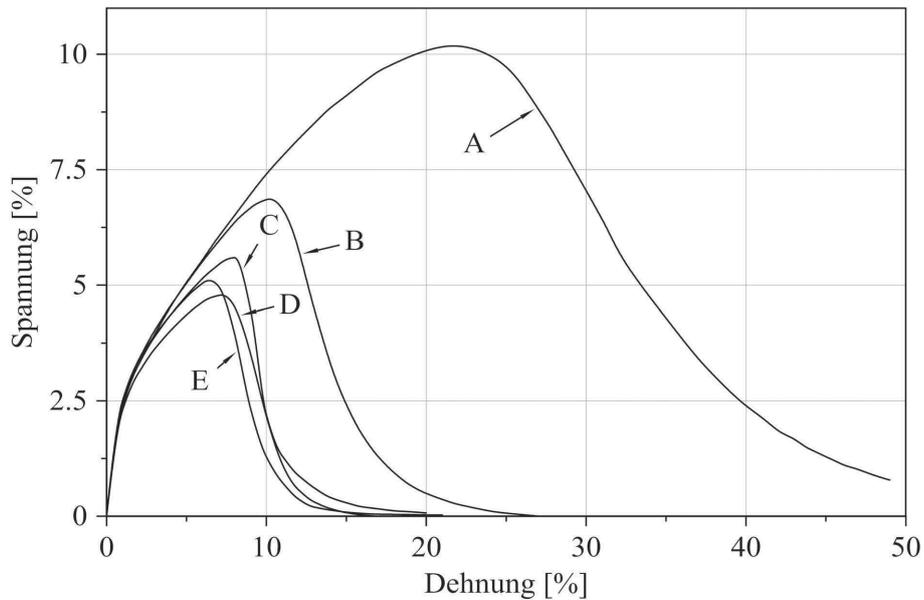


Abbildung 5.19: Spannungs-Dehnungs-Verhalten einer Faserformprobe mit unterschiedlichen Einspannlängen: A 3 mm, B 10 mm, C 20 mm, D 30 mm, E 40 mm

die hierfür benötigten Nuten in der Probe ohne Mehraufwand fertigen zu können, sind diese bereits in das Stanzwerkzeug der Proben integriert.

Druckprobe

In DIN 54518 ist ein Verfahren zur Ermittlung des Streifenstauchwiderstandes beschrieben. Diese Norm gilt für Papier und Pappe mit einem Flächengewicht zwischen 80 g/m^2 und 400 g/m^2 . Sie sieht eine Einspannlänge von $0,7 \text{ mm}$ vor, um den Einfluss des Ausknickens möglichst gering zu halten. Je kürzer die Einspannlänge ist, desto wahrscheinlicher befinden sich Fasern in der Matrix, die von beiden Spannvorrichtungen erfasst sind. Als Messergebnis erscheint folglich nicht das reine Materialverhalten der Fasermatrix, sondern es erfolgt eine Überlagerung durch das Materialverhalten einzelner Fasern. Bei Betrachtung der Faserlängenverteilung des verwendeten Zellstoffs (Diagramm 5.16a) ist ersichtlich, dass bei einer Einspannlänge von $0,7 \text{ mm}$ die Wahrscheinlichkeit recht hoch ist, dass Fasern in beiden Spannvorrichtungen fixiert sind. Da es sich bei den zu betrachtenden Faserformproben um ein Flächengewicht außerhalb des Geltungsbereichs der Norm handelt (600 g/m^2) ist zu vermuten, dass die Einspannlänge ohne Gefahr des Ausknickens erhöht werden kann.

Für stabförmige Gebilde existieren die nach *Euler* benannten *Eulerschen Knicklasten* [Gro+09]. Diese beschreiben die Art der Lagerungen des betrachteten Stabes und legen dementsprechend einen Korrekturfaktor für die Einspannlänge fest. Die axiale Kraft, bei der eine Ausknickung des Stabes auftritt, wird als Knickkraft F_k bzw. Eulerkraft bezeichnet und berechnet sich aus dem Elastizitätsmodul E , dem axialen Flächenträgheitsmoment I , der Knicklänge l und dem Knicklängenkorrekturfaktor β_k [Gro+09] zu

$$F_k = \frac{\pi^2 EI}{l^2 \beta_k^2}. \quad (5.26)$$

Für einen Stab mit rechteckigem Querschnitt, der um die Achse parallel zur längeren Querschnittsseite gebogen wird, ergibt sich das axiale Flächenträgheitsmoment I [Gro+09]:

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (5.27)$$

Die Einspannlänge bei einem Druckversuch ist folglich so zu wählen, dass die Knickkraft F_k die maximal ertragbare Spannung des zu testenden Materials übersteigt. Nur so ist gewährleistet, dass es zur Materialzerstörung kommt, bevor der Stab ausknicken kann. Für diese Spannung ergibt sich unter Berücksichtigung der Gleichung 5.27

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} = \frac{\pi^2 E}{\beta_k^2 l^2} \cdot \frac{h^3 b}{12} \cdot \frac{1}{bh}. \quad (5.28)$$

Diese Knickspannung σ_k muss konstant bleiben, um ein Ausknicken zu verhindern. Sie darf sich also im Fall einer Einspannlängenänderung nicht ändern. Unter der Annahme der Konstanz von Elastizitätsmodul E und Knicklängenkorrekturfaktor β_k ergibt sich für $\sigma_{k1} = \sigma_{k2}$:

$$\frac{h_1}{l_1} = \frac{h_2}{l_2}. \quad (5.29)$$

Das Verhältnis der Einspannlängen muss also dem Verhältnis der Profilhöhen (hier Probendicken) entsprechen. In dem betrachteten Fall beträgt die Dicke eines 80 g/m² Blattes 0,104 mm. Die zu untersuchenden Faserformproben haben eine Dicke von ca. 1,5 mm. Demzufolge wäre eine Einspannlänge von 10 mm theoretisch akzeptabel. Aus Sicherheitsgründen wird ein Sicherheitsfaktor von ca. 3 verwendet, so dass sich eine Einspannlänge von 3 mm ergibt. Vorversuche mit dieser Einspannlänge bestätigten, dass bei dieser Länge kein Ausknicken auftritt. Da der Anteil der Fasern, die eine Länge von 3 mm übersteigen, unter 7 % liegt, ist davon auszugehen, dass der Einfluss einzelner beidseitig eingeklemmter Fasern auf das Messergebnis gering ist und hauptsächlich die Eigenschaften des Faserverbundes gemessen werden.

5.5.4 Probenkonditionierung

Zur Einstellung der gewünschten klimatischen Bedingungen ist es nötig, die Proben vor Beginn des Versuchs einer Klimatisierung zu unterziehen. Diese findet in einem Klimaschrank des Herstellers Binder (Modell KBF 240) statt. Aufgrund des temperaturabhängigen maximalen Wasserdampfgehaltes der Luft ist nicht nur eine Abhängigkeit der Probenfeuchte von der relativen Luftfeuchtigkeit zu erwarten, sondern auch von der Temperatur.

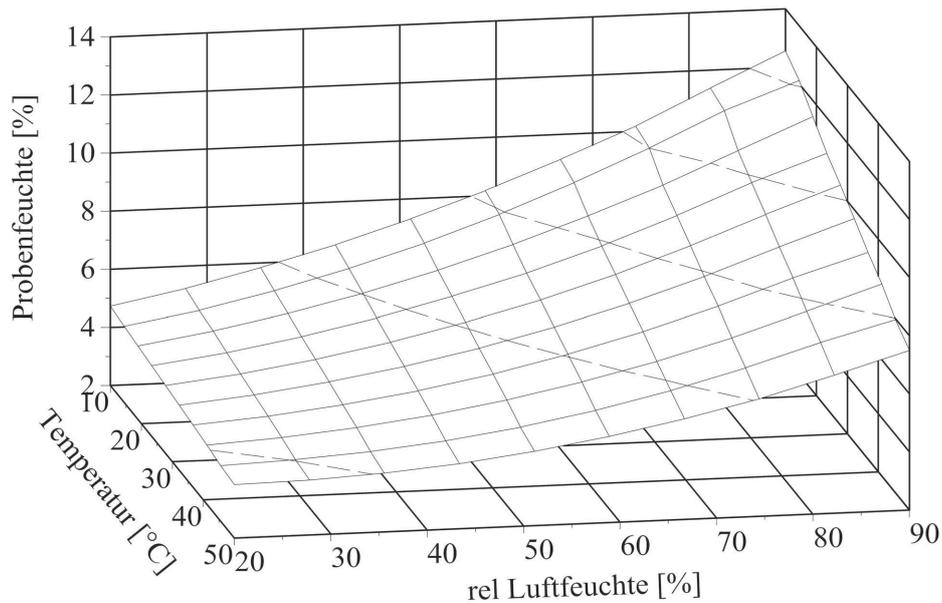


Abbildung 5.20: Abhängigkeit der Bauteilfeuchte von der Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft. Probenmaterial: Zellstoff, 600 g/m^2 , ungepresst

Die Regressionsanalyse einer entsprechenden Versuchsreihe ergibt bei einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und einem Bestimmtheitsmaß von r^2 0,98 folgenden Zusammenhang: Nahe-liegenderweise hängt die Probenfeuchte proportional von der relativen Luftfeuchtigkeit und anti-proportional von der Temperatur ab. Mit zunehmender Temperatur und abnehmender relativer Luftfeuchtigkeit sinkt die Bauteilfeuchte (vgl. Abbildung 5.20).

Das aus der Regressionsanalyse entstandene Modell beschreibt die Abhängigkeit der Bauteilfeuchte f_B von der relativen Luftfeuchtigkeit φ und der Temperatur T folgendermaßen:

$$f_B = 4,286 + 0,07559 \cdot \varphi + (\varphi - 54,51) \cdot (\varphi - 54,51) \cdot 0,0007477 - 0,07356 \cdot T + (\varphi - 54,51) \cdot (T - 33,861) \cdot -0,001490 \quad (5.30)$$

Aufgrund dieses Zusammenhangs ergibt sich für das in DIN EN 20187 definierte Normklima eine Bauteilfeuchte von 6,316 % bzw. für tropische Regionen 7,403 %.

Vor Versuchsbeginn stellen sich bezüglich der klimatischen Konditionierung zwei Fragen: Wie lange müssen die Proben in der Klimatisierung verbleiben, um sicherzustellen, dass sie ihre gewünschte klimatische Konditionierung erreicht haben? Und wie groß ist die Abweichung der klimatischen Konditionierung durch die Zeit, die beim Transport durch Umgebungsklima von der Klimatisierung zur Versuchsanlage verstreicht? Hierzu werden Versuche zur zeitlichen Abhängigkeit der Bauteilfeuchte bei sich schlagartig ändernden Umgebungsklimata erhoben (vgl. Abbildung 5.21). Hierbei wird die Umgebungstemperatur konstant auf 20°C gehalten. Als relative Umgebungsfeuchtigkeit wird 30 % gewählt (vgl. Abbildung 5.21).

Die Versuche zeigen, dass sich während der Konditionierung ein asymptotisches Verhalten einstellt, welches spätestens nach ca. 2 Stunden seinen Endwert erreicht hat. Somit sollten die Proben möglichst mehr als 2 Stunden klimatisch konditioniert werden. Außerdem ist bei großen

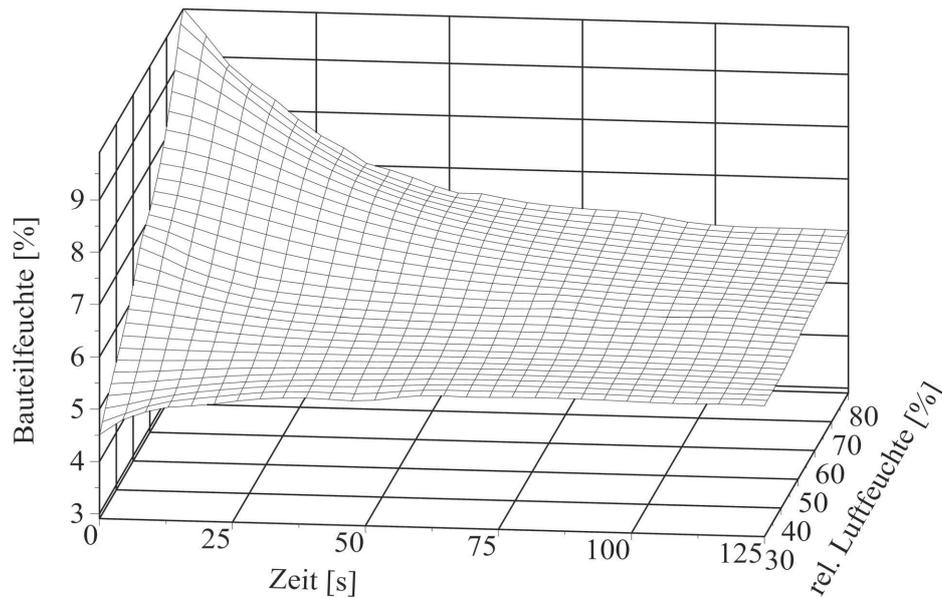


Abbildung 5.21: Zeitliche Abhängigkeit der Bauteilfeuchte unter sprunghafter Änderung des Umgebungsklimas. Probenmaterial: Zellstoff, 600 g/m^2 , ungepresst

Temperatur- bzw. relativen Luftfeuchtigkeitssprüngen eine schnelle Änderung der Bauteilfeuchtigkeit zu vermerken. Beispielsweise würde ein Sprung von 80 % auf 30 % relative Luftfeuchte in einer Bauteilfeuchtenänderung von ca. 0,7 % innerhalb der ersten 5 min resultieren. Um die Bauteilfeuchtenänderung während des Transports zwischen Klimaschrank und Versuchsanlage unter 1 % zu halten, darf die Zeit zwischen dem Entnehmen aus dem Klimaschrank und der Durchführung des Versuchs bei maximaler Klimadifferenz zwischen Klimatisierungs- und Umgebungsklima nicht mehr als 7,5 min betragen.

Die Proben werden nebeneinander liegend auf einem Gitterrost mittig im Klimaschrank positioniert. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass das Konditionierungsklima an allen Seiten der Proben anliegt und eine zügige Klimatisierung sichergestellt ist. Die Regelung des Klimaschranks wird auf die in DIN EN 20187 genannte Prüftemperatur ($(23 \pm 1)^\circ\text{C}$) und die für die jeweiligen Versuche relevante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt.

6 Versuchsplanung, -durchführung und Datenaufbereitung

Zu Beginn erfolgt die Versuchsplanung. Es folgt die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der benötigten Parameter. Am Ende dieses Kapitels werden die aus den Versuchen resultierenden Daten für die Auswertung aufbereitet.

6.1 Versuchsplanung

Vor der Aufstellung eines Versuchsplans ist dessen benötigter Umfang zu klären, um zufällige Ergebnisse weitestgehend zu vermeiden und gewünschte Zusammenhänge zu erkennen. Um ggf. auftretende nichtlineare Zusammenhänge zu detektieren sind drei Faktorstufen notwendig.

Vollständig reproduzierbare Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen wären ideal, so dass sich eine statistische Auswertung erübrigen würde. Reale Zusammenhänge unterliegen jedoch den Einflüssen systematischer und unsystematischer Fehler. Die resultierende Streuung der Messwerte wird durch die Standardabweichung gekennzeichnet und beeinflusst somit den benötigten Umfang an Versuchen.

Zur Bestimmung der Standardabweichung werden zehn exemplarische Druckversuche durchgeführt, da aufgrund der Messtechnik hier die größte Streuung zu erwarten ist. Als Konditionierung wird eine Bauteilfeuchte von 5,2% (relative Luftfeuchtigkeit von 35%) bei einer Dichte von ca. 350 kg/m^3 gewählt. Durchgeführt werden die Versuche mit einer Dehnrates von $1/\text{s}$. Aus der Druckfestigkeit ergibt sich bezogen auf das arithmetische Mittel eine Standardabweichung von $2,35 \text{ N/mm}^2$.

Mittels einer gewünschten statistischen Mächtigkeit von mindestens 90% ergibt sich eine benötigte Versuchsanzahl von ca. 50 Versuchen. Bei einem vollfaktoriellen und 3-stufigen Versuchsplan (27 Einzelversuche) entspricht die Versuchsanzahl einer einfachen Wiederholung für jeweils die Zug- und Druckversuche. Dieser Versuchsplan wird für jede Prüfmaschine separat aufgestellt. Somit ergibt sich eine Gesamtversuchsanzahl von 216 Versuchen.

Die Faktorstufen der Versuchspläne werden an die jeweiligen Grenzen und die dazwischen liegenden Mittelpunkte angepasst. Aus der vollfaktoriellen Kombination der drei Faktorstufen der Einflussgrößen ergibt sich für jeden Versuch ein Muster, aus dem die jeweilige Faktorstufe erkennbar ist (vgl. Tabelle 6.2 und 6.3). Die in Kapitel 4.1.2 festgelegten Grenzen der Einflussfaktoren (vgl. Tabelle 6.1) ergeben demzufolge die in den Tabellen 6.2 und 6.3 dargestellten Versuchspläne, welche mit einer Wiederholung randomisiert durchgeführt werden.

Tabelle 6.1: Grenzen der Einflussfaktoren

| | Minimum | Mittelpunkt | Maximum |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Dichte | 257 kg/m ² | 365 kg/m ² | 473 kg/m ² |
| Bauteilfeuchte (relative Luftfeuchte) | 4,9 % (30 %) | 7,2 % (60 %) | 10,9 % (90 %) |
| Zugdehnrate Universalrührmaschine | 0,001 1/s | 5,4 1/s | 10,7 1/s |
| Zugdehnrate Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 5,7 1/s | 77,9 1/s | 150 1/s |
| Druckdehnrate Universalprüfmaschine | 0,001 1/s | 16,7 1/s | 33,3 1/s |
| Druckdehnrate neue Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 33,3 1/s | 91,7 1/s | 150 1/s |

Tabelle 6.2: Versuchsplan Universalprüfmaschine

| Muster | Zugversuche | | | Druckversuche | | |
|--------|-----------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|
| | Dehnrate 1/s | Dichte kg/m ³ | Bauteilfeuchte % | Dehnrate 1/s | Dichte kg/m ³ | Bauteilfeuchte % |
| 111 | 0,001 | 257 | 4,9 | 0,001 | 257 | 4,9 |
| 112 | 0,001 | 257 | 7,2 | 0,001 | 257 | 7,2 |
| 113 | 0,001 | 257 | 10,9 | 0,001 | 257 | 10,9 |
| 121 | 0,001 | 365 | 4,9 | 0,001 | 365 | 4,9 |
| 122 | 0,001 | 365 | 7,2 | 0,001 | 365 | 7,2 |
| 123 | 0,001 | 365 | 10,9 | 0,001 | 365 | 10,9 |
| 131 | 0,001 | 473 | 4,9 | 0,001 | 473 | 4,9 |
| 132 | 0,001 | 473 | 7,2 | 0,001 | 473 | 7,2 |
| 133 | 0,001 | 473 | 10,9 | 0,001 | 473 | 10,9 |
| 211 | 5,4 | 257 | 4,9 | 16,7 | 257 | 4,9 |
| 212 | 5,4 | 257 | 7,2 | 16,7 | 257 | 7,2 |
| 213 | 5,4 | 257 | 10,9 | 16,7 | 257 | 10,9 |
| 221 | 5,4 | 365 | 4,9 | 16,7 | 365 | 4,9 |
| 222 | 5,4 | 365 | 7,2 | 16,7 | 365 | 7,2 |
| 223 | 5,4 | 365 | 10,9 | 16,7 | 365 | 10,9 |
| 231 | 5,4 | 473 | 4,9 | 16,7 | 473 | 4,9 |
| 232 | 5,4 | 473 | 7,2 | 16,7 | 473 | 7,2 |
| 233 | 5,4 | 473 | 10,9 | 16,7 | 473 | 10,9 |
| 311 | 10,7 | 257 | 4,9 | 33,3 | 257 | 4,9 |
| 312 | 10,7 | 257 | 7,2 | 33,3 | 257 | 7,2 |
| 313 | 10,7 | 257 | 10,9 | 33,3 | 257 | 10,9 |
| 321 | 10,7 | 365 | 4,9 | 33,3 | 365 | 4,9 |
| 322 | 10,7 | 365 | 7,2 | 33,3 | 365 | 7,2 |
| 323 | 10,7 | 365 | 10,9 | 33,3 | 365 | 10,9 |
| 331 | 10,7 | 473 | 4,9 | 33,3 | 473 | 4,9 |
| 332 | 10,7 | 473 | 7,2 | 33,3 | 473 | 7,2 |
| 333 | 10,7 | 473 | 10,9 | 33,3 | 473 | 10,9 |

Tabelle 6.3: Versuchsplan Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten

| Muster | Zugversuche | | | Druckversuche | | |
|--------|------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|---------------------|
| | Dehnrates 1/s | Dichte kg/m ³ | Bauteilfeuchte % | Dehnrates 1/s | Dichte kg/m ³ | Bauteilfeuchte % |
| 111 | 5,7 | 257 | 4,9 | 33,3 | 257 | 4,9 |
| 112 | 5,7 | 257 | 7,2 | 33,3 | 257 | 7,2 |
| 113 | 5,7 | 257 | 10,9 | 33,3 | 257 | 10,9 |
| 121 | 5,7 | 365 | 4,9 | 33,3 | 365 | 4,9 |
| 122 | 5,7 | 365 | 7,2 | 33,3 | 365 | 7,2 |
| 123 | 5,7 | 365 | 10,9 | 33,3 | 365 | 10,9 |
| 131 | 5,7 | 473 | 4,9 | 33,3 | 473 | 4,9 |
| 132 | 5,7 | 473 | 7,2 | 33,3 | 473 | 7,2 |
| 133 | 5,7 | 473 | 10,9 | 33,3 | 473 | 10,9 |
| 211 | 77,9 | 257 | 4,9 | 91,7 | 257 | 4,9 |
| 212 | 77,9 | 257 | 7,2 | 91,7 | 257 | 7,2 |
| 213 | 77,9 | 257 | 10,9 | 91,7 | 257 | 10,9 |
| 221 | 77,9 | 365 | 4,9 | 91,7 | 365 | 4,9 |
| 222 | 77,9 | 365 | 7,2 | 91,7 | 365 | 7,2 |
| 223 | 77,9 | 365 | 10,9 | 91,7 | 365 | 10,9 |
| 231 | 77,9 | 473 | 4,9 | 91,7 | 473 | 4,9 |
| 232 | 77,9 | 473 | 7,2 | 91,7 | 473 | 7,2 |
| 233 | 77,9 | 473 | 10,9 | 91,7 | 473 | 10,9 |
| 311 | 150 | 257 | 4,9 | 150 | 257 | 4,9 |
| 312 | 150 | 257 | 7,2 | 150 | 257 | 7,2 |
| 313 | 150 | 257 | 10,9 | 150 | 257 | 10,9 |
| 321 | 150 | 365 | 4,9 | 150 | 365 | 4,9 |
| 322 | 150 | 365 | 7,2 | 150 | 365 | 7,2 |
| 323 | 150 | 365 | 10,9 | 150 | 365 | 10,9 |
| 331 | 150 | 473 | 4,9 | 150 | 473 | 4,9 |
| 332 | 150 | 473 | 7,2 | 150 | 473 | 7,2 |
| 333 | 150 | 473 | 10,9 | 150 | 473 | 10,9 |

6.2 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Zielgrößen werden Zug- und Druckversuche bei variierenden Einflussgrößen durchgeführt, welche im Folgenden beschrieben werden. Es folgt die Beschreibung der Versuchsdurchführung zur Bestimmung der materiellen Zwangsbedingungen und der materiellen Symmetrien.

6.2.1 Druck- und Zugversuche zur Bestimmung der Zielgrößen

Nach erfolgter Vlieserstellung werden die Proben mit Hilfe von Stanzmessern hergestellt, die den Probenkonturen entsprechen. Hierzu werden die Stanzmesser in eine handbetätigte Stanze (*NAEF B/36-AL*) montiert und durch manuellen Hebeldruck in das Faservlies gepresst. Nachdem die Stanzmesser auf diese Weise die Probenkontur aus dem Faservlies ausgestanzt haben, kann der

Stanzhebel wieder entlastet werden. Beim Entlasten der Stanze wird ein Auswerfermechanismus betätigt, welcher dafür sorgt, dass die entstandenen Proben flächig aus den Stanzmessern gedrückt werden und im Anschluss entnommen werden können.

Es folgt die Klimatisierung der Proben. Hierzu werden diese für mindestens fünf Stunden nebeneinander liegend auf einem Gitterrost mittig im Klimaschrank positioniert. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass das Konditionierungsklima an allen Seiten der Proben anliegt und eine zügige Klimatisierung sichergestellt ist. Die Regelung des Klimaschranks wird auf die in DIN EN 20187 genannte Prüftemperatur von $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ und die für die jeweiligen Versuche relevante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Da sich der Klimaschrank in unmittelbarer Nähe der Prüfmaschinen befindet, kann die Zeit zwischen Entnahme aus dem Klimaschrank und der Versuchsdurchführung minimiert und auf unter 7,5 min reduziert werden. Hierdurch wird die Abweichung der Bauteilfeuchte von den Konditionierungsbedingungen beschränkt.

Die Versuche werden nach den zuvor aufgestellten Versuchsplänen auf den beiden zur Verfügung stehenden Prüfmaschinen durchgeführt. Versuche mit Geschwindigkeiten von 1×10^{-7} m/s bis 0,375 m/s werden auf der Universalprüfmaschine durchgeführt. Für Versuche mit höheren Geschwindigkeiten (0,1 m/s bis 5 m/s) kommt die Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten zum Einsatz. Beide Prüfmaschinen ermöglichen softwareseitig eine stufenlose Einstellung der Prüfgeschwindigkeit.

Die Sensorik erfasst während des Versuchs Daten über die von der Probe auf die Prüfmaschine aufgeprägte Kraft. Um hieraus die entsprechende Spannung im Material berechnen zu können, ist die Querschnittsfläche normal zur Krafrichtung zu ermitteln. Da die Proben mit Hilfe eines Stanzmessers gefertigt werden, kann von einer konstanten Breite ausgegangen werden. Die Dicke wird vor Beginn jedes Versuchs mittels einer digitalen Bügelmessschraube (*Mahr, Micromar 40 EWS*) ermittelt. Hierzu wird an drei über die Probenfläche diagonal verteilten Messpunkten die Dicke bestimmt und der Mittelwert gebildet.

Zur Bestimmung des Gewichts der Probe wird die Wiegefunktion einer Halogentrocknungswaage (*Mettler Toledo, Moisture Analyser HB43*) genutzt. Unter Berücksichtigung des Feuchtegehalts der Proben kann mit Hilfe des Gewichts die reale Dichte der Proben bestimmt werden.

Die vollständige Probenvermessung wird bei jeder Probe nach der Entnahme aus dem Klimaschrank unmittelbar vor der Einspannung in die Prüfmaschinen durchgeführt. Die Datenübertragung erfolgt vollautomatisiert und digital.

Um den Einfluss der aus der Schraubenvorspannkraft resultierenden Probenklemmung auf die Versuchsergebnisse zu minimieren, wird das Anzugsmoment der Klemmschrauben konstant gehalten. Dies erfolgt mittels eines drehmomentgesteuerten Handelektroschraubers. Das Anzugsmoment der M6 Schraube beträgt hierbei 2 N m.

Nach erfolgter Einspannung wird der vollautomatisierte Versuchsablauf gestartet. Eine jeweilige Anlagensoftware übernimmt hierbei die Steuerung der Versuchsanlagen und der Messtechnik sowie die Datenaufnahme. Hierbei wird zunächst die gewünschte Anlagengeschwindigkeit angefahren. Bei der Universalprüfmaschine erfolgt dies durch Beschleunigung des Linearschlittens bis zur gewünschten Geschwindigkeit. Bei der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten wird das Fallgewicht aus einer definierten Fallhöhe der Erdbeschleunigung ausgesetzt, so dass es beim

Erreichen der Probe die gewünschte Geschwindigkeit erreicht hat. Die Einkopplung der Proben-
spannvorrichtung erfolgt bei der Universalprüfmaschine durch die Mitnahme der oberen Proben-
spannvorrichtung am Ende der Freilaufstrecke. Bei der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindig-
keiten erfolgt sie bei Zugversuchen durch die Mitnahme der unteren Probenspannvorrichtung und
bei Druckversuchen durch die Mitnahme der oberen Probenspannvorrichtung. Während die Pro-
ben nun einer Belastung durch Längenänderung unterzogen werden, digitalisiert die Messtechnik
fortwährend die von den Sensoren gemessenen physikalischen Größen. Nach Beendigung des Ver-
suchs wird die jeweils bewegliche Probenspannvorrichtung bis zum Stillstand abgebremst. Bei der
Universalprüfmaschine erfolgt dies durch Verzögerung des Linearschlittens. Das Fallgewicht der
Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten wird durch den dafür vorgesehenen Dämpfer bis
zum Stillstand abgebremst.

Nach erfolgtem Versuch führen beide Anlagensoftwares die Versuchsdaten und die versuchsspezi-
fischen Daten zusammen und speichern diese in dem dafür vorgesehenen Dateiformat ab.

6.2.2 Versuche zur Bestimmung der materiellen Zwangsbedingungen

Um die materielle Zwangsbedingung der Querkontraktion zu charakterisieren, wird in Kooperati-
on mit der *Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH* (Braunschweig) eine exemplarische Zell-
stoffprobe mit einem Videoextensometer untersucht. Hierbei wird die lokale Dehnung bei einem
Zugversuch mittels digitaler Bildkorrelation bestimmt. Um zu untersuchen, ob es sich bei der er-
folgten Verformung um eine rein elastische Verformung handelt, wird nach erfolgter Belastung
auch die Entlastung der Probe aufgezeichnet.

6.2.3 Versuche zur Bestimmung der materiellen Symmetrien

Um die Anisotropie in der Ebene einordnen zu können, werden zwei Versuche durchgeführt:

Zum einen wird die Anisotropie anhand mechanischer Zugversuche untersucht. Hierzu werden 40
Proben in 4 Richtungen (0° , 45° , 90° , 135°) aus einem Blatt erstellt und einem Zugversuch mit ei-
ner Geschwindigkeit von 1,67 mm/s unterzogen. Die Spannungs- und Dehnungsdaten werden über
die jeweiligen 10 Versuche einer Richtung gemittelt und die daraus resultierenden 4 Spannungs-
Dehnungs-Diagramme visuell miteinander verglichen.

Zum anderen wird anhand eines *Tensile-Stiffness-Orientation Tests* (vgl. Kapitel 2.5.3) durch das
Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik der *Technischen Universität
Darmstadt* die Faserorientierung innerhalb eines angeformten 600 g/m^2 Blatts untersucht.

6.3 Datenaufbereitung der Zug- und Druckversuche

Aufgrund von elektrischen und mechanischen Einflüssen kann es zur Veränderung der Messsignale
kommen. Hierzu gehören Laufzeitdifferenzen in der Messkette und Überlagerungen des Messsi-
gnals durch mechanische Anregungen der Eigenschwingungen des Aufbaus. Um die Fehlerein-
flüsse auf die Messwerte möglichst zu reduzieren, werden diese Einflüsse näher betrachtet und
Möglichkeiten zur Reduzierung entwickelt. Des Weiteren sind Mechanismen notwendig, mit Hilfe
derer die Zielgrößen für die FEM-Simulation nutzbar gemacht werden können.

6.3.1 Kanalsynchronisierung

Die Weg- und Kraftsignale passieren vor ihrer Digitalisierung unterschiedliche Stationen. Der Weg wird mit Hilfe des physikalischen Effekts der Triangulation in eine elektrische Größe gewandelt. Dies geschieht durch eine Abtastung einer lichtempfindlichen Photozeile. Dieses Signal wird auf seine Normalverteilung überprüft und anschließend der Mittelwert berechnet. Diese Rechenleistung findet bereits im Sensor statt. Die entstandenen Daten werden an einen Controller geleitet, welcher aus diesen ein analoges Spannungssignal formt.

Der im Kraftsensor befindliche Piezokristall bewirkt eine Ladungsverschiebung, welche durch einen Ladungsverstärker auf eine normierte Spannung verstärkt wird.

Die Spannungen des Controllers und des Ladungsverstärkers werden gleichzeitig im Messverstärker digitalisiert und mit Zeitstempeln versehen. Problematisch wirken sich nun die unterschiedlichen Laufzeiten der beiden Signale aus, bevor sie vom Messverstärker digitalisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass die Laufzeiten beider Messketten für sich konstant sind. Daher kann durch nachträgliche Korrektur dieser Fehler eliminiert werden. Hierzu ist die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Kanälen zu bestimmen, um die beiden Kanäle nachträglich ihrer zeitlichen Zugehörigkeit zuzuführen. Dies geschieht durch Verschiebung einer der beiden Kanäle.

Zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz wird der als elastisch anzusehende Teil eines Versuchs betrachtet. Aus der Elastik ergibt sich zwangsläufig eine Proportionalität zwischen dem Weg und der Kraft. Somit sollten das Weg- und das Kraftsignal zeitlich gleichzeitig ansteigen. In Diagramm 6.1 ist der Beginn eines Versuchs mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 3,8m/s dargestellt. Es ist deutlich der zeitliche Verzug des Wegsignals im Vergleich zum Kraftsignal zu erkennen. Wird das Wegsignal so weit verschoben, dass es sich mit dem Kraftsignal deckt, resultiert eine Verschiebung um 28 Samples, was bei einer Abtastrate von 192kHz einen zeitlichen Verzug von 0,146 ms ergibt.

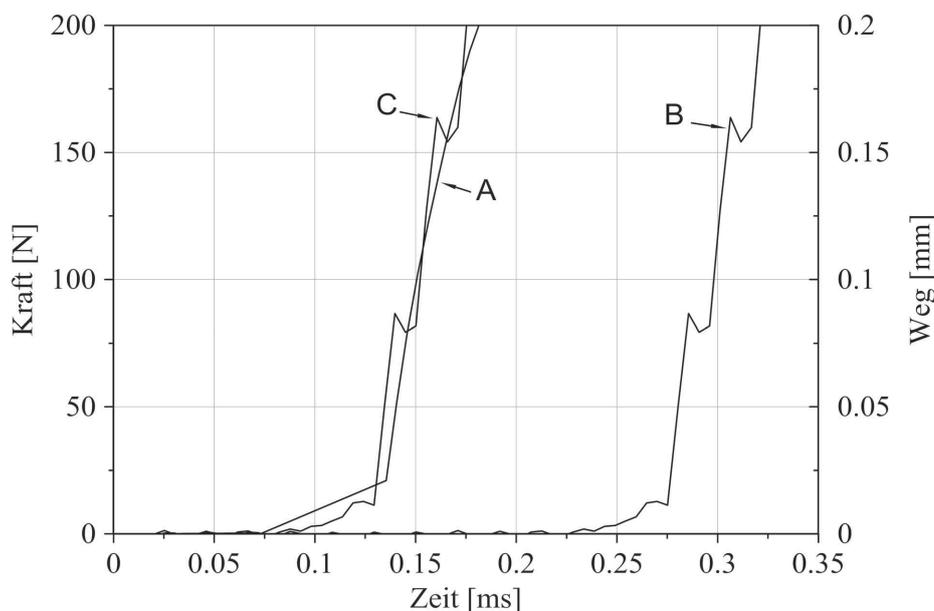


Abbildung 6.1: Laufzeitdifferenz des Weg- und Kraftsignals (Abzugsgeschwindigkeit: 3,8m/s): A Kraftsignal, B Wegsignal, C zeitlich synchronisiertes Wegsignal

Um diesen Umstand auszugleichen und die Datenkanäle zeitlich zu synchronisieren, wird der Wegkanal nach der Datenaufnahme am Anfang automatisiert um 28 Samples gekürzt. Zum Ausgleich der Kanallänge werden auch die Kraft- und Zeitkanäle am Ende um 28 Samples gekürzt.

6.3.2 Berechnung der Anregungsfunktion und Korrektur der Versuchsdaten

Die Messwerte werden durch die mechanische Dynamik des Systems beeinflusst. Hierbei spielen mechanische Trägheiten und Steifigkeiten eine entscheidende Rolle und führen zu einer Verzögerung der Signalerfassung.

Der in den Kraftmessstrang integrierte Kraftsensor bildet mit dem Aufbau ein Schwingungssystem. Dieses besteht vereinfacht aus den rheologischen Modellen für Elastizität und Dämpfung. Wird dieses angeregt, antwortet es mit der ihm eigentümlichen Systemantwort. Ist diese jedoch z. B. durch eine hohe Trägheit zu langsam für einen Flankenanstieg der zu messenden Größe, so wird die Information zeitlich und in ihrer Amplitude verändert von der Messtechnik wahrgenommen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit eines nach erfolgter Anregung ungewollten Nachschwingens des Systems, welches dem Messsignal überlagert ist.

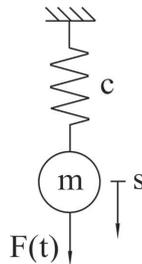


Abbildung 6.2: Modell eines angeregten 1-Massenschwingers mit Masse m , Federsteifigkeit c , Auslenkung s und Anregungskraft $F(t)$

Um diese Abweichung besser abschätzen zu können, soll die Systemantwort eines beispielhaften Versuchs betrachtet werden. Hierzu ist zu Beginn der Messstrang mechanisch zu charakterisieren. Vereinfacht soll hierfür ein harmonisch angeregter 1-Massenschwinger betrachtet werden (vgl. Abbildung 6.2). Der Sensor wird hierbei durch die Federsteifigkeit abgebildet. Die Verschiebung s der Masse m ist somit dem Kraftsignal, welches gemessen wird, proportional. Folglich lautet die Bewegungsgleichung für eine harmonische Anregung mit der Kreisfrequenz Ω und der Amplitude Q nach Dresig und Holzweißig [DH12]:

$$m\ddot{s} + cs - Q \sin(\Omega t) = 0. \quad (6.1)$$

Aus dem Ansatz zur Lösung des partikulären Teils der Differentialgleichung:

$$s_p = Q_p \sin(\Omega t) \quad (6.2)$$

folgt durch Differenzieren und Einsetzen in die Bewegungsgleichung:

$$Q_p = \frac{Q}{c - m\Omega^2} \quad (6.3)$$

Für die Lösung des homogenen Teils der Differentialgleichung ist nach Dresig und Holzweißig [DH12] im allgemeinen die Determinante aus der Differenz der Steifigkeitsmatrix \mathbf{C} und dem Produkt aus dem Quadrat der Eigenfrequenzen ω und der Massenmatrix \mathbf{M} gleich null:

$$\det(\mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0. \quad (6.4)$$

Im hier vorliegenden Fall mit der Anzahl der Freiheitsgrade = 1 ergibt sich für die Eigenfrequenz:

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (6.5)$$

Mit dem Ansatz:

$$s(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + Q_p \sin(\Omega t) \quad (6.6)$$

und den Anfangswerten für $s(0)$ und $\dot{s}(0)$ können die Koeffizienten A und B des Ansatzes bestimmt werden.

Unter der Annahme einer Masse m des Einmassenschwingers von 0,04kg und einer Steifigkeit des Sensors c von $4,5 \times 10^8 \text{ N/m}$ [Hota], einer Anregungsamplitude $Q = 100 \text{ N}$ und einer Versuchslänge von 3 mm würde sich eine in Abbildung 6.3 dargestellte Systemantwort einstellen. Die Systemantwort entspräche in diesem Fall dem vom Sensor aufgenommenen Signal.

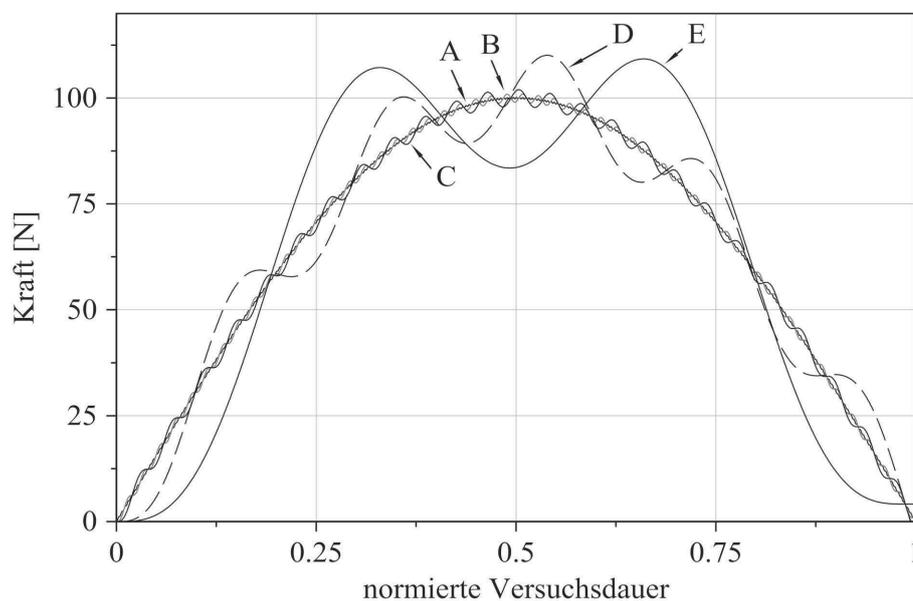


Abbildung 6.3: Systemantworten eines harmonisch angeregten 1-Massenschwingers bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: A 0,1 m/s, B 0,5 m/s, C 1 m/s, D 5 m/s, E 10 m/s

Es ist deutlich zu erkennen, dass gerade im Anfangsbereich und bei hohen Geschwindigkeiten die Systemantwort eine zeitliche Verzögerung aufweist. Des Weiteren erfolgen im Anschluss Über-

und Unterschwingungen des eigentlichen Signals. Mit steigender Geschwindigkeit nehmen diese Abweichungen von der Anregung zu und verfälschen somit das Messergebnis.

Die Amplituden der überlagerten Schwingung bzw. der homogenen Lösung der Differentialgleichung errechnen sich durch:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin(\omega t) + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos(\omega t) \right). \end{aligned} \quad (6.7)$$

Da die Summe der Quadrate der beiden Koeffizienten:

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin(\omega t) \quad (6.8)$$

und

$$\frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos(\omega t) \quad (6.9)$$

gleich 1 ist, existiert ein Winkel φ , für den

$$\sin(\varphi) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (6.10)$$

und

$$\cos(\varphi) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (6.11)$$

gilt. Dementsprechend folgt für $s(t)$:

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (6.12)$$

$s(t)$ entspricht folglich einer neuen Sinusfunktion, die um φ phasenverschoben ist und die Amplitude Q_h :

$$Q_h = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (6.13)$$

besitzt. Somit ist ersichtlich, dass die Abweichung des Signals von der Anregung des Systems durch den eigentlichen Versuch abhängig ist (vgl. Tabelle 6.4).

Um diesen Zusammenhang zu modellieren und eine Übertragungsfunktion zu erstellen, die den entstandenen Fehler nachträglich rechnerisch eliminiert, muss die Anregung des Systems ermittelt werden.

Tabelle 6.4: Amplituden des homogenen Anteils der Differentialgleichung

| Geschwindigkeit | Amplitude Q_h |
|-----------------|-----------------|
| 0,1 m/s | 0,197 N |
| 0,5 m/s | 0,987 N |
| 1 m/s | 1,975 N |
| 5 m/s | 9,97 N |
| 10 m/s | 20,547 N |

Um dieses Ziel näher zu betrachten, soll die Lösung einer Bewegungsgleichung betrachtet werden. Der Einfachheit halber wird ein Einmassenschwinger betrachtet, wobei der Kraftaufnehmer als Feder fungiert. Da die Messdaten diskret vorliegen und keine Aussagen darüber getroffen werden können, welche Werte die Signale zwischen den Messpunkten angenommen haben, soll eine lineare Interpolation zwischen diesen Werten angenommen werden. Somit ist die Anregungsfunktion $F_{\text{Anr lin}}$ als Geradengleichung mit der Steigung α und dem y-Achsenabschnitt β zu formulieren:

$$F_{\text{Anr lin}} = \alpha t + \beta. \quad (6.14)$$

Die Bewegungsgleichung lauten dann:

$$m\ddot{s} + cs = -F_{\text{Anr lin}}. \quad (6.15)$$

Als allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung für einen Einmassenschwinger mit linearer Anregung ergibt sich:

$$s(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + \alpha_p t + \beta_p. \quad (6.16)$$

Aus der Bewegungsgleichung 6.15 ergeben sich mit dem partikulären Ansatz 6.14 folgende Abhängigkeiten zwischen den Anregungskoeffizienten und den partikulären Anregungskoeffizienten:

$$\alpha_p = \frac{\alpha}{c} \quad \text{und} \quad \beta_p = \frac{\beta}{c}, \quad (6.17)$$

wobei α_p und β_p die Koeffizienten der partikulären Lösung sind. Die Kreisfrequenz ω ist systembedingt und somit anregungsunabhängig. Es bleiben vier Koeffizienten (A, B, α_p, β_p), die zur eindeutigen Beschreibung einer Bewegung zu bestimmen sind. Es stellt sich die Frage, wie diese bestimmt werden könnten. Ausgehend von den erhobenen Messdaten stehen Informationen über die Kraft und deren zeitliche Abhängigkeit zur Verfügung. Da davon auszugehen ist, dass sich der Sensor linear elastisch verformt, kann mit Hilfe seiner Federkonstante aus der Kraft der Weg berechnet werden, welcher aus der Kraft resultiert. Steht der Weg zur Verfügung, kann durch Differenzieren des Signals auch die Geschwindigkeit ermittelt werden. Soll also die lineare Anregung zwischen einem Zeitpunkt t_0 und dem darauf folgenden Zeitpunkt t_1 bestimmt werden, können durch die vier Anfangsbedingungen $s(t_0), s(t_1), \dot{s}(t_0), \dot{s}(t_1)$ alle Koeffizienten bestimmt werden.

Mit Hilfe der Koeffizienten α_p und β_p lässt sich nach Gleichung 6.17 die Anregungsfunktion für jeden Zeitpunkt t_n bestimmen. Diese Methode hat im Gegensatz zu einer digitalen Filterung den Vorteil, dass keine Phasenverschiebung des Signals stattfindet und trotzdem die mechanischen Schwingungen, welche dem Anregungssignal überlagert sind, rechnerisch eliminiert werden können.

Da sich der reale Aufbau jedoch nicht auf einen Einmassenschwinger reduzieren lässt, ist zu überprüfen, ob dieses Konzept auch für Mehrmassenschwinger anwendbar ist. Die Eigenvektoren sind analog zu den Eigenfrequenzen systembedingt und können unabhängig von der Anregung bestimmt werden. Pro Freiheitsgrad sind jeweils die Koeffizienten des homogenen Teils der Differentialgleichung A und B zu bestimmen. Hinzu kommen die Anregungskoeffizienten α und β . Die Anzahl der Koeffizienten n_{Koeff} ergibt sich somit zu:

$$n_{\text{Koeff}} = 2n_{\text{Fg}} + 2. \quad (6.18)$$

Nun ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Anfangsbedingungen n_{AnfBed} zu betrachten. Zum Zeitpunkt t_0 sind die Auslenkungen und die dazugehörige zeitliche Ableitung jedes Freiheitsgrades bekannt. Da der Kraftsensor sich als Feder zwischen zwei Massen befindet, symbolisiert das von ihm bekannte Signal die Differenz aus den Auslenkungen der benachbarten Massen und deren Ableitung. Somit ist für den Zeitpunkt t_1 nicht die konkrete Auslenkung einer Masse wie im zuvor beschriebenen Beispiel bekannt, sondern nur die Differenz aus zwei Auslenkungen:

$$n_{\text{AnfBed}} = 2n_{\text{Fg}}(t_0) + 2(t_1). \quad (6.19)$$

Aufgrund von

$$n_{\text{AnfBed}} = n_{\text{Koeff}} \quad (6.20)$$

ist das Konzept für eine beliebige Anzahl von Freiheitsgraden anwendbar.

Bevor das Konzept angewendet werden kann, ist jedoch der mechanische Aufbau zu charakterisieren. Dazu gehört die Ermittlung der Eigenfrequenzen. Die Eigenfrequenzen des mechanischen Systems können aus dem Frequenzspektrum des Systems ermittelt werden. Zur Ermittlung des Frequenzspektrums ist eine Systemantwort mittels der Fourier-Transformation $f(t) \circ \rightarrow \bullet \mathcal{F}(\omega)$ zu ermitteln.

Die Systemantwort kann z. B. durch periodische Anregung mit konstanter Amplitude und variabler Frequenz oder durch einen Impuls ermittelt werden. Als Alternative kann auch das freie Ausschlagen des Systems nach erfolgtem Versuch betrachtet werden. Dieses ist in Diagramm 6.4 dargestellt. Hierbei ist die Bandbreite der Messkette zu berücksichtigen. Der Ladungsverstärker und der Messverstärker weisen beide eine Tiefpasscharakteristik auf (vgl. Kapitel 2.1.3). Dabei stellt der Ladungsverstärker durch seine Bandbreite von 10 kHz die größte Bandbreitenbeschränkung dar. Somit sind Frequenzen oberhalb dieser Bandbreite gedämpft und werden nicht mit Ihrer realen Amplitude wiedergegeben.

In Diagramm 6.4 sind im Bereich der Frequenzen 5,5 kHz, 8 kHz und 19,5 kHz Spitzen zu erkennen. Da die Amplitude des elektrischen Signals der Frequenz 19,5 kHz jedoch ohne Kenntnisse

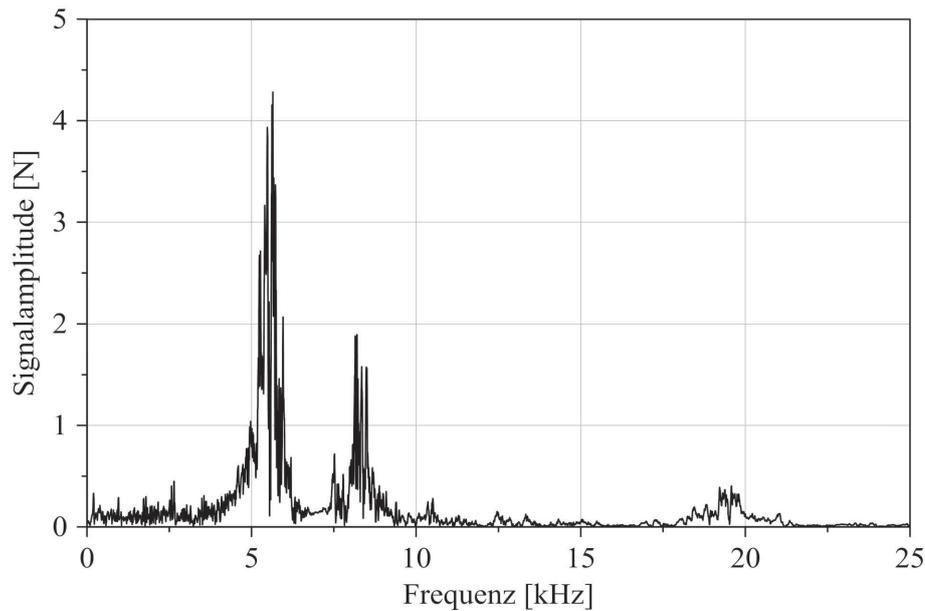


Abbildung 6.4: Frequenzspektrum des Ausschlagens des durch einen Versuch angeregten Versuchsaufbaus

über das Tiefpassverhalten des Ladungsverstärkers nicht rekonstruiert werden kann, ist es nicht möglich, diese in die Modellbildung mit einzubeziehen. Demzufolge wird ein Modell erstellt, welches zwei Eigenfrequenzen aufweist und folglich zwei Freiheitsgrade besitzt. Zur Abschätzung der Zusammenhänge zwischen den Massen, den Federsteifigkeiten und den Eigenfrequenzen wird die Berechnung der Eigenfrequenzen näher betrachtet (vgl. Gleichung 6.4). Hierzu sind zunächst die Bewegungsgleichungen aufzustellen, um hieraus im Anschluss die Massen- und Steifigkeitsmatrizen zu erstellen.

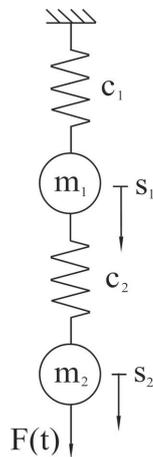


Abbildung 6.5: Modell eines Systems mit 2 Freiheitsgraden

Die Bewegungsgleichungen für das in Abbildung 6.5 dargestellte System lauten:

$$m_1 \ddot{s}_1 = -c_2 s_1 + c_2 s_2 - c_1 s_1 \tag{6.21}$$

und

$$m_2 \ddot{s}_2 = -c_2 s_2 + c_2 s_1 + F(t). \quad (6.22)$$

Hieraus ergeben sich die Massen- und Steifigkeitsmatrizen:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \quad (6.23)$$

und

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}. \quad (6.24)$$

Mit $\lambda := \omega^2$ folgt aus Gleichung 6.4:

$$(c_1 + c_2 - \lambda m_1)(c_2 - \lambda m_2) - c_2^2 = 0. \quad (6.25)$$

Durch Umformen nach c_1 :

$$c_1 = \frac{c_2^2}{c_2 - \lambda m_2} - c_2 + \lambda m_1 \quad (6.26)$$

und Ersetzen von λ durch das Quadrat der Eigenfrequenzen λ_1 und λ_2 folgt:

$$\frac{c_2^2}{c_2 - \lambda_2 m_2} + \lambda_2 m_1 = \frac{c_2^2}{c_2 - \lambda_1 m_2} + \lambda_1 m_1. \quad (6.27)$$

Somit ergibt sich für m_1 :

$$m_1 = \frac{c_2^2 / (c_2 - \lambda_1 m_2) - c_2^2 / (c_2 - \lambda_2 m_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (6.28)$$

Da m_1 positiv sein muss und unter der Annahme, dass $\lambda_2 > \lambda_1$ ist, folgt, dass der Zähler von Gleichung 6.28 > 0 sein muss:

$$\frac{c_2^2}{c_2 - \lambda_1 m_2} - \frac{c_2^2}{c_2 - \lambda_2 m_2} > 0. \quad (6.29)$$

Mit $c_2^2 > 0$ und $(c_2 - \lambda_1 m_2 < 0 \wedge c_2 - \lambda_2 m_2 < 0) \vee (c_2 - \lambda_1 m_2 > 0 \wedge c_2 - \lambda_2 m_2 > 0)$ lässt sich Gleichung 6.29 vereinfachen zu:

$$c_2 - \lambda_2 m_2 > c_2 - \lambda_1 m_2 \quad (6.30)$$

bzw.

$$\lambda_1 > \lambda_2. \quad (6.31)$$

Es würde folgen, dass $\lambda_1 > \lambda_2$ ist, was der Annahme für Gleichung 6.29 widerspricht. Folglich wäre der Nenner von Gleichung 6.28 negativ und der Zähler positiv. Der gesamte Bruch wäre negativ, was bedeuten würde, dass die Masse m_1 negativ wäre.

Es bleiben noch die Fälle für Gleichung 6.29, dass $(c_2 - \lambda_1 m_2 < 0 \wedge c_2 - \lambda_2 m_2 > 0) \vee (c_2 - \lambda_1 m_2 > 0 \wedge c_2 - \lambda_2 m_2 < 0)$ ist. Hieraus würde

$$c_2 - \lambda_2 m_2 > c_2 - \lambda_1 m_2 \quad (6.32)$$

und

$$\lambda_1 < \lambda_2 \quad (6.33)$$

folgen, was der zuvor getroffenen Annahme entspricht. Die zuvor angenommenen Fälle führen zu den folgenden Zusammenhängen:

$$(c_2 - \lambda_1 m_2 < 0 \Leftrightarrow \frac{c_2}{m_2} < \lambda_1) \wedge (c_2 - \lambda_2 m_2 > 0 \Leftrightarrow \frac{c_2}{m_2} > \lambda_2) \quad (6.34)$$

und

$$(c_2 - \lambda_1 m_2 > 0 \Leftrightarrow \frac{c_2}{m_2} > \lambda_1) \wedge (c_2 - \lambda_2 m_2 < 0 \Leftrightarrow \frac{c_2}{m_2} < \lambda_2). \quad (6.35)$$

Letztendlich ergibt sich aus dem Zusammenhang 6.34:

$$\lambda_1 > \frac{c_2}{m_2} > \lambda_2 \quad (6.36)$$

und aus dem Zusammenhang 6.35:

$$\lambda_2 > \frac{c_2}{m_2} > \lambda_1. \quad (6.37)$$

Die Voraussetzung 6.33 wird jedoch nur von Gleichung 6.37 erfüllt. Ein System, welches die beiden Eigenfrequenzen λ_1 und λ_2 aufweisen soll, muss also einen Quotienten aus c_2 und m_2 besitzen, der sich zwischen den beiden Eigenfrequenzen befindet. Die Masse m_1 kann direkt aus c_2 und m_2 mit Hilfe der Gleichung 6.28 bestimmt werden. Die Federsteifigkeit c_1 ist durch Einsetzen der berechneten Masse m_1 in Gleichung 6.26 festgelegt. Ein System mit 2 Freiheitsgraden ist folglich bei bekannten Eigenfrequenzen bereits durch die Wahl von c_2 und m_2 eindeutig bestimmt.

Ist das System vollständig bestimmt, können die zu den Eigenfrequenzen ω_1 und ω_2 gehörenden Eigenvektoren $\vec{\Phi}_1$ und $\vec{\Phi}_2$ berechnet werden:

$$(\mathbf{C} - \omega_n^2 \mathbf{M}) \vec{\Phi}_n = \mathbf{0}. \quad (6.38)$$

Da das Gleichungssystem unterbestimmt ist, existieren unendlich viele Lösungen. Daher wird zur Berechnung eines Eigenvektors das erste Element des Vektors $\vec{\Phi}_{n1} = 1$ gesetzt. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für die Eigenvektoren

$$\vec{\Phi}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ (c_1 + c_2 - \omega_n^2 m_1) / (c_2) \end{pmatrix}. \quad (6.39)$$

Zur Lösung der Bewegungsgleichung:

$$\vec{s} = ((A_1 \cos(\omega_1 t) + B_1 \sin(\omega_1 t))\vec{\Phi}_1 + ((A_2 \cos(\omega_2 t) + B_2 \sin(\omega_2 t))\vec{\Phi}_2 + \vec{\alpha}t + \vec{\beta} \quad (6.40)$$

sind die Koeffizienten A_1, A_2, B_1, B_2 zu bestimmen. Diese lassen sich durch Festlegung der Anfangsbedingungen berechnen und ergeben sich zu:

$$A_1 = (s_1(0) \frac{1}{\Phi_{11}} - s_2(0) \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}} - \beta_1 \frac{1}{\Phi_{11}} + \beta_2 \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}}) / (1 - \frac{\Phi_{12}\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}}), \quad (6.41)$$

$$A_2 = (s_1(0) \frac{1}{\Phi_{21}} - s_2(0) \frac{\Phi_{11}}{\Phi_{12}\Phi_{21}} - \beta_1 \frac{1}{\Phi_{21}} + \beta_2 \frac{\Phi_{11}}{\Phi_{12}\Phi_{21}}) / (1 - \frac{\Phi_{11}\Phi_{22}}{\Phi_{12}\Phi_{21}}), \quad (6.42)$$

$$B_1 = (s_1(0) \frac{1}{\omega_1 \Phi_{11}} - s_2(0) \frac{\Phi_{21}}{\omega_1 \Phi_{11}\Phi_{22}} - \alpha_1 \frac{1}{\omega_1 \Phi_{11}} + \alpha_2 \frac{\Phi_{21}}{\omega_1 \Phi_{11}\Phi_{22}}) / (1 - \frac{\Phi_{12}\Phi_{21}}{\Phi_{11}\Phi_{22}}), \quad (6.43)$$

und

$$B_2 = (s_1(0) \frac{1}{\omega_2 \Phi_{21}} - s_2(0) \frac{\Phi_{11}}{\omega_2 \Phi_{12}\Phi_{21}} - \alpha_1 \frac{1}{\omega_2 \Phi_{21}} + \alpha_2 \frac{\Phi_{11}}{\omega_1 \Phi_{12}\Phi_{21}}) / (1 - \frac{\Phi_{11}\Phi_{22}}{\Phi_{12}\Phi_{21}}). \quad (6.44)$$

Somit ist das System zu jeder beliebigen Zeit t vollständig beschreibbar. Wie bereits zuvor für eine beliebige Anzahl von Freiheitsgraden gezeigt wurde, kann aus der Antwort des Systems die Anregung bestimmt werden. Die hierfür benötigten Zeitpunkte t_n und t_{n+1} ergeben sich hierbei durch die zeitlich äquidistante Abtastung des Signals.

Die in Abbildung 6.6 zu sehende errechnete Anregungsfunktion weist deutliche Frequenzanteile im Bereich von ca. 20kHz auf. Diese fielen bereits bei der Betrachtung des Frequenzspektrums auf. Da sie jedoch oberhalb der Eckfrequenz des Ladungsverstärkers liegen, konnten sie nicht in die Modellbildung mit einfließen. Um diese Frequenzanteile zu reduzieren, wird durch einen dreieckig gewichteten gleitenden Durchschnitt die Anregungsfunktion mit einer Halbwertsbreite von 8 Samples gemittelt. Der hierbei begangene Fehler ist jedoch um ein Vielfaches geringer als bei einer direkten Mittelung des ursprünglichen Messsignals, da die zu reduzierenden Frequenzen höher liegen. Um eine ähnliche Reduzierung der Frequenzanteile im Bereich von ca. 20kHz aus der Systemantwort zu erzielen, wäre eine dreimal höhere Halbwertsbreite von 24 Samples nötig.

Durch diese Methode können die dynamikbedingten Störungen in den Versuchsdaten signifikant reduziert werden. Alle Versuche, die durch eine überlagerte Schwingung eine periodische Abweichung aufweisen, können durch diese Methode nachträglich korrigiert werden.

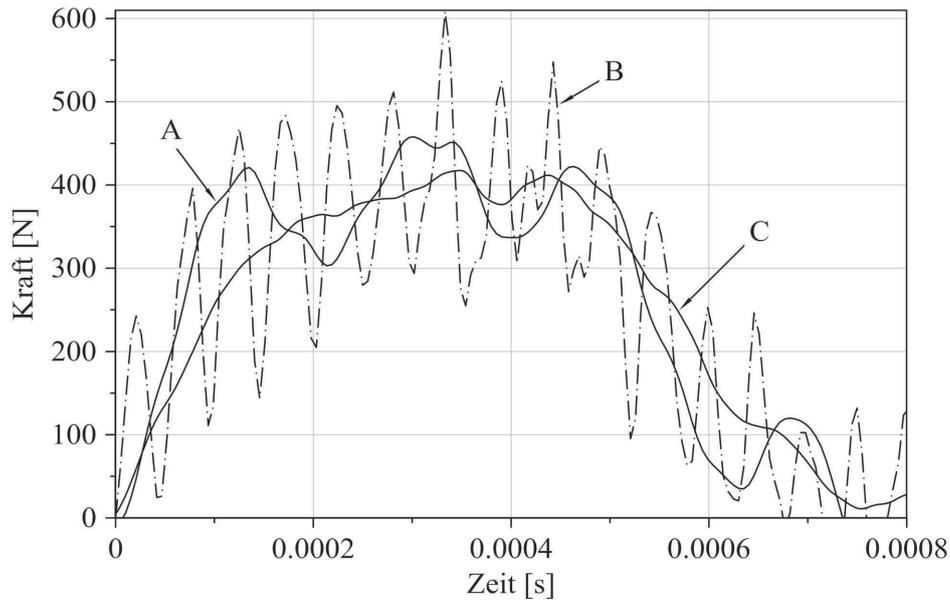


Abbildung 6.6: Systemantwort eines Versuchs mit 3,7 m/s (A) und dessen berechnete Anregungsfunktion (B) sowie der dreieckig gewichtete gleitende Durchschnitt der Anregungsfunktion mit einer Halbwertsbreite von 8 Samples (C)

6.3.3 Dehnung

Bei der Berechnung der Dehnung wird diese üblicherweise auf die Anfangslänge bezogen. Auf diese Weise berechnete Dehnungen werden als *technische* Dehnungen ε_T bezeichnet:

$$\varepsilon_T(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} = \frac{l(t) - l_0}{l_0} = \frac{l(t)}{l_0} - 1. \quad (6.45)$$

Die für ein FEM-Modell benötigte *wahre* Dehnung wird jedoch aus der aktuellen Länge berechnet und weicht bei größeren Dehnungen von der technischen Dehnung ab. Die wahre Dehnung ε_W setzt sich nach [BRR14] aus der Summe beliebig kleiner Inkremente der Dehnung $\frac{\Delta l}{l_0}$ zusammen. Nach [BRR14] ergibt sich folgendes Integral:

$$\varepsilon_W = \int_{l_0}^{l(t)} \frac{1}{l} dl = \ln \frac{l(t)}{l_0}. \quad (6.46)$$

Aus Gleichung 6.45 folgt:

$$l(t) = \varepsilon_T l_0 + l_0. \quad (6.47)$$

Somit ergibt sich aus Gleichung 6.45 und 6.47 für die wahre Dehnung ε_W :

$$\varepsilon_W = \ln \frac{\varepsilon_T(t) l_0 + l_0}{l_0} = \ln(\varepsilon_T(t) + 1). \quad (6.48)$$

6.3.4 Spannung

Zur Ermittlung der Spannung ist die während des Versuchs durch die Probe induzierte Kraft auf die Querschnittsfläche der Probe normal zur Krafrichtung zu beziehen. Üblicherweise wird als Querschnittsfläche lediglich die Anfangsquerschnittsfläche der unbelasteten Probe verwendet. Die so entstehende Größe wird als technische Spannung bezeichnet. Da sich die Breite der Querschnittsfläche unter Belastung jedoch ändern kann (vgl. Kapitel 2.3.2), entspräche dies nicht der wahren Spannung. Die Breite der belasteten Probe B_{bel} lässt sich über die Definition der Querkontraktionszahl ν (vgl. Gleichung 2.23) als Quotient aus der wahren Dehnung (vgl. Gleichung 6.46) in Breitenrichtung ε_B und in Längsrichtung ε_L :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_L} \quad (6.49)$$

zu

$$B_{\text{bel}} = B_0 \cdot e^{-\nu \cdot \varepsilon_L} \quad (6.50)$$

berechnen. Da die Fasern hauptsächlich in der Ebene orientiert sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Querkontraktion in Dickenrichtung gegen null geht. Daher soll diese vernachlässigt werden. Die wahre Spannung errechnet sich folglich aus dem Quotienten der Kraft F und dem Produkt aus der Dicke D und der Breite der belasteten Probe B_{bel} zu:

$$\sigma = \frac{F}{DB_0 \cdot e^{-\nu \cdot \varepsilon_L}} \quad (6.51)$$

6.3.5 Technische Elastizitätsgrenze

Zur Bestimmung der technischen Dehngrenze wird ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, anhand des Anteils der plastischen Dehnung - für die technische Dehngrenze 0,01 % - automatisiert die Koordinaten für Spannung und Dehnung der technischen Dehngrenze zu identifizieren. Als Quelldaten liegen die Signalkanäle der Spannung und der Dehnung sowie der Zeit in Form eines Datenarrays vor. Die Kanäle beinhalten neben den eigentlichen Versuchdaten auch Daten, die während des Stillstandes, der Beschleunigung sowie der Abbremsung der Prüfmaschine aufgenommen werden.

Um die Auswertung durch diese Daten nicht zu verfälschen, ist es zuvor notwendig, den Versuchsbeginn zu identifizieren, um im Anschluss die technische Dehngrenze zu bestimmen. Hierzu können beide Datenkanäle genutzt werden. Charakteristisch für den Versuchsbeginn ist der Anstieg des Kraft- bzw. Wegsignals. Aufgrund des allgegenwärtigen Messrauschens weisen die Signalkanäle jedoch zufällig verteilte Anstiege und Abfälle auf. Zusätzlich treten im Kraftsignal nach dem Versuch bruchinduzierte Schwingungen auf, die die automatisierte Identifizierung des Versuchsbeginns im Kraftsignal erschweren. Um eindeutig den Versuchsbeginn bestimmen zu können, muss ein Algorithmus entwickelt werden, der robust gegenüber zufällig auftretendem Messrauschen und unabhängig von nachfolgenden Signalverläufen ist. Da sich Zug- und Druckversuche im Bereich der Elastizität bis auf die Vorzeichen der Signale ähneln, kann für beide Versuchsarten der gleiche Algorithmus verwendet werden, solange die Daten eines der beiden Versuche invertiert werden.

Um den Versuchsbeginn zu bestimmen, ist der Index des Datenarrays zu bestimmen, an dem das Signal von dem anfänglichen Rauschen abweicht. Hierzu wird folgendermaßen vorgegangen: Zu Beginn ist der Versuchsanfang inkl. dem anfänglichen Messrauschen grob aus den Daten zu extrahieren. Hierdurch werden Fehlinterpretationen durch später auftretende Phänomene, z. B. durch den Probenbruch, ausgeschlossen. Im Anschluss kann der Versuchsbeginn genau eingegrenzt werden.

Zum Extrahieren des Versuchsbeginns aus den Versuchsdaten wird das anfängliche Messrauschen durch seinen Mittelwert und seine Standardabweichung charakterisiert. Wird nun das Array von Beginn an nach dem ersten Wert durchsucht, welcher größer als die Summe aus Mittelwert des anfänglichen Rauschens und dem Produkt aus Standardabweichung und einem Sicherheitsfaktor ist, kann davon ausgegangen werden, dass zum Zeitpunkt dieses Index der Versuch bereits begonnen hat. Um auszuschließen, dass bei Versuchen mit sehr kleinen Kräften der zu suchende Vergleichswert größer als das maximal auftretende Signalmaximum ist und somit kein Wert gefunden werden kann, sollte der Vergleichswert nicht größer sein können als das Maximum des betrachteten Datenarrays. Die weiteren Untersuchungen erfolgen nun nur noch anhand eines Teilarrays, welches an dem identifizierten Index endet. Somit sind jegliche Phänomene durch beispielsweise den Probenbruch ausgeschlossen.

Zur Identifizierung des Versuchsbeginns wird nun das Teilarray rückwärts betrachtet. Es ist der Index zu finden, an dem erstmals ein Wert kleiner oder gleich dem Mittelwert des zuvor vorherrschenden Rauschens erreicht wird. Problematisch hierbei gestaltet sich jedoch die Tatsache, dass sich der Mittelwert unmittelbar vor Versuchsbeginn geringfügig von dem Mittelwert des Messrauschens zu Beginn der Messung unterscheiden kann. Dies beruht auf Störeinflüssen, die durch die Steuerung der Versuchsanlage hervorgerufen werden. Um diesen Einfluss zu eliminieren, muss ein neuer Mittelwert bestimmt werden, der unmittelbar vor dem Versuchsbeginn vorherrscht. Hierzu wird das Teilarray rückwärts nach einem Index durchsucht, an dem die zur Rauschreduktion über eine Anzahl von Samples gemittelte Steigung oberhalb einer Grenze nahe null liegt. Diese Grenze ist dynamisch zu gestalten, da sie u. a. von der Versuchsgeschwindigkeit und der Abtastrate abhängig ist. Außerdem muss sie sich oberhalb der anfänglichen Steigung des Signals befinden. An diesem Index ist erneut der Mittelwert des Signals zu bestimmen. Mit diesem neu gewonnen Mittelwert wird nun erneut das Teilarray rückwärts nach einem Wert durchsucht, der kleiner oder gleich diesem neuen Mittelwert ist. Der sich nun ergebende Index ist schlussendlich von der Länge des Teilarrays zu subtrahieren, um den Index zu erhalten, an dem, bezogen auf das ursprünglichen Datenarray, der Versuch beginnt.

Nachdem der Beginn des Versuchs identifiziert wurde, wird nun die technische Dehngrenze bestimmt. Aus den gleichen phänomenologischen Gründen wie bei der Identifikation des Versuchsbeginns wird auch hier der für die technische Dehngrenze irrelevante Teil des Datenarrays entfernt. Hierzu wird der Index des Datenarrays bestimmt, bei dem die Hälfte der bei der Zugfestigkeit aufgetretenen Dehnung erreicht wird, und nur noch die Teilarrays der Spannungs- und Dehnungskanäle von Versuchsbeginn bis zu diesem Index betrachtet.

Nun wird durch Bestimmung der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Punkt mit der vorgegebenen plastischen Verformung (0,01 %) ermittelt. Würde die Steigung aus den unbearbeiteten Kanaldaten bestimmt werden, entstünde aufgrund des Signalrauschens beider Kanäle ein stark schwankendes und zufällig das Vorzeichen wechselndes Steigungssignal. Dieses weiter auszuwerten wäre nur schwer möglich. Daher wird mit Hilfe eines dreieckig gewichteten gleitenden Durchschnitts die Datenarrays von Spannung und Dehnung gemittelt. Die Halbwertsbreite wird

hierbei so lange erhöht, bis beide Arrays monoton wachsend sind. Erst jetzt wird aus den beiden Kanälen die Steigung für jeden Punkt berechnet.

Um nun die plastische Dehnung bestimmen zu können, ist die Anfangselastizität zu bestimmen. Um den Einfluss von zu Beginn der Belastung ggf. auftretenden Setzvorgängen zu eliminieren, wird die maximal auftretende Steigung aus dem errechneten Steigungsarray bestimmt. Diese Gerade wird um den gewünschten Dehnungsbetrag verschoben, und der sich mit der Spannungs-Dehnungskurve ergebende Schnittpunkt ergibt die Koordinaten der technischen Dehngrenze.

7 Datenauswertung und Modellierung

Nach der Versuchsdurchführung erfolgt nun die Auswertung der Versuche. Zu Beginn des Kapitels werden die Ergebnisse der Versuche bezüglich der materiellen Symmetrie in der Ebene beschrieben. Hieraus ergibt sich, ob eine Charakterisierung der Materialparameter in unterschiedlichen Richtungen in der Ebene erfolgen muss.

Es folgt die Untersuchung der materiellen Zwangsbedingungen. Hierzu ist die Betrachtung der Querkontraktion in der Probenebene nötig.

Im Anschluss findet für die Auswertung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens eine multiple lineare Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate [Leg05] Anwendung. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse ergeben die funktionalen Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Dabei ergibt die Kombination der Zielgrößen das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Faserformwerkstoffs. Signifikante Einflussfaktoren der Spannung sind Dehnrate, Dichte und Bauteilfeuchte sowie Wechselwirkungen zwischen jeweils der Dichte und der Bauteilfeuchte bzw. der Dehnrate. Wechselwirkungen der Einflussgrößen in Bezug auf die Dehnungen sind nicht signifikant. Hier treten nur die Größen Dehnrate, Dichte und Bauteilfeuchte als Einflussfaktoren ohne Wechselwirkung untereinander auf.

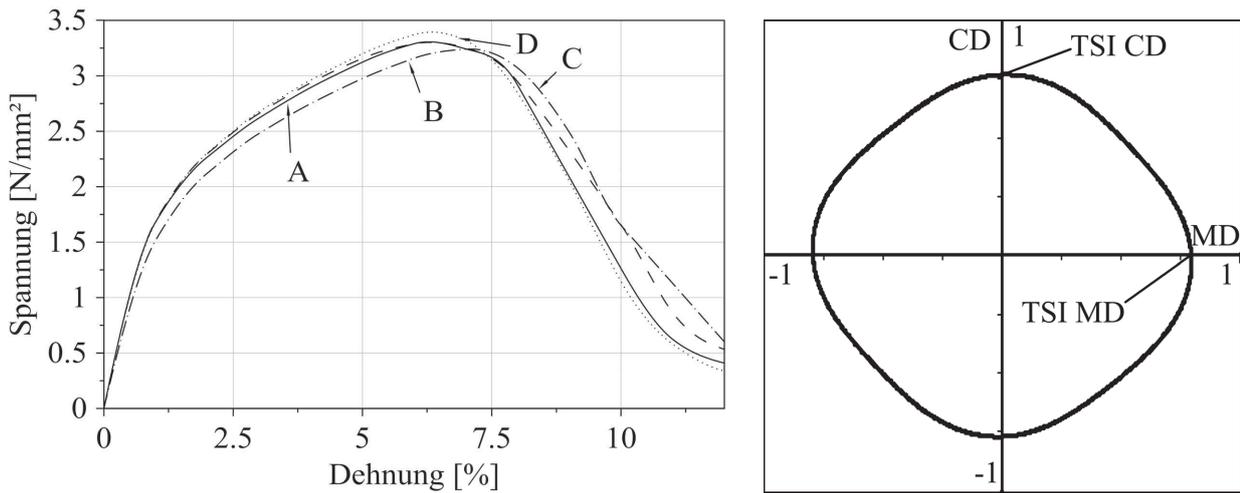
Exemplarisch werden für jede Zielgröße quantitative Werte für übliche Konstruktivpolster genannt. Diese sind ungepresst und weisen eine Dichte von durchschnittlich 290kg/m^3 auf. Es wird zwischen Norm- und tropischen Klimabedingungen unterschieden.

7.1 Isotropie in der Ebene

Die mechanischen Versuche zur Detektion einer Anisotropie in der Ebene können keine sichtbare Abhängigkeit zwischen der Richtung und dem Spannungs-Dehnungsverhalten identifizieren (vgl. Abbildung 7.1a). Die sichtbaren Abweichungen der Kurven voneinander sind Streuungen des Materialverhaltens zuzuordnen.

Die durch das *Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik* der *Technischen Universität Darmstadt* durchgeführten Zugsteifigkeitsindex-Untersuchungen ergeben einen nahezu kreisförmigen Verlauf (vgl. Abbildung 7.1b). Somit kann auch hier die Isotropie gezeigt werden.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die verwendeten Laborblätter prozessbedingt keine relevante Anisotropie in der Ebene aufweisen. Folglich ist keine differenzierte Betrachtung des Materialverhaltens in unterschiedlichen Richtungen in der Ebene notwendig.



(a) Gemittelte Spannungs-Dehnungs-Kurven verschieden orientierter Proben: A 0°, B 45°, C 90°, D 135° (b) Zugsteifigkeitsindizes (TSI MD, TSI CD) eines 600 g/m²-Faserformblattes (Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (TU-Darmstadt))

Abbildung 7.1: Versuchsergebnisse zur Untersuchung der Isotropie in der Ebene von Faserformprodukten

7.2 Querkontraktion

Bei den durch die *Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH* (Braunschweig) durchgeführten Versuchen zur Detektion der Querkontraktion stellt sich bei einer maximalen Längsdehnung von 6,194 % eine Querdehnung von -1,557 % ein (vgl. Abbildung 7.2).

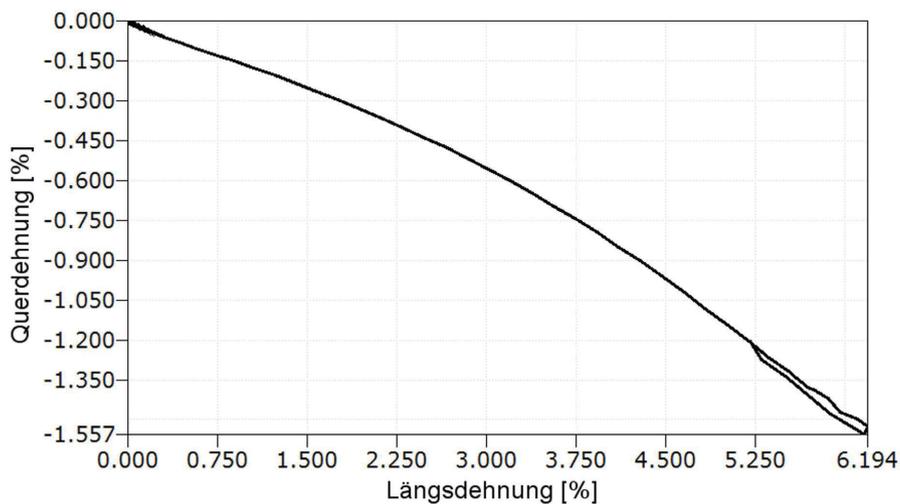


Abbildung 7.2: Querdehnung über Längsdehnung einer Faserformprobe (*GOM mbH* Braunschweig)

Der Verlauf der Querdehnung ist leicht progressiv. Die anschließende Entlastung bis auf 5,2 % zeigt eine gute Deckung mit der Belastung. Aufgrund der Deckung zwischen Be- und Entlastung

kann von einer Elastizität ausgegangen und ein plastischer Anteil der Dehnung ausgeschlossen bzw. von einem auf Längs- und Querdehnung bezogenen isotropen plastischen Anteil ausgegangen werden. Das Verhältnis zwischen Längs- und Querdehnung ergibt nach Gleichung 2.23 eine mittlere Querkontraktionszahl von 0,196.

7.3 Elastisches Verhalten / technische Elastizitätsgrenze

Das elastische Materialverhalten endet, sobald der Werkstoff zu fließen bzw. sich plastisch zu verformen beginnt. Um diesen Punkt möglichst genau zu ermitteln, wird die technische Elastizitätsgrenze (vgl. Kapitel 4.1.1) mit einem plastischen Anteil von 0,01 % für Zug- und Druckbelastung ermittelt.

Das für die Abhängigkeit zwischen der technischen Elastizitätsspannung unter Zugbelastung σ_{tEz} und den Einflussgrößen Dehnrates $\dot{\epsilon}$, Dichte ρ und Bauteilfeuchte f_B resultierende Regressionsmodell:

$$\begin{aligned}\sigma_{tEz} = & 1,292 + 0,0136 \cdot \dot{\epsilon} + 0,0152 \cdot \rho - 0,522 \cdot f_B \\ & + (\rho - 401,146) \cdot (f_B - 7,872) \cdot -0,00216 \\ & + (\dot{\epsilon} - 52,027) \cdot (\rho - 401,146) \cdot 0,0000352\end{aligned}\quad (7.1)$$

besitzt einen Signifikanzwert p von unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,67.

Es ergeben sich proportionale Zusammenhänge zwischen der technischen Elastizitätsspannung σ_{tEz} als Zielgröße und den Einflussgrößen Dehnrates und Dichte. Zwischen der technischen Elastizitätsspannung σ_{tEz} und der Bauteilfeuchte ergibt sich ein antiproportionaler Zusammenhang. Die Wechselwirkungen zwischen jeweils der Dichte und der Dehnrates bzw. der Bauteilfeuchte beeinflussen die Zusammenhänge zwar, kehren die Richtung der Proportionalität jedoch nicht um.

In Abbildung 7.3 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Aufgrund des linearen Einflusses der Dehnrates auf die Zielgröße sind zur Verbesserung der Lesbarkeit nur die extremen Dehnrates (0,001 1/s und 150 1/s) als Flächen gezeigt.

Für handelsübliche Konstruktivpolster ergeben sich bei Normklima technische Elastizitätsspannungen von 2,228 N/mm² bei einer Dehnrates von 0,001 1/s bzw. 3,687 N/mm² bei einer Dehnrates von 150 1/s. Für tropische Regionen verringern sich die jeweiligen technischen Elastizitätsspannungen (1,921 N/mm² bei 0,001 1/s und 3,380 N/mm² bei 150 1/s).

Das Regressionsmodell zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der technischen Elastizitätsdehnung unter Zugbelastung ϵ_{tEz} und den Einflussgrößen Dehnrates $\dot{\epsilon}$, Dichte ρ und Bauteilfeuchte f_B :

$$\epsilon_{tEz} = -0,000592 + 0,0000408 \cdot \dot{\epsilon} - 0,00000263 \cdot \rho + 0,000948 \cdot f_B \quad (7.2)$$

weist einen Signifikanzwert p von unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,77 auf.

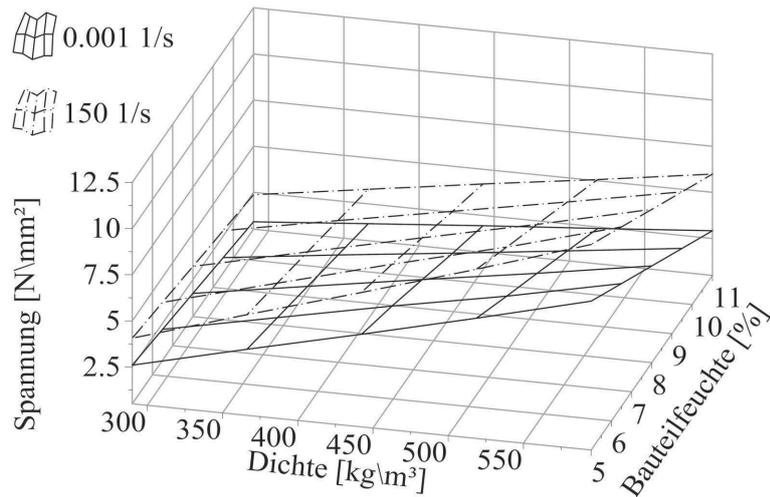


Abbildung 7.3: Technische Elastizitätsspannungsabhängigkeit unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

Die technische Elastizitätsdehnung ϵ_{tEz} hängt hierbei proportional von der Dehnrate und der Bauteilfeuchte ab. Der Einfluss der Dichte ist hingegen antiproportional (vgl. Abbildung 7.4). Wechselwirkungen existieren nicht.

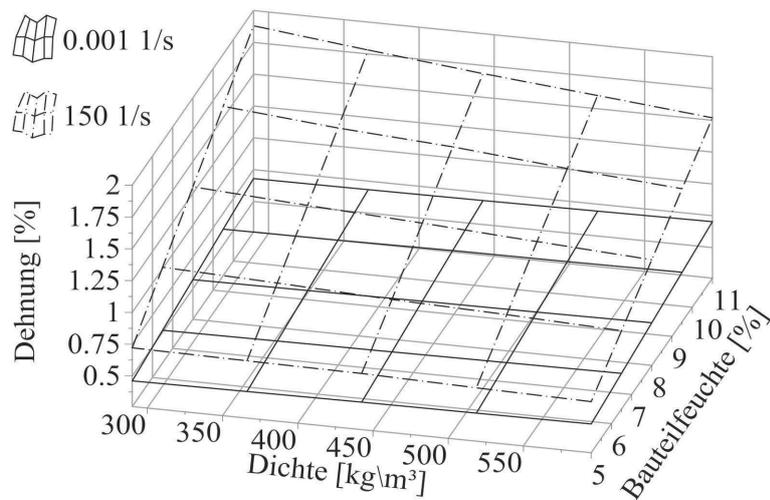


Abbildung 7.4: Technische Elastizitätsdehnungsabhängigkeit unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

Bei Normklima beträgt die technische Elastizitätsdehnung für ungespresste Verpackungen 0,510 % bei einer Dehnrate von 0,001 1/s und steigt auf 0,976 % bei 150 1/s. Unter tropischen Bedingungen beträgt die technische Elastizitätsdehnung 0,549 % bei 0,001 1/s. Hierbei erhöht sich die technische Elastizitätsdehnung bei einer Dehnrate von 150 1/s auf 1,185 %.

Für die technische Elastizitätsspannung unter Druckbelastung σ_{tEd} ergibt die Regressionsanalyse für die Abhängigkeit von den Einflussgrößen folgendes Modell:

$$\begin{aligned}\sigma_{tEd} = & -0,919 + 0,0000918 \cdot \dot{\epsilon} + 0,184 \cdot f_B - 0,00515 \cdot \rho \\ & + (\dot{\epsilon} - 652,609) \cdot (\rho - 446,168) \cdot -0,00000147 \\ & + (f_B - 8,020) \cdot (\rho - 446,168) \cdot 0,00129\end{aligned}\quad (7.3)$$

mit einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,4.

Hierbei hängt die technische Elastizitätsspannung σ_{tEd} antiproportional von der Dichte ab. Aufgrund der Wechselwirkungen mit den Einflussfaktoren Dichte und Dehnrate variiert der Einfluss der Bauteilfeuchte auf die technische Elastizitätsspannung σ_{tEd} zwischen konstant und proportional. Der Einfluss der Dehnrate auf die technische Elastizitätsspannung σ_{tEd} variiert. Durch die Wechselwirkung mit der Bauteilfeuchte wird der Einfluss der Dehnrate nur skaliert. Der Einfluss der Dichte hingegen ändert die Proportionalität des Dehnrateneinflusses auf die technische Elastizitätsspannung σ_{tEd} . Niedrige Dichten ergeben einen proportionalen Zusammenhang zwischen Dehnrate und technischer Elastizitätsspannung σ_{tEd} , wohingegen hohe Dichten einen antiproportionalen Zusammenhang bewirken. Der Umkehrpunkt befindet sich bei einer Dichte von ca. 510 kg/m^3 (vgl. Abbildung 7.5).

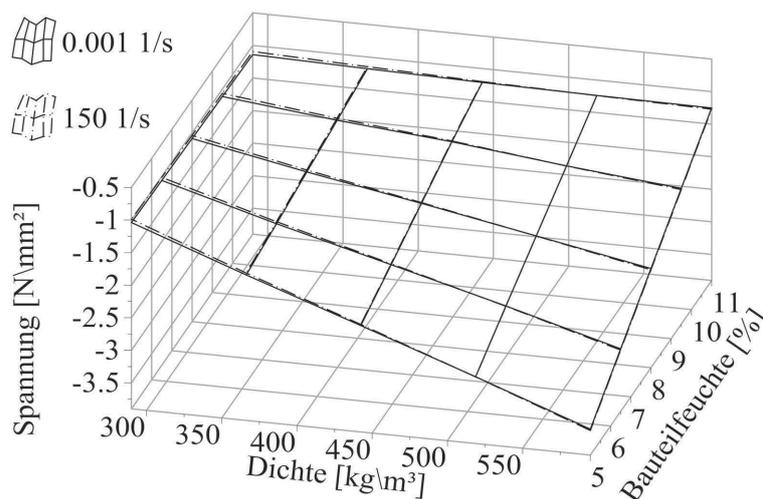


Abbildung 7.5: Technische Elastizitätsspannungsabhängigkeit unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

Unter Normklima und bei einer Dehnrate von 0,001 1/s beträgt die technische Elastizitätsspannung σ_{fd} für ungepresste Verpackungen $-1,060 \text{ N/mm}^2$. Bei einer Dehnrate von 0,001 1/s steigt die technische Elastizitätsspannung auf $-1,012 \text{ N/mm}^2$. Unter tropischen Bedingungen ist die technische Elastizitätsspannung mit $-1,078 \text{ N/mm}^2$ ($\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ 1/s}$) und $-1,030 \text{ N/mm}^2$ ($\dot{\epsilon} = 150 \text{ 1/s}$) im Vergleich zum Normklima höher.

Die Regressionsanalyse der technischen Elastizitätsdehnung unter Druckbelastung ϵ_{fd} liefert die Modellgleichung

$$\epsilon_{tEd} = 0,0000343 + 0,000000511 \cdot \dot{\epsilon} - 0,000552 \cdot f_B - 0,00000274 \cdot \rho \quad (7.4)$$

mit einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und einem Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,33.

Die Bauteilfeuchte und die Dichte wirken antiproportional auf die technische Elastizitätsdehnung ε_{tEd} . Die Dehnrage hat einen geringen proportionalen Einfluss. Wechselwirkungen werden keine detektiert (vgl. Abbildung 7.6).

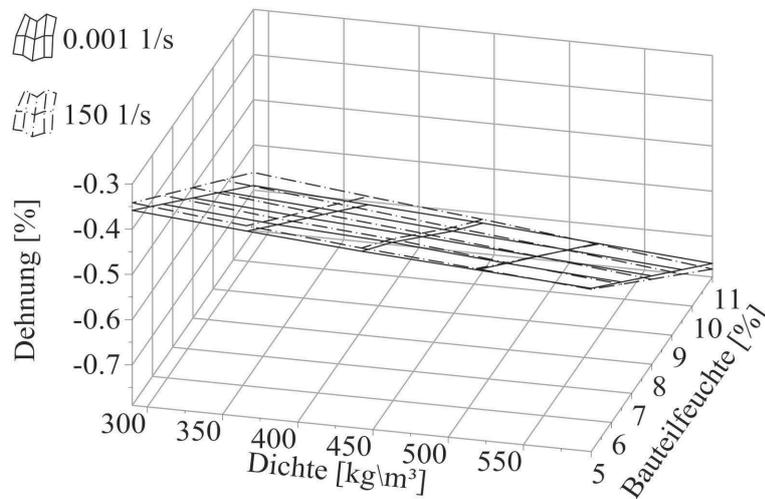


Abbildung 7.6: Technische Elastizitätsdehnungsabhängigkeit unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrage $\dot{\varepsilon}$

Die technische Elastizitätsdehnung ε_{fd} beträgt unter Normbedingungen bei einer Dehnrage von 0,001 1/s $-0,431\%$ und steigt auf $-0,412\%$ bei 150 1/s. Unter tropischen Bedingungen bleibt diese Dehnratenabhängigkeit bestehen, jedoch sinkt die technische Elastizitätsdehnung auf $-0,491\%$ bei 0,001 1/s bzw. $-0,470\%$ bei 150 1/s.

7.4 Plastizität

Zur Charakterisierung der Plastizität bzw. des Fließverhaltens dienen zusammen mit der technischen Dehngrenze und der Festigkeit zwei weitere Punkte des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung. Diese sind äquidistant zwischen der technische Elastizitäts- und Bruchdehnung platziert und mit Fließspannung bzw. -dehnung 1 und Fließspannung bzw. -dehnung 2 bezeichnet.

Die Modellgleichung für die unter Zugbelastung auftretende Fließspannung 1 σ_{fz1} :

$$\begin{aligned} \sigma_{fz1} = & 1,692 + 0,0188 \cdot \dot{\varepsilon} + 0,0252 \cdot \rho - 0,741 \cdot f_B \\ & + (\rho - 401,147) \cdot (f_B - 7,873) \cdot -0,00306 \\ & + (\dot{\varepsilon} - 52,027) \cdot (\rho - 401,147) \cdot 0,0000802 \end{aligned} \quad (7.5)$$

hat einen Signifikanzwert p von unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,86. Die Fließspannung 2 σ_{fz2} besitzt folgende Modellgleichung:

$$\begin{aligned}
\sigma_{fz2} = & 2,086 + 0,0126 \cdot \dot{\epsilon} + 0,0266 \cdot \rho - 0,703 \cdot f_B \\
& + (\rho - 401,147) \cdot (f_B - 7,873) \cdot -0,00304 \\
& + (\dot{\epsilon} - 52,027) \cdot (\rho - 401,147) \cdot 0,0000367
\end{aligned}
\tag{7.6}$$

mit einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und einem Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,81.

Die qualitativen Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen σ_{fz1} und σ_{fz2} und ihren Einflussgrößen sind gleich. Die Dehnrates und die Dichte bewirken eine proportionale Änderung beider Fließspannungen σ_{fz1} und σ_{fz2} . Die Bauteilfeuchte hingegen wirkt antiproportional. Die Wechselwirkung der Dichte mit der Bauteilfeuchte und mit der Dehnrates wirkt sich verstärkend auf die Zielgrößen σ_{fz1} und σ_{fz2} aus (vgl. Abbildung 7.7 und 7.8).

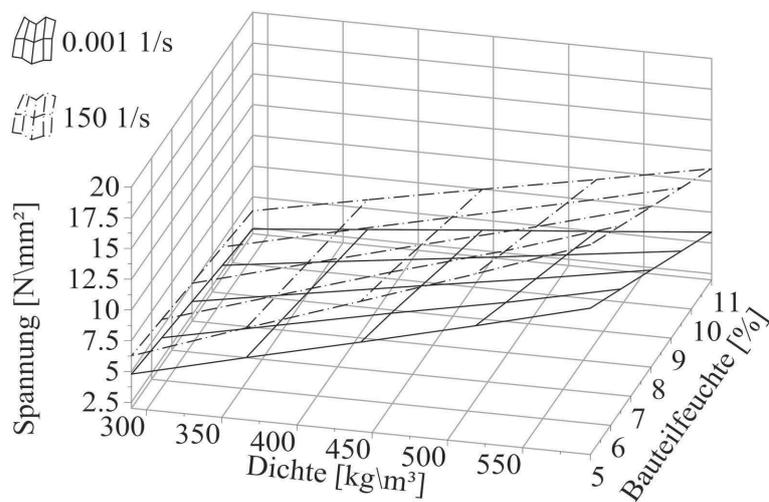


Abbildung 7.7: Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fz1} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\epsilon}$

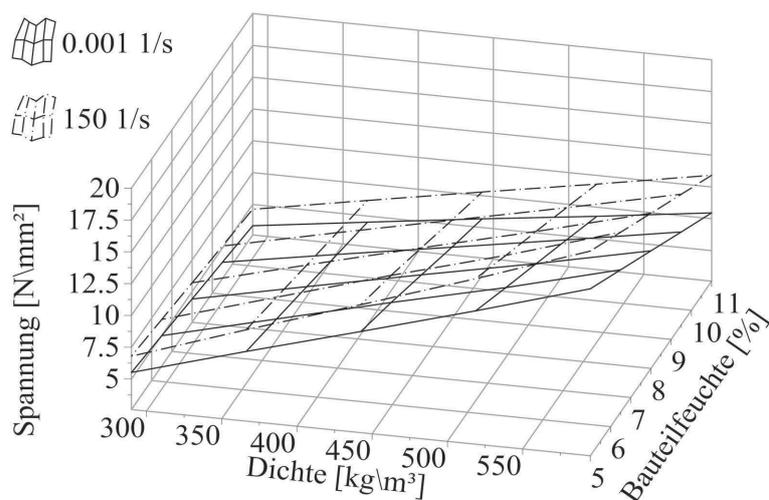


Abbildung 7.8: Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fz2} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\epsilon}$

Unter Normbedingungen betragen die Fließspannungen σ_{fz1} und σ_{fz2} bei $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s $\sigma_{fz1} = 4,260$ N/mm² und $\sigma_{fz2} = 5,043$ N/mm² bzw. nehmen bei $\dot{\epsilon} = 150$ 1/s bis auf $\sigma_{fz1} = 5,747$ N/mm² und $\sigma_{fz2} = 6,322$ N/mm² zu. Unter Tropenbedingungen sinken die Fließspannungen σ_{fz1} und σ_{fz2} auf $\sigma_{fz1} = 3,825$ N/mm² und $\sigma_{fz2} = 4,646$ N/mm² bei $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s. Bei höheren Dehnraten ($\dot{\epsilon} = 150$ 1/s) erhöhen sich die Fließspannungen σ_{fz1} und σ_{fz2} unter tropischen Klimabedingungen auf $\sigma_{fz1} = 5,311$ N/mm² und $\sigma_{fz2} = 5,925$ N/mm².

Die Fließdehnungen ϵ_{fz1} und ϵ_{fz2} folgen den Modellgleichungen:

$$\epsilon_{fz1} = 0,0120 + 0,0000717 \cdot \dot{\epsilon} - 0,0000112 \cdot \rho + 0,00288 \cdot f_B \quad (7.7)$$

mit einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,77 und

$$\epsilon_{fz2} = 0,0213 + 0,0000604 \cdot \dot{\epsilon} - 0,0000232 \cdot \rho + 0,00542 \cdot f_B \quad (7.8)$$

mit einem Signifikanzwert p von unter 0,0001 und einem Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,74.

Analog zu den Fließspannungen σ_{fz1} und σ_{fz2} nehmen auch die Fließdehnungen ϵ_{fz1} und ϵ_{fz2} proportional mit der Dehnrates zu. Auch die Bauteilfeuchte wirkt sich proportional auf die Fließdehnungen ϵ_{fz1} und ϵ_{fz2} aus. Die Dichte hingegen bewirkt eine Reduktion der Fließdehnungen ϵ_{fz1} und ϵ_{fz2} . Wechselwirkungen sind keine zu vermerken (vgl. Abbildung 7.9 und 7.10).

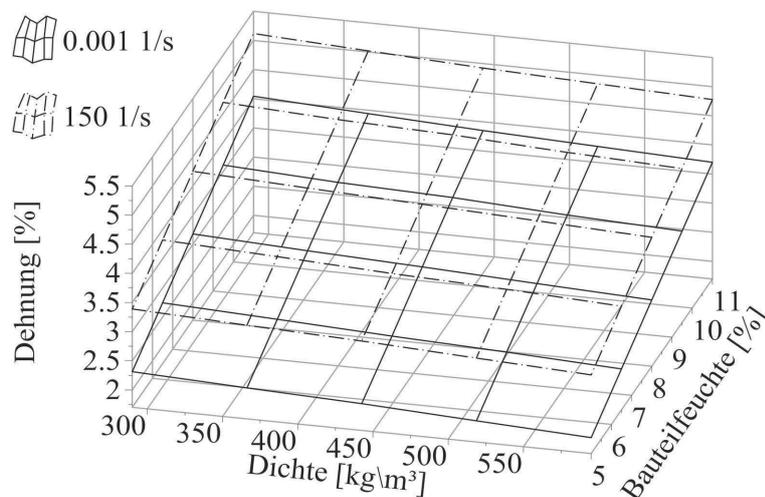


Abbildung 7.9: Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fz1} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\epsilon}$

Für ein Normklima ergeben sich Fließdehnungen $\epsilon_{fz1} = 2,693$ % und $\epsilon_{fz2} = 4,879$ % bei einer Dehnrates von 0,001 1/s. Mit zunehmender Dehnrates (150 1/s) erhöhen sich die Fließdehnungen auf $\epsilon_{fz1} = 3,769$ % und $\epsilon_{fz2} = 5,784$ %. Bei tropischem Klima nehmen die Fließdehnungen weiter zu. Bei $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s erreicht ϵ_{fz1} einen Wert von 3,007 % und ϵ_{fz2} 5,468 %. Unter dynamischer Belastung ($\dot{\epsilon} = 150$ 1/s) beträgt $\epsilon_{fz1} = 4,082$ % und $\epsilon_{fz2} = 6,373$ %.

Für Druckbelastungen ergibt sich für die Fließspannung σ_{fd1} der Zusammenhang

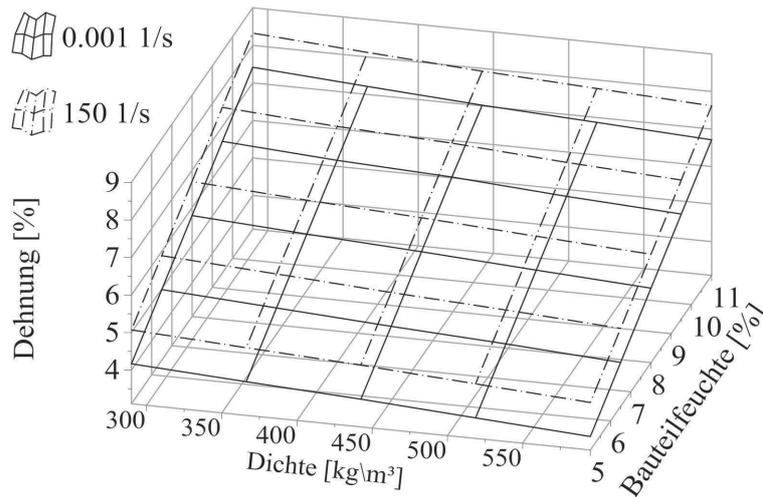


Abbildung 7.10: Abhängigkeit der Fließdehnung ε_{fz2} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\varepsilon}$

$$\begin{aligned} \sigma_{fd1} = & -1,272 - 0,000190 \cdot \dot{\varepsilon} + 0,292 \cdot f_B - 0,00906 \cdot \rho \\ & + (\dot{\varepsilon} - 652,609) \cdot (\rho - 446,168) \cdot -0,00000139 \\ & + (f_B - 8,020) \cdot (\rho - 446,168) \cdot 0,00181. \end{aligned} \quad (7.9)$$

Hierbei ist der Signifikanzwert p kleiner als 0,0001 und das Bestimmtheitsmaß r^2 beträgt 0,46. Der Zusammenhang der Fließspannung σ_{fd2} :

$$\begin{aligned} \sigma_{fd2} = & -1,493 - 0,000457 \cdot \dot{\varepsilon} + 0,385 \cdot f_B - 0,0117 \cdot \rho \\ & + (\dot{\varepsilon} - 652,609) \cdot (\rho - 446,168) \cdot -0,00000148 \\ & + (f_B - 8,020) \cdot (\rho - 446,168) \cdot 0,00245 \end{aligned} \quad (7.10)$$

besitzt einen Signifikanzwert p kleiner als 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,61.

Die Fließspannungen σ_{fd1} und σ_{fd2} sinken beide mit steigender Dehnrates und Dichte. Mit der Bauteilfeuchte hingegen steigen sie. Wechselwirkungen treten zwischen der Dichte und den beiden Einflussgrößen Bauteilfeuchte und Dehnrates auf. Der Anstieg der Bauteilfeuchte bewirkt einen abnehmenden Einfluss der Dichte auf die Zielgröße. Eine zunehmende Dichte hingegen vergrößert den Einfluss der Bauteilfeuchte und der Dehnrates auf die Zielgröße. Eine geringe Dichte eliminiert den Einfluss der Dehnrates und Bauteilfeuchte auf die Zielgröße nahezu (vgl. Abbildung 7.11 und 7.12).

Klimatische Normbedingungen bewirken in diesem Fall Fließspannungen σ_{fd1} von $-1,720 \text{ N/mm}^2$ und σ_{fd2} von $-1,957 \text{ N/mm}^2$ ($\dot{\varepsilon} = 0,001 \text{ 1/s}$) bzw. von $-1,716 \text{ N/mm}^2$ und $-1,991 \text{ N/mm}^2$ bei $\dot{\varepsilon} = 150 \text{ 1/s}$. Tropische Bedingungen bewirken aufgrund der niedrigen Dichte einen geringen Unterschied. Bei Dehnrates von $0,001 \text{ 1/s}$ ergeben sich Fließspannungen von $\sigma_{fd1} = -1,710 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{fd2} = -1,954 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\sigma_{fd1} = -1,706 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{fd2} = -1,988 \text{ N/mm}^2$ (150 1/s).

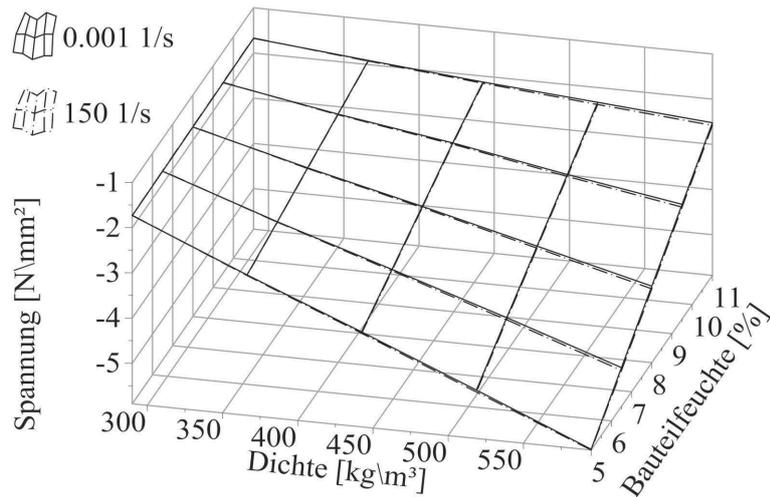


Abbildung 7.11: Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fd1} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

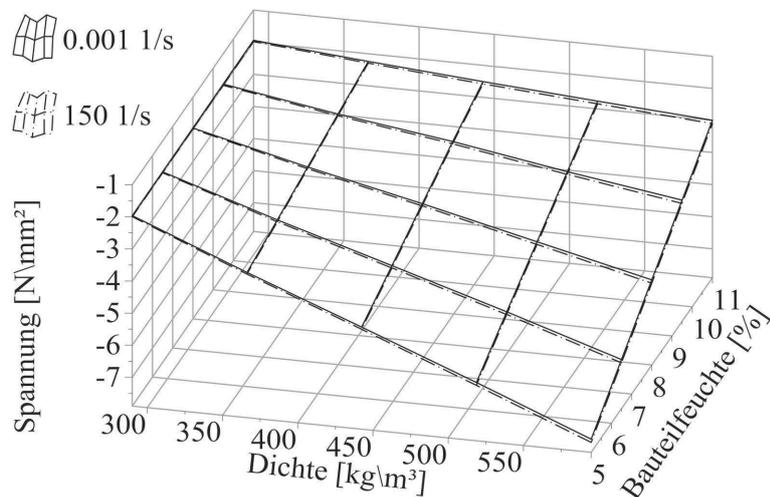


Abbildung 7.12: Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fd2} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

Die der Regressionsanalyse entstammenden Modelle für die Fließdehnungen unter Druckbelastung für ϵ_{fd1} und ϵ_{fd2} :

$$\epsilon_{fd1} = -0,00638 - 0,0000112 \cdot \dot{\epsilon} - 0,00117 \cdot f_B + 0,00000805 \cdot \rho \quad (7.11)$$

und

$$\epsilon_{fd2} = -0,0177 - 0,0000191 \cdot \dot{\epsilon} - 0,00148 \cdot f_B + 0,0000237 \cdot \rho \quad (7.12)$$

weisen beide einen Signifikanzwert p unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,54 auf.

Dehnrate und Bauteilfeuchte wirken hierbei fließdehnungssenkend. Nur die Dichte bewirkt einen proportionalen Zusammenhang zur Fließdehnung. Der Einfluss der Dichte und der Bauteilfeuchte

ist im Gegensatz zur Dehnrage als eher gering zu bezeichnen. Wechselwirkungen sind keine zu vermerken (vgl. Abbildung 7.13 und 7.14).

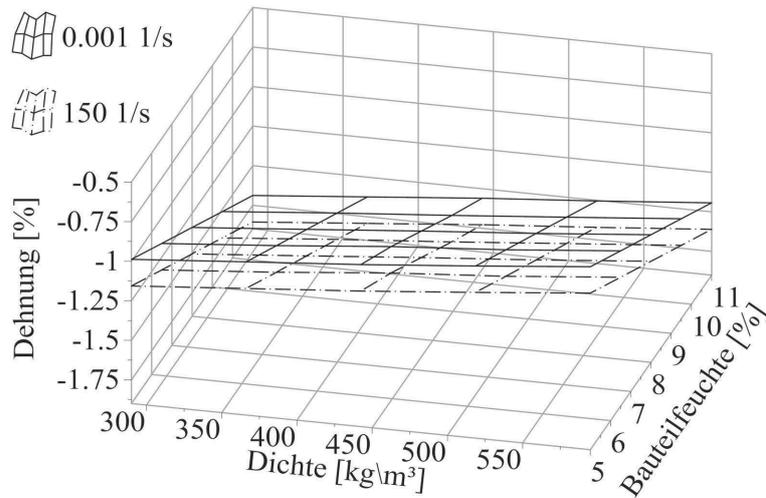


Abbildung 7.13: Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fd1} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrage $\dot{\epsilon}$

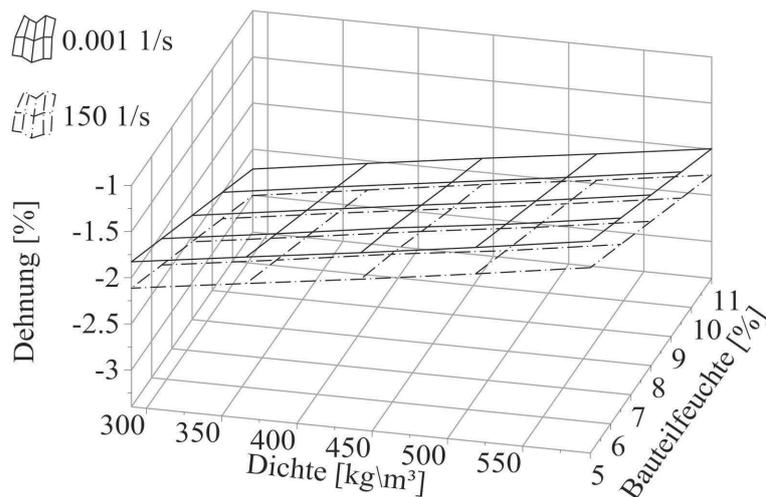


Abbildung 7.14: Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fd2} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrage $\dot{\epsilon}$

Die Werte der Fließdehnung bei Normklima betragen bei einer Dehnrage von 0,001 1/s $\epsilon_{fd1} = -1,142\%$ und $\epsilon_{fd2} = -2,022\%$. Bei einer Dehnrage von 150 1/s erhöhen sich die Fließdehnungen auf $\epsilon_{fd1} = -1,310\%$ und $\epsilon_{fd2} = -2,309\%$. Bei tropischem Klima erhöhen sich die Fließdehnungen. Bei $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s beträgt $\epsilon_{fd1} = -1,269\%$ und $\epsilon_{fd2} = -2,183\%$. Unter dynamischer Belastung $\dot{\epsilon} = 150$ 1/s ergibt sich $\epsilon_{fd1} = -1,436\%$ und $\epsilon_{fd2} = -2,470\%$.

7.5 Zug- und Druckfestigkeit

Da das betrachtete Faserformmaterial nahezu keine Entfestigung aufweist, versagte der Werkstoff nach Erreichen der Zugfestigkeit. Dies bedeutet bei Zugbelastung beispielsweise den Riss der Pro-

be durch Faser- oder Faserbindungsriß bzw. Faserabgleitungen. Unter Druckbelastung hingegen ist aufgrund des Matrixaufbaus eher eine Delamination zu erwarten.

Die Modellgleichung für die Zugfestigkeit σ_z :

$$\begin{aligned}\sigma_z = & 2,594 + 0,0109 \cdot \dot{\epsilon} + 0,0270 \cdot \rho - 0,758 \cdot f_B \\ & + (\rho - 401,147) \cdot (f_B - 7,873) \cdot -0,00324 \\ & + (\dot{\epsilon} - 52,027) \cdot (\rho - 401,147) \cdot 0,0000211\end{aligned}\quad (7.13)$$

besitzt einen Signifikanzwert p unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,83.

Dehnrates und Dichte wirken hierbei zugfestigkeitssteigernd. Die Bauteilfeuchte hingegen reduziert die Zugfestigkeit. Diese Trends ändern sich durch die Wechselwirkungen nicht. Die Wechselwirkung zwischen der Dichte und der Dehnrates sowie der Bauteilfeuchte wirkt verstärkend. Analog hierzu bewirkt die Dehnrates eine Steigerung des Einflusses der Dichte auf die Zugfestigkeit. Eine steigende Bauteilfeuchte hingegen reduziert den Einfluss der Dichte auf die Zugfestigkeit (vgl. Abbildung 7.15).

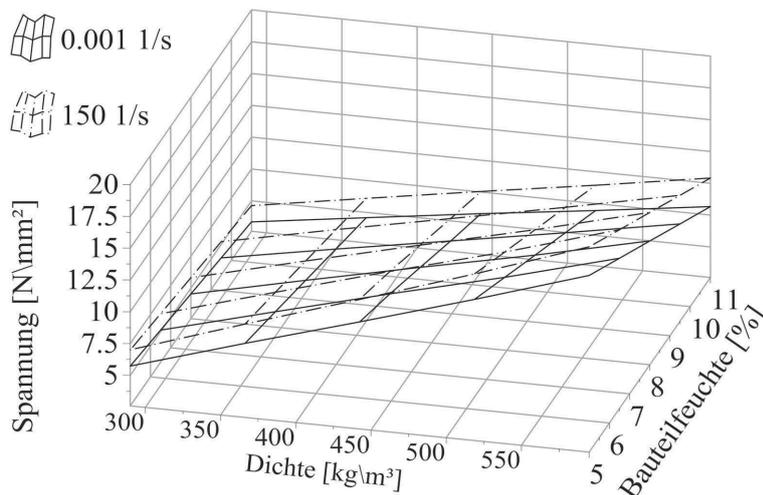


Abbildung 7.15: Abhängigkeit der Zugfestigkeit σ_z von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\epsilon}$

Ein Normklima ruft bei einer Dehnrates von 0,001 1/s eine Zugfestigkeit von 5,210 N/mm² hervor. Diese steigt bei Erhöhung der Dehnrates auf 150 1/s auf 6,487 N/mm². Tropische Klimabedingungen reduzieren die Zugfestigkeit auf 4,777 N/mm² bei 0,001 1/s und 6,054 N/mm² bei 150 1/s.

Die der Zugfestigkeit zugehörige Dehnung ϵ_z folgt der Modellgleichung:

$$\epsilon_z = 0,0306 + 0,0000490 \cdot \dot{\epsilon} - 0,0000352 \cdot \rho + 0,00796 \cdot f_B \quad (7.14)$$

mit einem Signifikanzwert p unter 0,0001 und einem Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,72$.

Ein Anstieg der Dehnrates bzw. Bauteilfeuchte erhöht auch ϵ_z . Eine zunehmende Dichte hingegen senkt die Zugfestigkeitsdehnung. Wechselwirkungen der Einflussgrößen untereinander sind nicht zu verzeichnen (vgl. Abbildung 7.16).

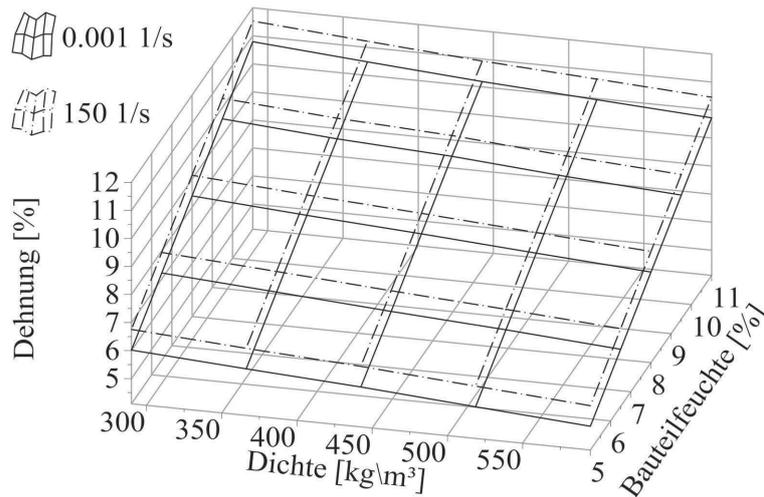


Abbildung 7.16: Abhängigkeit der Zugfestigkeitsdehnung ε_z von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrates $\dot{\varepsilon}$

Dem Normklima entsprechende Umgebungsklimabedingungen bewirken bei einer Dehnrates von 0,001 1/s eine Zugfestigkeitsdehnung von 7,064 %. Diese erhöht sich bei steigender Dehnrates (0,001 1/s) auf 7,799 %. Tropische Umgebungsklimabedingungen erhöhen ε_z auf 7,929 % (0,001 1/s) bzw. 8,664 % (150 1/s).

Unter Druckbelastung ergibt sich folgendes Modell für die Druckfestigkeit σ_d :

$$\begin{aligned} \sigma_d = & -1,241 - 0,000487 \cdot \dot{\varepsilon} + 0,411 \cdot f_B - 0,0138 \cdot \rho \\ & + (\dot{\varepsilon} - 652,609) \cdot (\rho - 446,168) \cdot -0,00000143 \\ & + (f_B - 8,020) \cdot (\rho - 446,168) \cdot 0,00290 \end{aligned} \quad (7.15)$$

wobei der Signifikanzwert p unter 0,0001 liegt und das Bestimmtheitsmaß r^2 0,72 beträgt.

Die Dichte und die Dehnrates bewirken eine Abnahme der Druckfestigkeit. Mit steigender Bauteilfeuchte hingegen nimmt die Druckfestigkeit zu. Eine zunehmende Dichte wirkt sich verstärkend auf den Einfluss der Bauteilfeuchte und der Dehnrates auf die Druckfestigkeit aus. Eine steigende Bauteilfeuchte hingegen reduziert den Einfluss der Dichte. Mit zunehmender Dehnrates verstärkt sich der Einfluss der Dichte. Analog zu allen anderen Spannungen eliminiert sich der Einfluss der Bauteilfeuchte und der Dehnrates auf die Druckspannung bei niedrigen Dichten fast vollständig (vgl. Abbildung 7.17).

Die Druckfestigkeit σ_d beträgt bei Normbedingungen $-2,018 \text{ N/mm}^2$ (0,001 1/s). Die Änderung bei dynamischer Belastung ist aufgrund der niedrigen Dichte gering. Für eine Dehnrates von 150 1/s erhöht sich die Druckfestigkeit lediglich auf $-2,058 \text{ N/mm}^2$. Unter tropischen Bedingungen findet eine weitere leichte Erhöhung statt. Hier erreicht die Druckfestigkeit $-2,063 \text{ N/mm}^2$ (0,001 1/s) bzw. $-2,102 \text{ N/mm}^2$ (150 1/s).

Abschließend wird die der Druckfestigkeit zugehörige Dehnung ε_d betrachtet. Das Modell

$$\varepsilon_d = -0,0266 - 0,0000269 \cdot \dot{\varepsilon} - 0,00181 \cdot f_B + 0,0000344 \cdot \rho \quad (7.16)$$

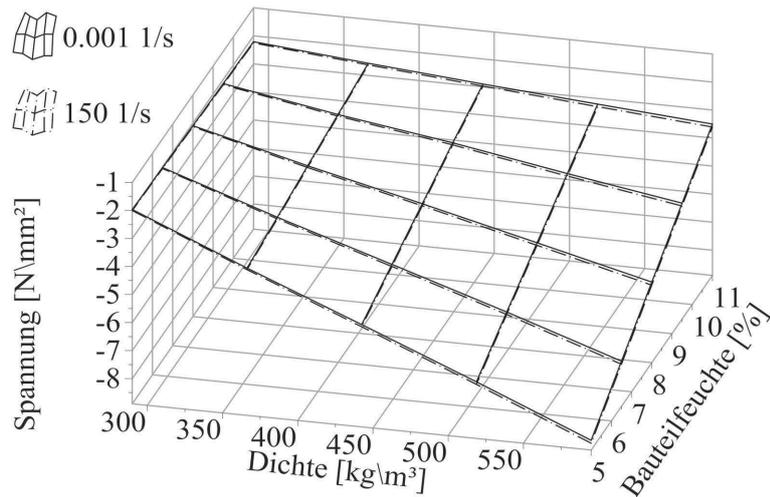


Abbildung 7.17: Abhängigkeit der Druckfestigkeit σ_d von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

besitzt einen Signifikanzwert p unter 0,0001 und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,56.

Dehnrate und Bauteilfeuchte weisen einen antiproportionalen Zusammenhang zu ϵ_d auf. Der Einfluss der Dehnrate ist hierbei stärker ausgeprägt. Die Dichte wirkt geringfügig verstärkend auf die der Druckfestigkeit zugehörigen Dehnung. Wechselwirkungen sind nicht zu vermerken (vgl. Abbildung 7.18).

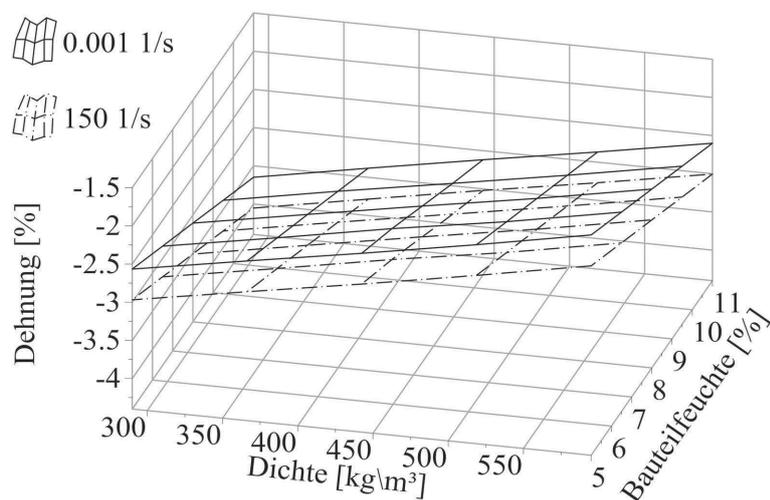


Abbildung 7.18: Abhängigkeit der Druckfestigkeitsdehnung ϵ_d von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$

Unter klimatischen Normbedingungen erreicht die Druckfestigkeitsdehnung ϵ_d eine Höhe von $-2,804\%$ (0,001 1/s) bzw. $-3,207\%$ (150 1/s). Diese sinkt unter tropischen Klimabedingungen auf $-2,804\%$ (0,001 1/s) bzw. $-3,207\%$ (150 1/s).

7.6 Spannungs-Dehnungsverhalten

Zusammenfassend ergeben sich aus der technische Elastizitätsgrenze, der Plastizität und der Festigkeit die in den Abbildungen 7.19a bis 7.20b dargestellten Zusammenhänge zwischen der Spannung und der Dehnung. Hierbei sind sowohl die Unterschiede im Bereich von Zug- und Druckbelastungen als auch die Abhängigkeiten von den Einflussgrößen klar zu erkennen.

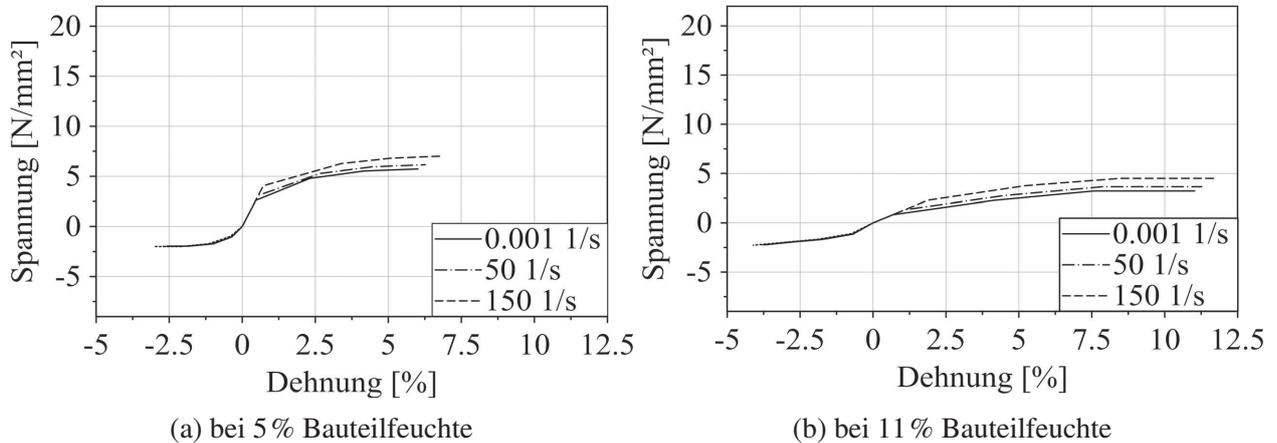


Abbildung 7.19: Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Abhängigkeit von der Dehnrage bei einer Dichte von 290 kg/m^3

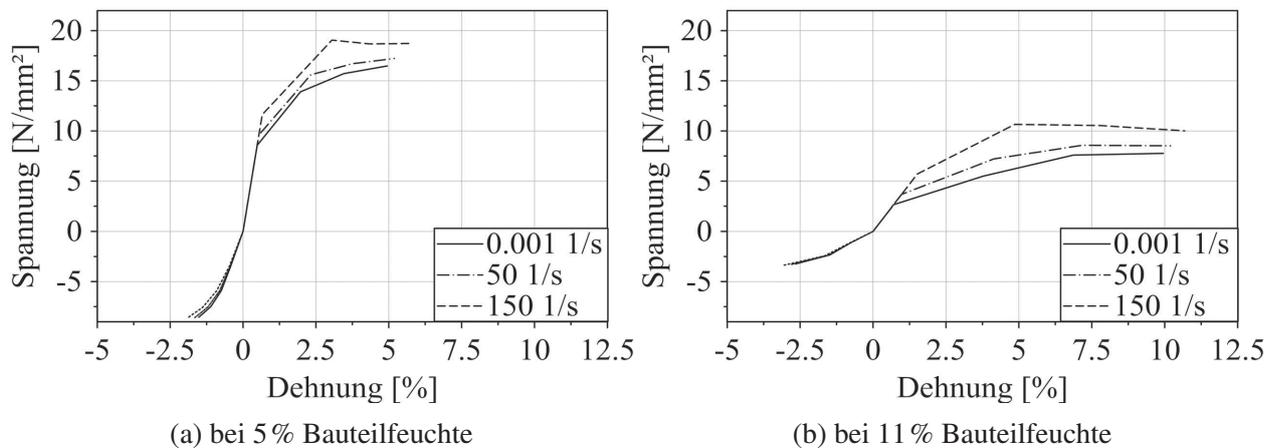


Abbildung 7.20: Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Abhängigkeit von der Dehnrage bei einer Dichte von 595 kg/m^3

8 Simulation

Nachdem in dem vorangegangenen Kapitel das Werkstoffverhalten charakterisiert und modelliert worden ist, erfolgt nun die Simulation. Hierzu wird zunächst eine geeignete Simulationsumgebung ausgewählt. Im Anschluss wird ein dem Materialverhalten entsprechendes Materialmodell gewählt, und die aus der Charakterisierung und Modellierung gewonnenen Daten werden der Simulation zugeführt.

Ziel ist es, das in Kapitel 7 erarbeitete Materialverhalten mittels der Simulation abbilden zu können und die Simulation mit der Modellierung abzugleichen.

8.1 Softwareauswahl

Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten und des nicht linearen Materialverhaltens (vgl. Kapitel 3.2) wird für die geplanten Simulationen die Software *LS-Dyna R8* (*Livermore Software Technology Corporation*, Livermore, California, USA) mit expliziter Zeitintegration verwendet. Diese verfügt über 276 Materialien mit unterschiedlichsten Materialeigenschaften bzw. Kombinationen derer. Hieraus wird ein Modell ausgewählt, welches dem Materialverhalten des Faserformmaterials am ähnlichsten ist.

8.2 Materialmodellauswahl

Zur Auswahl des Materialmodells werden Kriterien festgelegt, anhand derer die Anwendbarkeit der vorhandenen Materialmodelle für das vorhandene Materialverhalten bewertbar ist. Der gewählte FEM-Solver *LS-Dyna* verfügt über 243 Materialmodelle [Liv16]. Diese sind nach den folgenden Materialeigenschaften klassifiziert:

- Dehnratenabhängigkeit
- Versagenskriterium
- Zustandsgleichung
- Thermale Effekte
- Anisotropie/Orthotropie
- Schädigung
- Zug-/Druckanisotropie

Aus dem Stand der Technik und den Ergebnissen der Materialcharakterisierung ist das feuchtigkeitsabhängige Materialverhalten bekannt. Da die Ergebnisse aus Kapitel 5.5.4 jedoch eine im Vergleich zur Dauer der dynamischen Versuche träge Änderung der Probenfeuchte hervorbrachten, sind die Änderungen innerhalb eines Versuchs als gering zu bezeichnen. Konkret ergab sich beispielsweise für eine Änderung des Klimas um 50 % der relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % auf 30 % bei ca. 20 °C eine anfängliche Änderung der Bauteilfeuchte um 0,0022 %/s. Bei einem maximalen Einfluss der Feuchtigkeit auf die Dehnung, bezogen auf die Feuchtigkeitsänderung von ca. 14,71 %/%, ergibt sich somit eine Änderung der jeweiligen Dehnung um maximal 0,0324 %/s. Daher wird dieser Fehler vernachlässigt und die Feuchte während des Versuchs als konstant angenommen. Somit hat die Feuchte keinerlei Einfluss auf die Simulation und soll daher nicht in die FEM-Simulation mit einfließen. Vielmehr stellen die gewonnenen Ergebnisse der Feuchtigkeitsabhängigkeit (vgl. Kapitel 7) die grundlegenden Parametersätze dar, auf denen die FEM-Simulation aufgebaut wird.

Bezüglich der Richtungsabhängigkeit des Materialverhaltens zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 7.1 eine Isotropie in der Ebene des Materials. Begründet ist diese durch die zufällig orientierten Fasern in der Ebene. In Normalenrichtung ist aufgrund der in Ebenenrichtung liegenden Fasern eine Anisotropie zu erwarten, so dass für das Materialverhalten eine transversale Isotropie angenommen wird. Aus den in Kapitel 4.2 genannten Gründen können auch keinerlei Druckkräfte in Normalenrichtung auftreten, so dass die Anisotropie in Normalenrichtung vernachlässigt wird und ein isotropes Materialmodell Anwendung findet.

Aufgrund der ausgeschlossenen Belastungen in Normalenrichtung (vgl. Kapitel 4.2) kann ein ebener Spannungszustand angenommen werden. Zusätzlich handelt es sich herstellungsbedingt bei Konstruktivpolstern aus Faserform um dünnwandige Elemente. Ihre Dicke ist um ein Vielfaches kleiner als ihre Längen in Ebenenrichtung. Daher bietet es sich an, Flächenelemente anstatt Volumenelemente zur Simulation zu verwenden, da diese zusätzlich den Rechenaufwand reduzieren.

Thermische Abhängigkeiten des Materialverhaltens sind nicht bekannt und sollten daher keinerlei Anwendung in der FEM finden. Auch über Schädigungsmechanismen existieren zu wenig Kenntnisse, um diese in die Simulation einfließen lassen zu können. Daher bleibt als zu berücksichtigende Kriterien die Möglichkeit der Simulation der Dehnratenabhängigkeit, des Materialversagens und der Zug-Druck-Anisotropie.

Anhand dieser Auswahlkriterien ergeben sich die Materialien mit den Nummern 9 und 124. Das Material MAT_009 (MATT_NULL) ist für Flüssigkeiten und hydrodynamische Materialien vorgesehen. Material 124 (*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION) ist für die Simulation von Metallen und Kunststoffen entwickelt worden und somit besser für den geplanten Einsatzzweck geeignet.

Dieses Materialmodell bietet die Möglichkeit, ein anisotropes Zug- / Druckverhalten simulieren zu können. Das Materialmodell beruht jedoch auf der *von Mises*-Hypothese. Diese errechnet beim ein- und mehrachsigen Spannungszustand aus den für die Gestaltänderung erforderlichen Arbeiten eine Vergleichsspannung. Diese Modellierung des Materialverhaltens basiert auf den Erkenntnissen, die aus dem Werkstoff Stahl mit dessen eigentümlichen Eigenschaften, wie z. B. der Verfestigung bei Verformung, hervorgehen und ist daher nur eine Annäherung an den hier zu betrachtenden Faserwerkstoff.

Bei dem in *LS-DYNA* integrierten Materialmodell 124 handelt es sich um ein isotropes Materialmodell, welches elastische und plastische Eigenschaften abbilden kann. Zusätzlich können unter-

schiedliche Fließkurven für Zug- und Druckbelastungen hinterlegt werden, womit eine Zug-Druck Anisotropie abbildbar ist. Das Versagen des Werkstoffs ist dehnratenabhängig und isotrop simulierbar. Der Dehnrateneinfluss auf das Materialverhalten ist mittels einer Skalierung der Fließkurve realisiert.

8.3 Bestimmung der modellspezifischen Werkstoffkennwerte

Zur Verwendung des Materialmodells 124 müssen die Materialkennwerte zum Teil den benötigten Eingaben des Materialmodells entsprechend angepasst werden. Einige Daten, wie die Querkontraktionszahl und die Dichte, können direkt in das Modell implementiert werden. Andere Daten, wie die Elastizitätsmoduln, die Plastizität und das Versagen, müssen zuvor umgerechnet werden.

Zur Bildung der Parametersätze werden für die Einflussgrößen Dichte und Bauteilfeuchte exemplarisch die jeweiligen Randwerte der durchgeführten Untersuchungen gewählt. Es ergeben sich somit vier Modellparametersätze (vgl. Tabelle 8.1).

Tabelle 8.1: Zu validierende Parametersätze

| Parametersatz | Bauteilfeuchte f_B | Dichte ρ |
|---------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 5 % | 290 kg/m ³ |
| 2 | 5 % | 595 kg/m ³ |
| 3 | 11 % | 290 kg/m ³ |
| 4 | 11 % | 595 kg/m ³ |

8.3.1 Querkontraktionszahl

Die Querkontraktionszahl ist in Kapitel 7.2 mit 0,196 ermittelt worden. Diese kann ohne weitere Umformung der Simulation zugeführt werden.

8.3.2 Elastizität

Die Elastizität wird nach Gleichung 2.3.1 durch den Elastizitätsmodul charakterisiert. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten der Spannung und der Dehnung der technischen Elastizitätsgrenze (vgl. Kapitel 4.1.1).

Tabelle 8.2: Elastizitätsmodule

| Bauteilfeuchte f_B | Dichte ρ | Elastizitätsmodul E | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Zug | Druck |
| [%] | [kg/m ³] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 5 | 290 | 562 | 289 |
| 5 | 595 | 1761 | 817 |
| 11 | 290 | 122 | 166 |
| 11 | 595 | 376 | 150 |

Aufgrund der Zug-Druck-Anisotropie werden die Elastizitätsmoduln für Zug- und Druckbelastungen getrennt ermittelt. Es werden folglich jeweils zwei Elastizitätsmoduln für jeden Parametersatz bestimmt (vgl. Tabelle 8.2).

8.3.3 Plastizität

Um die Plastizität in das Material 124 einfließen lassen zu können, wird die Fließspannung als Funktion der plastischen Dehnung ausgedrückt. Hierzu wird für jeden Parametersatz die plastische Dehnung für Druck- und für Zugbelastungen bestimmt.

Allgemein bestimmt der Elastizitätsmodul den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung im elastischen Bereich. Um den plastischen Anteil einer Dehnung zu berechnen, wird der elastische Anteil subtrahiert. Grafisch wird hierzu eine parallel zum Elastizitätsmodul angeordnete Gerade durch den zu betrachtenden Punkt gelegt. Im Anschluss kann die plastische Dehnung als Entfernung des Schnittpunkts zwischen der erzeugten Gerade und der X-Achse und dem Koordinatenursprung abgelesen werden.

Numerisch wird die Geradengleichung bestimmt, welche durch den zu betrachtenden Punkt ε_1 , σ_1 verläuft, und die Steigung des Elastizitätsmoduls E aufweist:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + b. \quad (8.1)$$

Bei gegebenem ε_1 und σ_1 kann b eindeutig bestimmt werden. Gesucht ist der plastische Dehnungsanteil $\varepsilon_{\text{plast}}$

$$\varepsilon_{\text{plast}} = \frac{\sigma - b}{E}, \quad (8.2)$$

Tabelle 8.3: Plastische Dehnungen und Fließspannungen unter Zugbelastung

| Bauteil- feuchte | Dichte ρ [kg/m ³] | Dehn- rate $\dot{\varepsilon}$ [1/s] | plast. Dehnung | | | Fließspannung | | Ver- sagen σ_z [N/mm ²] |
|---------------------|--|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|--|--|---|
| | | | ε_{pz1} [%] | ε_{pz2} [%] | ε_z [%] | σ_{pz1} [N/mm ²] | σ_{pz2} [N/mm ²] | |
| 5 | 290 | 0,001 | 1,46 | 3,18 | 5,00 | 4,788 | 5,523 | 5,734 |
| 5 | 290 | 50 | 1,73 | 3,41 | 5,17 | 5,283 | 5,949 | 6,160 |
| 5 | 290 | 150 | 2,27 | 3,86 | 5,50 | 6,274 | 6,802 | 7,011 |
| 5 | 595 | 0,001 | 1,18 | 2,57 | 4,01 | 13,895 | 15,717 | 16,480 |
| 5 | 595 | 50 | 1,44 | 2,81 | 4,21 | 15,613 | 16,703 | 17,228 |
| 5 | 595 | 150 | 1,97 | 3,30 | 4,62 | 19,051 | 18,675 | 18,723 |
| 11 | 290 | 0,001 | 2,26 | 4,92 | 8,37 | 2,267 | 3,227 | 3,229 |
| 11 | 290 | 50 | 2,21 | 4,87 | 8,26 | 2,762 | 3,653 | 3,654 |
| 11 | 290 | 150 | 2,12 | 4,77 | 8,05 | 3,753 | 4,506 | 4,506 |
| 11 | 595 | 0,001 | 2,32 | 4,85 | 7,89 | 5,495 | 7,584 | 7,767 |
| 11 | 595 | 50 | 2,23 | 4,89 | 7,93 | 7,214 | 8,570 | 8,514 |
| 11 | 595 | 150 | 2,03 | 4,97 | 8,02 | 10,651 | 10,542 | 10,009 |

der sich durch Einsetzen von $\sigma = 0$ und b aus Gleichung 8.1 in Gleichung 8.2 ergibt:

$$\varepsilon_{\text{plast}} = -\frac{b}{E} = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E}. \quad (8.3)$$

Hieraus ergeben sich die in Tabelle 8.3 und Tabelle 8.4 aufgeführten Werte für die plastische Dehnung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung.

Tabelle 8.4: Plastische Dehnungen und Fließspannungen unter Druckbelastung

| Bauteil- feuchte | Dichte ρ | Dehn- rate $\dot{\varepsilon}$ | plast. Dehnung | | | Fließspannung | | Ver- sagen σ_z |
|---------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| | | | ε_{Pz1} | ε_{Pz2} | ε_z | σ_{Pz1} | σ_{Pz2} | |
| f_B [%] | [kg/m ³] | [1/s] | [%] | [%] | [%] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 5 | 290 | 0,001 | -0,390 | -1,150 | -1,887 | -1,732 | -1,962 | -1,964 |
| 5 | 290 | 50 | -0,446 | -1,241 | -2,017 | -1,731 | -1,973 | -1,977 |
| 5 | 290 | 150 | -0,559 | -1,425 | -2,277 | -1,728 | -1,995 | -2,004 |
| 5 | 595 | 0,001 | -0,023 | -0,189 | -0,469 | -5,885 | -7,494 | -8,554 |
| 5 | 595 | 50 | -0,077 | -0,280 | -0,600 | -5,905 | -7,528 | -8,589 |
| 5 | 595 | 150 | -0,183 | -0,463 | -0,860 | -5,944 | -7,595 | -8,659 |
| 11 | 290 | 0,001 | -0,714 | -1,589 | -2,364 | -1,674 | -1,942 | -2,223 |
| 11 | 290 | 50 | -0,771 | -1,677 | -2,490 | -1,672 | -1,953 | -2,236 |
| 11 | 290 | 150 | -0,884 | -1,855 | -2,743 | -1,670 | -1,976 | -2,262 |
| 11 | 595 | 0,001 | -0,028 | -0,188 | -0,488 | -2,359 | -2,780 | -3,256 |
| 11 | 595 | 50 | -0,030 | -0,261 | -0,599 | -2,379 | -2,814 | -3,291 |
| 11 | 595 | 150 | -0,036 | -0,406 | -0,821 | -2,419 | -2,882 | -3,361 |

Dehnratenabhängigkeit des plastischen Dehnungsanteils

Das Material 124 bietet die Möglichkeit, den plastischen Dehnungsanteil in Abhängigkeit von der Dehnraten zu skalieren. Es ist möglich, den Skalierungsfaktor in Abhängigkeit von der Dehnraten zu verändern. Hierzu stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder wird die Skalierung anhand des Cowper-Symonds-Modells [CS57] oder durch separate Skalierungskurven definiert. Da die Anwendung des Cowper-Symonds-Modells im Material 124 jedoch keine Zug-Druck-Anisotropie zulässt, wird die Möglichkeit der Skalierungskurven gewählt.

Da die dehnratenabhängigen Spannungs-Dehnungs-Kurven keine exakte Proportionalität untereinander aufweisen, wird eine Grundkurve bei einer mittleren Dehnraten von 75 1/s als Basis verwendet. Nun wird der Proportionalitätsfaktor bestimmt, bei dem die Summe der Abweichungen zwischen den aus Kapitel 7 bekannten Spannungswerten und den aus der skalierten Grundkurve errechneten Spannungswerten zu null wird. Die errechneten Skalierungsfaktoren für Zug- und Druckbelastung sind in Tabelle 8.5 aufgeführt.

Tabelle 8.5: Dehnratenabhängige Skalierungsfaktoren der Fließspannung

| Bauteil- feuchte | Dichte ρ [kg/m ³] | Dehn- rate $\dot{\epsilon}$ [1/s] | Skalierungsfaktor | |
|---------------------|--|--|-------------------|-------|
| | | | Zug | Druck |
| 5 | 290 | 0,001 | 0,880 | 0,990 |
| 5 | 290 | 150 | 1,118 | 1,012 |
| 5 | 595 | 0,001 | 0,880 | 0,994 |
| 5 | 595 | 150 | 1,123 | 1,006 |
| 11 | 290 | 0,001 | 0,790 | 0,992 |
| 11 | 290 | 150 | 1,207 | 1,010 |
| 11 | 595 | 0,001 | 0,810 | 0,984 |
| 11 | 595 | 150 | 1,182 | 1,016 |

8.3.4 Versagen

Zur Implementierung des Versagens in das Materialmodell 124 wird analog zu Kapitel 8.3.3 für jeden Parametersatz die Zug- und Druckfestigkeit als Funktion der plastischen Dehnung ausgedrückt (vgl. Tabelle 8.3 und Tabelle 8.4).

Dehnratenabhängigkeit des Versagens

Zur Implementierung des dehnratenabhängigen Versagensverhaltens bietet das Material 124 die Möglichkeit, die plastische Dehnung in Abhängigkeit von der Dehnratenrate als Kurve zu hinterlegen. Dies kann jedoch nur isotrop geschehen. Bei Zugversuchen nimmt nach der Zugfestigkeit die ertragbare Spannung abrupt ab, und es kommt zum Materialversagen. Unter Druckbelastung nimmt die Spannung nach der Druckfestigkeit jedoch nur leicht ab. Daher kann unter Druckbelastungen hinter der Druckfestigkeit nicht von einem Versagen gesprochen werden. Folglich ist es nicht sinnvoll, unter Druckbelastung die Versagensgrenze in die Nähe der Druckfestigkeit zu platzieren. Da es schwierig ist, die Versagensgrenze unter Druckbelastung eindeutig festzulegen, hingegen die Versagensdehnung unter Zugbelastung klar definiert ist und zusätzlich Material 124 keine Zug-Druck-Anisotropie zulässt, findet nur das Versagensverhalten unter Zugbelastung in dem Parametersatz Anwendung. Eine Überprüfung, ob bei dieser Vereinfachung Druckfestigkeiten außerhalb des Versagens auftreten, fällt negativ aus. Um zu verhindern, dass durch simulationsprogrammbedingte Extrapolation der Spannung über die Druckfestigkeit hinaus die Druckspannung weiter zunimmt, wird ein weiterer Spannungswert dem Parametersatz hinzugefügt. Dieser ist identisch mit der Druckfestigkeit, so dass bei einer Extrapolation der Spannungswert konstant bleibt.

Die dehnratenabhängige Versagensgrenze entspricht folglich der plastischen Dehnung ϵ_z , die zum Zeitpunkt der Zugfestigkeit vorhanden ist (vgl. Tabelle 8.3).

8.4 Durchführung der Simulation

Die nun ermittelten Parametersätze werden in Form von Materialkarten für die Simulation hinterlegt. Die Geometrie der Zug- und Druckversuche wird maßstäblich und in Form eines Shell-Elements nachgebildet. Es werden jeweils für Zug- und für Druckversuche Simulationen mit allen Parametersätzen durchgeführt. Das Shell-Element wird in der Simulation mit drei exemplarischen Dehnraten (0,001 1/s, 50 1/s und 150 1/s) belastet. Aus den Simulationsergebnissen werden die Zusammenhänge zwischen der in der Probe vorherrschenden Spannung und der plastischen Dehnung extrahiert und der Validierung zugeführt.

9 Validierung

Die Sinnhaftigkeit einer Simulation ist nur dann sichergestellt, wenn eine ausreichende Realitätsnähe gegeben ist. Hierzu dient ein Vergleich der Simulation mit der Modellierung in Form einer Validierung. Hierbei wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Simulation und Modellierung miteinander verglichen. Abschließend erfolgt eine Abschätzung der Unsicherheiten mit dem Ziel, diese durch die Einführung eines Sicherheitsfaktors bei der Auslegung von Verpackungen berücksichtigen zu können.

9.1 Angleichung der Simulationsdaten an die Modellierungsdaten

Da die wahre Gesamtdehnung nicht als Ergebnis aus der Simulation extrahierbar ist, muss diese zur besseren Vergleichbarkeit mit der Modellierung aus den vorhandenen Daten berechnet werden. Hierzu wird die wahre Dehnung aus dem in Gleichung 6.48 beschriebenen Zusammenhang zwischen technischer und wahrer Dehnung berechnet:

$$\varepsilon_W = \ln \left(1 + \frac{v_{\text{Vert}}}{l_0} \right). \quad (9.1)$$

Die Spannung kann ohne Umrechnung der Simulation entnommen und mit der Modellierung verglichen werden.

9.2 Parametersatz 1

Parametersatz 1 beinhaltet eine Bauteilfeuchte von 5%. Dies entspricht nach Gleichung 5.30 bei einer Lufttemperatur von 23 °C einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 32%. Die Dichte beträgt 290 kg/m³, was in der Praxis einem ungespresten Konstruktivpolster entspricht. Mit diesem Parametersatz werden der Druck- und der Zugversuch simuliert (vgl. Abbildung 9.1).

Unter Druckbelastung kann die Simulation die Modellierung gut abbilden. Hier liegt die Abweichung zwischen Simulations- und Modellspannung bei maximal 12,7% bei einer Dehnung von -1%. Auch die Zugbelastung kann gut abgebildet werden. Hier bewirkt jedoch die modellbedingte Skalierung der Fließspannung eine Abweichung. Bei einer Dehnrage von 150 1/s und einer Dehnung von 2,8% ist die Spannungsabweichung maximal. Sie beträgt 13,7%. Die Versagensgrenze wird mit einer maximalen Abweichung von 2,5% sehr gut abgebildet.

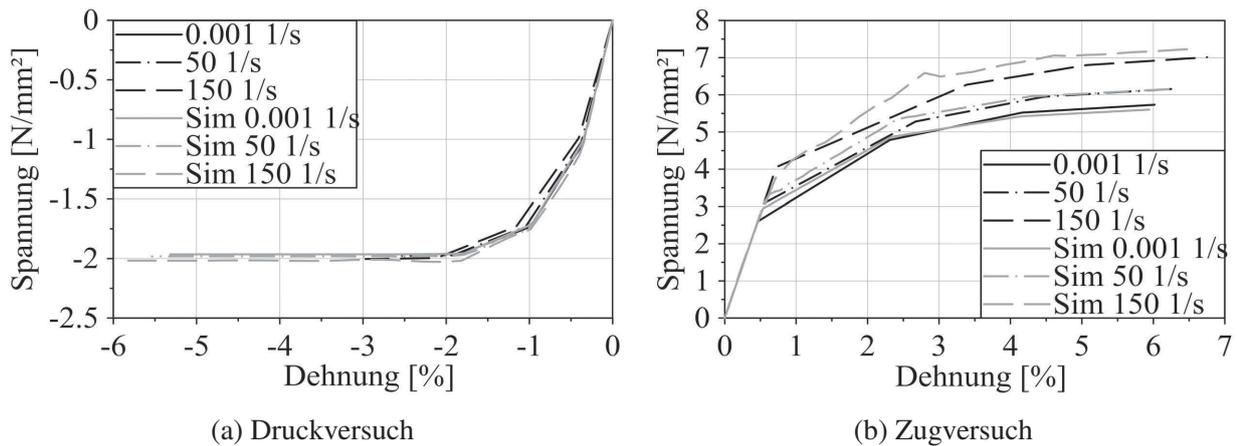


Abbildung 9.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 5% und einer Dichte von 290kg/m^3

9.3 Parametersatz 2

Durch Parametersatz 2 wird im Gegensatz zum Parametersatz 1 ein gepresstes Material mit einer Dichte von 595kg/m^3 charakterisiert (vgl. Abbildung 9.2). Die Bauteilfeuchte von 5% bleibt bestehen.

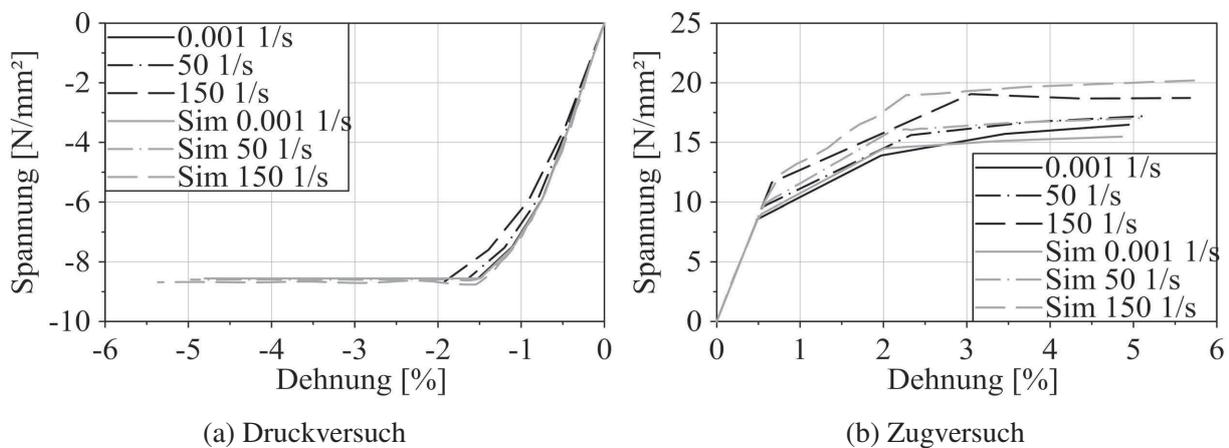


Abbildung 9.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 5% und einer Dichte von 595kg/m^3

Bei einer Druckbelastung ist deutlich die Dehnratenabhängigkeit der Modelldehnung zu erkennen. Da modellbedingt nur eine Skalierung der Spannung möglich ist, kann diese Abhängigkeit nicht abgebildet werden. Mit einer maximalen Spannungsabweichung von 10,3% bei einer Dehnung von $-1,5\%$ ist die Anpassungsgüte aber immer noch als gut zu bezeichnen.

Unter Zugbelastung beträgt die maximale Abweichung 13,6% bei 2,3% und einer Dehnrate von 150 1/s. Die Simulation der Versagensgrenze ist mit einer Abweichung von 1,7% als sehr gut zu bezeichnen.

9.4 Parametersatz 3

Die Bauteilfeuchte in Parametersatz 3 beträgt 11 % (vgl. Abbildung 9.3). Bei einer Temperatur von 23 °C stellt sich diese Bauteilfeuchte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 90 % ein. Die Dichte entspricht mit 290kg/m^3 einem ungespressten Zustand.

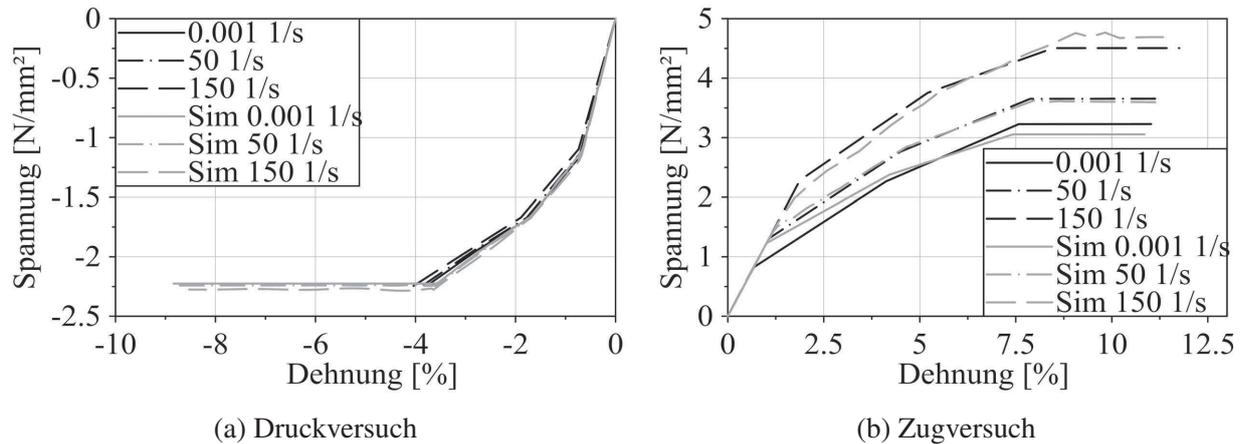


Abbildung 9.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 11 % und einer Dichte von 290kg/m^3

Bei der Simulation der Druckbelastung ist die Variation der Dehnung gering. Die maximale Abweichung beträgt 6,2 % bei einer Dehnung von $-2,1\%$. Unter Zugbelastung sind oberhalb einer Dehnung von 4 % geringe Abweichungen zu verzeichnen, da die Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung eher einer Proportionalität entspricht. Daher ergibt sich bei Dehnungen über 7 % eine maximale Abweichung von 5,3 %. Wird jedoch der Bereich des Fließbeginns betrachtet, so stellt sich bei einer Dehnung von 1 % eine Abweichung von bis zu 29 % ein. Diese hohe Abweichung ist in der geringen Bezugsspannung begründet. Die Versagensgrenze wird unter Zugbelastung mit einem Fehler von 3,8 % abgebildet.

9.5 Parametersatz 4

Parametersatz 4 beinhaltet eine Bauteilfeuchte von 11 %. Die Dichte beträgt kompressionsbedingt 595kg/m^3 . Hiermit werden die letzten Simulationen durchgeführt (vgl. Abbildung 9.4).

Die Simulation mit Parametersatz 4 weist unter Druckbelastung die größte Abweichung (9,2 %) bei einer Dehnung von $-1,5\%$ auf. Unter Zugbelastung stellt sich die größte Abweichung von 20,5 % nahe des Fließbeginns bei einer Dehnung von 0,9 % ein. Das Versagen unter Zugbelastung kann mit einem maximalen Fehler von 1,9 % bei einer Dehnrate von 0,001 1/s sehr gut abgebildet werden.

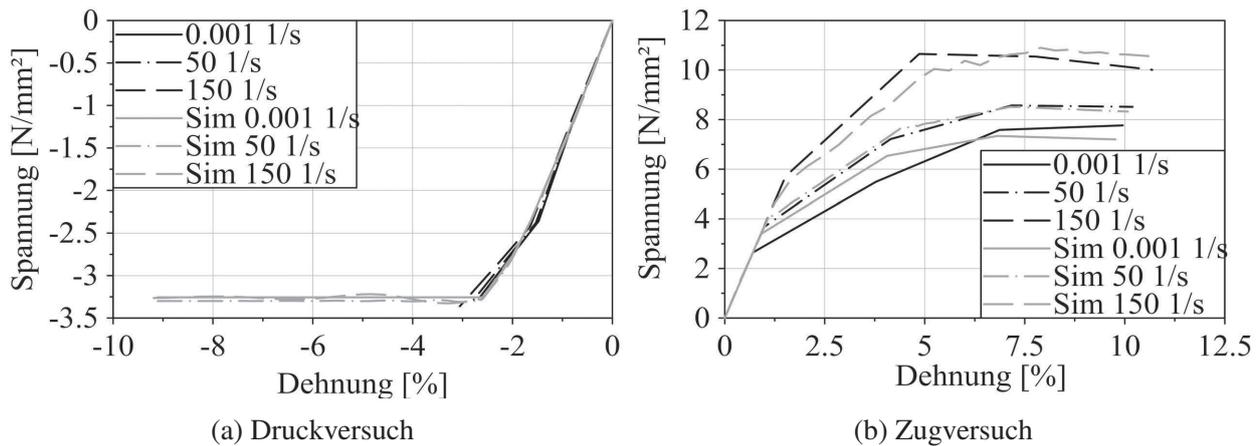


Abbildung 9.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 11 % und einer Dichte von 595 kg/m^3

9.6 Bewertung der Simulationsergebnisse

Die Validierung der Simulation kann eine gute bis sehr gute Abbildung des Materialverhaltens nachweisen. Das Spannungs-Dehnungsverhalten kann hierbei gut abgebildet werden. Als Grund für die auftretenden Abweichungen ist hierbei die Skalierung der Fließspannung durch das Materialmodell zu sehen. Durch eine Parameteranpassung kann die Simulation jedoch weitestgehend den Modelldaten angepasst werden. Die Versagensgrenze kann sehr gut abgebildet werden, da diese ausschließlich durch die Abhängigkeit von der Dehnrates parametrisiert wird.

9.7 Sicherheitsfaktor

Ein Sicherheitsfaktor S ist klassischerweise ein Maß für das Verhältnis zwischen ertragbarer Belastung und vorhandener Belastung:

$$S = \frac{\text{ertragbare Belastung}}{\text{vorhandene Belastung}}. \quad (9.2)$$

Durch die korrekte Wahl eines Sicherheitsfaktors werden z. B. Inhomogenitäten des Werkstoffs berücksichtigt, die ansonsten zu einem verfrühten Versagen des Bauteils führen. Daher muss dieser alle potentiellen Abweichungen berücksichtigen, so dass bei der Auslegung eines Bauteils sichergestellt werden kann, dass das später gefertigte reale Bauteil mindestens seinen Anforderungen entspricht.

Zur Ermittlung eines Sicherheitsfaktors für die Berechnung von Faserformelementen wird der gesamte Entstehungsprozess der Grundlagen für die Simulation und die Simulation selbst betrachtet. Bereits bei der Datenermittlung ergeben sich Unsicherheiten: Einzelne Messgeräte bzw. komplette Messketten weisen unterschiedliche Genauigkeiten auf (vgl. Tabelle B.1, B.2 und B.3). Zu diesen Unsicherheiten addiert sich die aus Materialinhomogenitäten resultierende Streuung der Versuchsdaten, welche zu einer Ungenauigkeit der Modellierung führt. Schlussendlich wird ein bereits

vorhandenes Materialmodell für die Simulation verwendet, welches viele Eigenschaften des Materials abbilden kann, jedoch nicht vollständig dem Materialverhalten entspricht. Somit folgt aus der Simulation die dritte Unsicherheit. Um diese Unsicherheiten bei einer späteren Simulation berücksichtigen zu können, werden diese drei Bereiche untersucht und die benötigten Sicherheitsfaktoren bestimmt.

9.7.1 Messketten

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der verwendeten Messketten werden die beiden Genauigkeiten der in den Prüfmaschinen jeweils verbauten Messtechnik betrachtet. Werden diese Genauigkeiten durch die minimal aufgetretenen Messwerte geteilt, ergeben sich die durch die Ungenauigkeiten der Messketten maximal resultierenden prozentualen Abweichungen der durchgeführten Messungen. Die minimalen Messwerte werden aus der Gesamtheit aller durchgeführten Versuche mittels des 95 %-igen Vertrauensintervalls bestimmt. Für Unsicherheiten, bei denen keinerlei Herstellerinformationen aus Datenblättern verfügbar sind (Geschwindigkeiten und Bauteilfeuchte), wird die Genauigkeit aus den durchgeführten Versuchen ermittelt. Zur Bestimmung der diesbezüglich benötigten Sicherheit $S_{\text{Mess } i}$ ist die Abweichung der betrachtenden Größe innerhalb des 95 %-igen Vertrauensintervalls zu bestimmen.

Aus der in Tabelle B.1, B.2 und B.3 aufgeführten Genauigkeiten und unter Berücksichtigung der minimalen Messwerte ergeben sich für die beiden Prüfmaschinen und die Probenvermessung entsprechende Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mess } i}$ (vgl. Tabelle 9.1, Tabelle 9.2 und Tabelle 9.3).

Tabelle 9.1: Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Universalprüfmaschine

| Messkette | minimaler Wert | Genauigkeit | Abweichung | Sicherheitsfaktor $S_{\text{Mess } i}$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|------------|--|
| Kraftmessung | 7,51 N | 5,5 N | 73,23 % | 1,73 |
| Wegmessung | 19,4 μm | 5,25 μm | 27,06 % | 1,27 |
| Einspannlänge | 3 mm | 0,01 mm | 0,33 % | 1,003 |
| Geschwindigkeit | | | 6,62 % | 1,07 |

Tabelle 9.2: Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten

| Messkette | minimaler Wert | Genauigkeit | Abweichung | Sicherheitsfaktor $S_{\text{Mess } i}$ |
|-----------------|--------------------|------------------|------------|--|
| Kraftmessung | 7,51 N | 9,1 N | 121,21 % | 2,21 |
| Wegmessung | 19,4 μm | 12 μm | 61,86 % | 1,62 |
| Geschwindigkeit | | | 6,52 % | 1,07 |

Da die in das Modell einfließenden Größen (σ, ϵ) aus mehreren Messwerten (F, b, d, l) berechnet werden, addieren sich hierbei die Ungenauigkeiten der einzelnen Messwerte für eine jeweilige Modellgröße. Folglich werden die für die Modellgrößen benötigten Kombinationen an Sicherheitsfaktoren der Messketten $S_{\text{Mess } i}$ bestimmt. Aus diesen Kombinationen können die Sicherheitsfaktoren für die Modellgrößen $S_{\text{Mg } i}$ bestimmt werden.

Tabelle 9.3: Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Probenvermessung

| Messkette | minimaler Wert | Genauigkeit | Abweichung | Sicherheitsfaktor $S_{\text{Mess } i}$ |
|----------------------|----------------|-------------|------------|--|
| Probengewicht | 0,044 g | 0,003 g | 6,87 % | 1,07 |
| Probendicke | 1,238 mm | 0,004 mm | 0,32 % | 1,003 |
| Probenbreite (Druck) | 5 mm | 0,05 mm | 1 % | 1,01 |
| Probenlänge (Druck) | 15 mm | 0,05 mm | 0,33 % | 1,003 |
| Bauteilfeuchte | | | 10,48 % | 1,1 |

Als Zielgrößen werden charakteristische Spannungs- und Dehnungspunkte gewählt. Da sich die Spannung aus der Kraft, der Breite der Probe und deren Dicke errechnet, wird die Summe der aus den Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mess } i}$ resultierenden Sicherheitszuschläge bestimmt (vgl. Tabelle 9.4).

Tabelle 9.4: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modellzielgröße Spannung

| Messgröße | Sicherheitsfaktor Universalprüfmaschine | Sicherheitsfaktor Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|----------------------------------|--|--|
| Kraftmessung S_{MessKr} | 1,73 | 2,21 |
| Probenbreite S_{MessPb} | 1,01 | 1,01 |
| Probendicke S_{MessPd} | 1,003 | 1,003 |
| Spannung S_{MgSp} | 1,743 | 2,223 |

Für die Sicherheit der Dehnung wurden die Einspannlänge und die Wegmessung berücksichtigt (vgl. Tabelle 9.5).

Tabelle 9.5: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modellzielgröße Dehnung

| Messgröße | Sicherheitsfaktor Universalprüfmaschine | Sicherheitsfaktor Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|------------------------------------|--|--|
| Einspannlänge S_{MessEsl} | 1,003 | 1,003 |
| Wegmessung S_{MessWm} | 1,27 | 1,62 |
| Dehnung S_{MgDe} | 1,273 | 1,623 |

Die gewählten Einflussgrößen Dehnrage, Dichte und Bauteilfeuchte unterliegen ebenso einer Unsicherheit, so dass auch hier die entsprechenden Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mg } i}$ bestimmt werden. Für die Einflussgröße Dehnrage ergibt sich der Sicherheitsfaktor S_{MgDr} aus den Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mess } i}$ der Geschwindigkeit und der Einspannlänge (vgl. Tabelle 9.6).

Für die Dichte ergibt sich der Sicherheitsfaktor S_{MgDi} aus den Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mess } i}$ des Probengewichts und dem Probenvolumen bestehend aus Probenlänge, -breite und -dicke (vgl. Tabelle 9.7).

Da die Bauteilfeuchte ausschließlich durch die Variation der relativen Luftfeuchte eingestellt werden konnte, wird aus der Verteilung der Bauteilfeuchten in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit die Sicherheit für die Bauteilfeuchte S_{MgBf} mittels des 95 %-igen Vertrauensintervalls bestimmt (vgl. Tabelle 9.8).

Tabelle 9.6: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Dehnrate

| Messgröße | Sicherheitsfaktor Universalprüfmaschine | Sicherheitsfaktor Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|-------------------------------------|--|--|
| Geschwindigkeit S_{MessGe} | 1,07 | 1,07 |
| Einspannlänge S_{MessEsl} | 1,003 | 1,003 |
| Dehnrate S_{MgDr} | 1,073 | 1,073 |

Tabelle 9.7: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Dichte

| Messgröße | Sicherheitsfaktor Universalprüfmaschine | Sicherheitsfaktor Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|-----------------------------------|--|--|
| Probengewicht S_{MessGw} | 1,07 | 1,07 |
| Probenlänge S_{MessPl} | 1,003 | 1,003 |
| Probenbreite S_{MessPb} | 1,01 | 1,01 |
| Probindicke S_{MessPd} | 1,003 | 1,003 |
| Dichte S_{MgDi} | 1,086 | 1,086 |

Tabelle 9.8: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Bauteilfeuchte

| Messgröße | Sicherheitsfaktor Universalprüfmaschine | Sicherheitsfaktor Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten |
|----------------------------------|--|--|
| Bauteilfeuchte S_{MgBf} | 1,105 | 1,105 |

9.7.2 Modellunsicherheiten

Nach der erfolgten Modellierung bestehen Differenzen zwischen den aus den Modellgleichungen berechneten Werten und den Versuchsdaten in Form von Residuen. Um auch diese Differenzen abzufangen und durch Sicherheitsfaktoren $S_{\text{Mod } i}$ mit in die Auslegung einfließen lassen zu können, werden für alle durchgeführten Versuche aus dem Quotienten aus vorhergesagter und reeller Größe der Sicherheitsfaktor $S_{\text{Mod } j}$ jedes einzelnen Versuchs j bestimmt. Durch Ermittlung des 95 %-igen Konfidenzintervalls der Sicherheiten jedes einzelnen Versuchs $S_{\text{Mod } j}$ werden anschließend Gesamtsicherheitsfaktoren $S_{\text{Mod } i}$ für jede Zielgröße berechnet (vgl. Tabelle 9.9).

9.7.3 Simulationsabweichungen

Aufgrund der Wahl eines bereits existierenden Materialmodells, welches dem Materialverhalten in einem großen Bereich entspricht, kommt es zu Abweichungen zwischen der Modellierung und der Simulation. Um auch diese Abweichung in Form eines Sicherheitsfaktors S_{Sim} zu berücksichtigen, wird die maximale Abweichung zwischen Modellierung und Simulation bestimmt und im Anschluss der benötigte Sicherheitsfaktor $S_{\text{Sim } i}$ für jeden Parametersatz aus der Validierung berechnet (vgl. Tabelle 9.10).

Tabelle 9.9: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Residuenstreuung auf die Zielgrößen

| Belastungsart | Zielgröße | Sicherheitsfaktor $S_{Mod\ i}$ |
|---------------|---|--------------------------------|
| Zug | Techn. Elastizitätsspannung σ_{tEz} | 1,224 |
| Druck | Techn. Elastizitätsspannung σ_{tEd} | 1,475 |
| Zug | Fließspannung 1 σ_{fz1} | 1,059 |
| Zug | Fließspannung 2 σ_{fz2} | 1,067 |
| Druck | Fließspannung 1 σ_{fd1} | 1,277 |
| Druck | Fließspannung 2 σ_{fd2} | 1,217 |
| Zug | Festigkeit σ_z | 1,063 |
| Druck | Festigkeit σ_d | 1,204 |
| Zug | Techn. Elastizitätsdehnung ϵ_{tEz} | 1,206 |
| Druck | Techn. Elastizitätsdehnung ϵ_{tEd} | 2,038 |
| Zug | Fließdehnung 1 ϵ_{fz1} | 1,054 |
| Zug | Fließdehnung 2 ϵ_{fz2} | 1,060 |
| Druck | Fließdehnung 1 ϵ_{fd1} | 1,552 |
| Druck | Fließdehnung 2 ϵ_{fd2} | 1,555 |
| Zug | Festigkeit zugehörige Dehnung ϵ_z | 1,067 |
| Druck | Festigkeit zugehörige Dehnung ϵ_d | 1,560 |

Tabelle 9.10: Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Simulationsabweichung bei 23 °C

| Parameter- satz | relative Luftfeuchtigkeit | Dichte | Sicherheitsfaktor Spannung S_{SimSp} | Sicherheitsfaktor Dehnung S_{SimDe} |
|--------------------|------------------------------|-----------------------|---|--|
| 1 | 32 % rel. Luftf. | 290 kg/m ³ | 1,137 | 1,025 |
| 2 | 32 % rel. Luftf. | 595 kg/m ³ | 1,136 | 1,017 |
| 3 | 90 % rel. Luftf. | 290 kg/m ³ | 1,29 | 1,038 |
| 4 | 90 % rel. Luftf. | 595 kg/m ³ | 1,205 | 1,019 |

9.7.4 Bestimmung der maximal benötigten Sicherheitsfaktoren

Zur Vereinfachung wird ein Sicherheitsfaktor $S_{Ges\ i}$ für jede Einfluss- und Zielgröße zur globalen Berücksichtigung aller möglichen Unsicherheiten angestrebt. Hierzu werden sämtliche für eine Simulation benötigten Sicherheiten ($S_{Mg\ i}$, $S_{Mod\ i}$, $S_{Sim\ i}$) zusammengetragen und die daraus resultierenden maximalen Sicherheitsfaktoren $S_{Ges\ i}$ bestimmt (vgl. Tabelle 9.11).

Bezogen auf die Spannung ergibt sich ein benötigter Sicherheitsfaktor von annähernd $S_{GesSp} = 3$, um mit 95 %-iger Sicherheit sagen zu können, dass das Bauteil auch im Realen den Simulationsbelastungen standhält. Die Ergebnisse der Dehnung bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung. Hierbei ist ein Sicherheitsfaktor von $S_{GesDe} = 2,7$ notwendig. Die Einflussfaktoren müssen mit individuellen Sicherheitsfaktoren versehen werden. Für die Dehnrage ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von $S_{GesDr} = 1,073$, für die Dichte ein Sicherheitsfaktor von $S_{GesDi} = 1,086$ und für die Bauteilfeuchte ein Sicherheitsfaktor von $S_{GesBf} = 1,105$.

Durch die Bestimmung der für die Simulation benötigten Sicherheitsfaktoren erfolgt eine Absicherung der Ergebnisse. Um diese einordnen zu können, werden die benötigten Sicherheitsfaktoren mit im Maschinenbau allgemein üblichen Sicherheitsfaktoren verglichen. Zur Auslegung von Maschinenelementen werden üblicherweise Sicherheitsfaktoren zwischen 1,05 und 3 verwendet (vgl.

Tabelle 9.11: maximale Sicherheitsfaktoren zur Simulation von Faserformmaterialien

| | Modellgröße | Modell | Simulation | Gesamtsicherheitsfaktor |
|-------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | $S_{Mg\ i}$ | $S_{Mod\ i}$ | $S_{Sim\ i}$ | $S_{Ges\ i}$ |
| Spannung S_{Sp} | 2,223 | 1,475 | 1,29 | 2,988 |
| Dehnung S_{De} | 1,623 | 2,038 | 1,038 | 2,699 |
| Dehnrage S_{Dr} | 1,073 | | | 1,073 |
| Dichte S_{Di} | 1,086 | | | 1,086 |
| Bauteilfeuchte S_{Bf} | 1,105 | | | 1,105 |

Tabelle 9.12). Bei z. B. Achsen oder Druckbehältern aus Eisengusswerkstoffen erhöhen sich die Sicherheitsbeiwerte auf bis zu 5 bis 6, was durch die Inhomogenität des Werkstoffs begründet ist.

Demzufolge ist mit einer maximal benötigten Sicherheit von nahezu 3 im Vergleich zu im allgemeinen Maschinenbau üblichen Sicherheitsfaktoren ein gutes Ergebnis erarbeitet worden, obwohl es sich um einen durchaus inhomogenen Werkstoff handelt.

Tabelle 9.12: Typische Sicherheitsbeiwerte im Maschinenbau [Kün14], [Wit+09]

| Anwendungsbereich | Sicherheitsfaktor |
|---|-------------------|
| Achsen | 3 - 6 |
| Wellen | 1,5 - 2 |
| Schweißnähte | 1,5 - 2 |
| Welle-Nabe-Verbindungen (Bruch) | 2 - 3 |
| Flankenpressung Zahnräder | 0,5 - 1,6 |
| Zahnfußspannung | 0,7 - 3 |
| Hertzsche Pressung im Wälzpunkt | 0,5 - 1,6 |
| Allg. Maschinenbau: Walz/Schmiedestähle | 1,5 - 2 |
| Allg. Maschinenbau: Eisengusswerkstoffe | 1,9 - 2,8 |
| Druckbehälter: Walz/Schmiedestähle | 1,05 - 2,8 |
| Druckbehälter: Eisengusswerkstoffe | 1,2 - 5 |

10 Zusammenfassung und Ausblick

Naturfaserverpackungen bieten eine ökologische Alternative zu Kunststoffverpackungen. In Ermangelung von Auslegungsmöglichkeiten hat sich die Faserformverpackung jedoch bis heute nicht gegenüber der Kunststoffverpackung durchsetzen können, geschweige denn diese vollständig ersetzen. Die vorliegende Arbeit begegnet diesem Missstand, indem sie eine Basis zur softwarebasierten Berechnung der Anforderungserfüllung schafft.

Hierzu wurden zu Beginn bestehende Prüfmöglichkeiten bewertet und Maßnahmen ergriffen, um Versuchsparameter, die aus den Anforderungen der Verpackungsindustrie resultieren, bestimmen zu können. Zu diesen Maßnahmen gehörte die Optimierung einer Universalprüfmaschine und die Erweiterung der Prüfmöglichkeiten durch die Konstruktion einer Prüfmaschine für hohe Dehnraten.

Zu den zu bestimmenden Versuchsparametern gehört die Bestimmung der Einflüsse der Dehnraten, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Verdichtung des Naturfasermaterials auf das mechanische Werkstoffverhalten. Diese Zusammenhänge werden durch uniaxiale Zug- und Druckversuche unter Variation der Einflussgrößen ermittelt und dienen zur Charakterisierung des mechanischen Werkstoffverhaltens.

Es folgt eine Modellierung der sich aus der Charakterisierung ergebenden Abhängigkeiten. Als Simulationsumgebung wird der explizite FE-Solver *LS-DYNA* und das darin enthaltene Material 124 (*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION) gewählt. Durch eine Validierung kann eine Abschätzung der Realitätsnähe der Simulationsergebnisse erfolgen. In Abhängigkeit von den Einflussgrößen ergeben sich Simulationsabweichungen von 1,7 % bis 29 %. Als Abschluss werden Sicherheitsfaktoren bestimmt, die sämtliche Fehlereinflüsse der Simulation (Messkette, Modelunsicherheiten und Simulationsabweichungen) abdecken und somit eine sichere Auslegung von Naturfaserprodukten aus dem untersuchten Werkstoff ermöglicht. Die Gesamtsicherheitsfaktoren betragen hierbei für Spannungen ca. 3 und für Dehnungen ca. 2,7.

Durch die erarbeitete Simulierbarkeit werden Iterationsschritte bestehend aus Formenbau, Herstellung von Prüflingen, Überprüfung auf Anforderungserfüllung und Geometrieanpassung reduziert und ggf. sogar eliminiert, und es wird eine effizientere Auslegung ermöglicht. Zusätzlich wird hierdurch der Anwendungsbereich von Naturfaserprodukten in der Verpackungsindustrie erweitert, da auch die Anforderungserfüllung von höher belasteten Konstruktivpolstern wie z. B. Haushaltsgroßgeräteverpackungen prognostizierbar wird. Somit schafft die vorliegende Arbeit eine Möglichkeit, die Erfüllung der mechanischen Anforderungen durch die Simulation bereits bei der Konstruktion zu berücksichtigen.

Findet die durch die vorliegende Arbeit ermöglichte Basis zur Simulation von Naturfaserprodukten eine breite Anwendung, resultiert ein großer volkswirtschaftlicher Nutzen. Kunststoffverpackungen könnten vollständig durch Konstruktivpolster aus Naturfasern ersetzt werden, da erstere keinerlei mechanische Vorteile bei der Auslegung mehr hätten. Der Einsatz von Kunststoffen in der Verpackungsindustrie könnte signifikant reduziert werden mit dem Ziel, fossile Ressourcen

einzusparen. Der durch die Herstellung bzw. durch die bei der späteren Verbrennung entstehende Ausstoß von Treibhausgasen würde verringert und somit ein Beitrag zur Verminderung der globalen Erderwärmung geleistet. Aufgrund der Recyclierbarkeit und der natürlichen Abbaubarkeit von Naturfaserprodukten würde zusätzlich das Abfallaufkommen reduziert.

In dieser Arbeit wurde als Basis zur Simulation ein Naturfaserwerkstoff mit definierten Eigenschaften charakterisiert. Um die Anwendbarkeit der geschaffenen Möglichkeit zur Simulation zu erweitern, bestünde die Möglichkeit, den Einfluss einer Änderung der Rohstoffeigenschaften in die Modellierung zu integrieren. Hierzu zählen die Fasereigenschaften und die Bindungseigenschaften der Fasern untereinander. Auch die Erweiterung der Charakterisierung durch die Betrachtung von Sekundärfasern zur weiteren ökonomischen und ökologischen Optimierung von Naturfaserverpackungen wäre ein möglicher Ansatzpunkt zur Fortsetzung dieser Arbeit.

11 Literatur

- [Baa06] Alexander Baar. „Modellierung der Werkstoffeigenschaften von Papierfaserprodukten als Grundlage für deren konstruktive Gestaltung“. Diss. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente, 2006. ISBN: 3937651047. URL: https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/22145/1/Diss_Baar_Bib.pdf.
- [Ble+04] W. Bleck u. a. „Einflüsse der Messtechnik auf die Ergebnisse von Hochgeschwindigkeitszugversuchen“. In: *Tagungsband Werkstoffprüfung: Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse*. Hrsg. von M Pohl. Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2004. ISBN: 3-88355-337-9.
- [Ble13] Jürgen Blechschmidt. *Taschenbuch der Papiertechnik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013. ISBN: 978-3-446-43701-2.
- [BRR14] Ralf Bürgel, Hans Albert Richard und Andre Riemer. *Werkstoffmechanik - Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. ISBN: 978-3-658-03935-6.
- [Bus08] Business Pundit, Hrsg. *25 Big Companies That Are Going Green*. Online Resource. Online Resource. Juli 2008. URL: <http://www.businesspundit.com/25-big-companies-that-are-going-green/> (besucht am 27. 04. 2015).
- [But30] Stephen Butterworth. „On the Theory of Filter Amplifiers“. In: *Wireless Engineer* 7 (1930), 536–541.
- [Che+08] J. Chen u. a. „An experimental and numerical investigation of cushioning mechanism of mould pulp structure“. In: *Advances in Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2008)*. Second International Conference on Heterogeneous Material Mechanics. Huangshan, China: DEStech Publications, Juni 2008, S. 988–992.
- [CS57] G. Cowper und P. Symonds. *Strain hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. Techn. Ber. 1957.
- [Deu12] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN-Taschenbuch 490/6 - Verpackung* 6. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012, S. 624. ISBN: 978-3-410-23056-4.
- [Deu13] Deutsche Post DHL, Hrsg. *Living responsibility, GoGreen*. Broschüre. Mai 2013. URL: http://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/dpdhl/verantwortung/downloads/broschueren/GoGreen_D_Ansicht.pdf (besucht am 27. 04. 2015).
- [DH12] Hans Dresig und Franz Holzweißig. *Maschinendynamik*. 11. Aufl. Springer-Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-29570-6. DOI: 10.1007/978-3-642-29571-3.

- [DIN 50145] *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugversuch*. Normschrift. Fachnormenausschuß Materialprüfung (FNM). Mai 1975.
- [DIN 54518] *Prüfung von Papier und Pappe - Streifenstauchwiderstand*. Normschrift. Normenausschuß Materialprüfung (NMP). März 2004.
- [DIN EN 20187] *Papier, Pappe und Zellstoff - Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung*. Normschrift. Normenausschuß Papier und Pappe (NPa). Nov. 1993.
- [DIN EN 24180-2] *Versandfertige Packstücke; Allgemeine Regeln für die Erstellung von Prüfplänen*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Berlin, Feb. 1993.
- [DIN EN ISO 12048] *Verpackung - Versandfertige Packstücke - Kompressions- und Stapelprüfung unter Verwendung einer Kompressionsprüfmaschine*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Apr. 2001.
- [DIN EN ISO 22248] *Verpackung - Versandfertige Packstücke - Vertikale Stoßprüfung (freier Fall)*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Feb. 1993.
- [DIN EN ISO 2233] *Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Klimatische Vorbehandlung für die Prüfung*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Nov. 2001.
- [DIN EN ISO 2234] *Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Stapelprüfung unter statischer Last*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Dez. 2002.
- [DIN EN ISO 2244] *Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Horizontale Stoßprüfung*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Dez. 2002.
- [DIN EN ISO 2247] *Verpackung; Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Schwingprüfung mit niedriger Festfrequenz*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Berlin, Dez. 2002.
- [DIN EN ISO 22876] *Verpackung - Versandfertige Packstücke - Umkipprückprüfung (sequentiell)*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Feb. 1993.
- [DIN EN ISO 2873] *Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Unterdruckprüfung*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Dez. 2002.
- [DIN EN ISO 2875] *Verpackung - Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten - Sprühwasserprüfung*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Jan. 2003.
- [DIN EN ISO 4180] *Verpackung – Versandfertige Packstücke – Allgemeine Regeln für die Erstellung von Prüfplänen*. Normschrift. Normenausschuß Verpackungswesen (NAVp). Dez. 2010.
- [DIN EN ISO 6892-1a] *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Normschrift. Normenausschuß Materialprüfung (NMP). Dez. 2009.

-
- [DIN EN ISO 6892-1b] *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Normschrift. Normenausschuss Materialprüfung (NMP). Juni 2014.
- [DIN ISO 1924-3] *Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei zugförmiger Belastung - Teil 3: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (100 mm/min)*. Normschrift. Normenausschuss Materialprüfung (NMP). Juni 2007.
- [EM94] Danny G. Eagleton und Jorge A. Marcondes. „Cushioning properties of moulded pulp“. In: *Packaging Technology and Science* 7.2 (1994), S. 65–72.
- [EN ISO 5269-2] *Faserstoffe - Laborblattbildung für physikalische Prüfungen - Teil 2: Rapid-Köthen-Verfahren*. Normschrift. Normenausschuss Materialprüfung (NMP). März 2004.
- [Fou22] Jean Baptiste Joseph baron Fourier. *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822.
- [Fra91] Werner; Krause Thomas Franke. *Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1991.
- [Fro99] Froböse. *CTU-Packrichtlinien*. Hrsg. von Verkehrsblatt. Richtlinie. Feb. 1999.
- [Geo97] A. Jeffrey George. *An Introduction to Hydrogen Bonding*. Oxford University Press, 1997. ISBN: 978-0195095494.
- [GG13] Hans-Jürgen Gevatter und Ulrich Grünhaupt. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-662-07701-6.
- [GHW09] Dietmar Gross, Werner Hauger und Peter Wriggers. *Technische Mechanik 4*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-89390-5.
- [Göt71] Lothar Götsching. „Das Festigkeitsverhalten von Papier unter statischer und dynamischer Beanspruchung“. Diss. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt, 1971.
- [Göt90] Lothar Götsching. *Papier in unserer Welt*. Hrsg. von Lothar Götsching. Düsseldorf: Econ-Verlag, 1990, S. 343. ISBN: 3-430-13252-5.
- [Gro+09] Dietmar Gross u. a. *Technische Mechanik 2*. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer-Verlag, 2009. ISBN: 978-3-642-00565-7.
- [Gro+12] Dietmar Gross u. a. *Technische Mechanik 3*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-29529-4.
- [Gru11] Gruber. *Grundlagen der Zellstofftechnologie*. Vorlesungsskriptum. März 2011.
- [HK14] Horst Haberhauer und Manfred Kaczmarek, Hrsg. *Taschenbuch der Antriebstechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. ISBN: 978-3446427709.

- [Hof00] J. Hoffmann. „Compression and cushioning characteristics of moulded pulp packaging“. In: *Packaging Technology and Science* 13.5 (2000), S. 211–220.
- [Hoo78] Robert Hooke. *Lectures de Potentia Restitutiva, Or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies*. London: John Martyn, 1678.
- [Hota] Hottinger Baldwin Messtechnik. *Paceline CMC Piezoelektrische Kraftmesskette*. Datenblatt.
- [Hotb] Hottinger Baldwin Messtechnik. *Paceline CFT - Piezoelektrische Kraftaufnehmer - Charakteristische Merkmale*. Datenblatt. Datenblatt. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [Int15] International Energy Agency (IEA), Hrsg. *Key world energy statistics 2015*. Broschüre. 2015. URL: http://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf (besucht am 27.04.2015).
- [Ji+04] H. W. Ji u. a. „Investigation of the Mechanical Properties of Molded Pulp with DICM“. In: *Chinese Packaging Engineering* 25.4 (2004), S. 24–27.
- [JMK13] H. Jäger, R. Mastel und M. Knaebel. *Technische Schwingungslehre*. 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. ISBN: 978-3-8348-1396-1. DOI: 10.1007/978-3-8348-2099-0.
- [JWC08] Hongwei Ji, Huaiwen Wang und Jinlong Chen. „Mechanical behaviors of molded pulp material“. In: *Proceedings of the International Conference on Experimental Mechanics*. Hrsg. von He Xiaoyuan, Xie Huimin und Kang YiLan. International Conference on Experimental Mechanics. Nanjing; China: SPIE-The International Society for Optical Engineering, Nov. 2008,
- [Keu06] Martin Keuerleber. „Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen bei hohen Dehnraten am Beispiel von PP“. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2006.
- [Kle12] Bernd Klein. *FEM*. 9. Aufl. Springer Vieweg, 2012. ISBN: 978-3-8348-1603-0. DOI: 10.1007/978-3-8348-2134-8.
- [Kol49] Herbert Kolsky. „An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading“. In: *Proceedings of the Physical Society. Section B*. Bd. 62. 11. London, 1949, S. 676–700.
- [Kra86] Arnold Krawietz. *Materialtheorie*. Springer Verlag, 1986. ISBN: 978-3-642-82513-2.
- [KS66] W. Knigge und H. Schulz. *Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte*. Hamburg und Berlin: Parey, 1966.
- [Kün14] Bernd Künne. *Maschinenelemente 1-3*. Skriptum. 2014.
- [KZI85] K. Kussmaul, C. Zimmermann und W. Issler. „Dynamic Tensile Testing with a Large Scale 33 MJ Rotating Disc“. In: *Journal de Physique Colloque C5* (1985). in Keu06 zitiert.

-
- [Lag13] I. Laghi. *Cadenas de celulosa*. GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), via Wikimedia Commons. Mai 2013. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Cellulose_strand.svg.
- [Lav+12] S.A. Lavrykov u. a. „Computational Modeling of the Mechanisms of Fracture of Paper Packaging Under Dynamic and Impact Loading“. In: *Conference Proceedings*. Stockholm, Sweden: Innventia AB, Juni 2012.
- [LCZ08] D. -M Lin, Y. -M Chen und X. -C Zhang. „Nonlinear elastic viscoplastic model of molded pulp material and its experimental verification“. In: *Zhongguo Zaozhi Xuebao/Transactions of China Pulp and Paper* 23.2 (2008), S. 91–95.
- [Leg05] Adrien-Marie Legendre. *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*. Paris, 1805.
- [LF07] Gunnar Lindblad und Thomas Fürst. *The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board*. Lorentzen & Wettre, 2007.
- [Liu08] Yucheng Liu. „ANSYS and LS-DYNA used for structural analysis“. In: *Int. J. Computer Aided Engineering and Technology* 1.1 (2008), S. 31–44.
- [Liv16] Livermore Software Technology Corporation. *LS-DYNA KEYWORD USER’S MANUAL*. 7537. Livermore, California, März 2016.
- [Ma04] X. Ma. „A design database for moulded pulp packaging structure“. In: *Packaging technology & science* 17.4 (2004), S. 193–204.
- [Max67] James Clerk Maxwell. „On the dynamical theory of gases“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 157 (1867), S. 49–88.
- [MK99] V. Mediavilla und M. Konermann. *Prüfung des Anbaus und der Möglichkeiten einer Markteinführung von neuen Faserpflanzen (Hanf, Kenaf, Miscanthus)*. Abschlussbericht. Grenzüberschreitenden Instituts zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung ITADA, 2 Allée de Herrlisheim, F-68000 Colmar, Juni 1999.
- [MMD05] A.K. Mohanty, M. Misra und L.T. Drzal. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, 2005. ISBN: 9780203508206.
- [Nas10] Lutz Nasdala. *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [NEU07] NEUROtiker. *Struktur von Cellulose (Sesselkonformation)*. via Wikimedia Commons. Okt. 2007. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Cellulose_Sessel.svg.
- [NH87] Sir Isaac Newton und Edmund Halley. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater, prostant venales apud Sam. Smith, 1687.
- [Nyq28] Harry Nyquist. „Certain Topics in Telegraph Transmission Theory“. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 47 (1928), 617–644.

- [Pah+07] G. Pahl u. a. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 7. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 3-540-34060-2.
- [Png07] Pngbot. *Beta-D-glucopyranose*. via Wikimedia Commons. Jan. 2007. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/Beta-D-glucopyranose-2D-skeletal.png>.
- [Poh97] Horst Pohle. Springer-Verlag, 1997. ISBN: 978-3-642-63842-8.
- [Pra95] Ludwig Prandtl. „Über die Härte plastischer Körper“. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1 (1895). URL: <http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/mod/?PPN=GDZPPN002505665>.
- [Rus09] Wilhelm Rust. *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8351-0232-3.
- [Sch07] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Hrsg. von VDI. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. ISBN: 978-3-540-72189-5.
- [Sha49] Claude Elwood Shannon. „Communication in the Presence of Noise“. In: *IRE*. Bd. 37. 1. 1949.
- [Sic02] Christian Sichau. *Die Viskositätsexperimente von J. C. Maxwell und O. E. Meyer - eine wissenschaftshistorische Studie über die Entstehung, Messung und Verwendung einer physikalischen Größe*. 1. Aufl. Berlin: Logos Verlag Berlin, 2002. ISBN: 978-3-832-50111-2.
- [Son08] Nadine Sonnenberg. „Theoretische Untersuchung zur Adsorption von Arzneistoffen an Mikrokristalliner Cellulose“. Diss. Göttingen: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2008.
- [Sor04] G. Sorensen. „Moisture-induced effects on stacking strength of moulded-fibre packaging in varying environmental conditions“. In: *Packaging technology & science* 17.5 (2004), S. 257–265.
- [Str99] Lubert Stryer. *Biochemie*. 4. Aufl. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlag, 1999. ISBN: 3-86025-346-8.
- [Stu10] Christian Stumpf. „Systematische Optimierung der mechanischen und hygroskopischen Eigenschaften von Faserformprodukten“. Diss. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente, 2010. URL: <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/27437/2/Dissertation.pdf>.
- [Tho49] W.E. Thomson. „Delay Networks having Maximally Flat Frequency Characteristics“. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. Bd. 96. 44. Nov. 1949, S. 487–490.
- [Tür14] Oliver Türk. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe: Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen*. Springer-Verlag, 2014. ISBN: 3834821993, 9783834821997.
- [UPM11] UPM, Hrsg. *So entsteht Qualitätspapier*. Pressemitteilung. Juli 2011.

-
- [UPS04] UPS, Hrsg. *Verpackungsleitfaden: Transportverpackung für den Einzelversand*. Leitfaden. 2004. URL: http://www.initiative-gut-verpackt.de/download/UPS-Verpackungsleitfaden_2004.pdf.
- [VWI04] *Ermittlung von Effizienzpotenzialen bei Transportverpackungen aus Wellpappe*. Bericht. Verband der Wellpappen-Industrie e. V. 2004. URL: <http://www.initiative-gut-verpackt.de/download/abstractstudie.pdf> (besucht am 02. 09. 2010).
- [Wan+01] G. Wang u. a. „Investigation on design of molded pulp cushioning products“. In: *Chung-kuo Tsao Chih/China Pulp and Paper* 20.4 (2001), S. 25–28.
- [Wan+09] H. Wang u. a. „Research on compression mechanical behaviors and constitutive relation of moulded pulp material“. In: *Jixie Qiangdu/Journal of Mechanical Strength* 31.3 (2009), S. 382–386.
- [Wei99] Johann Weigert. „Untersuchung zur chemischen Modifizierung von Zellstoff zur Vermeidung der Verhornungsneigung sowie zu den sich daraus ergebenden papiertechnischen Eigenschaften“. Diss. Technische Universität Darmstadt, Okt. 1999.
- [Wil02] Ulrike Willms. „Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Faserformprodukten am Beispiel einer Unterarmorthese“. Diss. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente, 2002. ISBN: 3937651004. URL: <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2819/1/willmsunt.pdf>.
- [Wit+09] Herbert Wittel u. a. *Roloff/Matek Maschinenelemente - Tabellenbuch*. 19, überarb. u. erw. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2009. ISBN: 978-3-834-80689-5.
- [Wüs13] Tanja Wüstenberg. *Cellulose und Cellulosederivate: Grundlagen, Wirkungen und Applikationen*. Behr's Verlag, 2013. ISBN: 3954681889, 9783954681884.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Integralbauweise von Konstruktivpolster und Umverpackung (Eierkarton) | 2 |
| 2.1 | Aufbau der Universalprüfmaschine | 15 |
| 2.2 | Beidseitige Einspannung | 15 |
| 2.3 | Ideale Geschwindigkeits-Weg Verläufe der gegebenen Lineareinheit | 16 |
| 2.4 | Klassifizierung der Dehnratenbereiche [Ble+04] | 17 |
| 2.5 | Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Beschleunigung und dem Ruck: a ideale, unendliche Beschleunigung und idealer unendlicher Ruck; b reale Beschleunigung und idealer unendlicher Ruck; c reale Beschleunigung und realer Ruck. | 18 |
| 2.6 | Beispiel einer Faserlängenverteilung von Zellstofffasern | 30 |
| 2.7 | β -D-Glucopyranose Molekül ($C_6H_{12}O_6$) [Png07] | 31 |
| 2.8 | Grundbaustein von Cellulosemolekülketten ($C_6H_{10}O_5$) _n [NEU07] | 31 |
| 2.9 | Intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen eines Cellulosemoleküls [Lag13] | 31 |
| 2.10 | Kristalliner Aufbau von Cellulosemolekülketten mit intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen (gestrichelt dargestellt) [Lag13] | 32 |
| 2.11 | Verbindung der Cellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand; a/b: Cellulose Makromolekül, c: Kristalliner Bereich einer Elementar- bzw. Grundfibrille, d: Elementar-/Grundfibrille mit kristallinen- (Micellen) und parakristallinen Bereichen, e: Mikrofibrille aus Grundfibrillen, f: Schichten einer hölzernen Faser mit (S ₃) Sekundärwand Innenschicht/(T)ertiärwand, (S ₂) Sekundärwand Mittelschicht, (S ₁) Sekundärwand Außenschicht, (P)rimärwand, (M)ittellamelle [KS66] | 33 |
| 2.12 | a-d: Holzstoffherstellung; a-f: Zellstoffherstellung; a: Entrindung, b: Hackschnitzel, c: Refiner, d: Bleichen, e: Kochen, f: Waschen [UPM11] | 36 |
| 2.13 | Prinzipdarstellung eines Anformwerkzeugs nach [Wil02] | 37 |
| 2.14 | Anform- und Anlagenprinzipien in der industriellen Faserformherstellung nach [Wil02] | 38 |
| 2.15 | Papierherstellungsbezogene Orientierungen: MD = Maschinenrichtung, CD = Querrichtung, ZD = Normalenrichtung | 41 |
| 3.1 | Alias-Effekt: (A) Ursprüngliche Frequenz, (B) Abtastpunkte, (C) Aliasfrequenz | 44 |
| 3.2 | Amplitudengang des Eingangssignals in Abhängigkeit des Quotienten aus Eingangs- und Grenzfrequenz eines Bessel-Filters 3. Ordnung (A), eines Butterworth-Filters 3. Ordnung (B) und eines idealen Rechteckfilters (C) | 45 |
| 3.3 | Visualisierung der impliziten Zeitintegration | 47 |
| 3.4 | Visualisierung der expliziten Zeitintegration | 48 |
| 4.1 | Zusammenhang zwischen der Dichte von 600kg/m ³ Faserformblättern und dem Pressdruck (=Kraft pro Faserformfläche, eigene Vorversuche) | 51 |
| 5.1 | Probenspannvorrichtung | 56 |
| 5.2 | Gestaltung der Klemmfläche | 57 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.3 | Frequenzgang des Messverstärkers <i>HBM QuantumX 410</i> | 58 |
| 5.4 | Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Universalprüfmaschine im Ausgangszustand über dem Beschleunigungsweg abhängig von der Sollgeschwindigkeit: Verdeutlichung der benötigten Anlaufstrecke bei Zugversuchen | 60 |
| 5.5 | Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Universalprüfmaschine im Ausgangszustand über dem Beschleunigungsweg abhängig von der Sollgeschwindigkeit: Verdeutlichung der benötigten Anlaufstrecke bei Druckversuchen | 60 |
| 5.6 | Zug- und Druckversuche zur Federsteifigkeitsermittlung | 61 |
| 5.7 | Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Druckversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 100 mm/s mit um 80 % reduzierter Probenbreite | 63 |
| 5.8 | Freilauf der Universalprüfmaschine | 63 |
| 5.9 | Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Zugversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 375 mm/s im Vergleich zu Abbildung 5.4 mit Freilaufstrecke | 64 |
| 5.10 | Normierte Geschwindigkeitsverläufe der Druckversuche bei Sollgeschwindigkeiten von 0,1 mm/s bis 100 mm/s im Vergleich zu Abbildung 5.5 mit Freilaufstrecke | 65 |
| 5.11 | Sensoranordnung senkrecht zur Bewegungsrichtung | 69 |
| 5.12 | Untere Klemmvorrichtung | 70 |
| 5.13 | Sensorpositionierung | 71 |
| 5.14 | Hubwagen zum Transport des Fallgewichts | 74 |
| 5.15 | Abdeckbare Geschwindigkeits- bzw. Dehnratenbereiche der Universalprüfmaschine (1, hellgrau) und der neu entwickelten Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten (2, dunkelgrau) mit $l_0 = 35$ mm für Zug- und $l_0 = 3$ mm für Druckversuche | 76 |
| 5.16 | Daten des verwendeten Zellstoffs | 78 |
| 5.17 | Zusammenhang zwischen Grad Schopper-Riegler (SR) und Canadian standard freeness (CSF) [Gru11] | 78 |
| 5.18 | Verwendetes ebenes Anformwerkzeug | 79 |
| 5.19 | Spannungs-Dehnung-Verhalten einer Faserformprobe mit unterschiedlichen Einspannlängen: A 3 mm, B 10 mm, C 20 mm, D 30 mm, E 40 mm | 81 |
| 5.20 | Abhängigkeit der Bauteilfeuchte von der Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft. Probenmaterial: Zellstoff, 600 g/m ² , ungespresst | 83 |
| 5.21 | Zeitliche Abhängigkeit der Bauteilfeuchte unter sprunghafter Änderung des Umgebungsklimas. Probenmaterial: Zellstoff, 600 g/m ² , ungespresst | 84 |
| 6.1 | Laufzeitdifferenz des Weg- und Kraftsignals (Abzugsgeschwindigkeit: 3,8 m/s): A Kraftsignal, B Wegsignal, C zeitlich synchronisiertes Wegsignal | 90 |
| 6.2 | Modell eines angeregten 1-Massenschwingers mit Masse m , Federsteifigkeit c , Auslenkung s und Anregungskraft $F(t)$ | 91 |
| 6.3 | Systemantworten eines harmonisch angeregten 1-Massenschwingers bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: A 0,1 m/s, B 0,5 m/s, C 1 m/s, D 5 m/s, E 10 m/s | 92 |
| 6.4 | Frequenzspektrum des Ausschlagens des durch einen Versuch angeregten Versuchsaufbaus | 96 |
| 6.5 | Modell eines Systems mit 2 Freiheitsgeraden | 96 |
| 6.6 | Systemantwort eines Versuchs mit 3,7 m/s (A) und dessen berechnete Anregungsfunktion (B) sowie der dreieckig gewichtete gleitende Durchschnitt der Anregungsfunktion mit einer Halbwertsbreite von 8 Samples (C) | 100 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.1 | Versuchsergebnisse zur Untersuchung der Isotropie in der Ebene von Faserformprodukten | 106 |
| 7.2 | Querdehnung über Längsdehnung einer Faserformprobe (<i>GOM mbH</i> Braunschweig) | 106 |
| 7.3 | Technische Elastizitätsspannungsabhängigkeit unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 108 |
| 7.4 | Technische Elastizitätsdehnungsabhängigkeit unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 108 |
| 7.5 | Technische Elastizitätsspannungsabhängigkeit unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 109 |
| 7.6 | Technische Elastizitätsdehnungsabhängigkeit unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 110 |
| 7.7 | Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fz1} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 111 |
| 7.8 | Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fz2} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 111 |
| 7.9 | Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fz1} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 112 |
| 7.10 | Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fz2} unter Zugbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 113 |
| 7.11 | Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fd1} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 114 |
| 7.12 | Abhängigkeit der Fließspannung σ_{fd2} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 114 |
| 7.13 | Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fd1} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 115 |
| 7.14 | Abhängigkeit der Fließdehnung ϵ_{fd2} unter Druckbelastung von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 115 |
| 7.15 | Abhängigkeit der Zugfestigkeit σ_z von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 116 |
| 7.16 | Abhängigkeit der Zugfestigkeitsdehnung ϵ_z von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 117 |
| 7.17 | Abhängigkeit der Druckfestigkeit σ_d von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 118 |
| 7.18 | Abhängigkeit der Druckfestigkeitsdehnung ϵ_d von der Bauteilfeuchte f , der Dichte ρ und der Dehnrate $\dot{\epsilon}$ | 118 |
| 7.19 | Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Abhängigkeit von der Dehnrate bei einer Dichte von 290 kg/m^3 | 119 |
| 7.20 | Spannungs-Dehnungs-Verhalten in Abhängigkeit von der Dehnrate bei einer Dichte von 595 kg/m^3 | 119 |
| 9.1 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 5 % und einer Dichte von 290 kg/m^3 | 130 |
| 9.2 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 5 % und einer Dichte von 595 kg/m^3 | 130 |
| 9.3 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 11 % und einer Dichte von 290 kg/m^3 | 131 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 9.4 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Modells und der Simulation eines Materials mit einer Bauteilfeuchte von 11 % und einer Dichte von 595 kg/m^3 | 132 |
| A.1 | Stärkediagramm der Anlagenprinzipien mit Gesamtwertigkeit nach dem Hyperbelverfahren und dem Geradenverfahren [Pah+07] | 165 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Zulässige g-Werte für unverpackte Produkte. g-Wert: Vielfaches der einfachen Erdbeschleunigung [UPS04]. | 8 |
| 2.2 | Zulässige g-Werte nach [Fro99] | 9 |
| 2.3 | Fallhöhe nach DIN EN ISO 4180 | 10 |
| 2.4 | Prüfpläne und -schärfen für Packstücke mit einer Produktmasse > 30kg und ≤100kg nach DIN EN ISO 4180 | 11 |
| 2.5 | Bezugsprüfschärfen nach DIN EN 24180-2 | 13 |
| 2.6 | Aufprallgeschwindigkeiten | 14 |
| 2.7 | Charakteristische Werte für Dichte, Durchmesser und mechanische Eigenschaften von Pflanzenfasern nach [MMD05] und [MK99] | 29 |
| 2.8 | Chemische Zusammensetzung von Pflanzen nach [Wüs13] | 30 |
| 2.9 | Atomare Zusammensetzung von Cellulose in Gew.-% nach [Wüs13] | 32 |
| 5.1 | Maximal erreichbare Versuchsgeschwindigkeiten der Universalprüfmaschine | 65 |
| 5.2 | Maximal erfassbare Messgrößen der Universalprüfmaschine | 65 |
| 5.3 | Abdeckbare Geschwindigkeits- bzw. Dehnratenbereiche mit $l_0 = 35$ mm für Zug- und $l_0 = 3$ mm für Druckversuches | 75 |
| 5.4 | Blattbildungs- und Stützsiebdaten | 79 |
| 6.1 | Grenzen der Einflussfaktoren | 86 |
| 6.2 | Versuchsplan Universalprüfmaschine | 86 |
| 6.3 | Versuchsplan Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 87 |
| 6.4 | Amplituden des homogenen Anteils der Differentialgleichung | 94 |
| 8.1 | Zu validierende Parametersätze | 123 |
| 8.2 | Elastizitätsmodule | 123 |
| 8.3 | Plastische Dehnungen und Fließspannungen unter Zugbelastung | 124 |
| 8.4 | Plastische Dehnungen und Fließspannungen unter Druckbelastung | 125 |
| 8.5 | Dehnratenabhängige Skalierungsfaktoren der Fließspannung | 126 |
| 9.1 | Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Universalprüfmaschine | 133 |
| 9.2 | Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 133 |
| 9.3 | Messkettenspezifische Ungenauigkeiten der Probenvermessung | 134 |
| 9.4 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modellzielgröße Spannung | 134 |
| 9.5 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modellzielgröße Dehnung | 134 |
| 9.6 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Dehnratenrate | 135 |

| | | |
|------|--|-----|
| 9.7 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Dichte | 135 |
| 9.8 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Messkettenfehler auf die Modelleinflussgröße Bauteilfeuchte | 135 |
| 9.9 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Residuenstreuung auf die Zielgrößen | 136 |
| 9.10 | Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der Simulationsabweichung bei 23°C . | 136 |
| 9.11 | maximale Sicherheitsfaktoren zur Simulation von Faserformmaterialien | 137 |
| 9.12 | Typische Sicherheitsbeiwerte im Maschinenbau [Kün14], [Wit+09] | 137 |
| | | |
| A.1 | Erfüllungsgrade für Anlagenprinzipien [Pah+07] | 164 |
| A.2 | Gewichtungsmatrix der Kriterien zur Auswahl des Anlagenprinzips [Pah+07] . . | 164 |
| A.3 | Technische Wertigkeit W_T der Anlagenprinzipien [Pah+07] | 165 |
| A.4 | Wirtschaftliche Wertigkeit W_W der Anlagenprinzipien [Pah+07] | 166 |
| A.5 | Gesamtwertigkeiten W der Anlagenprinzipien [Pah+07] | 166 |
| | | |
| B.1 | Genauigkeiten der Messketten der Universalprüfmaschine | 168 |
| B.2 | Genauigkeiten der Messketten der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten | 168 |
| B.3 | Genauigkeiten der Messketten der Probenvermessung | 169 |

Symbolverzeichnis

| | | |
|----------------|---|-------------------|
| α | Steigung der lin. Anregungsfunktion | N/s |
| α_p | Steigung der lin. Anregungsfunktion des partikulären Teils der DGL | N/s |
| β | Y-Achsenabschnitt der lin. Anregungsfunktion | N |
| β_k | Knicklängenkorrekturfaktor | |
| β_p | Y-Achsenabschnitt der lin. Anregungsfunktion des partikulären Teils der DGL | N |
| δ | Abklingkonstante | 1/s |
| η | dynamische Viskosität | Pa s |
| λ | Quadrat der Eigenfrequenzen | 1/s ² |
| \mathcal{F} | Fourier-Transformierte | |
| ν | Querkontraktionszahl | % |
| Ω | Kreisfrequenz der harmonischen Anregung | 1/s |
| ω | Kreisfrequenz | Hz |
| ω_0 | Eigenkreisfrequenz | Hz |
| $\vec{\Phi}$ | Eigenvektor | |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| σ | Spannung | N/mm ² |
| σ_{fd} | Fließspannung unter Druckbelastung | N/mm ² |
| σ_{fz} | Fließspannung unter Zugbelastung | N/mm ² |
| σ_F | Fließgrenze | N/mm ² |
| σ_k | Knick- bzw. Eulerspannung | N/mm ² |
| σ_{tEd} | technische Elastizitätsspannung unter Druckbelastung | N/mm ² |
| σ_{tEz} | technische Elastizitätsspannung unter Zugbelastung | N/mm ² |

Symbolverzeichnis

| | | |
|----------------------------------|---|-------------------|
| σ_{tE} | technische Elastizitätsspannung | N/mm ² |
| σ_{vorh} | vorhandene Spannung | N/mm ² |
| σ_v | viskositätsbedingte Spannung | N/mm ² |
| σ_{zul} | zulässige Spannung | N/mm ² |
| σ_d | Druckfestigkeit | N/mm ² |
| σ_z | Zugfestigkeit | N/mm ² |
| ε | Dehnung/Deformation | % |
| $\dot{\varepsilon}$ | Dehnrate | 1/s |
| $\dot{\varepsilon}_{Druck\ max}$ | maximale Druckdehnrate | 1/s |
| $\dot{\varepsilon}_{Druck\ min}$ | minimale Druckdehnrate | 1/s |
| $\dot{\varepsilon}_{Zug\ max}$ | maximale Zugdehnrate | 1/s |
| $\dot{\varepsilon}_{Zug\ min}$ | minimale Zugdehnrate | 1/s |
| ε_{Bruch} | Bruchdehnung | % |
| ε_B | wahre Dehnung in Breitenrichtung | % |
| ε_{fd} | Fließdehnung unter Druckbelastung | % |
| ε_{fz} | Fließdehnung unter Zugbelastung | % |
| ε_L | wahre Dehnung in Längsrichtung | % |
| ε_{plast} | plastische Dehnung | % |
| ε_{tEd} | technische Elastizitätsdehnung unter Druckbelastung | % |
| ε_{tEz} | technische Elastizitätsdehnung unter Zugbelastung | % |
| ε_{tE} | technische Elastizitätsdehnung | % |
| ε_d | Dehnung der Druckfestigkeit | N/mm ² |
| ε_T | technische Dehnung | % |
| ε_W | wahre Dehnung | % |
| ε_z | Dehnung der Zugfestigkeit | N/mm ² |
| ε_{R_p} | Dehnung der Dehn-/Elastizitätsgrenze | % |

| | | |
|---------------------|--|-------------------|
| φ | relative Luftfeuchtigkeit | % |
| A | Fläche | m ² |
| A | Koeffizient | |
| a | Beschleunigung | m/s ² |
| a_{Aufp} | Aufprallbeschleunigung | m/s ² |
| a_{zul} | zulässige Beschleunigung | m/s |
| B | Koeffizient | |
| b | Y-Achsenabschnitt | |
| B_0 | Breite der unbelasteten Probe | m |
| B_{bel} | Breite der belasteten Probe | m |
| c | Federkonstante / Federsteifigkeit | N/m |
| C | Steifigkeitsmatrix | |
| c_{Anlage} | Anlagenfedersteifigkeit | N/m |
| c_{Probe} | Probensteifigkeit | N/m |
| D | Dicke der Probe | m |
| d | Dämpfungskonstante | N s/m |
| E | Elastizitätsmodul | N/mm ² |
| $E_{\text{kin Fg}}$ | kinetische Energie des Fallgewichts | J |
| $E_{\text{kin Kl}}$ | kinetische Energie der Klemmvorrichtung | J |
| E_{kin} | kinetische Energie | J |
| $E_{\text{pot Fg}}$ | potentielle Energie des Fallgewichts | J |
| $E_{\text{pot Kl}}$ | potentielle Energie der Klemmvorrichtung | J |
| E_{pot} | potentielle Energie | J |
| E_{Vers} | Versuchsenergie | J |
| F | Kraft | N |
| f_{Abtast} | Abtastfrequenz | Hz |

Symbolverzeichnis

| | | |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------|
| $F_{\text{Anr lin}}$ | lineare Anregungskraft | N |
| f_{B} | Bauteilfeuchte | % |
| $F_{\text{Dämpfer}}$ | Dämpfungskraft | N |
| F_{Feder} | Federkraft | N |
| F_{k} | Knick- bzw. Eulerkraft | N |
| f_{max} | maximale Frequenz | Hz |
| F_{Probe} | Probenkraft | N |
| F_{R} | Reibkraft | N |
| F_{Vers} | Versuchskraft | N |
| F_{Zul} | zulässige Kraft | N |
| g | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| h | Höhe | m |
| h_{Fall} | Fallhöhe | m |
| $h_{\text{Fg Kl}}$ | Höhe des Fallgewichts und der Klemme | m |
| $h_{\text{Vers Beg}}$ | Höhe des Versuchsbeginns | m |
| I | axiales Flächenträgheitsmoment | m ⁴ |
| k | Stoßzahl | |
| k | Stützstellen des Frequenzspektrums | |
| l | Länge | m |
| Δj | Auslenkungsgeschwindigkeit | m/s |
| Δl | Längenänderung | m |
| l_0 | Ursprungs- / Einspannlänge | m |
| m | Masse | kg |
| M | Massenmatrix | |
| m_{Fg} | Masse des Fallgewichts | kg |
| m_{Kl} | Masse der Klemme | kg |

| | | |
|---------------------------|--|-------------------|
| N | endliche Anzahl von Messwerten | |
| n_{AnfBed} | Anzahl der Anfangsbedingungen | |
| n_{Fg} | Anzahl der Freiheitsgrade | |
| n_{Koeff} | Anzahl der Koeffizienten | |
| p | Signifikanzwert | |
| p_{Atm} | Atmosphärendruck | bar |
| p_{I} | Innendruck | bar |
| p_{O} | Druck an Oberfläche | bar |
| Q | Amplitude der harmonischen Anregung | N |
| Q_{h} | Amplitude des homogenen Teils der Differentialgleichung | N |
| Q_{p} | Amplitude der harmonischen Anregung des partikulären Teils der Differentialgleichung | N |
| r | Radius | m |
| r^2 | Bestimmtheitsmaß | |
| R_e | Streckgrenze | N/mm ² |
| R_p | Dehn-/Elastizitätsgrenze | N/mm ² |
| S | Samples | |
| S | Sicherheitsfaktor | |
| s | Weg | m |
| \ddot{s} | Beschleunigung | m/s ² |
| Δs_{Einsp} | Abweichung des Probenspannvorrichtungswegs | m |
| \dot{s} | Geschwindigkeit | m/s |
| \vec{s} | Wegvektor | \vec{m} |
| s_0 | Ursprungsweg | m |
| s_{verz} | Verzögerungsweg | m |
| s_{Anlage} | Anlagenverfahrweg | m |

| | | |
|---------------|--|---|
| S_{Bf} | Sicherheitsfaktor der Bauteilfeuchte | |
| S_{De} | Sicherheitsfaktor der Dehnung | |
| S_{Di} | Sicherheitsfaktor der Dichte | |
| S_{Dr} | Sicherheitsfaktor der Dehnrates | |
| s_{Einsp} | Verfahrweg der Probeneinspannung | m |
| S_{GesBf} | Gesamtsicherheitsfaktor der Bauteilfeuchte | |
| S_{GesDe} | Gesamtsicherheitsfaktor der Dehnung | |
| S_{GesDi} | Gesamtsicherheitsfaktor der Dichte | |
| S_{GesDr} | Gesamtsicherheitsfaktor der Dehnrates | |
| S_{GesSp} | Gesamtsicherheitsfaktor der Spannung | |
| S_{Ges} | Gesamtsicherheitsfaktor | |
| s_k | Krissekante | m |
| $S_{MessEsl}$ | Sicherheitsfaktor der Einspannlängenmessung | |
| S_{MessGe} | Sicherheitsfaktor der Geschwindigkeitsmessung | |
| S_{MessGw} | Sicherheitsfaktor der Gewichtsmessung | |
| S_{MessKr} | Sicherheitsfaktor der Kraftmessung | |
| S_{MessPb} | Sicherheitsfaktor der Probenbreitenmessung | |
| S_{MessPd} | Sicherheitsfaktor der Probendickenmessung | |
| S_{MessPl} | Sicherheitsfaktor der Probenlängenmessung | |
| S_{MessWm} | Sicherheitsfaktor der Wegmessung | |
| S_{Mess} | Sicherheit einer Messkette | |
| S_{MgBf} | Sicherheitsfaktor der Modellgröße Bauteilfeuchte | |
| S_{MgDe} | Sicherheitsfaktor der Modellgröße Dehnung | |
| S_{MgDi} | Sicherheitsfaktor der Modellgröße Dichte | |
| S_{MgDr} | Sicherheitsfaktor der Modellgröße Dehnrates | |
| S_{MgSp} | Sicherheitsfaktor der Modellgröße Spannung | |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| S_{Mg} | Sicherheitsfaktor einer Modellgröße | |
| S_{Mod} | Sicherheitsfaktor der Modellierung | |
| s_p | Weg des partikulären Teils der Differentialgleichung | m |
| S_{SimDe} | Sicherheitsfaktor der Simulationsgröße Dehnung | |
| S_{SimSp} | Sicherheitsfaktor der Simulationsgröße Spannung | |
| S_{Sim} | Sicherheitsfaktor der Simulation | |
| S_{Sp} | Sicherheitsfaktor der Spannung | |
| s_{Vers} | Versuchsweg | m |
| T | Temperatur | °C |
| t | Zeit | s |
| t_{Vers} | Versuchszeit | s |
| v | Geschwindigkeit | m/s |
| Δv_{Probe} | Abweichung der Probengeschwindigkeit | m/s |
| v_0 | Ursprungsgeschwindigkeit | m/s |
| v_{Aufp} | Aufprallgeschwindigkeit | m/s |
| $v_{A Fg}$ | Anfangsgeschwindigkeit des Fallgewichts | m/s |
| $v_{A Kl}$ | Anfangsgeschwindigkeit der Klemme | m/s |
| v_{Abzug} | Abzugsgeschwindigkeit | m/s |
| v_{Anlage} | Anlagengeschwindigkeit | m/s |
| v_A | Anfangsgeschwindigkeit | m/s |
| $v_{E Kl}$ | Endgeschwindigkeit der Klemme | m/s |
| v_E | Endgeschwindigkeit | m/s |
| $v_{Fg Kl}$ | Fallgewichts- und Klemmvorrichtungsgeschwindigkeit | m/s |
| v_{Fg} | Fallgewichtsgeschwindigkeit | m/s |
| v_{max} | maximale Geschwindigkeit | m/s |
| v_{min} | minimale Geschwindigkeit | m/s |

Symbolverzeichnis

| | | |
|--------------------|-------------------------|-----|
| v_{Probe} | Probengeschwindigkeit | m/s |
| v_{Vers} | Versuchsgeschwindigkeit | m/s |
| $x(n)$ | Abtastwerte | |

A Tabellen und Diagramme der Konstruktionssystematik

Tabelle A.1: Erfüllungsgrade für Anlagenprinzipien [Pah+07]

| Kriterien | Erfüllungsgrade E (Bewertungsstufen) | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|
| | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Grundfläche | < 1 m ² | 1 m ² bis 4 m ² | 4 m ² bis 9 m ² | 9 m ² bis 16 m ² | > 16 m ² |
| Höhe | < 5 m | 5 m bis 8 m | 8 m bis 11 m | 11 m bis 15 m | > 15 m |
| Sicherheitsvorkehrungen | keine | wenige | strenge | spezielle Ausbildung nötig | Labor muss geräumt werden |
| Geschwindigkeitsabweichung | < 0,001 m/s | 0,001 m/s- 0,01 m/s | 0,01 m/s- 0,1 m/s | 0,1 m/s- 1 m/s | > 1 m/s |
| Energiebedarf | keiner | geringer | mittlerer | hoher | hoher Leistungsbedarf |

Tabelle A.2: Gewichtungsmatrix der Kriterien zur Auswahl des Anlagenprinzips [Pah+07]

| Kriterien | Kurzbez. | gegen Kriterien | | | | | Anzahl | Gewichtung G |
|-------------------------|----------|-----------------|---|---|-------|----|---------|--------------|
| | | H | S | V | K | K | | |
| Grundfläche | GF | GF | S | V | K | 3 | 17,65 % | |
| Höhe | H | H | S | V | K | 2 | 11,76 % | |
| Sicherheitsvorkehrungen | S | S | S | S | S | 5 | 29,41 % | |
| Geschw.-abweichung | V | V | S | V | V | 4 | 23,53 % | |
| Kosten | K | K | S | V | K | 3 | 17,65 % | |
| | | | | | Summe | 17 | 100 % | |

Tabelle A.3: Technische Wertigkeit W_T der Anlagenprinzipien [Pah+07]

| Kriterien | Lösungsbewertung | | | | | | | | |
|---|------------------|---|-------------|-------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | Impuls | | | Wellenausbreitung | | Treibladungen | | Hydraulisch | |
| | G | E | $E \cdot G$ | E | $E \cdot G$ | E | $E \cdot G$ | E | $E \cdot G$ |
| Grundfläche | 17,65% | 4 | 0,71 | 2 | 0,35 | 4 | 0,71 | 4 | 0,71 |
| Höhe | 11,76% | 4 | 0,47 | 4 | 0,47 | 4 | 0,47 | 4 | 0,47 |
| Sicherheitsvorkehrungen | 29,41% | 3 | 0,88 | 3 | 0,88 | 1 | 0,29 | 2 | 0,59 |
| Geschw.-abweichung | 23,53% | 2 | 0,47 | 2 | 0,47 | 1 | 0,24 | 3 | 0,71 |
| Energie | 17,65% | 3 | 0,53 | 3 | 0,53 | 2 | 0,35 | 3 | 0,53 |
| Punktesumme | | | 3,06 | | 2,71 | | 2,06 | | 3,00 |
| Techn. Wertigkeit W_T | | | 76,47% | | 67,65% | | 51,47% | | 75,00% |

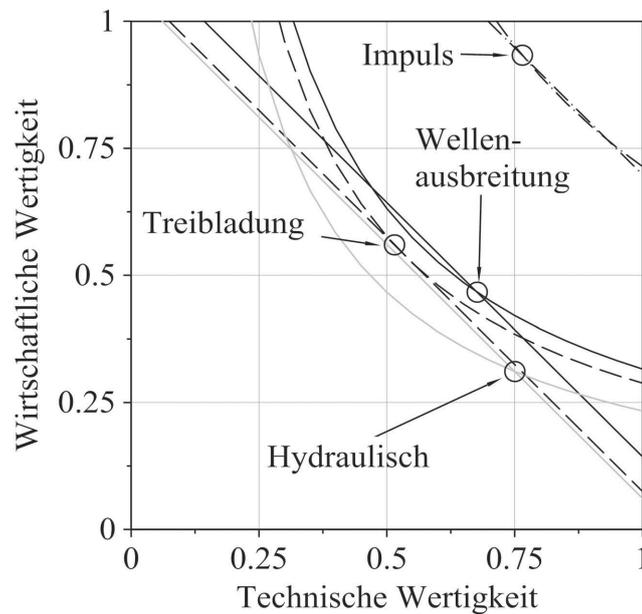


Abbildung A.1: Stärkediagramm der Anlagenprinzipien mit Gesamtwertigkeit nach dem Hyperbelverfahren und dem Geradenverfahren [Pah+07]

Tabelle A.4: Wirtschaftliche Wertigkeit W_W der Anlagenprinzipien [Pah+07]

| | Markt- vergleich | Impuls | Wellenaus- breitung | Treib- ladungen | Hydrau- lisch |
|---|---------------------|----------|------------------------|--------------------|------------------|
| Niedrigster vergl. Marktpreis $P_{M \min}$ | 100 000 € | | | | |
| Marktpreis P_M | 250 000 € | | | | |
| Herstellkosten H | 50 000 € | | | | |
| Kostenfaktor $\beta = P_M/H$ | 5 | | | | |
| Zul. Herstellkosten $H_{zul} = P_{M \min}/\beta$ | 20 000 € | | | | |
| Ideale Herstellkosten $H_i = 0,7 \cdot H_{zul}$ | 14 000 € | | | | |
| Herstellkosten des Entwurfs $H_{Entwurf}$ | | 15 000 € | 30 000 € | 25 000 € | 45 000 € |
| Wirtschaftl. Wertigkeit $W_W = H_i/H_{Entwurf}$ | | 93,33 % | 46,67 % | 56,00 % | 31,11 % |

Tabelle A.5: Gesamtwertigkeiten W der Anlagenprinzipien [Pah+07]

| | Impuls | Wellenaus- breitung | Treib- ladungen | Hydrau- lisch |
|----------------------------------|---------|------------------------|--------------------|------------------|
| Wirtschaftliche Wertigkeit W_W | 93,33 % | 46,67 % | 56,00 % | 31,11 % |
| Technische Wertigkeit W_T | 76,47 % | 67,65 % | 51,47 % | 75,00 % |
| Gesamtwertigkeit Geradenverf. | 84,90 % | 57,16 % | 53,74 % | 53,06 % |
| Gesamtwertigkeit Hyperbelverf. | 84,48 % | 56,19 % | 53,69 % | 48,30 % |

B Genauigkeiten der Messketten

Tabelle B.1: Genauigkeiten der Messketten der Universalprüfmaschine

| Messkette | Messkettenelement | Hersteller | Bezeichnung | Nennmessbereich | Nennkennwert | Genauigkeit |
|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|-------------|
| Kraftmessung | Kraftsensor | <i>HBM</i> | U10M | 2,5kN | 1 mV/V | 0,02 % |
| | Messverstärker | <i>HBM</i> | QuantumX MX410 | 4 mV/V | | 0,05 % |
| | Gesamtgenauigkeit | | | | | 5,5N |
| Wegmessung | Wegsensor | <i>HBM</i> | WA-L | 2 mm | 80 mV/V | 0,2 % |
| | Messverstärker | <i>HBM</i> | QuantumX MX410 | 100 mV/V | | 0,05 % |
| Gesamtgenauigkeit | | | | | | 5,25 µm |
| Einspannlänge | Lin.-Antrieb | <i>Indramat</i> | CLM, DKC, MKD | 250 mm | | 10 µm |

Tabelle B.2: Genauigkeiten der Messketten der Prüfmaschine für hohe Prüfgeschwindigkeiten

| Messkette | Messkettenelement | Hersteller | Bezeichnung | Nennmessbereich | Nennkennwert | Genauigkeit |
|-------------------|-------------------|----------------------|----------------|-----------------|--------------|-------------|
| Kraftmessung | Kraftsensor | <i>HBM</i> | CFT | 5 kN | 38500 pC | 0,1 % |
| | Ladungsverstärker | <i>HBM</i> | CMA | 39500 pC | 10 V | 0,05 % |
| | Messverstärker | <i>HBM</i> | QuantumX MX410 | 10 V | | 0,03 % |
| Gesamtgenauigkeit | | | | | | 9,1 N |
| Wegmessung | Wegsensor | <i>Micro-Epsilon</i> | ILD 2300LL | 20 mm | | 4 µm |
| | Controller | <i>Micro-Epsilon</i> | CSP2800 | | 10 V | 0,01 % |
| Gesamtgenauigkeit | Messverstärker | <i>HBM</i> | QuantumX MX410 | 10 V | | 0,03 % |
| Einspannlänge | Versuchsanlage | Eigenbau | | | | 10 µm |

Tabelle B.3: Genauigkeiten der Messketten der Probenvermessung

| Messkette | Messkettenelement | Hersteller | Bezeichnung | Nennmessbereich | Genauigkeit |
|---------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| Probengewicht | Trocknungswaage | <i>Mettler Toledo</i> | HB43 | 30 g | 3 mg |
| Probendicke | Bügelmessschraube | <i>Mahr</i> | Micromar 40 EWS | 25 mm | 4 µm |
| Probenbreite | Druckversuch | | | | |
| | Stanzwerkzeug | <i>Hans Naef AG</i> | Spezialanfertigung | 5 mm | 50 µm |
| Probenlänge | Druckversuch | | | | |
| | Stanzwerkzeug | <i>Hans Naef AG</i> | Spezialanfertigung | 15 mm | 50 µm |
| Probenfeuchte | Klimaschrank | <i>Binder</i> | KBF 240 | | 0,56 % |