

Ein Beitrag zur Etablierung von Holzwerkstoffen im strukturellen Automobilbau anhand der Vorentwicklung zweier Karosseriebauteile aus Rotbuche

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Swetlana Schweizer
aus Ekibastuz (Kasachstan)

Tag des Kolloquiums:	25.02.2022
Referent:	Prof. Dr. rer. nat Thomas Tröster
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA) an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn. Sie ist das Resultat meiner Forschungstätigkeit, die zu wesentlichen Anteilen vom Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) 2014 – 2020 der Europäischen Union sowie dem Land Nordrhein-Westfalen gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Thomas Tröster für seine fachliche und persönliche Unterstützung. Seine kritische Auseinandersetzung mit meiner wissenschaftlichen Arbeit und die wertvollen Anregungen haben meine Neugier immer weiter angefeuert und mich stets inspiriert, mein Wissen zu erweitern und neue Horizonte zu erschließen. Bei Herrn Prof. Gunter Kullmer möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates, das persönliche Interesse an meine Arbeit und die konstruktiven Ratschläge bedanken.

Weiterhin gilt mein herzlicher Dank allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls sowie allen Studierenden, deren studentische Arbeiten ich betreut habe und die mich im Rahmen Ihrer Arbeit am Lehrstuhl unterstützt haben, für die unvergessliche Zeit sowohl an guten als auch an den anstrengenden Tagen. Ihr habt mir geholfen, wenn Unterstützung notwendig war, mit mir gelacht oder sich geärgert, Neues gelernt und ausprobiert. Besonderer Dank gilt dabei den Kolleginnen und Kollegen aus dem Bereich Simulation, für die tatkräftige Unterstützung, für eure Zeit und Geduld.

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte hatte ich die Möglichkeit, mit zahlreichen Fachleuten aus Industrie und Forschung zusammenzuarbeiten. Vielen Dank für diese herausragende Zusammenarbeit und besonders für die interessanten Gespräche und Diskussionen, denen ich mit größter Freude beiwohnen durfte. Unter den zahlreichen Partnern möchte ich im Speziellen den Herrn Josef Hanses erwähnen, der leider viel zu früh von uns gegangen ist. Er hat maßgeblich mein Verständnis für den Werkstoff Holz beeinflusst und hat in mir die Begeisterung für dieses Material geweckt.

Von ganzem Herzen danke ich besonders meiner gesamten Familie, die immer hinter mir steht und mir den notwendigen Rückhalt in allen Lebenslagen bietet.

Zusammenfassung

Die überwiegende Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen ist ein wichtiger Aspekt zum dauerhaft nachhaltigen Wirtschaften. Dem Einsatz von Holzwerkstoffen in der Automobilindustrie stehen u. a. immer noch zahlreiche Kenntnislücken zum Material- und zum Strukturverhalten unter z. B. dynamischer Belastung entgegen. Um den Kenntnisstand zu erweitern und das Potenzial der Holzwerkstoffe als nachhaltige Alternative zu den etablierten Werkstoffen zu veranschaulichen, wurden hier zwei Demonstratoren von Bauteilen der Fahrzeugkarosserie aus dem Furnierschichtholz (FSH) der Buche entwickelt und getestet. Die ausgewählte Stoßabsorptionsvorrichtung und die Sitzrückwand wurden unter der Berücksichtigung der auftretenden Lasten und der Materialparameter konzipiert. Im Vordergrund standen bei der Stoßabsorptionsvorrichtung eine möglichst hohe Aufnahme von Crashenergie und bei der Sitzrückwand die fertigungstechnischen Aspekte der Furnierumformung zu einer komplexen Geometrie. Die entwickelten Demonstratoren erfüllten die im Rahmen dieser Arbeit an sie gestellten Anforderungen zufriedenstellend und wiesen zum Teil ein erhebliches Leichtbaupotenzial gegenüber den metallischen Referenzstrukturen auf. Mit dieser Arbeit wurden grundlegende Erkenntnisse über das Verformungs- und Versagensverhalten von Strukturen aus FSH unter quasistatischer und dynamischer Belastung gewonnen, um so die möglichen Einsatzgebiete dieses Holzwerkstoffes zu erweitern.

Abstract

The predominant use of renewable raw materials is a substantial aspect of sustainable management. The utilization of wood-based materials in the automotive industry is hampered due to numerous gaps in our knowledge of the material and the structural behavior under dynamic loads. To increase the level of knowledge and to illustrate the potential of wood-based materials as a sustainable alternative to established materials, two demonstrators of vehicle body components made of beech laminated veneer lumber (LVL) were developed and tested here. The selected crash box and the seat backpanel were designed taking into account the loads and the material parameters. The focus for the crash box was to absorb as much crash energy as possible and for the backpanel the manufacturing aspects of veneer forming into a complex geometry. The developed demonstrators satisfactorily met the requirements placed on them in the context of the study. Furthermore, they exhibited considerable lightweight design potential compared to the metallic reference structures in some designed experimental cases. In the current study, fundamental knowledge on the deformation and failure behaviour of LVL structures was gained under quasi-static and dynamic loading to expand the application of this wood-based material in several fields.

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen erschienen:

Akbulut Irmak E.F., Hanses, J., Schweizer, S., Tröster, T. (2019). *Modeling the Energy Absorption Characteristics of Wood Crash Elements*. Conference Paper, 12th European LS-DYNA Conference, Koblenz

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Thematik	1
1.1	Einordnung des Themas	2
1.2	Präzisierung des Entwicklungsziels und die gewählte Methodik	3
2	Wissensstand der Holzphysik	7
2.1	Holzmechanik.....	7
2.1.1	Ökologische und energetische Bedeutung des Holzes	9
2.1.2	Makroskopische und mikroskopische Holzstruktur.....	9
2.1.3	Hygroskopische Eigenschaften von Holz	13
2.1.4	Mechanische Eigenschaften und Versagensverhalten.....	14
2.1.5	Aufbau und Merkmale des Furnierschichtholzes.....	21
2.1.6	Holz als Hochleistungswerkstoff	22
2.2	Holz im modernen Automobil.....	23
3	Aufnahme der Kennwerte zu mechanischen Eigenschaften vom Furnierschichtholz	26
3.1	Zugbeanspruchung	26
3.1.1	Materialien und Methoden	27
3.1.2	Ermittelte mechanische Kennwerte.....	29
3.1.3	Abhängigkeit der Eigenschaften von der Schichtdicke	31
3.2	Druckbeanspruchung	34
3.2.1	Materialien und Methoden	34
3.2.2	Kennwerte bei statischer Druckbelastung	36
3.2.3	Kennwerte bei dynamischer Druckbelastung	37
3.2.4	Einfluss der Klebstoffart.....	39
3.3	Biegeeigenschaften.....	40
3.3.1	Materialien und Methoden	40
3.3.2	Kennwerte bei variierendem Lagenaufbau.....	42
3.3.3	Einfluss der Klebstoffart.....	45
4	Auswahl automobiler Strukturbauteile zur Auslegung mit Holzwerkstoffen.....	48
4.1	Potenziale des Furnierschichtholzes für den Einsatz im Automobil....	48
4.2	Festlegung der zu entwickelnden Demonstratoren	52
4.3	Charakteristik der Referenzstrukturen	53
4.3.1	Ausführung und Anforderungen an Stoßabsorptionsvorrichtungen aus Metallen und faserverstärkten Kunststoffen	54

4.3.2	Strukturbeschreibung und Anforderungen an eine Sitzrückwand	56
5	Konzeptentwicklung der Demonstratoren	59
5.1	Stoßabsorptionsvorrichtung	59
5.1.1	Voruntersuchungen zum Versagensverhalten und der Energieabsorption von geometrisch unterschiedlichen Holzstrukturen.....	60
5.1.2	Ausarbeitung eines erfolgsversprechenden Konzeptes.....	65
5.2	Sitzrückwand	68
5.2.1	Analyse der Ausbildung von Sickenstrukturen an flachen Holzelementen.....	70
5.2.2	Berechnungen zum optimalen Lagenaufbau	73
5.2.3	Konstruktion und Fertigung der Ersatzgeometrie	75
6	Prüfung der entwickelten Demonstratoren.....	79
6.1	Stoßabsorptionselement.....	79
6.1.1	Prüfstandaufbau und Prüfelemente.....	79
6.1.2	Prüfergebnisse.....	81
6.1.3	Analyse des Versagensverhaltens	84
6.1.4	Beurteilung der Demonstratoreigenschaften	87
6.2	Sitzrückwand	88
6.2.1	Prüfstandaufbau und Prüfmethode	88
6.2.2	Prüfergebnisse.....	90
7	Adaptieren eines Materialmodells für Nadelholz an Buchen - FSH.....	92
7.1	Beschreibung des Materialmodells MAT-143 für LS – DYNA.....	92
7.2	Aufbau der initialen Materialkarte für FSH aus Buche.....	95
7.3	Parameteranpassung der Materialkarte an Grundprüfungen	96
7.4	Validierung des Materialmodells an den Stoßabsorptionselementen.....	101
7.5	Finale Materialkarte für FSH aus Buche	105
7.6	Schwächen und Potenziale des Materialmodells MAT-143 für Simulationen im Automobilbereich.....	106
8	Bewertung des untersuchten Holzwerkstoffes für den prinzipiellen Einsatz im Automobil und die Formulierung forschungsrelevanter Herausforderungen	108
9	Literaturverzeichnis.....	111

1 Einführung in die Thematik

Die offizielle Geburtsstunde des Automobils liegt bereits über 130 Jahre zurück. Im Jahre 1886 hat der Konstrukteur Carl Benz den ersten Wagen mit Verbrennungsmotor patentiert (Patentschrift DRP 37435). Seit dieser Zeit wurde das Automobil stetig weiterentwickelt, sodass aus einer einst handgefertigten, motorisierten Dreirad-Kutsche ein hochkomplexes und weitverbreitetes Industrieerzeugnis entstand. Die gegenwertige Verbreitung dieses Verkehrsmittels kann anhand einiger statistischer Daten verdeutlicht werden. Zum 01. Januar 2020 waren laut Kraftfahrtbundesamt in Deutschland 701 Kraftfahrzeuge pro 1000 Einwohner angemeldet. Mehr als die Hälfte aller Bundesbürger ist somit motorisiert. Weltweit waren im Jahr 2015 knapp 1,3 Milliarden Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs. Dabei ist diese Zahl zwischen den Jahren 2005 und 2015 stetig um mehr als 30 % gestiegen. Auch in der Zukunft ist zu erwarten, dass genau diese Transportform weiterhin ihren Platz in der Gesellschaft bewahrt. Der Wunsch jedes einzelnen Menschen nach uneingeschränkter Mobilität kann mit keinem anderen Transportmittel so gut erfüllt werden, wie mit einem Automobil. [Ans97], [Sta18]

Wegen der hohen Anforderungen, die an die Fahrzeuge gestellt werden, steht die Automobilindustrie unter enormen Druck, die Fahrzeuge technisch zu verbessern und an die Bedürfnisse der Gesellschaft anzupassen. Jeder Fahrzeughersteller arbeitet mit Hochdruck an neuen Technologien, um einerseits die Konkurrenz zu überbieten und andererseits den strengen gesetzlichen Anforderungen an Umweltschutz und Sicherheit gerecht zu werden. Die steigenden Bedürfnisse der Autofahrer sowie technische und sicherheitsrelevante Anforderungen führen dazu, dass neben der Anzahl der Fahrzeuge auch deren Gewicht in den vergangenen 130 Jahren stetig gestiegen ist. Z. B. erfordert mehr Fahrleistung einen stärkeren und somit auch schwereren Motor → schwerere Motoren und höhere Fahrgeschwindigkeiten ziehen Fahrwerksanpassungen nach sich → für gleiche oder größere Reichweite wird somit auch ein größerer Kraftstofftank benötigt → kollektiv erfordert es eine höhere Karosseriesteifigkeit, die ebenfalls das Gesamtgewicht erhöht [Ans97]. Aber nicht nur strukturelle Änderungen an Karosserie und Fahrwerk, sondern auch das „Mehr“ an Komfort durch z. B. elektrische Bedienelemente oder Fahrassistenzsysteme treiben das Fahrzeuggewicht stetig nach oben.

Die Auswirkungen der steigenden Fahrzeugmassen auf die Emissionen klimaschädlicher Gase können abgeschätzt werden. Eine Erhöhung des Fahrzeuggewichtes um 100 kg steigert den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch um ca. 0,5 l / 100 km und somit auch die CO₂-Emissionen um 12 g / km. Ziel des Leichtbaus ist es, eine Struktur mit minimalem Eigengewicht und einer definierten Stabilität und Lebensdauer zu realisieren. Dabei bedienen sich die Entwickler unterschiedlicher Methoden, um das übergeordnete Ziel des Leichtbaus zu erreichen. Es wird an einer möglichst anwendungsgerechten Bauweise, neuen leichteren Werkstoffen und fortschrittlichen Herstelltechnologien gearbeitet. Bei allen diesen Entwicklungen spielen auch die Kosten eine wichtige Rolle. Ein Massenprodukt wie das Automobil muss für die Masse erschwinglich bleiben. Somit

muss immer ein Kompromiss zwischen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten erreicht werden, um den gestellten Anforderungen gerecht zu werden. [Kle13]

1.1 Einordnung des Themas

Die Massereduktion bei modernen Kraftfahrzeugen kann nicht zuletzt durch den Einsatz von neuartigen und vor allem leichteren Werkstoffen erreicht werden. Der erste wichtige Schritt in diese Richtung wurde durch die Entwicklung von hochfesten und höchstfesten Stählen realisiert. Die Dichte und somit das Gewicht dieser Stahlgüten wurde nicht verändert, deren Eigenschaftsspektrum wurde aber deutlich ausgeweitet. Dadurch konnte der Querschnitt einzelner Bauteile durch die veränderten Materialeigenschaften deutlich reduziert werden. Kleineres Materialvolumen bei gleichbleibender Dichte ergibt ein geringeres Gewicht. Da die Festigkeitssteigerung bei metallischen Werkstoffen physikalische Grenzen hat und die Querschnittsreduzierung nicht unendlich betrieben werden kann, kann dieser Ansatz nur begrenzt genutzt werden. Die Abbildung 1-1 zeigt die Anteile unterschiedlicher Werkstoffe am Gesamtgewicht der Fahrzeuge. Etwa drei Viertel des Gesamtgewichtes machen die metallischen Werkstoffe aus. Mit einem Anteil von über 55 % werden überwiegend Stahlwerkstoffe mit unterschiedlichen, an die jeweilige Anwendung angepassten Eigenschaften eingesetzt. Die im weiten Bereich einstellbaren Eigenschaften und die ausgereiften Be- und Verarbeitungstechnologien sind die wichtigsten Argumente der Fahrzeugentwickler bei der Entscheidung für diesen bereits äußerst vertrauten Werkstoff. [MEKW12]

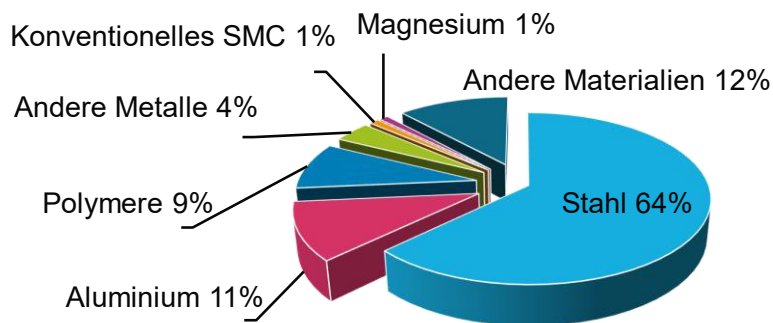


Abbildung 1-1: Anteile der bei der Produktion eines Pkws verwendeten Materialien im Jahr 2015 (bezogen auf das Gewicht) nach [Duc16]

Im Rahmen weiterer Entwicklungen wurde die Werkstoffgruppe der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) für den Automobilbau erschlossen. Nach dem Vorbild der Natur wurden die FKV aus hochfesten Fasern eingebunden in einem polymeren Matrixwerkstoff mit deutlich geringerer Festigkeit entwickelt. Die Fasern und die Matrix werden derart miteinander kombiniert, dass sich Eigenschaften ergeben, die von den Komponenten allein nicht erreicht werden können. Die festen Fasern nehmen die mechanischen Lasten auf, während die polymere Matrix die Fasern in der vorgegebenen Position fixiert. Natürliche Faserverbundstrukturen finden sich sowohl in der Pflanzenwelt als auch bei Lebewesen. Die Tragstrukturen von Pflanzen (Stängel) bestehen aus Fasern. Die Muskulatur und der

Knochenbau von Lebewesen (Tiere und Menschen) sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Die Kollagenfasern, eingebettet in einer anorganischen Substanz, passen sich in ihrem Wachstum der Belastung an. [Sch07]

Mit der Entwicklung von Kunststoffen, insbesondere der Kunstharze wurde auch die Verbreitung der modernen Faserverbundwerkstoffe angetrieben. Aktuell werden Hochleistungsfasern, wie Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern in Kunststoffe eingebettet. Kunststoffe haben eine geringe Dichte, sind korrosionsbeständig und haften gut auf den Fasern. Zu den Vorteilen der FKV zählen vor allem die hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht. Das beträchtliche Energieaufnahmevermögen ist besonders für crashrelevante Automobilbauteile attraktiv. Durch die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften der Faserwerkstoffe lassen sich konstruktiv belastungsangepasste und dementsprechend gewichtsoptimierte Strukturen realisieren. Diese Materialien sollen vermehrt im Automobil eingesetzt werden. Der maßgebende Nachteil der FKV ist der im Vergleich zu Metallen hohe Preis des Materials und der daraus hergestellten Produkte. Der beträchtliche Energieeinsatz bei der Herstellung verursacht nicht nur hohe Kosten, sondern hinterlässt auch einen folgenreichen ökologischen Fußabdruck. Die hohen Kosten und die negativen Folgen für die Umwelt verhindern den massenweisen Einzug der FKV in die modernen Fahrzeugkarosserien. [Sch07]

Bei dem allgegenwärtigen Ziel zum Erhalt einer „gesunden“ Umwelt durch die effiziente Nutzung der verfügbaren Ressourcen beschäftigt sich unsere Gesellschaft immer mehr mit den Fragestellungen zu Energieaufwand, Schadstoffemissionen, Treibhauseffekt und Umweltbelastung. Diesen kritischen Fragenstellungen kann derzeit nur bedingt durch die existierenden Leichtbaukonzepte im Automobilbau begegnet werden.

Die zwingende Notwendigkeit des Leichtbaus und der Wunsch nach einer nachhaltigen Ressourcennutzung treiben die Automobilindustrie dazu, den Werkstoff Holz für ihre Zwecke zu beleuchten und gegebenenfalls zu adaptieren. Der Hauptgrund dafür ist die Dichte von Holz: Sie beträgt nur ein Zehntel der Dichte von Stahl. Zwar sind die mechanischen Eigenschaften von Holz deutlich geringer, auf die Dichte bezogen kann Holz aber durchaus mit den Stahlwerkstoffen konkurrieren. Auch in punkto der Nachhaltigkeit weist Holz deutliche Vorteile auf, da es bei richtiger Handhabung ohne zusätzlichen Energieaufwand zur Verfügung steht. Trotz jahrhundertelanger Holzforschung sind zahlreiche Lücken vor allem bei der Modellierung von Holzeigenschaften oder der Zeitabhängigkeit elastischer Konstanten vorhanden [NS17]. Somit eröffnet sich in diesem Bereich ein großes Feld mit enormem Forschungsbedarf.

1.2 Präzisierung des Entwicklungsziels und die gewählte Methodik

Trotz intensiver Forschungsarbeit zu Aufbau und Eigenschaften von Holz ist es bislang nicht gelungen, alle physikalischen und chemischen Prozesse in diesem natürlich ge-

wachsenen Werkstoff zu verstehen. Es gibt noch immer zahlreiche Fragen zu den Materialeigenschaften wie z. B. plastische Verformung oder Richtungs- und Zeitabhängigkeit der Eigenschaften. Dadurch ist es nur bedingt möglich, zuverlässige Berechnungsmodelle für Strukturen aus Holz und den zahlreichen Holzwerkstoffen aufzustellen.

Vor allem in der Automobiltechnik ist die Sicherheit der Fahrzeuginsassen existenziell. Gepaart mit dem Ziel des Extremleichtbaus entstehen besondere Herausforderungen in der Fahrzeugauslegung. Neben den genauen Kenntnissen zum Materialverhalten sind vor allem exakte Berechnungsmethoden der Schlüssel zum Erfolg.

In dieser Arbeit wird das Potenzial eines ausgewählten Holzwerkstoffes für den Einsatz in modernen Fahrzeugkarosserien, und zwar im strukturellen Fahrzeugbau und nicht nur als Interieur-, Füll- oder Dämmwerkstoff aufgezeigt. Neben der Beschreibung des Aufbaus und des Versagensverhaltens werden dafür zunächst die wichtigsten Werkstoffkennwerte ermittelt.

Zur Darstellung des Werkstoffpotenzials reichen die Kennwerte alleine nicht aus. Deswegen wird anhand der Entwicklung zweier Demonstratoren gezeigt, welcher Entwicklungsaufwand notwendig ist und welche gewichts- und umwelttechnischen Vorteile durch den Einsatz von Holzwerkstoffen im Automobil entstehen können. Neben den positiven Aspekten werden auch die Herausforderungen beleuchtet, die auf diesem Weg noch überwunden werden müssen.

Als Grundlage für den Entwicklungsprozess dienen die Materialkennwerte eines ausgewählten Holzwerkstoffes aus der deutschen Rotbuche. In Anlehnung an die vorhandenen Methoden zur Ermittlung der Materialeigenschaften (für Holz) werden im Rahmen dieser Arbeit abweichende Geometrien für die Probenkörper eingesetzt. Neben der Faserichtung werden der Lagenaufbau, der Klebstoff und die Lagedicke des Holzwerkstoffes variiert. Hiermit wird ermittelt, inwieweit auf die Steifigkeiten und Festigkeiten des Holzwerkstoffes Einfluss genommen werden kann.

Anhand der ermittelten Kennwerte und einem Vergleich dieser zu den typischerweise im Automobilbau verwendeten Werkstoffen wird die Auswahl automobiler Karosseriekomponenten vorgenommen, die zur Auslegung aus dem untersuchten Holzwerkstoff geeignet sind. Hierbei wird zunächst nur das mechanisch technische Anforderungsprofil der Komponenten berücksichtigt. Wirtschaftliche und umweltrelevante Aspekte stehen nicht im Vordergrund, werden aber nicht gänzlich außer Acht gelassen.

Nach der Festlegung der zu entwickelnden Karosseriekomponenten werden im Rahmen des vorhandenen Bauraumes Konzepte erarbeitet, wie das ausgewählte Material in seinem Aufbau und seiner Form bestmöglich die an ihn gestellten Anforderungen erfüllen kann. Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sind hier genauso wichtig wie das Versagensverhalten und die fertigungstechnischen Aspekte. In speziell entwickelten Prüfvorrichtungen und nach eigens festgelegten Prüfmethoden werden die nach den vielversprechendsten Konzepten entwickelten Demonstratoren getestet.

Neben der Demonstratorentwicklung fließen die Ergebnisse der Materialuntersuchungen in die Erstellung und Validierung einer Materialkarte für Holzwerkstoffe. Holz weist einige weitere Eigenschaften auf, die in anderen Werkstoffgruppen (z. B. Metalle) nicht vorkommen, die aber zur Beschreibung des Materialverhaltens berücksichtigt werden müssen. Entsprechend wird zur simulativen Auslegung ein Materialmodell benötigt, das das spezifische Holzverhalten abbilden kann. Ein erstes Materialmodell mit zwei Materialkarten für Nadelhölzer existiert bereits. Die Eignung dieses Modells zur Auslegung von Karosseriekomponenten aus dem gewählten Holzwerkstoff wird ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

2 Wissensstand der Holzphysik

Seit der Entstehung der menschlichen Zivilisation ist Holz ein vielfach verwendeter Werkstoff. Es stand bei jeder neu entwickelten Technologie immer im Vordergrund. Die ersten Häuser haben die Menschen aus Holz gebaut. Das erste Geschirr wurde aus Holz geschnitzt. Der erste Brennstoff, den die Menschheit eingesetzt hat, war Holz. Auch den Mobilitätssektor hat Holz nachhaltig geprägt. Schiffe, Kutschen, Fahrräder, Flugzeuge und auch Automobile sind zunächst aus diesem vielseitigen Werkstoff gebaut worden. Im Laufe der Jahrhunderte haben Beton, Porzellan, Kunststoff und natürlich Metalle das Holz immer weiter aus dem Lebensbereich der Menschen verdrängt.

Noch vor unserer Zeitrechnung sind bereits die ersten uns bekannten wissenschaftlichen Arbeiten zur Anatomie des Holzes entstanden. Dabei wurde hauptsächlich der innere Aufbau der Bäume als Analogie zu tierischen Körpern beschrieben. Erst die Erfindung des Mikroskops im 17. Jahrhundert legte den Grundstein zu tiefergehendem Erkenntnisgewinn in der holzanatomischen Forschung. Aufgrund der Fortschritte in der Mikroskopietechnik konnten die Holzstruktur tiefergehender beschrieben, die biologischen Vorgänge erklärt und die Verbindungen zu den Holzeigenschaften abgeleitet werden. [Wag99]

Die heutige Materialforschung konzentriert sich überwiegend auf das zeitliche Verhalten (Kriechen) von Holz unter Umwelteinflüssen (Klima-Belastungs-Interaktion). Auch wird verstärkt an den theoretischen Ansätzen zur Modellierung der Materialparameter und des Werkstoffverhaltens im Rahmen der kontinuumsmechanischen Betrachtung geforscht. [Gri99]

2.1 Holzmechanik

Der Rohstoff Holz kann grundsätzlich auf zwei Arten genutzt werden, als Vollholz und als Holzwerkstoff. Zu Vollholz gehört Schnittholz, Furnier und Rundholz. Dabei kann das Holz vergütet oder unvergütet sein. Unvergütetes Holz ist unbehandelt, kann aber getrocknet oder klimatisiert sein. Von einer Vergütung von Holz spricht man, wenn:

- durch Druck die Dichte und somit die Festigkeit erhöht wird.
- das Holz mit Kunstharzen getränkt wird.
- eine thermische oder eine hydrothermische Behandlung durchgeführt wird (z. B. Methylierung). [NS17]

Durch die Vergütung können mechanische und physiologische Eigenschaften des Holzes verändert und die Resistenz gegen Schädlinge und Pilze verbessert werden.

Die Holzwerkstoffe werden durch Zerkleinern von Vollholz zu Flächengebilden oder Partikeln und anschließendem Zusammenfügen hergestellt. Holzwerkstoffe werden nach Ihrem Aufbau in fünf Kategorien eingeteilt: Vollholzwerkstoffe, Furnierwerkstoffe, Span-

werkstoffe, Faserwerkstoffe und Verbundwerkstoffe. In dieser Arbeit werden Furnierwerkstoffe behandelt. Furnierwerkstoffe bestehen aus symmetrisch übereinander geschichteten und miteinander verklebten Furnierlagen. Durch eine Vergütung, ähnlich wie beim Vollholz, oder eine gezielte Orientierung der Lagen zueinander können die Eigenschaften der Werkstoffe ebenfalls in einem weiten Bereich eingestellt werden. [NS17]

Der Werkstoff Holz weist unabhängig von der Art seiner Verarbeitung eine inhomogene und komplexe Beschaffenheit aus unterschiedlichen Strukturen über mehrere Ebenen auf. Es kann zwischen einer makroskopischen (z. B. Jahresringe, Faserrichtung), einer mikroskopischen (z. B. Aufbau von Frühholz oder Spätholz, Porosität), einer submikroskopischen (z. B. Zellwandaufbau) und der chemischen Struktur (z. B. übermolekularer Bau, Cellulose) eines Baumes unterschieden werden. Die einzelnen Ebenen des strukturellen Aufbaus sind in Abbildung 2-1 graphisch dargestellt. [NS17]

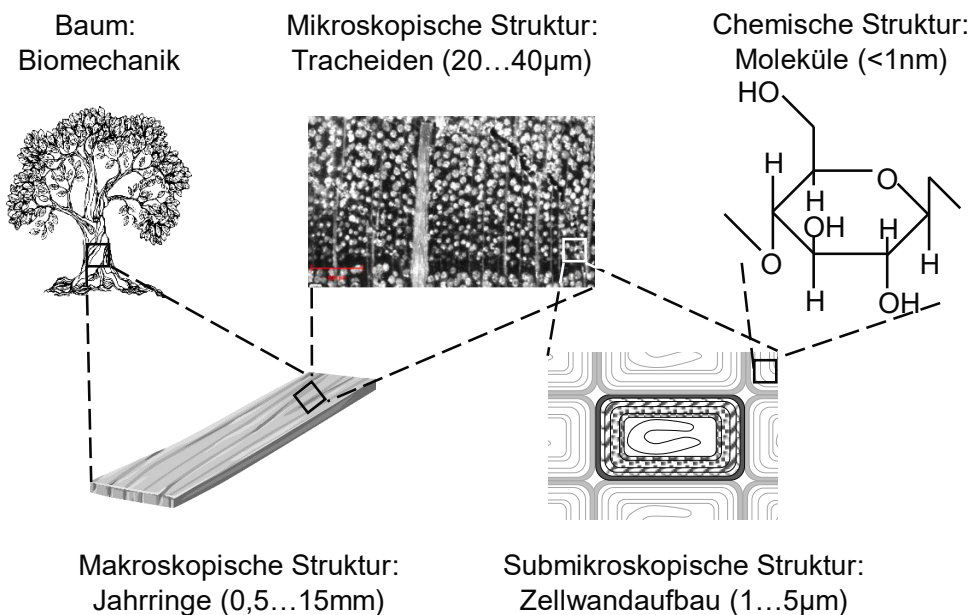


Abbildung 2-1: Hierarchische Struktur im Holz nach [Har02]

Je nach Holzart, Nadel- oder Laubholz, ist die Struktur zudem unterschiedlich aufgebaut. In dieser Arbeit wird nur auf das Laubholz eingegangen, wobei die Versagensmechanismen bei beiden Holzarten nahezu identisch sind. Der Aufbau des Holzes und die Wachstumsbedingungen haben eine unmittelbare Auswirkung auf seine physikalischen, mechanischen und nicht selten auch biologischen Eigenschaften.

Die Holzfeuchte beeinflusst ebenfalls massiv die Holzeigenschaften. Die Temperatur übt nur einen geringen direkten Einfluss aus, führt aber i. d. R. zu einer Änderung der Holzfeuchte. Ein anderer wichtiger Faktor ist die Beanspruchungsdauer. Holzwerkstoffe weisen ein ausgeprägtes viskoelastisches Materialverhalten auf. Deshalb müssen Kriechen und Spannungsrelaxation bei der Verhaltensanalyse immer mitbetrachtet werden.

2.1.1 Ökologische und energetische Bedeutung des Holzes

Mithilfe von Sonnenlicht wandelt ein Baum CO_2 und Wasser in Biomasse um. Dabei wird Sauerstoff in die Atmosphäre abgegeben. Holz besteht zu ungefähr 50 % aus Kohlenstoff und ist damit ein natürlicher Kohlenstoffspeicher. Zur Bildung von einem Kubikmeter Holz bindet ein Baum zwischen 250 kg und 300 kg Kohlenstoff. Der auf diese Art gespeicherte Kohlenstoff trägt zunächst nicht zum Treibhauseffekt bei. Wird das Holz in langlebigen Produkten wie z. B. in Gebäuden eingesetzt, so ist der darin enthaltene Kohlenstoff temporär der Atmosphäre entzogen. Diese Vorgehensweise der Kohlenstoffspeicherung wird als Carbon Capture and Storage bezeichnet. Je mehr Holz in Produkten mit hoher Nutzungsdauer eingesetzt wird, desto mehr von diesem Material muss aber auch forstwirtschaftlich nachgebaut werden. Es ist eine Tatsache, dass junge Bäume mehr CO_2 umsetzen als ausgewachsene Bäume. Dadurch ist die Baumholznutzung im Sinne der Kohlenstoffspeicherung wünschenswerter als reiner Bestandserhalt. [Dol13], [Wol09]

Zudem weist Holz einen beachtlichen Energiegehalt auf. Die durch die Sonnenenergie entstandenen chemischen Verbindungen geben beim Aufbrechen (z. B. durch thermische Zersetzung) wieder Energie ab, die effektiv genutzt werden kann. Holz weist nachweislich eine positive Energiebilanz auf. Am Beispiel von Holzbauten kann dies praktisch erklärt werden. Am Ende der Nutzungsphase eines Holzgebäudes kann das Holz immer noch neben der weiteren Wiederverwendung auch thermisch verwertet werden. Bei der Verbrennung wird so viel Energie wieder frei, dass mit dieser Energie 2 – 3 vergleichbare Gebäude ebenfalls aus Holz aufgebaut werden können. Nachteilig ist die thermische Verwertung im Hinblick auf die Kohlenstoffspeicherung. Der Kohlenstoff wird dabei frei und bildet wieder CO_2 in der Atmosphäre. Aus diesem Grund wird diese Art der Kohlenstoffspeicherung als temporär bezeichnet. [Wol09]

In jedem Fall weist Holz in seiner reinen Form eine neutrale Kohlenstoffdioxidbilanz auf. Nur der Kohlenstoff, der beim Wachsen des Baumes im Holz gespeichert wurde, kann bei einer thermischen Verwertung wieder abgegeben werden. [Hän12]

2.1.2 Makroskopische und mikroskopische Holzstruktur

Um das Versagensverhalten von Holzwerkstoffen unter verschiedenen Belastungssituationen zu verstehen, ist es wichtig, seine Beschaffenheit bis auf die mikroskopische Struktur zu kennen. Holz ist ein natürlich gewachsener Werkstoff, der sich an die Anforderungen des Baumes bezüglich seiner Stabilität und seiner Versorgung angepasst hat. Deswegen ist Holz ein anisotropes Material mit stark richtungsabhängigen Eigenschaften.

Die äußere Schicht eines Baumes bildet die Rinde. Sie wird in die äußere Rinde, die Borke, und in die innere Rinde, den Bast unterteilt. Die Rinde dient hauptsächlich zum Schutz des Baumes vor äußeren Einflüssen. Diese können physikalischer (z. B. Tempe-

ratur), mechanischer oder biologischer (z. B. Insekten, Infektionen) Natur sein. In radialer Richtung folgen das Kambium und das Splintholz. Das Kambium ist für das Dickenwachstum des Baumes verantwortlich. Es erzeugt nach außen Rinde und nach innen Splintholz. Splintholz ist hauptsächlich für den Wasser- und Nährstofftransport verantwortlich. Das innere Kernholz und das Mark sind abgestorben. Eine graphische Darstellung der wichtigsten Strukturelemente ist in Abbildung 2-2 gezeigt. [Gri99], [NS17], [Wag99]

Bei der Holzbetrachtung wird nach drei Hauptachsen unterschieden. Die longitudinale Achse (L) verläuft längs des Baumes in die Höhenwachstumsrichtung. Die radiale Achse (R) ist vom Mark zur Baumrinde senkrecht zu den Jahresringen gerichtet. Die tangentielle Achse (T) bildet die dritte Raumrichtung und verläuft parallel zum Jahresringverlauf. Diese Beschreibung legt eine Nutzung von Zylinderkoordinaten nahe. In einem ausreichenden Abstand vom Mark kann das Holz annähernd durch ein kartesisches Koordinatensystem beschrieben werden. Daraus ergeben sich die drei Schnittflächen: Querschnittsfläche RT, Tangentialfläche LT und Radialfläche LR. [Ran07], [Wag99], [NS17]

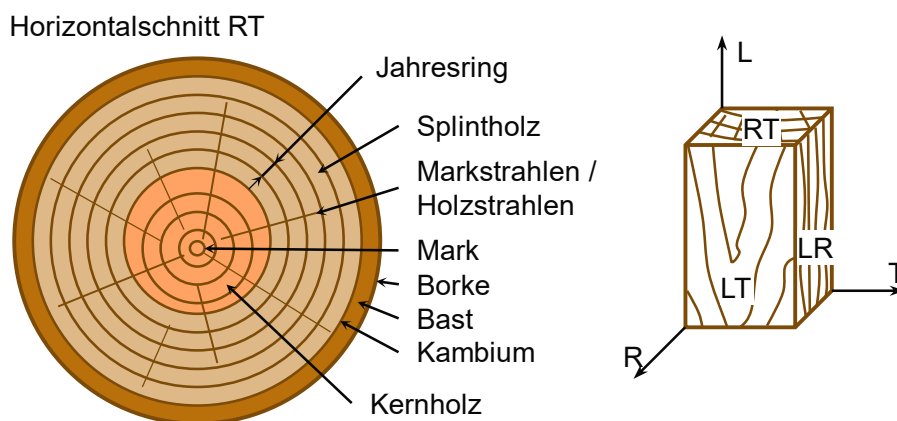


Abbildung 2-2: Die drei Schnittflächen des Holzes und die wichtigsten Strukturelemente nach [Fli08], [DN02]; L – Longitudinal, R – Radial, T – Tangential, LT – Tangentialfläche, RT – Querschnittsfläche, LR – Radialfläche

Das Wachstum des Holzes in die Dickenrichtung ist periodisch und eng an die Temperatur und die Wasserversorgung gekoppelt. Im Winter findet kein Dickenwachstum statt. Im Frühjahr liegt die Priorität des Baumes auf dessen Wasserversorgung, deswegen ist das Holz, das zu diesem Zeitpunkt gebildet wird, locker und porenreich. Diese Holzabschnitte werden als Frühholz bezeichnet. Im Spätsommer und Herbst wird die Festigkeit der Holzzellen in den Vordergrund gestellt. Die Anzahl der Wassertransportwege und deren Durchmesser werden im Laubholz reduziert, dadurch steigt die Dichte des Holzes. Diese Holzabschnitte werden als Spätholz bezeichnet. In einem Horizontalschnitt des Baumes sind die so entstandenen unterschiedlichen Zuwachszonen, auch Jahresringe genannt, durch farbliche Absetzung gut erkennbar (Abbildung 2-2). Das Frühholz macht etwa 4/5 der Jahresringbreite aus und ist heller als das Spätholz. [Nie06], [Gri99], [Wag99]

Mikroskopisch gesehen bestehen die Laubhölzer aus vielen unterschiedlichen Zelltypen. Zwischen den Zelltypen herrscht eine organisierte Arbeitsteilung. Die wichtigsten Typen sind die Holzfasern, die Tracheen und die Parenchymzellen. Die Holzfasern, auch Tracheiden oder Libriformfasern genannt, bilden hauptsächlich das axiale Grundgerüst des Baumes und sind für die Festigkeit verantwortlich. Die Holzfasern haben eine Länge von 0,5 mm bis 1,5 mm und einen Durchmesser von 0,02 mm bis 0,05 mm. Sie sind hauptsächlich in die Längsrichtung (L) des Baumes gerichtet und machen bei den meisten Laubhölzern zwischen 50 % und 60 % der Holzmasse aus. Die Tracheen oder auch Gefäße genannt, dienen der Wasserversorgung mit den darin enthaltenen Nährstoffen (Abbildung 2-3). Die Länge der Einzelzelle der Gefäße liegt bei wenigen zehntel Millimeter, aber die Gefäße selbst können mehrere Meter lang sein. Die Parenchymzellen sind lebende Zellen und sind vor allem für die Einlagerung von Nährstoffen verantwortlich. Sie lagern gummiartige Substanzen in die Zellen ein und verstopfen damit einige Leitungsbahnen. Auf diese Weise wirken die Einlagerungen als ein natürlicher Abwehrmechanismus gegen Mikroorganismen. [Ran07], [Nie06], [NS17], [Hän12]

Die Anordnung der Tracheiden/Holzfasern ist in die radiale und transversale Koordinatenrichtung nicht gleich. In die radiale Richtung sind die Fasern in einer Richtung angeordnet. In tangentialer Richtung sind diese gegeneinander versetzt. In der Abbildung 2-3 ist dies anhand einer mikroskopischen Aufnahme verdeutlicht. [Wag99]

In der Abbildung 2-4 ist der Aufbau einer Zellwand von Holz dargestellt. Eine Holzfaser hat in ihrem Inneren einen Hohlraum (Lumen). Die Zellwand wird aus verschiedenen Schichten (S1, S2 und S3) gebildet. Diese Schichten werden aus Mikrofibrillen gebildet. Mikrofibrillen sind lange Bündel aus Celluloseketten und Hemicelluloseketten. Die Verteilung und Orientierung dieser Ketten bestimmen die mechanischen Eigenschaften der Zelle. Die Mittellamelle schließt die Zelle ab, bildet den Raum zwischen den einzelnen Zellen und besteht fast ausschließlich aus Lignin. [Ran07]

Der Werkstoff Holz besteht aus den folgenden chemischen Elementen:

- 50 % Kohlenstoff
- 43 % Sauerstoff
- 6 % Wasserstoff
- < 1 % Stickstoff
- < 1 % Mineralstoffe

Diese Elemente bilden chemische Komponenten. Bei den Komponenten muss zwischen den makromolekularen und niedermolekularen Bestandteilen unterschieden werden. Den Großteil machen die makromolekularen Bestandteile aus. Das sind z. B. die Zellwandkomponenten. Anteilmäßig gering sind die Mengen an niedermolekularen Bestandteilen. Dazu zählen die Extrastoffe und die Mineralstoffe, die baumartspezifisch sind. [LW10]

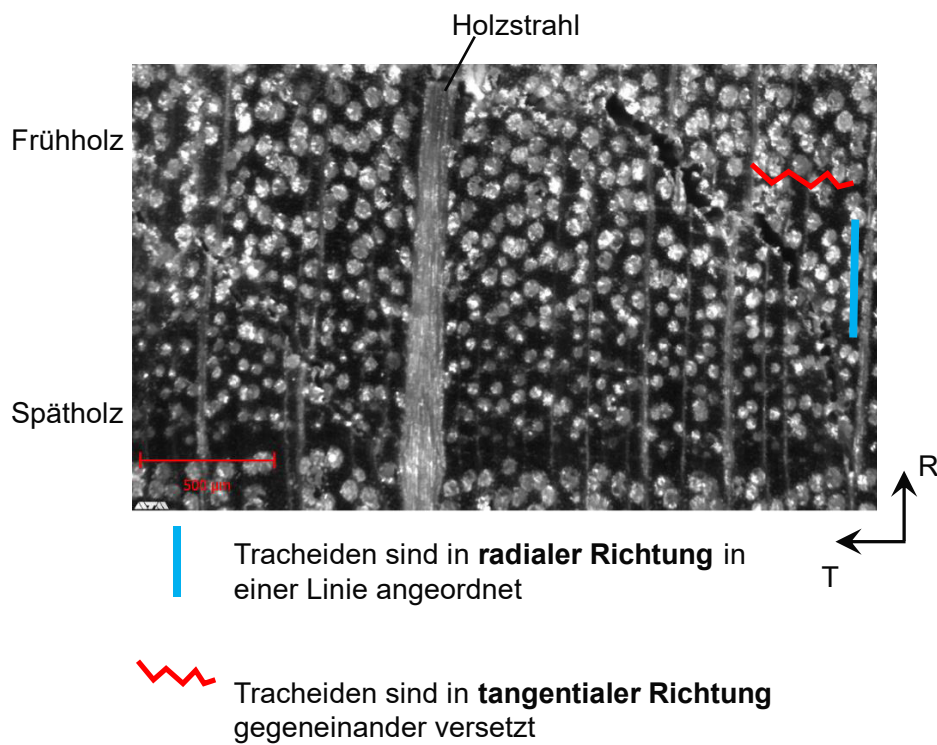


Abbildung 2-3: Anordnung der Tracheiden in radialer und tangentialer Richtung. Mikroskopische Aufnahme der Rotbuche

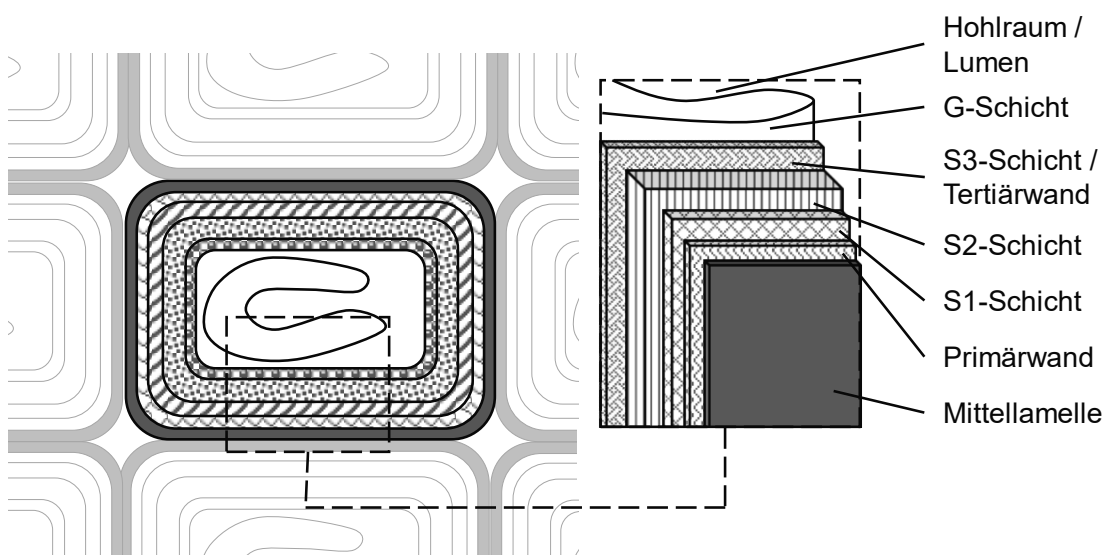


Abbildung 2-4: Zellwandaufbau einer Holzfaser von Laubholz nach [NS17]

2.1.3 Hygroskopische Eigenschaften von Holz

Der Werkstoff Holz zeigt ein ausgeprägtes hygroskopisches Verhalten, das durch seinen kapillarporösen Aufbau bestimmt wird. Wie alle porösen Werkstoffe hat Holz eine ausgeprägte innere Oberfläche. Nach Popper und Niemz beträgt die innere Oberfläche bei der Buche 196 m²/g [PN09]. Dieser Wert variiert je nach Holzart, die Größenordnung der Werte bleibt aber unverändert. An dieser Fläche wird Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufgenommen (adsorbiert) und wieder abgegeben (desorbiert). Die Holzfeuchte erreicht bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen immer ein Gleichgewicht zu der relativen Luftfeuchtigkeit. Der Feuchtegehalt w [%] des Holzes wird aus der Masse des feuchten Holzes m_w [kg] und der Masse des darrtrockenen (keine Wasseranteile mehr) Holzes m_0 [kg] (2-1) berechnet. Neben dem Wasser kann das Holz auch andere flüssige Medien wie Klebstoffe und Beschichtungsmaterialien aufnehmen. [PN09], [NS17]

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2-1)$$

Die gängigste Methode zur Bestimmung der Holzfeuchte ist die Darrmethode. Dabei wird den Proben in einem Trockenschrank durch das Verdampfen bei Temperaturen über 100 °C Wasser entzogen. Ist eine Massenkonzanz erreicht, wird davon ausgegangen, dass das Holz absolut trocken ist. Der Feuchtegehalt wird dann nach der Gleichung (2-1) berechnet. [Hän12], [DIN93]

Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % erreicht das Holz einen Fasersättigungsbereich, der für die heimischen Holzarten bei Feuchtegehalten zwischen 22 % und 35 % liegt. Das aufgenommene Wasser ist im Holz gebunden und lagert sich nicht in den Hohlräumen ab (Abbildung 2-5 (b)). Dadurch nehmen die Zellwände an Volumen zu. Erst beim Überschreiten des Fasersättigungsbereiches wird freies Wasser im Holz eingelagert, bis ein maximaler Feuchtegehalt erreicht ist. Während der Feuchteaufnahme bis zum Fasersättigungsbereich kommt es zur Änderung des Porenvolumens und damit zur Volumenerhöhung (Quellung) des Holzes. Bei Feuchteabgabe in diesem Bereich wird ein Volumenschwund (Schwinden) beobachtet. [NS17]

In Abbildung 2-5 (a) ist die Quellung von Rotbuchenholz im Verhältnis zur Holzfeuchte dargestellt. Je nach Schnittrichtung gibt es deutliche Unterschiede im Quellverhalten. Im Durchschnitt ist die Schwindung oder die Quellung in Längsrichtung des Holzes vernachlässigbar klein im Vergleich zur Schwindung in Radial- und Tangentialrichtung. Es wird auf die Orientierung der Fibrillen in Faserlängsrichtung und einen vergleichsweise geringen Anteil quer zur Faserrichtung liegender Zellwände zurückgeführt.

Die Quellung in tangentialer Richtung ist bei Rotbuche im Vergleich zur radialen Richtung etwa doppelt so groß. Das ist die Hauptursache des Verwerfens und Verdrehens von zugeschnittenen Holzstrukturen beim Schwinden und Quellen. Den Unterschied bewirken die unterschiedlichen Mikrofibrillenwinkel in der Zellwand, der Verlauf von Früh- und Spätholz und die verstärkende Wirkung der Holzstrahlen [Wal06].

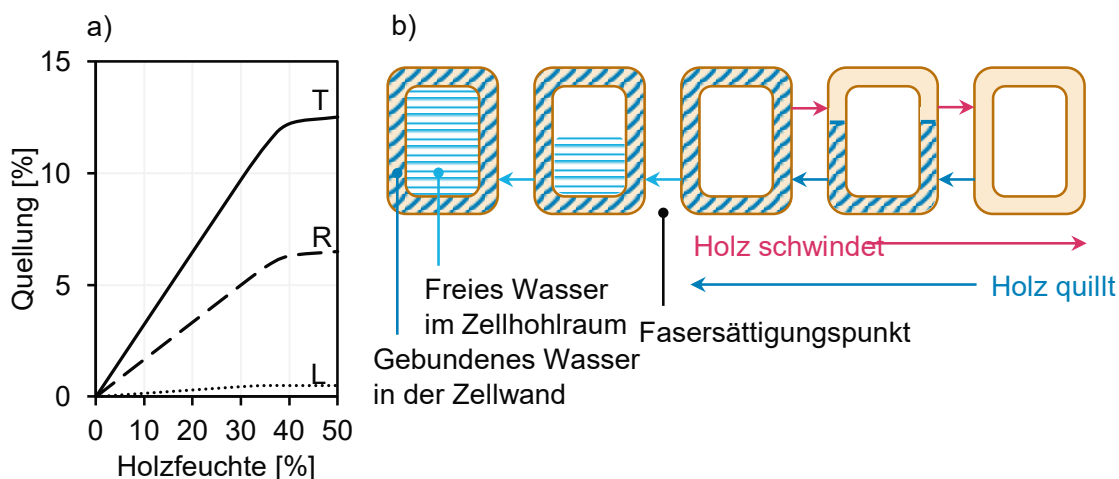


Abbildung 2-5: Quell- und Schwindverhalten von Holz: a) Quellung von Rotbuchenholz nach [Mör31]: L - längs, R - radial, T - tangential, b) Schematische Darstellung der Wasserabgabe und Wasseraufnahme einer Holzzelle nach [Bau17]

Da sich durch das Einlagern von Wasser sowohl die mikroskopische als auch die makroskopische Struktur des Holzes verändert, ist es konsequent, dass dieser Vorgang auch einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat.

2.1.4 Mechanische Eigenschaften und Versagensverhalten

Sowohl der makroskopische als auch der mikroskopische Aufbau des Rohstoffes Holz sind maßgeblich für sein Verhalten bei mechanischer Belastung verantwortlich. Der Aufbau wird wiederum durch z. B. die Wachstumsbedingungen des Baumes beeinflusst, die vom Standort oder den klimatischen Bedingungen abhängig sind. Zur Homogenisierung der Eigenschaften werden aus dem Rohstoff Holz zahlreiche Holzwerkstoffe als technisch nutzbare Materialien hergestellt.

Die ermittelten Werte für die mechanischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen sind in erster Linie von der Größe der zur Messung verwendeten Prüfkörper abhängig. Generell gilt: Je kleiner der Prüfkörper, desto höhere Werte können gemessen werden (Volumeneffekt). Verdeutlicht wird dies in der Abbildung 2-6 am Beispiel der Werte für die Zugfestigkeit. Fehlstellen im Holz, nicht exakt geradliniger Faserverlauf, Dichteschwankungen und weitere Gegebenheiten tragen zu einer starken Ausprägung des Volumeneffektes bei Holz bei. [NS17], [Hän12]

Die Rohdichte hat einen direkten Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffes. Hölzer mit höherer Dichte weisen auch höhere Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte auf. Die Rohdichte von Holz wird als das Verhältnis von Masse zu Volumen angegeben und unterscheidet sich je nach Holzart. Die Dichte der reinen Zellwandsubstanz ist im Gegensatz zur Rohdichte unabhängig von der Holzart und beträgt etwa $1,5 \text{ g/cm}^3$. Die Dichte der einzelnen Holzarten variiert in einem Bereich von $0,1 \text{ g/cm}^3$ (Balsaholz) bis $1,2 \text{ g/cm}^3$ (Pockholz). Je höher die Rohdichte ist, desto höher ist der Zellwandanteil und desto geringer der Porenanteil. Für die in der vorliegenden Arbeit verwendete Holzart Rotbuche

beträgt die Rohdichte zwischen $0,65 \text{ g/cm}^3$ – $0,75 \text{ g/cm}^3$ bei einer Porosität des Werkstoffes von etwa 60 %. Da die Rohdichte abhängig von der Holzfeuchte w ist, wird sie nach DIN 52182 bezogen auf eine Holzfeuchte von $w = 12 \% (w_{12})$ angegeben. [WS18], [NS17], [SLG03]

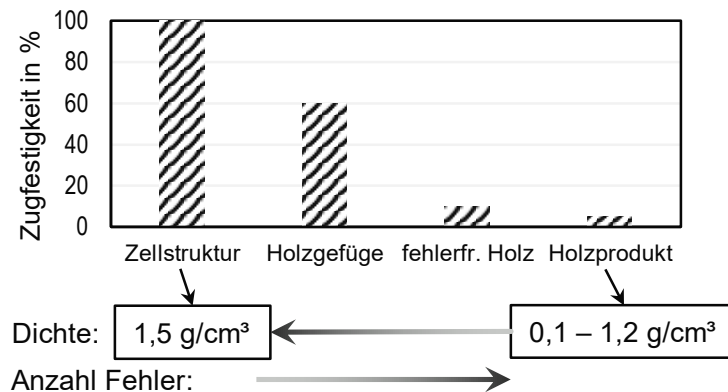


Abbildung 2-6: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Skalierung nach [Hän12]

Daneben unterscheiden sich die elastischen Eigenschaften und die Festigkeitseigenschaften stark in den drei Hauptachsen. Holz und auch viele Holzwerkstoffe sind orthotrope Materialien. Das Verhältnis einiger Eigenschaften normiert auf die Werte in tangentialer Richtung ist in Tabelle 2-1 aufgezeigt. Der E-Modul und die Festigkeiten in tangentialer Richtung sind am geringsten. In radialer Richtung sind diese etwa doppelt so groß, wie in tangentialer Richtung. In Faserrichtung (longitudinal) sind die Festigkeiten und Steifigkeiten um mehr als Zehnfache größer.

Diese Unterschiede können ebenfalls in einem Polardiagramm veranschaulicht werden. In Abbildung 2-7 (a) ist die anisotrope Elastizität von Vollholz dargestellt. Bereits eine geringe Winkelabweichung von der Faserrichtung (0°) bewirkt einen starken Abfall der Steifigkeit. Eine dreidimensionale Darstellung der Polardiagramme stellen die von Grimsel erstellten und genannten Deformationskörper dar [Gri99]. Damit kann das anisotrope Verhalten von Holz in alle Raumrichtungen veranschaulicht werden. Die größte Deformation tritt demnach bei Zugbelastung der Buche in tangentialer Richtung auf. Holz wird bei höherer Materialfeuchte nachgiebiger, also schwindet der Deformationskörper bei geringer werdender Holzfeuchte.

Der Werkstoff weist zudem ein viskoelastisches Verhalten auf. Die Belastungsgeschwindigkeit hat somit einen enormen Einfluss auf die gemessenen Materialkennwerte. Sowohl die Festigkeiten als auch die Verformungen von Holz und Holzwerkstoffen sind zeitabhängig. Maßgebend für den Gebrauch sind dabei das Kriechen, die Spannungsrelaxation und die Dauerstandfestigkeit. [NS17]

Tabelle 2-1: Kennwerte und das Verhältnis der elastischen und Festigkeitseigenschaften in den Hauptachsen bei Rotbuche nach [NS17] [OHN12]

Hauptachsen	L	T	R
Verhältnis			
Elastizitätsmodul Zug	13	1	1,7
Festigkeit Zug	11	1	1,7
Festigkeit Druck	7,5	1	1,8
Kennwerte			
Elastizitätsmodul Zug [N/mm ²]	14.000	1.160	2.280
Festigkeit Zug [N/mm ²]	97	9	15
Festigkeit Druck [N/mm ²]	45	6	11
Bruchdehnung [%]	1	1,8	1,5

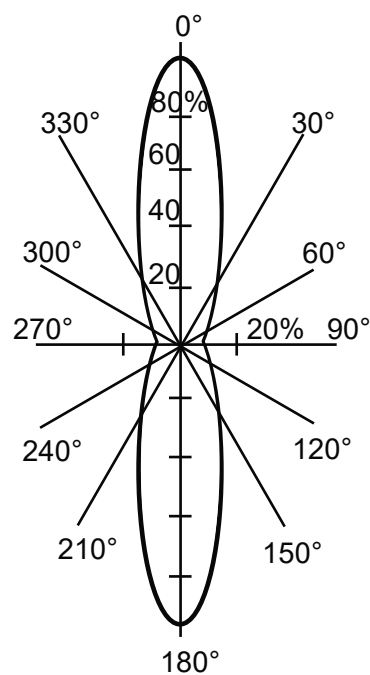


Abbildung 2-7: a) Anisotrope Elastizität (Polardiagramm) von Vollholz nach [Key51] modifiziert von [Bae15]

Versagen bei Zugbeanspruchung

Ist die Materialfestigkeit bei Zugbeanspruchung erreicht, erfolgt der Bruch des Werkstoffes ausgesprochen spröde. Nach Bildung eines Initialrisses pflanzt sich dieser rasch fort und führt zum plötzlichen Versagen der gesamten Struktur.

Beim Versagen von Holz in Faserrichtung wird zwischen dem Versagen von dünnwandigem Frühholz und dem dickwandigen Spätholz unterschieden (Abbildung 2-8 (a)). Bei

den dünnwandigen Frühholzfasern breitet sich der Bruch senkrecht zur Belastungsrichtung aus. Die Fasern werden dabei durchtrennt. Im Bereich der Spätholzfasern verläuft der Riss sowohl senkrecht als auch parallel zur Belastungsrichtung, aber in der Regel zwischen den Fasern. Dabei werden einzelne Fasern aus dem Verbund gelöst. Sind in einem Probenquerschnitt Früh- und Spätholzanteile vertreten, treten zusätzliche Mechanismen auf. So wird oft eine abrupte Ablenkung an der Grenzfläche von Früh- und Spätholz oder eine sich über verhältnismäßig große Entfernungen erstreckende Rissausbreitung in Faserrichtung beobachtet. [Gro05]

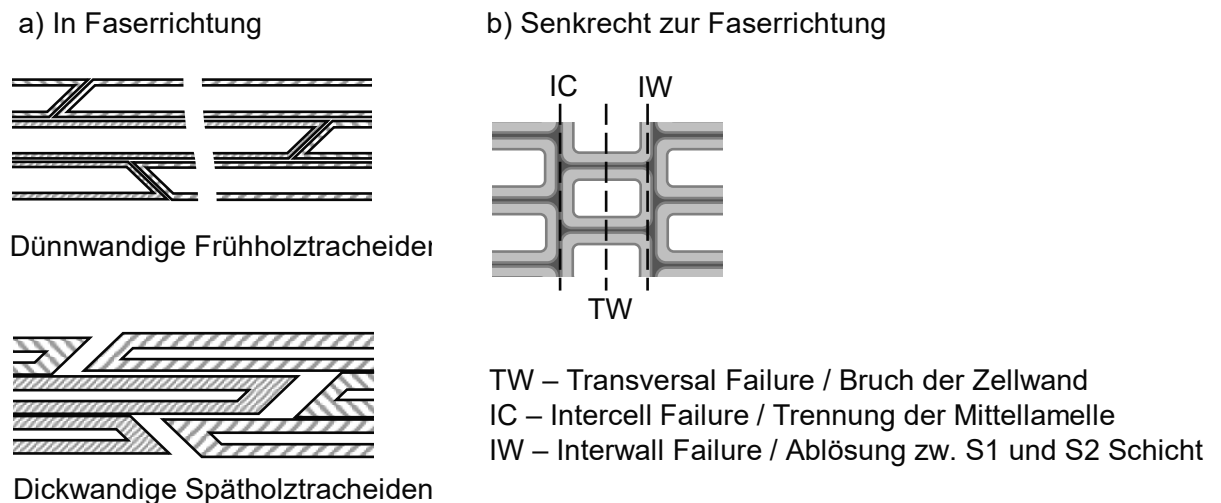


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Versagensmechanismen des Holzes auf mikroskopischer Ebene: a) in Faserrichtung nach [BJ93]; b) senkrecht zur Faserrichtung nach [SLG03]

Beim Versagen senkrecht zur Faserrichtung kann der Bruch sowohl durch die Zellwand (TW) als auch zwischen benachbarten Zellen (IC und IW) auftreten. In Abbildung 2-8 (b) sind die Versagensmechanismen graphisch dargestellt. Im Falle des TW wird die Festigkeit des Materials im Wesentlichen von der Zellwanddicke beeinflusst. Vor allem bei dünnwandigem Frühholz tritt diese Versagensart auf. Bei einer Ablösung der Zellen voneinander (IC und IW) spielt die Zellwanddicke und somit auch die Dichte des Werkstoffes eine untergeordnete Rolle. Bei dickwandigem Spätholz treten vermehrt diese Versagensmechanismen auf. [Gro05], [SLG03]

Versagen bei Druckbeanspruchung

Am Beispiel der Druckbeanspruchung von Balsa ist in Abbildung 2-9 der Spannungs-Dehnungs-Verlauf dargestellt. Auch bei Druck reagiert Holz parallel und senkrecht zu der Faserrichtung unterschiedlich. In Faserrichtung (longitudinal) weist Holz eine deutlich höhere Druckfestigkeit auf als senkrecht (radial, tangential) dazu.

Belastung in Faserrichtung

Bis etwa 80 % der Druckfestigkeit, auch Proportionalitätsgrenze genannt, wird nach Poulsen [PMSB97] ein linear-elastischer Bereich beobachtet (Bereich 1 in Abbildung

2-9 (a)). Ab der Proportionalitätsgrenze (auch Spannungsppeak) bis zur Druckfestigkeit setzt das Faserknicken ein (Bereich 2 in Abbildung 2-9 (a)), „incipient kinking“ Abbildung 2-9 (b)). Dabei werden je nach Festigkeit der Fasern Scher- und Gleitflächen an den Faserwänden ausgebildet oder die Cellulosefibrillen der S2-Schicht knicken aus. Diese Schädigungen sind augenscheinlich nicht erkennbar. Nach Erreichen der Druckfestigkeit wird eine sich schnell ausbreitende, makroskopische Stauchlinie (Knickband) sichtbar. Die Stauchlinie verläuft in der LR-Ebene senkrecht zur Faserrichtung und in der LT-Ebene in einem flachen Winkel (ca. 23°) dazu. Die Fasern werden von der ursprünglichen longitudinalen Lage nicht nur ausgelenkt, sondern auch geknautscht („transient kinking“ Abbildung 2-9 (b)). Mit steigender Belastung wird das angrenzende Material in das Knickband hineingeschoben („steady-state kinking“ Abbildung 2-9 (b)). Durch verschiedene Störfaktoren können im Verlauf der Ausbildung des Knickbandes Querkzugspannungen im Werkstoff entstehen. Diese führen oft zum Splitting des Materials und zum starken Spannungsabfall. [Gro05], [PMSB97]

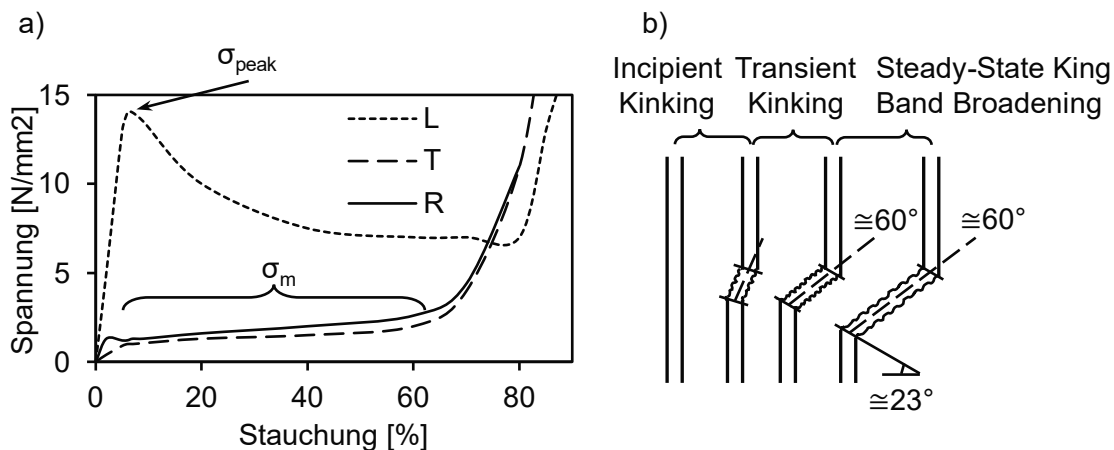


Abbildung 2-9: a) Prinzipieller Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Holz bei Druckbeanspruchung am Beispiel von Balsa nach [GA97], angepasst von [Gro05]; b) schematische Darstellung des Ausknickens einer einzelnen Faser nach [PMSB97]; σ_{peak} – Spannungsppeak; σ_m – mittleres Spannungsniveau

Belastung senkrecht zur Faserrichtung

Der Spannungsverlauf senkrecht zur Faserrichtung entspricht prinzipiell dem Verlauf parallel zur Faserrichtung. Nach dem elastischen Bereich folgt ein annähernd konstanter Verlauf bis zur starken Verfestigung bei sehr großer Stauchung. Dabei liegt das Spannungsniveau im mittleren Bereich auf einem deutlich niedrigeren Niveau (Abbildung 2-9). [Gro05]

Beim Versagensverhalten wird zwischen der tangentialen und der radialen Beanspruchung unterschieden.

In radialer Richtung sind die Zellwände übereinander ausgerichtet. Die Kraftweiterleitung erfolgt unmittelbar über die parallel zur Belastungsrichtung ausgerichteten Wände. Diese Wände werden auf Druck belastet und knicken nach Erreichen der Stabilitätsgrenze aus.

Das Versagen tritt zunächst in den Bereichen mit geringsten Wanddicken auf (vermehrt im Frühholz). Bei steigender Belastung kollabieren die Zellen bis zur vollständigen Komprimierung (Verfestigung). Die grafische Darstellung des Versagens ist schematisch in Abbildung 2-10 gezeigt. Durch Umlagerung der Belastung auf benachbarte Zellen breitet sich die Schädigung seitlich aus. Hierdurch entsteht ein im weiten Bereich annähernd konstanter Kraftverlauf. [Gro05], [Mue03], [SLG03]

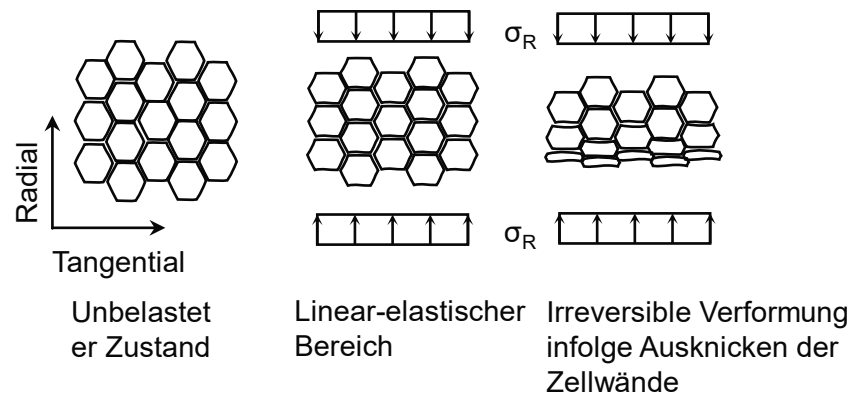


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Verformungen der Holzzellen unter radialer Druckbeanspruchung, nach [GA97], angepasst von [Gro05]

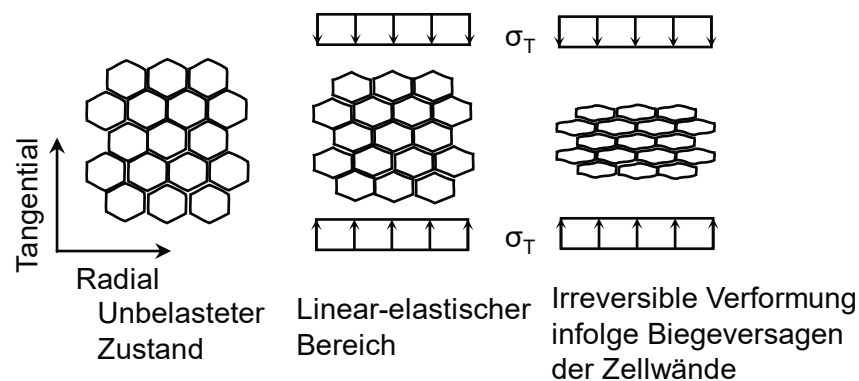


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Verformungen der Holzzellen unter tangentialer Druckbeanspruchung, nach [GA97], angepasst von [Gro05]

In tangentialer Richtung sind die Holzfasern zueinander versetzt. Die Weiterleitung der Kraft erfolgt nicht nur über die parallel zur Belastungsrichtung ausgerichteten Wände, sondern auch über die Biegebelastung der senkrecht zur Belastung verlaufenden Anteile. Zunächst werden die auf Biegung belasteten Wandanteile elastisch und plastisch verformt. Steigt die Belastung weiterhin an, knicken auch die parallelen Wände ein und werden in den Zellhohlraum gefaltet. Das Versagensverhalten ist graphisch in Abbildung 2-11 dargestellt.

Die schwächsten Stellen liegen hier sowohl in den Früh- als auch in den Spätholzanteilen. Die seitliche Ausbreitung der Verformung geschieht nicht zwangsläufig in einer Ebene, da die schwächsten Stellen in unterschiedlichen Ebenen liegen können.

Dehnratenabhängigkeit

Die Untersuchungen von Wouts et al. [WHO+16] zeigen, dass mit steigender Dehnrates tendenziell eine höhere Versagensspannung (Spannungsppeak) bei Druckbelastung in Faserrichtung in Buche entsteht (Abbildung 2-12 (a) und (c)). Dieser Anstieg wird deutlicher bei Dehnrates über 15 s^{-1} . Senkrecht zur Faserrichtung steigt die Versagensspannung ebenfalls mit höherer Dehnrates an, wobei der Anstieg weniger ausgeprägt als in Faserrichtung ist (Abbildung 2-12 (b)).

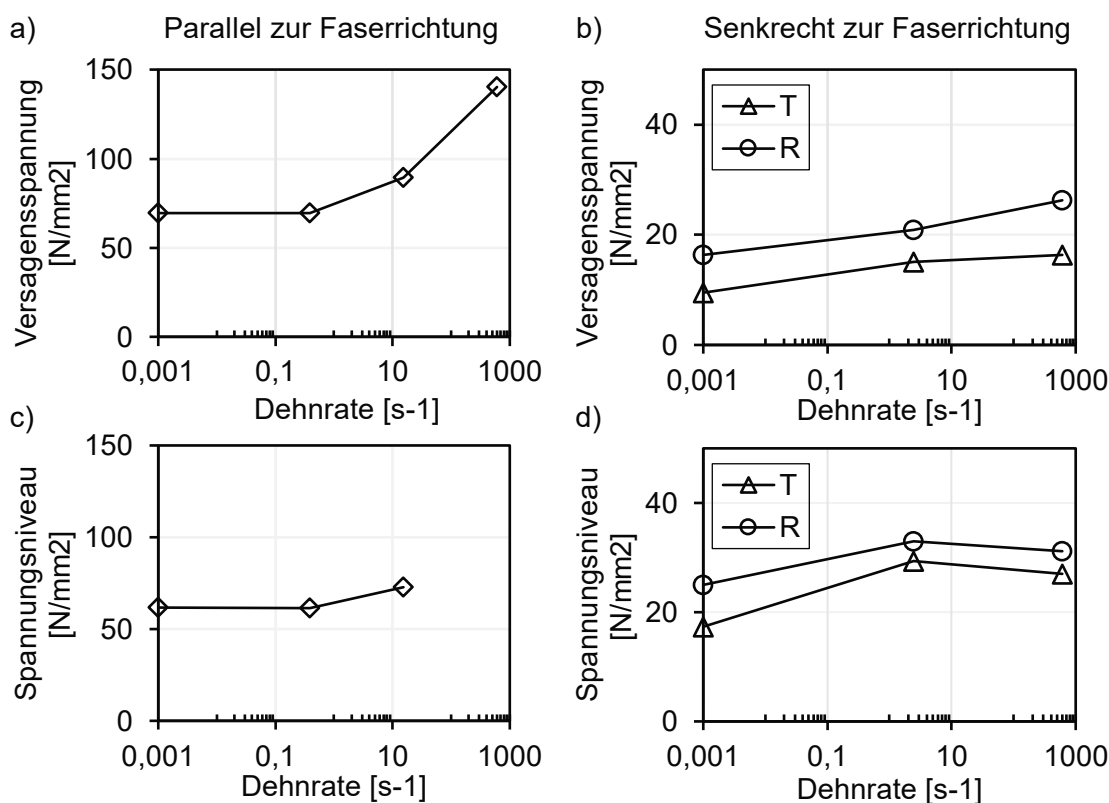


Abbildung 2-12: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Versagensspannung und das mittlere Spannungsniveau bei Druckbeanspruchung in Buche; a) Versagensspannung in Faserrichtung; b) Versagensspannung senkrecht zur Faserrichtung (tangential); c) Spannungsniveau in Faserrichtung; d) Spannungsniveau senkrecht zur Faserrichtung (tangential); nach [WHO+16]

Beim mittlerem Spannungsniveau in Faserlängsrichtung wurde mit höherer Dehnrates tendenziell ein ähnlicher Anstieg wie für die Versagensspannung festgestellt (Abbildung 2-12 (d)). Die Auswertung bei Dehnrates von 600 1/s war nicht möglich. Die Probenkörper wiesen ein sprödes Versagensverhalten auf, sodass kein ausgeprägtes Spannungsniveau vorlag. Das Versagen bei Dehnrates um und über 600 1/s unterliegt komplexeren Versagensmechanismen und konnte von den Autoren nicht weiter quantifiziert werden. Das Spannungsniveau senkrecht zur Faserrichtung folgt keinem eindeutigen Trend,

steigt aber tendenziell ebenfalls mit höheren Dehnraten. Genauere Erläuterungen hierzu sind in [WHO+16] gegeben.

Feuchteabhängigkeit der Eigenschaften

Die Feuchteabhängigkeit der Holzeigenschaften ist ausführlich untersucht und in der Literatur beschrieben worden. Grundsätzlich gilt, dass mit steigender Holzfeuchte (bis zur Fasersättigung) die Kennwerte abnehmen. Ausführlich wird dies z. B. in [NOHS15], [ÖHN12] beschrieben.

2.1.5 Aufbau und Merkmale des Furnierschichtholzes

Holz furnierwerkstoffe sind mehrlagige und i. d. R. plattenförmige Werkstoffe aus symmetrisch übereinander geschichteten und schubfest miteinander verklebten Furnierlagen. Je nach Faserrichtung der einzelnen Lagen wird zwischen Schichtholz (de. Furnierschichtholz FSH; eng. Laminated Veneer Lumber LVL), Sperrholz und Sternholz unterschieden. Ein Schichtholz besteht aus Furnierlagen, die faserparallel zueinander orientiert werden. Beim Sperrholz werden die Furniere zueinander kreuzweise in Bezug auf die Faserrichtung verleimt. Bei der Sternholzfertigung variiert die Faserrichtung der Lagen zueinander. [Bic19] [NS17]

Bei Furnierwerkstoffen sind drei Strukturparameter für die Ausprägung der mechanischen Eigenschaften entscheidend: die Holzart, die Veredelung der Furniere durch Verichten oder Tränken und der Faser-Last-Winkel [NS17].

Das verbreitetste Verfahren zur Furnierherstellung ist das Schälen. Dabei wird ein Stammabschnitt in Rotation um die Längsachse versetzt und ein Schälmesser mit Druckbalken daran geführt (Abbildung 2-13 (a)). Die so hergestellten Schäl furniere werden zu Schalen gleicher Länge zugeschnitten und in einem Ofen getrocknet (Abbildung 2-13 (b)). Bei der Herstellung von FSH erfolgt nach einer Qualitätssortierung der Klebstoffauftrag und das Stapeln zu Platten (Abbildung 2-13 (c)). Bei kontinuierlichen Prozessen werden die Furniere in den einzelnen Lagen versetzt zueinander gelegt. Die so entstandene endlose Platte wird in einer kontinuierlichen Presse unter Druck und Temperatur verklebt (Abbildung 2-13 (d)).

Es entsteht ein homogenes Produkt, in dem die Holzfehler und die Aststellen gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt sind. Der Einfluss dieser Fehlstellen auf die Festigkeitseigenschaften des Werkstoffes wird dadurch signifikant verringert. Um die gleichen Festigkeiten zu erreichen, können wesentlich schlankere Konstruktionen mit den FSH ausgeführt werden als mit Vollholz. [Bic19] [NS17] [HE15]

Plattenförmige Furnierwerkstoffe finden im Bauwesen, im Möbel- und Instrumentenbau sowie im Transportwesen Anwendung [Bic19]. Aus den Furnieren können aber auch freie Geometrien geformt werden, z. B. freischwingende Stühle.

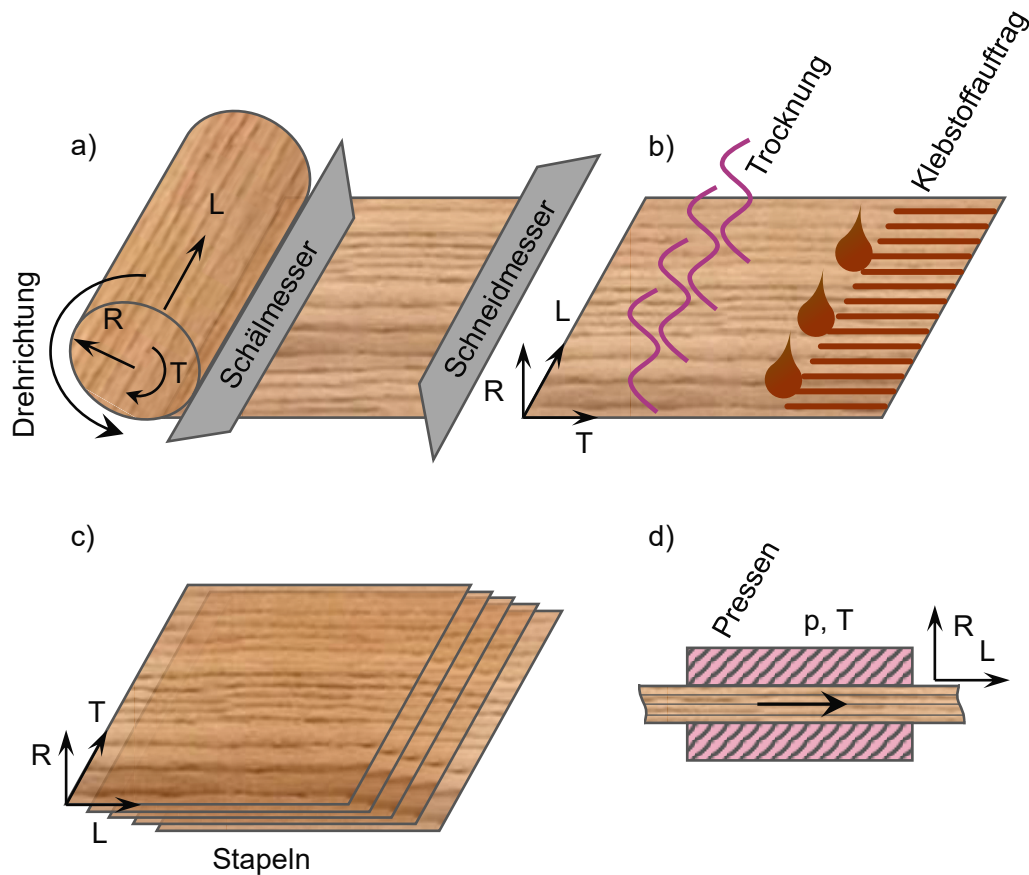


Abbildung 2-13: Verfahren zur Herstellung der Furnierwerkstoffe aus Schäl furnieren

Die Fertigung der Holzwerkstoffe aus dem Vollholz ist im Vergleich zu den anderen Bauwerkstoffen um ein Vielfaches effizienter in Bezug auf den erforderlichen Energieeinsatz beim Herstellungsprozess. Pro Tonne Fertigprodukt verbraucht z. B. die Herstellung von Stahl und Aluminium das 17- und 70-fache an Energie im Vergleich zu Holzprodukten [Koc92]. Für das Erreichen gleicher Steifigkeits- und Festigkeitswerte in einer Struktur ist die dafür benötigte Masse der genannten Materialien unterschiedlich, was den Vorsprung von Holzprodukten insgesamt verringert. Bei einem Biegebalken mit gleicher Biegesteifigkeit wird bei Holz im Vergleich zu Stahl etwa das 2,5 - fache an Bauraum benötigt.

2.1.6 Holz als Hochleistungswerkstoff

Vor dem Hintergrund der aktuellen Klima-Diskussionen wird intensiv daran geforscht, wie das Anwendungsspektrum von Holz und Holzwerkstoffen signifikant erweitert werden kann. Es wird untersucht, wie deren natürliche Eigenschaften verbessert und das Holz mit weiteren neuen Funktionen ausgestattet werden kann. Holz kann bereits wasserfest, sicher vor biologischem Befall, feuerfest (durch Kalkeinlagerung), elektrisch leitend und magnetisch modifiziert werden [Mer16] [MCK+14] [Gla04]. Einige ausgewählte Beispiele werden in diesem Kapitel kurz zusammengefasst.

In Portugal wurde Kiefernholz mit dem duroplastischen Biopolymer Furfurylalkohol behandelt. Dieses Polymer entsteht durch Aufschluss von Biomasse (z. B. Haferschalen, Aprikosenkerne), die reich an Hemicellulose ist. Die Furfurylalkohol-Harze besitzen eine niedrige Viskosität und eignen sich deswegen gut zur Benetzung oder Tränkung von Faserwerkstoffen. Damit behandeltes Kiefernholz wies im Durchschnitt eine 38 % - ige Massezunahme und eine um 37 % höhere Dichte auf. Das Quell- und Schwindverhalten konnte um etwa 45 % reduziert werden. Ein Einfluss der Behandlung auf den Elastizitätsmodul konnte nicht festgestellt werden, dafür eine 6 % - ige Zunahme der Biegefestigkeit. Der Masseverlust durch Pilzbefall wurde fast vollständig unterbunden. [ENP11]

Schweizer Wissenschaftler haben Methoden entwickelt, um Lignin aus dem Holz auszuwaschen. Das Holz besteht dann fast ausschließlich aus Cellulose. Dieses neue Material weist eine verdreifachte Dichte und eine rund elfmal so hohe Festigkeit auf wie unbehandeltes Holz. Die so gewonnene und gerichtete Cellulose lässt sich um bis zu 95 % verdichten, fast beliebig formen und auch mit Kunststoffen tränken. Somit entsteht eine neue Materialklasse mit großem Potenzial, die auch im Fahrzeugbau eingesetzt werden kann. [FWS+18]

Einen anderen Weg schlägt ein französisches Start-up „Woodoo“ ein. Sie ersetzen Lignin durch einen transparenten Biokunststoff. Das damit modifizierte Holz wird lichtdurchlässig. Der Biokunststoff nimmt nicht nur den Lignin-Platz ein, sondern füllt auch die natürlichen Poren und Risse auf. Dadurch wird das Holz bis zu zehnmal fester. Das Quell- und Schwindverhalten kann damit fast vollständig unterbunden werden.

An der TU Chemnitz und der TU Dresden wurde ein anderer Ansatz verfolgt. Um die Werkstoffeigenschaften von Holz weiter zu verbessern, wurden Holzfurniere mit thermoplastischem Kunststoff zu Furnier-Prepregs verarbeitet. Diese Furniere können dann in thermoplastischen Prozessen zu Bauteilen geformt werden. Durch die natürlich gerichtete Struktur des Furniers ist das Eigenschaftspotenzial der Furnier-Prepregs in Faserichtung wesentlich höher als in der homogenisierten Struktur von Wood-Polymer-Composites (WPCs). [BSWN15]

2.2 Holz im modernen Automobil

In dem Bestreben der Menschheit zur Mobilität spielte Holz schon immer eine bedeutende Rolle: Die ersten Räder sowie die Pferdekutschen wurden entsprechend auch aus Holz gefertigt. Mehrere Jahrhunderte dominierten Holzwerkstoffe monopolistisch in diesem Bereich. Dadurch ist es auch nicht verwunderlich, dass die ersten nicht von Zugtieren angetriebenen Fahrzeuge auf Basis der aus Holz gefertigter Kutschen aufgebaut wurden. Mit der Erfindung und Weiterentwicklung des Benzinmotors und der wachsenden Kräfte, die vom Motor auf das Fahrwerk übertragen werden mussten, wurde das Holz schnell aus dem Bereich Chassis und Antriebsstrang von Stahl verdrängt. Im Gegensatz dazu blieb Holz lange Zeit für den Fahrzeugaufbau und den Rahmen konkurrenzlos. Erst die Entwicklung der Blechverarbeitungsverfahren und der Fügeverfahren,

aber auch die Einführung der Fließbandproduktion bewirkten das fast vollständige Verschwinden von Holz aus dem Automobilbau [Bra07], [Wen08]

Nur wenige Automobilhersteller widersetzten sich dieser Entwicklung und setzen bis heute Holz in der Fahrzeugkarosserie ein. Ein Beispiel dafür ist der Morgan Flaving, der seine aktuellen Fahrzeugmodelle mit Holzrahmen aus Eschenholz beplankt mit Aluminiumblechen herstellt [Mor21]. Diese Fahrzeuge sind exklusiv, werden in Kleinserien gefertigt und sind für den durchschnittlichen Verbraucher in der Regel unerschwinglich.

In nahezu allen modernen PKWs sind Bauteile aus Sperrholzplatten, Tischlerplatten oder Holzfasermatten zu finden. In dem Chevrolet Corvette (Modell 2006) wird beispielsweise der Sandwichunterboden aus faserverstärkten Kunststoffen mit Balsaholz als Kern eingesetzt. Die Holzwerkstoffe dienen auch in Türinnen- und Seitenverkleidungen zur Schall- und Wärmedämmung und als Aufprallschutz. Als Sitzschalen, Kofferraumverkleidungen, Hutablagen und Dachhimmel finden diese beim Innenausbau Verwendung [Fri13], [Zus03].

Daneben wurden in den letzten Jahren zahlreiche Projekte zur Realisierung von Fahrzeugen mit Holz als Hauptkonstruktionswerkstoff durchgeführt. Die meisten dieser Fahrzeuge bleiben bis heute ausgefallene Einzelstücke ohne Straßenzulassung, zeigen aber ein umfangreiches Einsatzspektrum von Holz im Automobilbereich.

Eher spielerisch wurde in Japan ein Elektroauto mit 50 km/h Spitzengeschwindigkeit und einer Reichweite von 10 km aus Bambusholz gebaut [MET08]. Ein weiteres Modell kommt ebenfalls aus Japan, überzeugt mit einem moderneren Design und einer Spitzengeschwindigkeit von 90 km/h [Pes07].

Andere Modelle erfüllen eher die Anforderungen an ein modernes Fahrzeug, wie das in der Ukraine von einem Hobbykonstrukteur gebaute Auto. Die überwiegend aus Holz gefertigte Karosserie gleicht auf seiner linken Seite einem modernen Fahrzeug und auf seiner rechten Seite einem Oldtimer. Das Fahrzeug wird von einem 100 PS starken Opel-Motor (Baujahr 1981) angetrieben [Doc07]. Daneben wagen sogar namhafte Automobilhersteller wie Mercedes Benz den Sprung zum Holz im Automobil und fertigen Prototypen mit hohem Holzanteil. Bereits im Jahr 2006 stellte Mercedes Benz das Modell RECY vor [Fan06]. Das Fahrzeug wurde aus einem hochstabilen Rahmen mit einer Außenhaut aus Holzpaneelen gefertigt und ist zu 100 % recycelbar. Die Konstruktion soll auch in Crashesituationen den Insassen die höchste Sicherheit bieten.

Auch beim Konzeptfahrzeug Setsuna von Toyota wurde auf Holz gesetzt. Bei diesem Fahrzeug wurden unterschiedliche Holzarten bedarfsgerecht kombiniert. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Verbindungstechnik gelegt. Es wurden keine Schrauben oder Nägel verbaut, lediglich die Füge Technologien aus dem Schreinerhandwerk kamen hier zur Anwendung. Trotz des Projekterfolges ist eine Umsetzung in Serie nicht geplant. [Toy16]

In dieser Arbeit wurden nur einige Modelle oder Prototypen von PKWs mit einem hohen Anteil an Holzwerkstoffen vorgestellt. Eines verbindet alle diese Modelle: Es sind und

bleiben Einzelanfertigungen oder Prototypen. Es ist an dieser Stelle auch nicht bekannt, ob die Hersteller dieser Fahrzeuge die einzelnen Fahrzeugbauteile für eine definierte Belastung ausgelegt haben, oder ob ein ansprechendes Design die entscheidende Treibkraft für die Struktur gewesen ist.

Über den Einsatz von einzelnen Strukturbauteilen im modernen Automobil (ausgenommen einige Nischenfahrzeuge) ist nichts bekannt. Allerdings wird in einigen öffentlich geförderten Forschungsprojekten das Holz auf deren Einsatz im Automobil untersucht. Das Verbundprojekt „Hammer“, „For(s)tschritt“ oder auch „WoodCar“ beschäftigten sich in den letzten Jahren mit der Entwicklung von Leichtbaukonzepten und -strukturen aus nachwachsenden Rohstoffen.

Im Projekt „Hammer“ (Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau) wird der Schwerpunkt auf Multimaterialsysteme (MMS) für strukturelle Komponenten von Fahrzeugen gelegt. Die MMS sollen auf Holzbasis aufgebaut und als Holzformteile genutzt werden. Die Holzformteile sind in erster Linie als Ersatz für Bauteile gedacht, die entweder bereits aus FKV gefertigt werden oder wo der Einsatz von FKV sinnvoll ist. Auch Fügeverfahren zur Anbindung der Formteile in die bestehenden Karosseriekonzepte sind ein wichtiger Untersuchungsgegenstand dieses Projektes.

Ein Nachfolgeprojekt von „Hammer“ ist das Projekt „For(s)tschritt“ (Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau). Hier sollen die erarbeiteten Erkenntnisse zu werkstofftechnologischen Grundlagen in realen, großflächigen, wenig gekrümmten Bauteilen (Dach- und Seitenwand - Strukturen) umgesetzt werden. Die Fertigung der holzbasierten Leichtbaustrukturen, die Einbindung der Fertigung in die Serienfertigung von (Schienen-)Fahrzeugstrukturen sowie die Charakterisierung der Leichtbaustrukturen sind hier die zentralen Fragestellungen.

Im Projekt „WoodC.A.R.“ (Wood – Computer Aided Research) wurde die Berechenbarkeit, die Simulation und der Einsatz von Computer Aided Engineering zur Generierung von Anwendungspotenzialen von Holz für tragende und dynamisch belastete Bauteile in der Fahrzeugtechnik untersucht. Es wurden wissenschaftliche und technologische Fragestellungen in Hinblick auf Produktion, Technologie, Fertigungstechnik, Rohstoffkosten, Materialsimulation, etc. identifiziert, die eine hohe Relevanz für die Implementierung von Holz und Holzwerkstoffen im Fahrzeugbau besitzen. Heraus wurde eine belastbare Basis für weitere F&E-Aktivitäten für den Einsatz von Holz in Produkten gehobener Wertschöpfung erstellt. Für die Validierung der Ergebnisse wurden Komponenten des Concept Car CULT der Fa. Magna Steyr aus Holzwerkstoffen entwickelt, berechnet, gefertigt und statischen sowie dynamischen Belastungstests unterzogen. Neben Materialwissenschaft, Technologie und Qualitätssicherung wurden auch ökonomische und ökologische Aspekte (Bio-Ökonomie-Konzepte, Life-Cycle Analyse) betrachtet.

3 Aufnahme der Kennwerte zu mechanischen Eigenschaften vom Furnierschichtholz

Holz weist ausgeprägte anisotrope Eigenschaften auf. Lokale Dichteschwankungen im Holz, Äste und ein nicht exakt geradliniger Faserverlauf bestimmen die lokalen und somit auch die globalen mechanischen Eigenschaften dieses Werkstoffes [NS17]. Die Bestimmung der globalen Holzeigenschaften gestaltet sich dadurch komplex, weil nur die Eigenschaften des schwächsten Elementes gemessen werden können. Grundsätzlich greift hier der Größeneffekt (size effect) nach Weibull [Wei39]. Dieser besagt, dass mit zunehmendem Volumen des Probenkörpers die Anzahl der Fehlstellen proportional dazu steigt (weakest link theorie). Sobald die Bruchspannung des schwächsten Elementes überschritten wird, versagt bei spröden Materialien direkt die gesamte Struktur. [PCDH03]

In dieser Arbeit werden nach den gängigen Prüfmethoden Materialuntersuchungen an makroskopischen Probekörpern durchgeführt, wobei die Eigenschaften und die Fehlstellen im mikroskopischen Bereich stark variieren können. Dies zeigt sich vor allem in der erheblichen Streuung der aufgenommenen Ergebnisse.

Es wurden ausgewählte mechanische Eigenschaften von FSH aus deutscher Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) aufgenommen. Die Rotbuche ist das am weitesten verbreitete Laubholz in Deutschland [Wal17]. Neben den Nadelhölzern ist es auch das am meisten verwendete Industrieholz. Mit einer Dichte von rund 700 kg/m^3 gehört diese Holzart eher zu den Schwergewichten unter den Hölzern und weist herausragende mechanische Eigenschaften auf. Aufgrund der guten Verfügbarkeit und der mechanischen Eigenschaften ist es für diese Arbeit ausgewählt worden.

Die aufgenommenen Kennwerte dienen der grundsätzlichen Charakterisierung des Werkstoffes und werden im weiteren Verlauf auch für die Aufstellung und Validierung der Materialkarte für Simulationen verwendet (Kapitel 7).

Es werden Zug- und Druckkennwerte ermittelt, da diese Belastungen zu den Grundbelastungsarten zählen, wenn es um die Charakterisierung eines Werkstoffes zur simulativen Auslegung geht. Anhand der Biegekennwerte, vor allem mit unterschiedlichem Furnieraufbau, wird die Materialkarte validiert. Die Variation der Klebstoffe zur Herstellung des FSHes dient der Untersuchung des möglichen Rahmens zur gezielten Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften.

3.1 Zugbeanspruchung

In der Literatur sind zahlreiche Angaben zu den mechanischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Querkontraktionszahl) der Rotbuche zu finden. Vor allem die Wissenschaftler an der ETH Zürich haben umfassende Datensätze ermittelt und veröffentlicht [NS17], [ÖHN12], [BW08], [NOHS15]. In dieser Arbeit werden Fur-

nierschichthölzer aus der Rotbuche betrachtet und mit den Angaben zum Vollholz verglichen. Festigkeits- und Steifigkeitsangaben zu dem FSH gibt es nur wenige und diese sind für tragende Zwecke in Holzbauwerken aufgenommen [HE15]. Die Prüfgeometrien und Prüfmethode dafür unterscheiden sich von denen der reinen Materialcharakterisierung, sodass die Kennwerte nur bedingt mit den Werten in dieser Arbeit vergleichbar sind.

In diesem Kapitel werden die aufgenommenen Kennwerte von auf Zug beanspruchten FSH-Probenkörpern vorgestellt. Die Ergebnisse der Masterarbeit von *Dingfelder* [Din17] sind hier eingeflossen.

3.1.1 Materialien und Methoden

Die geprüften Holzwerkstoffe wurden aus geschälten Furnieren mit einer Dicke von 1 mm in unidirektionaler Richtung mit einem Dispersionsleim zusammengefügt. Die Furniere wurden bei 80 °C und 6 N/mm² zu Furnierschichtholz verpresst.

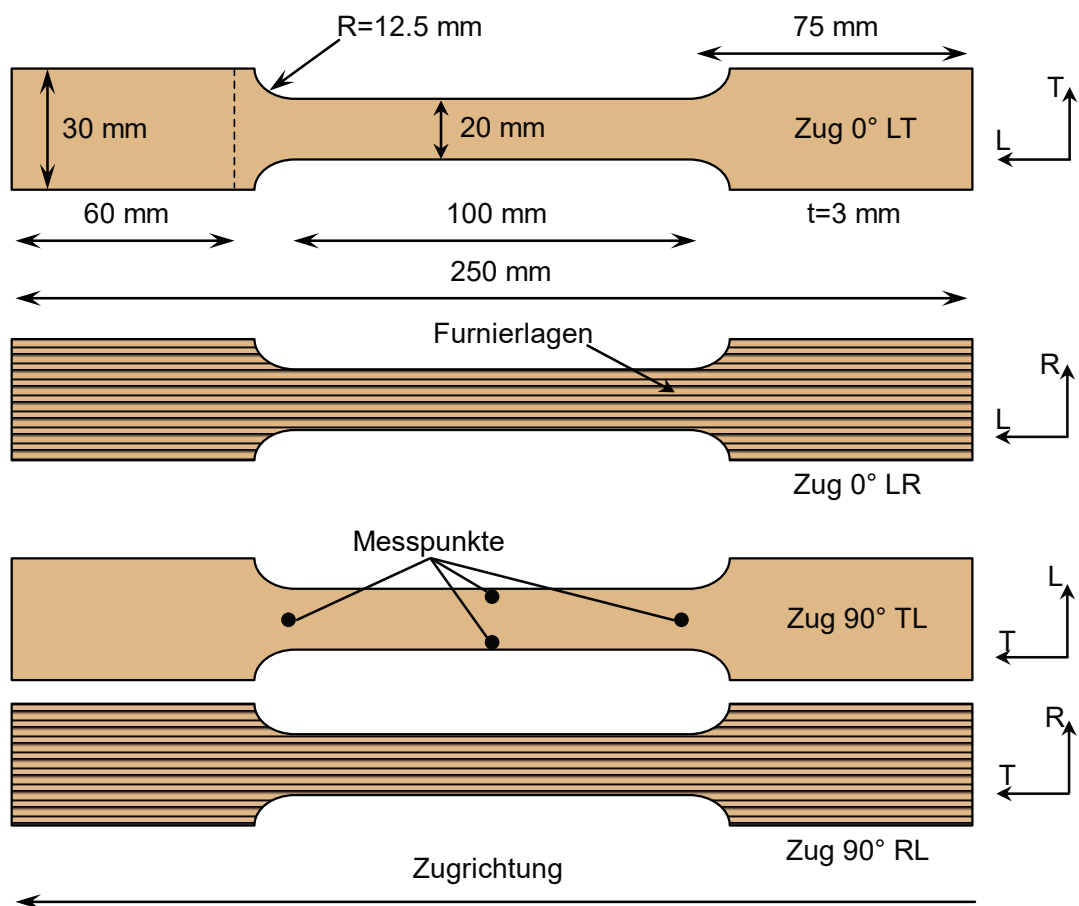


Abbildung 3-1: Probenkörpergeometrie, Probenebene und Orientierung der Furnierschichten im Verbund: L – Längs zur Faserrichtung, T – Tangential, R – Radial. Die Streifen kennzeichnen die einzelnen Furnierlagen.

Zur Kennwertaufnahme wurden Schulterproben aus den Furnierholzplatten zugeschnitten, angelehnt an DIN 52188 (1979) und DIN 52377 (2016). In Abbildung 3-1 ist die genaue Geometrie der Probenkörper und die Ausrichtung der Furniere angegeben.

An allen Probenkörpern wurden der Elastizitätsmodul, die Zugfestigkeit und die Querkontraktionszahl ermittelt. Die Prüfrichtungen sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die Furniere standen in den Dicken von 1 mm, 2,5 mm und 3,6 mm zur Verfügung. Die Anzahl der Lagen ergibt sich aus der Probenkörpergeometrie und der Furnierdicke.

Die Dicke der Probenkörper lag fertigungsbedingt je nach Orientierung der Faserrichtung zwischen 3 mm (LR, TR) und 4 mm (LT, TL). In der Literatur wurden keine Untersuchungen veröffentlicht, die nachweisen würden, dass geringe Änderungen die Dicke und dementsprechend des Querschnittes der Probenkörper einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen mechanischen Eigenschaften von Holz haben. Die grundsätzliche Dimensionierung der Probenkörper (das Verhältnis Länge, Breite, Dicke) haben dafür einen deutlichen Einfluss auf die gemessene Zugfestigkeit [SF13], [SNB+17], [BP11]. Nach Weibull (Theorie des schwächsten Kettengliedes) kann der Einfluss der hier vorliegenden Dickenänderung nur abgeschätzt werden. Madson und Buchanan [MB86] beschreiben das Verhältnis der Versagensspannung (σ_1, σ_2) zur Dicke (d_1, d_2) des Prüfkörpers mit dem Zusammenhang (3-1). Dabei ist m ein Faktor, der unter der Annahme eines Fraktils von 10 % für die Dicke mit $m_d = 0,1$ angenommen wird. Bei einer Vergrößerung der Probendicke von 3 mm auf 4 mm, kann damit erwartet werden, dass der gemessene Spannungswert um 3 % geringer ausfällt.

Tabelle 3-1: Zusammenstellung der durchgeführten Messungen. Bei der Bezeichnung der Probenebene gilt: erster Koeffizient – Holzorientierung in Belastungsrichtung; zweiter Koeffizient – Holzorientierung senkrecht zur Belastungsrichtung in der Probenebene

Probenebene	Belastungsrichtung	Furnierdicke [mm]	Anzahl Lagen	Anzahl der Prüfkörper
LR	L	1	30	17
		2,5	15	15
		3,6	10	20
LT	L	1	4	10
		2,5	2	15
		3,6	2	12
TR	T	1	30	19
		2,5	15	18
		3,6	10	18
TL	T	1	4	12
		2,5	2	16
		3,6	2	10

$$\rightarrow \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cong \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{m_d} \quad (3-1)$$

Die Messungen erfolgten an einer Universalprüfmaschine MTS Criterion Model 45 der Firma MTS Systems Corporation. Die Prüfgeschwindigkeit wurde für alle Prüfkörper nach DIN 52377 auf 1 mm/min festgelegt (ermittelt an den Prüfkörpern mit Faserrichtung parallel zur Belastungsrichtung). Die optimale Einspannkraft wurde experimentell ermittelt (kein Rutschen der Probenkörper und keine Quetschung des Einspannbereiches) und betrug 25 kN für die Probenkörper mit der Probenebene LR, TR und TL und 40 kN für die Probenkörper mit der Probenebene LT. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels optischer Verfahren. Es wurden ein Advantage Video Extensometer (AVX 03) der MTS Systems Corporation (Messung der Längs- und Querdehnung) und ein 3D Verformungsmesssystem Aramis 5M der GOM GmbH (Dehnungsverteilung im Probenkörper) verwendet.

Die Prüfkörper wurden vor der Prüfung unter Normalklima in Anlehnung an DIN 52377 (2016) bei 20 ± 1 °C und 65 ± 3 % relativer Luftfeuchte konfektioniert. Die Holzfeuchte wurde mittels Darmmethode an fünf zufällig ausgewählten Probenkörpern ermittelt. Diese lag im Durchschnitt bei 6 %. Die Rohdichte des Werkstoffes wurde nicht gemessen, liegt aber nach den Angaben des Herstellers bei 0,8 g/cm³.

Die zur Prüfung vorbereiteten Probenkörper wurden nach EN 325 mithilfe eines Messschiebers an drei Stellen im Messbereich (in der Mitte des Probenkörpers und an den Rändern des Messbereiches) in Breite und Dicke vermessen. Der minimale ermittelte Querschnitt wird für die weiteren Berechnungen herangezogen.

Nach DIN 52188 (1979) wird zur Bestimmung der Zugfestigkeit R_m die technische Spannung genutzt. Die Zugfestigkeit entspricht der im Zugversuch maximal gemessenen technischen Spannung. Die Bruchdehnung ε_b entspricht der aufgenommenen Längsdehnung beim Erreichen der Zugfestigkeit. Der Elastizitätsmodul E wird in Anlehnung an DIN EN 789 (2005) im linear-elastischen Bereich, entsprechend 10 - 40 % der Zugfestigkeit, als die Steigung der Geraden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermittelt. Im gleichen Dehnungsbereich, 10 - 40 % der Zugfestigkeit, wird die Querkontraktionszahl ν als Verhältnis aus Querdehnung zur Längsdehnung berechnet.

3.1.2 Ermittelte mechanische Kennwerte

Exemplarisch für alle durchgeführten Zugprüfungen ist in Abbildung 3-2 der Spannungs-Dehnungs-Verlauf von Holz dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung ist für Holz typisch annähernd linear (leichte Konvexität). Die Streuung der Ergebnisse ist für die Kennwerte der Festigkeit und Steifigkeit deutlich erkennbar. In allen untersuchten Prüfrichtungen wurden bei steigenden Werten für die Zugfestigkeit auch höhere Werte für die Bruchdehnung verzeichnet. Dies ist auf die Dichteschwankungen innerhalb und zwischen den Probekörpern zurückzuführen, wie Niemz und Sonderreger

bereits für weitere Korrelationen bei den Werkstoffkennwerten für Holz festgestellt haben [NS03].

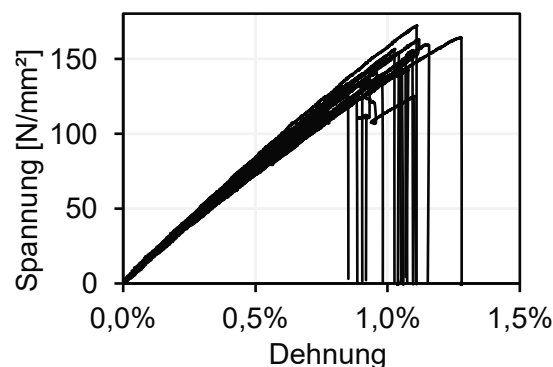


Abbildung 3-2: Spannungs-Dehnungs-Verlauf des Furnierschichtholzes aus 1 mm dicken Lagen in Richtung LR

In der Abbildung 3-3 sind die Bruchbilder der auf Zug belasteten Probenkörper abgebildet. Liegt der Faserverlauf senkrecht zur Belastungsrichtung (TL, TR), dann entsteht eine vergleichsweise geradlinige Bruchfläche, die erwartungsgemäß zwischen den Fasern verläuft. Entspricht die Faserrichtung der Belastungsrichtung (LT, LR), dann ist die Bruchfläche insgesamt größer und verläuft zum Teil in die Belastungsrichtung. Die entsprechenden Bruchmechanismen sind in Kapitel 2.1.4 erläutert.

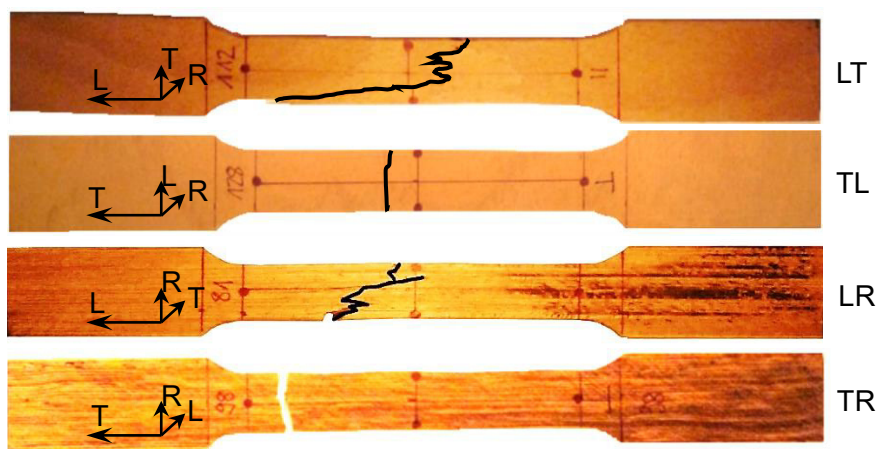


Abbildung 3-3: Bruchbilder auf Zug belasteter Probenkörper

Die aus den aufgenommenen Daten berechneten Werte für die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung, die Querkontraktionszahl und den Elastizitätsmodul mit den entsprechenden Variationskoeffizienten sind nach Ausrichtung der Probenkörper geordnet in der Tabelle 3-2 zusammengefasst. Die ermittelten Kennwerte entsprechen etwa den in der Literatur angegebenen Werten für Vollholz (Tabelle 2-1). Der Elastizitätsmodul und die Festigkeiten in Faserrichtung sind beim Furnierholz tendenziell um bis zu 20 % höher. Durch das in Kapitel 2.1.5 beschriebene Verfahren der Furnierholzherstellung ist die Ausrichtung der Fasern im Verbund und im Probenkörper homogener als im Vollholz.

Tabelle 3-2: Ermittelte Kennwerte des Furnierschichtholzes aus 1 mm dicken Lagen, in Klammern ist der jeweilige Variationskoeffizient (relative Standardabweichung) in % angegeben

Kennwert	LR	LT	TR	TL
Zugfestigkeit [N/mm ²]	146,3 (9)	129,3 (12)	5,8 (16)	3,5 (35)
Bruchdehnung [%]	1 (11)	0,8 (10)	0,45 (20)	0,37 (22)
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	15.151 (4)	17.128 (8)	1.348 (6)	1.162 (11)
Querkontraktionszahl	0,28 (23)	0,58 (19)	0,12 (57)	0,32 (85)

Beim Vollholz kann die natürliche Krümmung des Baumes Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften im geprüften Querschnitt haben. Beim Herstellen des Furnierholzes wird Druck ausgeübt und Klebstoff in den Verbund eingebracht. Durch den aufgetragenen Druck können Risse und Unebenheiten auf der Oberfläche geglättet werden und der Verbund insgesamt wird verdichtet. Das kann sich ebenfalls positiv auf die Eigenschaften auswirken.

Senkrecht zur Faserrichtung wurde beim Furnierholz im Vergleich zu den Literaturwerten für Vollholz eine geringere Festigkeit (etwa 50 %) und Bruchdehnung (mehr als 60 %) gemessen. Der Elastizitätsmodul ist in dieser Arbeit je nach Vergleichsquelle nur um bis zu 10 % höher als bei Vollholz. Das deutet auf ein frühzeitiges Versagen der Probenkörper hin. Inwieweit es auf das Herstellverfahren oder die Probenkörpervorbereitung zurückzuführen ist, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Ein Zusammenhang zwischen der Materialverdichtung und einer dadurch entstandenen Faserschädigung senkrecht zur Faserrichtung kann nicht ausgeschlossen werden.

Bei der Querkontraktionszahl wurde eine gute Übereinstimmung zu den Literaturangaben für Vollholz in LT und TL Richtung festgestellt. Insgesamt kann bedingt durch die große Streuung der Ergebnisse keine Aussage zur Veränderung des Kennwertes durch die Furnierholzherstellung getroffen werden.

3.1.3 Abhängigkeit der Eigenschaften von der Schichtdicke

Eine eindeutige Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften im Furnierholz von der Schichtdicke der Furniere konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Jedoch sind je nach Richtung Abweichungen vorhanden. Tendenziell weist der Werkstoff durch den Einsatz von dünneren Furnieren höhere Kennwerte (Festigkeit in Faserrichtung und Steifigkeit senkrecht zur Faserrichtung) bei Zugbelastung auf. Es wurde Furnierholz aus Furnieren mit 1 mm, 2,5 mm und 3,6 mm Dicke untersucht.

Die Querkontraktionszahl ist als einziger Kennwert in jede Holzrichtung unabhängig von der Schichtdicke der Furniere. Zwar zeigen sich Unterschiede in den Mittelwerten, aber eine fast vollständige Überschneidung der Streubereiche liegt in allen vier getesteten Holzrichtungen vor.

In Faserrichtung (Abbildung 3-4)

In Faserrichtung (LR, LT) bleiben die Werte für den Elastizitätsmodul bei Erhöhung der Schichtdicke konstant. In LT-Richtung gilt das ebenfalls für die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung. In LR-Richtung wurden die größten Werte für die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung bei 1 mm dicken Furnierlagen gemessen. Bei dickeren Furnierlagen sind diese Werte um bis zu einem Drittel geringer. Im Vergleich aller gemessener Holzrichtungen weist die LR-Richtung mit 146 N/mm^2 die höchste Festigkeit auf. Die Homogenisierung der Werkstoffeigenschaften durch die Herstellung von Furnierholz aus dünneren Furnierlagen kann hier bereits eine messbare Erhöhung der Festigkeit bewirkt haben. Die höhere Bruchdehnung ist erwartungsgemäß das Resultat von gleichbleibender Steifigkeit und erhöhter Festigkeit.

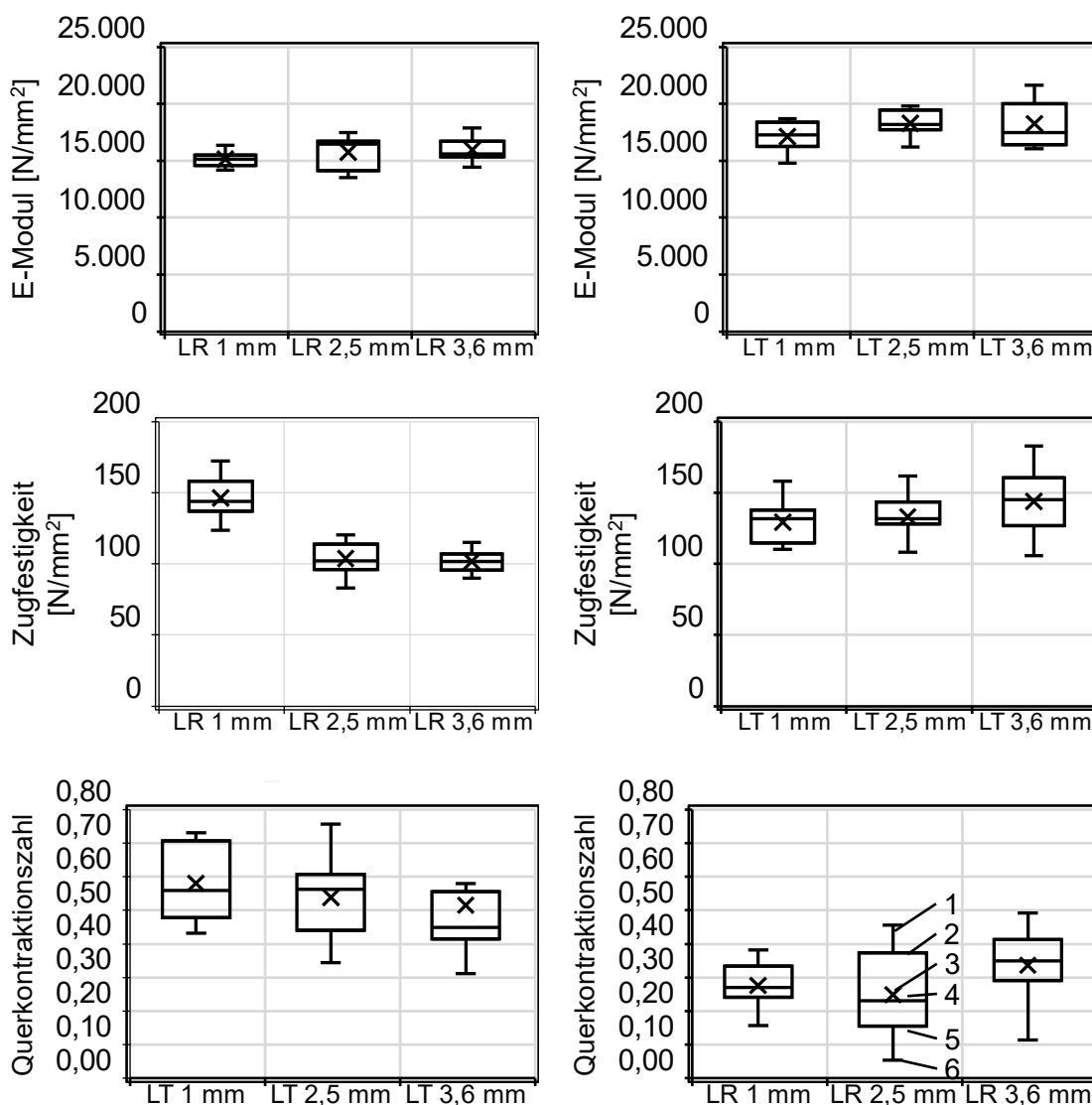


Abbildung 3-4: Vergleich der Kennwerte bei Zugbelastung in Faserrichtung nach unterschiedlicher Furnierdicke; 1 – oberer Whisker, 2 – oberes Quartil, 3 – Mittelwert, 4 – Median, 5 – unteres Quartil, 6 – unterer Whisker

Senkrecht zur Faserrichtung (Abbildung 3-5)

Die höchste Steifigkeit senkrecht zur Faserrichtung (TR und TL) wurde beim Furnierholz mit 1 mm dicken Furnierlagen gemessen. Beim Werkstoff aus dickeren Furnieren liegt der gemessene Elastizitätsmodul nur noch im Bereich von 50 % bis 70 %. Bei der Festigkeit müssen die Richtungen TR und TL unterschieden werden. In TR-Richtung nimmt die Zugfestigkeit mit steigender Lagendicke um bis zu einem Drittel ab. In TL-Richtung sind die Zugfestigkeit bei den 3,6 mm dicken Furnierlagen um bis zu 40 % höher als bei den dünneren Lagen. Insgesamt ist das Festigkeitsniveau gering (unter 6 N/mm²). Es kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die Probenkörper trotz sorgfältiger Behandlung im Rahmen der Vorbereitung nicht beschädigt wurden. Bei der Querkontraktionszahl kann keine eindeutige Abhängigkeit von der Furnierdicke abgeleitet werden.

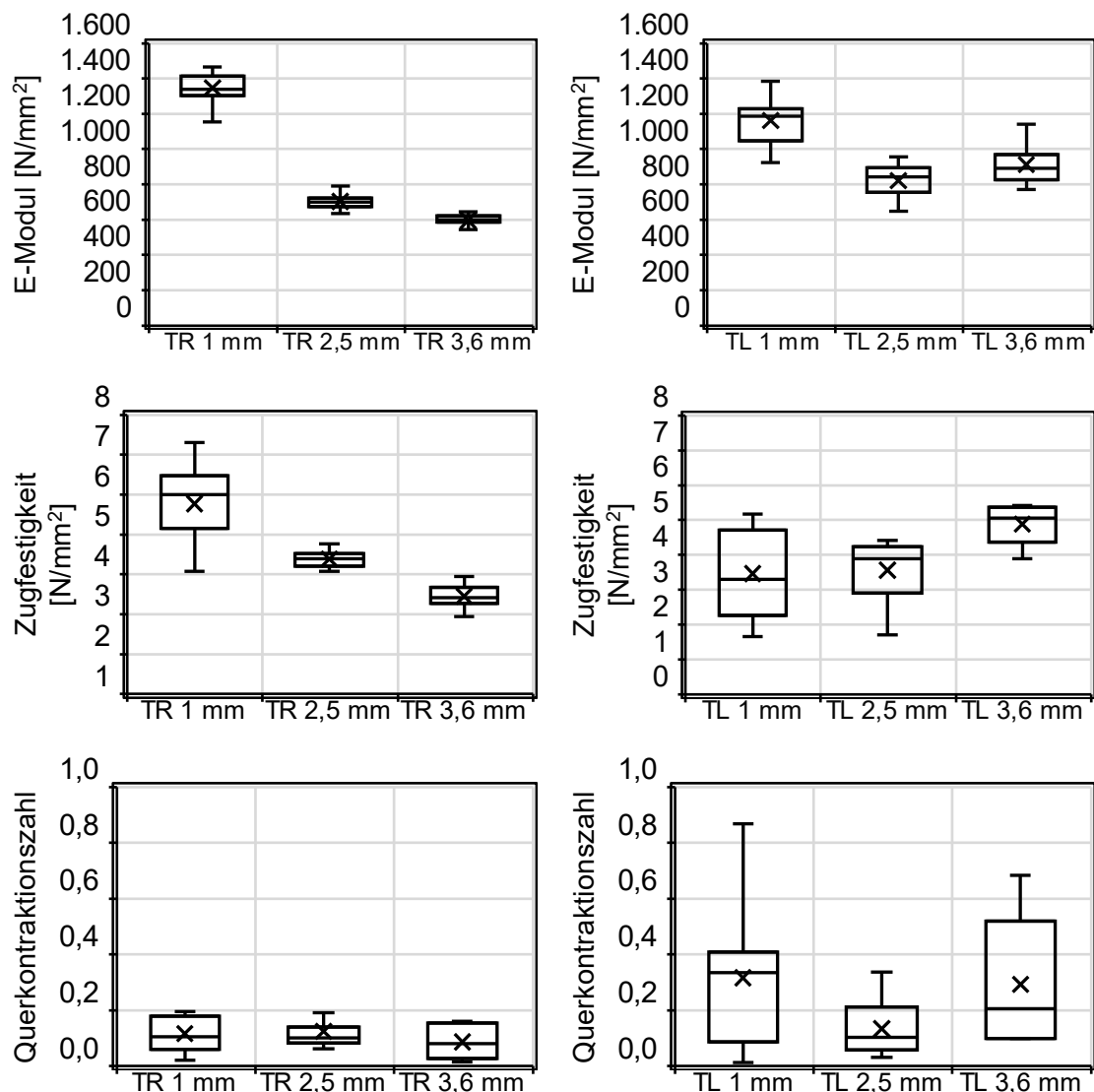


Abbildung 3-5: Vergleich der Kennwerte bei Zugbelastung senkrecht zur Faserrichtung nach unterschiedlicher Furnierdicke

3.2 Druckbeanspruchung

Das Verhalten der Holzwerkstoffe bei Druckbeanspruchung wurde bereits in Kapitel 2.1.4 erläutert. Die Druckfestigkeit von Holz wird nach DIN 52 185 parallel zur Faserrichtung und nach DIN 52 192 senkrecht zur Faserrichtung bestimmt. Generell gilt, dass die Druckfestigkeit bei Holz etwa die Hälfte der Zugfestigkeit beträgt. Zusätzlich wird der Einfluss, der bei der Herstellung des Furnierschichtholzes verwendeten Klebstoffart auf die Druckeigenschaften untersucht. Diese Erkenntnisse können zur Konzeptionierung des Demonstrators genutzt werden.

In diesem Kapitel werden die aufgenommenen Kennwerte von auf Druck belasteten FSH-Probenkörpern vorgestellt. Die Ergebnisse der Masterarbeit von *Neuser* [Neu18] sind in das Kapitel 3.2.4 eingeflossen.

3.2.1 Materialien und Methoden

Die Probenkörper wurden aus Furnieren mit 1 mm und 2,5 mm dicken Furnierlagen gefertigt. Für die Kennwertermittlung bei statischer und dynamischer Beanspruchung wurde analog zu den Untersuchungen bei Zugbeanspruchung das Furnierholz aus 1 mm dicken Lagen geprüft. Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart wurden zur besseren Handhabung dickere Lagen mit 2,5 mm für das Furnierholz verwendet. Für alle Probenkörper wurde die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul bestimmt.

Die Furniere zur Kennwertermittlung wurden in unidirektionaler Richtung mit einem Dispersionsleim bei 80 °C und 6 N/mm² zu Furnierschichtholz verpresst (Fertigung wie Zugproben). Aus den Probenplatten wurden einzelne Probenkörper herausgetrennt. Die Kantenlänge a der rechteckigen Proben betrug 30 mm. Die Probenlänge b lag nach DIN 52 185 bei 60 mm. Die Probengeometrie und der Versuchsaufbau sind in Abbildung 3-6 vorgestellt.

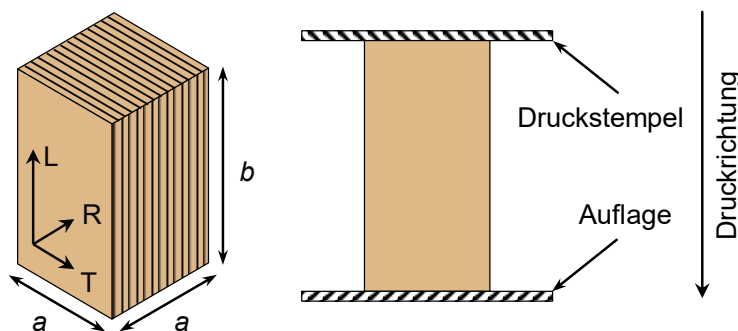


Abbildung 3-6: Probengeometrie und Versuchsaufbau Druckprüfung; a – Kantenlänge, b – Probenhöhe

Statische Druckbelastung

Die quasistatischen Messungen erfolgten an einer Universalprüfmaschine MTS Criterion Model 45 der Firma MTS Systems Corporation. Die Prüfgeschwindigkeit wurde für alle Prüfkörper nach DIN 52 185 auf 2 mm/min festgelegt. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels optischer Verfahren. Es wurde ein 3D Verformungsmesssystem Aramis 5M der GOM GmbH verwendet. Zur Messung der Stauchung wurde nach DIN 52 192 ein optischer Extensometer der Länge 40 mm mittig auf dem Probenkörper platziert.

Die Prüfkörper für die quasistatischen Messungen wurden vor der Prüfung unter Normklima in Anlehnung an DIN 52377 (2016) bei 20 ± 1 °C und 65 ± 3 % relativer Luftfeuchte konfektioniert. Die Holzfeuchte wurde mittels Darmmethode an vier zufällig ausgewählten Probenkörpern ermittelt. Diese lag im Durchschnitt bei 8 %.

Die Ermittlung des Druck E-Moduls erfolgte über die Steigung der Verläufe des Spannungs – Stauchungs – Diagramms des jeweiligen Probenkörpers. In Faserrichtung wurde der Bereich 10 % - 60 % der Druckfestigkeit und senkrecht zur Faserrichtung 5 - 30 % der Druckfestigkeit einbezogen. Die Druckfestigkeit ist die maximal erreichte Kraft bezogen auf die Querschnittsfläche. Zusätzlich wird senkrecht zur Faserrichtung die Stauchgrenze angegeben. Die Stauchgrenze ist die Spannung bei 2 % Stauchung, wenn eine zur elastischen Geraden auf 2 % Stauchung verschobene Gerade das Spannungs – Stauchungs – Diagramm schneidet. Damit wird der Punkt markiert, an dem die Verformung des Probenkörpers stark zunimmt. Da senkrecht zur Faserrichtung nicht immer ein Bruch in dem Spannungs – Stauchungs – Diagramm erkennbar ist, wird die Stauchgrenze als Druckfestigkeit angenommen. Die genaue Berechnung ist in DIN 52 192 beschrieben.

Dynamische Druckbelastung

Die dynamischen Messungen wurden an einem Fallmasseprüfstand durchgeführt. Die Auftreffgeschwindigkeit des Schlittens betrug 2,6 m/s. Die Kraftmessung erfolgte unter dem Prüfkörper mittels zweier piezoelektrischer Kraftaufnehmer. Der gesamte Verfahrensweg des Schlittens wurde gemessen.

Die Prüfkörper für die dynamischen Messungen wurden nicht klimatisiert. Sie wurden vor der Prüfung bei Raumtemperatur in Innenräumen mit Zentralheizung gelagert. Die Holzfeuchte lag im Durchschnitt bei 6 - 8 %. Dieser Untersuchung ist als Voruntersuchung zur ersten Dimensionierung eines in Kapitel 5 zu entwickelnden Demonstrators vorgenommen worden. Eine Konfektionierung ist nicht notwendig gewesen, da auch die Entwicklung des Demonstrators unter Raumbedingungen erfolgte.

Untersuchungen zum Klebstoffeinfluss

Es wurden Furnierschichthölzer mit vier unterschiedlichen Klebstoffen durch Verpressen der Furnierlagen bei 6 N/mm^2 hergestellt. Die verwendeten Klebstoffe sind Dispersionsleim (Leim), Epoxidharz (EP), SE-Polymer (Silan-terminierte Polymere in Kombination mit Epoxidharz - SE) und Polyurethanklebstoff (PUR). In allen Probenkörpern wurde die Faserrichtung in die Belastungsrichtung gelegt. Die Kantenlänge a wurde auf 20 mm festgelegt. Die Probenhöhe b betrug 50 mm. Jeder Prüfkörper bestand aus acht symmetrisch zur Mitte aufgebauten Furnierlagen mit je 2,5 mm Dicke. Je nach Feststoffanteil im Klebstoff und der Rauigkeit der Furnierlagen variierte die Klebstoffdicke. Bei der mikroskopischen Betrachtung der Klebstoffschicht wurden Klebstoffdicken von 0,02 mm bis 0,13 mm gemessen. Die Holzfeuchte der Probenkörper lag im Durchschnitt bei 5,8 %.

Die Untersuchungen wurden unter statischer Beanspruchung durchgeführt. Die Messungen erfolgten an einer Universalprüfmaschine MTS Criterion Model 45 der Firma MTS Systems Corporation. Die Prüfgeschwindigkeit wurde für alle Prüfkörper nach DIN 52 185 auf 1 mm/min festgelegt. Da die hier ermittelten Kennwerte nicht im weiteren Verlauf gesondert genutzt werden und nur der Vergleich zwischen den untersuchten Klebstoffen angestrebt wird, wurde auf die aufwendige Ermittlung der Stauchung in der Mitte der Prüfkörper verzichtet. Stattdessen wurde zum Vergleich der Stempelweg der Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Stauchung genutzt. Dieser wurde ebenfalls durch optische Verfahren ausgewertet.

3.2.2 Kennwerte bei statischer Druckbelastung

In Abbildung 3-7 sind die Spannungs – Stauchungs – Verläufe von Holzdruckprobenkörpern unter quasistatischer Belastung dargestellt. Die Verläufe entsprechen annähernd, den in der Literatur beschriebenen. Das vollständige Versagen des Probenkörpers tritt im Vergleich zu der Darstellung in der Literatur (Abbildung 2-9) früher ein.

Die ermittelten Werte für die Druckfestigkeit und den Druck E-Modul sind in Tabelle 3-3 aufgelistet. Die Druckfestigkeit ist in Faserrichtung etwa doppelt so groß wie senkrecht zur Faserrichtung (T). Das Versagen tritt dafür aber auch bei einer deutlich geringeren Stauchung auf. Trotz der geringeren Druckfestigkeit nehmen die Probenkörper mit dem Faserverlauf senkrecht zur Belastungsrichtung in etwa genau so viel Energie auf wie die in die Belastungsrichtung. Je nach Anwendung kann die Faserrichtung im Bauteil entsprechend den Anforderungen eingesetzt werden. Ist bauraumbedingt nur ein kurzer Weg zur Energieaufnahme vorhanden, empfiehlt es sich, den Faserverlauf in die Belastungsrichtung zu legen.

Mit dem FSH wurden hier deutlich höhere Werte für die Druckfestigkeit und -steifigkeit erreicht als in der Literatur für Vollholz aus Rotbuche angegeben. Wobei die Werte auch je nach Quelle schwanken, da es Unterschiede in der Probengeometrie, der Holzfeuchte oder anderen Faktoren gibt. Die höheren Werte beim hier geprüften FSH können auf

eine Versteifung und Verdichtung des Werkstoffes während der Fertigung zurückgeführt werden.

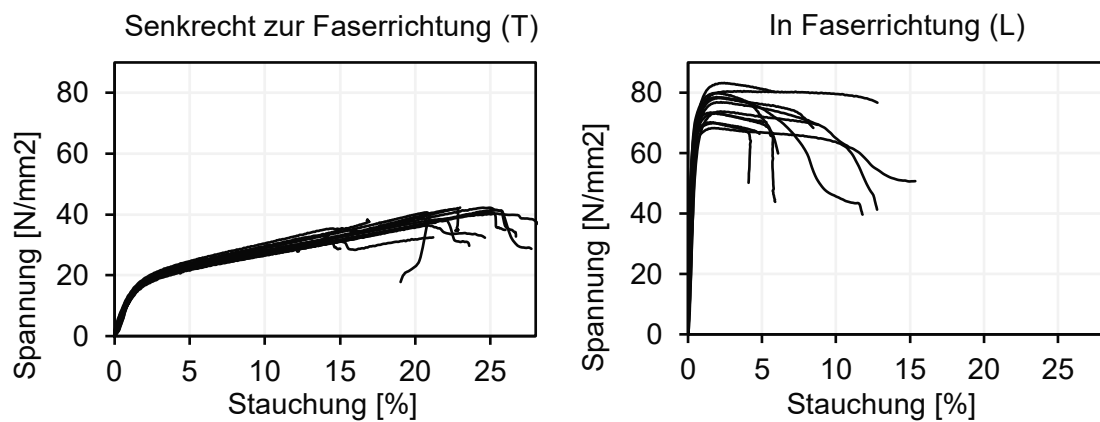


Abbildung 3-7: Spannungs – Stauchungs – Diagramme von Holzdruckprobenkörpern unter quasistatischer Belastung

Tabelle 3-3: Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte von druckbelasteten FSH - Probenkörpern aus Rotbuche

	Druck E-Modul		Druckfestigkeit (Stauchgrenze)	
	L	T	L	T
Mittelwert [N/mm ²]	18.858	1.293	76	38 (21)
Standardabweichung [N/mm ²]	4.686	121	5	4 (0,6)
Variationskoeffizient [%]	25	9	6	12 (3)
Vollholz [NS17]	11060	750	45	6
Vollholz [OHN13]	9690	810		

Die Streuung der Ergebnisse liegt meist in einem für Holz üblichen Bereich von etwa 10 % (Variationskoeffizient). Nur beim Druck E-Modul in Faserrichtung liegt der Variationskoeffizient bei 25 %. Da Holz ein natürlich gewachsener Werkstoff ist, sind seine Eigenschaften lokal sehr unterschiedlich (Porenanteil, Spät- oder Frühholzanteil). Dies kann Auswirkungen auf die Steifigkeit des Werkstoffes haben. Durch die Verdichtung des Werkstoffes in der Fertigung (erfolgt senkrecht zur Faserrichtung) kann der Porenanteil reduziert und die Faserstruktur geändert werden, sodass die Steifigkeit stärker variiert.

3.2.3 Kennwerte bei dynamischer Druckbelastung

Auch bei erhöhter Prüfgeschwindigkeit (etwa 20-fach) ist ein holztypisches Verhalten festzustellen. In Abbildung 3-8 sind die Kraft – Weg – Verläufe dargestellt. Die Stauchung konnte nicht berechnet werden, da keine Dehnung im Probenkörper nach DIN 52 192 aufgenommen wurde. Nach Erreichen der maximalen Kraft tritt fast unmittelbar ein progressives Versagen des Prüfkörpers ein. Das Material zerspringt in grobe Splitter und

wird im Prüfraum verteilt. Auch dynamisch tritt die maximale Kraft in Faserrichtung bei deutlich geringerem Weg als senkrecht zur Faserrichtung auf.

Senkrecht zur Faserrichtung wurde bei allen Probenkörpern im Bereich von 3 – 4 mm (etwa 5 % Stauchung) ein leichtes Absinken der Kraft festgestellt. Ein Grund dafür kann das teilweise Knicken/Falten der Fasern sein, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Auch in Faserrichtung wurde bei etwa gleichem Krafniveau ein kurzer Abfall der Kraft beobachtet. Auch hier kann es zum Knicken der in den Laubhölzern quer zum Faserverlauf liegenden Holzstrahlen (Abbildung 2-3) gekommen sein.

Die aus den aufgenommenen Daten ermittelten Kennwerte sind in der Tabelle 3-4 zusammengefasst. Die dynamische Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung ist fast doppelt so groß wie die statisch aufgenommenen Werte. In Faserrichtung sind die dynamischen Werte mehr als doppelt so groß wie die statischen. Dieser Effekt wird in der Literatur oft beschrieben, die Ursachen dafür sind aber nicht endgültig geklärt [WHO+16]. Eine Schockwelle im Werkstoff verursacht durch den Belastungsimpuls oder Micro-Effekte in den Zellen, die das Ausbilden eines Knickbandes verhindern, können die Ursachen sein [RP97].

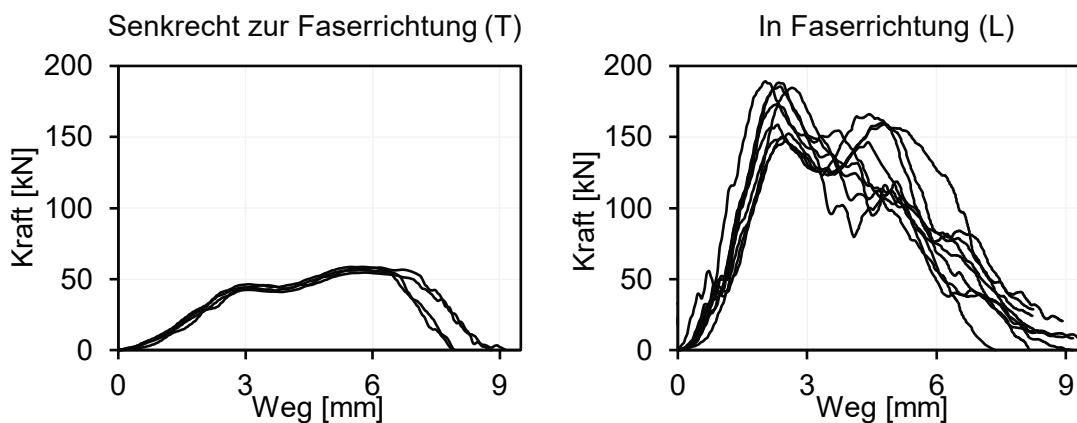


Abbildung 3-8: Kraft – Weg – Diagramme von Holzdruckprobenkörpern unter dynamischer Belastung

Tabelle 3-4: Druckfestigkeit (L: Wert des ersten Peaks; T: Maximalwert), aufgenommene Energie und die spezifische Energieaufnahme (SEA) von dynamisch druckbelasteten Holzkörpern aus Rotbuche

	Druckfestigkeit [N/mm ²]		Energie [J]		SEA [kJ/kg]	
	L	T	L	T	L	T
Mittelwert	189	64	738	289	17	7
Standardabweichung	20	2	55	14	1,3	0,5
Variationskoeffizient	10 %	3 %	7 %	5 %	7 %	7 %

Bei allen Kennwerten konnte im Vergleich zu den Kennwerten für die Zugbeanspruchung eine geringere Streuung (Variationskoeffizient unter 10 %) festgestellt werden. Die spezifische Energieaufnahme von den untersuchten Probenkörpern ist beachtlich, unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass die Probenkörper konstruktiv nicht speziell für die Energieaufnahme optimiert sind. Diese Werte liegen im Bereich der metallischen energieabsorbierenden Strukturen [MSL+20] [Fei12]. Um die Werte, die mit Strukturen aus FKV möglich sind, zu erreichen, muss die Bauteilform optimiert werden [LSY12].

3.2.4 Einfluss der Klebstoffart

Sowohl bei der Druckfestigkeit als auch beim Druck E-Modul wurden Unterschiede durch die Verwendung verschiedener Klebstoffe festgestellt.

Die höchsten Werte wurden für beide Kennwerte bei den Probenkörpern mit Epoxidharz (EP) gemessen (Tabelle 3-5). Durch die Verwendung von EP wurde nicht nur die Festigkeit, sondern auch die Steifigkeit des Materials erhöht. Änderungen im Versagensverhalten wurden aber nicht festgestellt. Eine Versprödung des Materials ist nicht erkennbar.

Auch beim SE-Polymer konnten höhere Kennwerte erreicht werden. Nur mit dem Polyurethanklebstoff wurde ein geringerer Druck E-Modul ermittelt. Bei diesen Probenkörpern wurde ebenfalls kein abweichendes Versagensverhalten festgestellt.

Mittels mikroskopischer Aufnahmen wurden die Klebstoffdicken in den Probenkörpern gemessen. Daraus wurde der Klebstoffanteil berechnet (Tabelle 3-5). Für den Leim gestaltete sich die Messung die Klebstoffdicke problematisch. Aufgrund der geringen Viskosität und dem geringen Festkörperanteil von nur 60 % (andere Klebstoffe bei 100 %), ergibt sich ein geringerer Klebstoffanteil und eine höhere Durchdringung des Klebstoffes in die Furnierschichten. Dadurch verschwimmt die Grenze Holz – Klebstoff. Die Klebstoffdicke ist so nur eingeschränkt messbar. Angaben zu den mechanischen Eigenschaften liegen nicht vor.

Tabelle 3-5: Druckfestigkeit und Druck E-Modul in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffes, sowie der Klebstoffanteil an den Probenkörpern

Klebstoffart	Leim	SE	PUR	EP
Druckfestigkeit [N/mm ²]	66	77	69	89
Standardabweichung [N/mm ²]	1,5	1,2	1,7	2,3
Variationskoeffizient [%]	2,2	1,5	2,5	2,6
Druckfestigkeit normiert [%]	100	116	103	134
Druck E-Modul [N/mm ²]	10.815	12.445	9.940	15.796
Standardabweichung [N/mm ²]	992	1.175	1.871	1.849
Variationskoeffizient [%]	9,2	9,4	18,8	11,7
Druck E-Modul normiert [%]	100	115	92	146
Klebstoffanteil [%]	0,9	3,3	2,2	3,3

Der größte Klebstoffanteil von 3,3 % wurde bei SE und EP Probenkörpern ermittelt. Beide wiesen auch entsprechend höhere Kennwerte auf. Da der Klebstoffanteil grundsätzlich eher gering ist und die Kennwerte für PUR trotz höherem Anteil an Klebstoff im Vergleich zum Leim in etwa gleichgeblieben sind, kann nicht eindeutig davon ausgegangen werden, dass die Kennwertänderung allein auf den höheren Klebstoffanteil zurückzuführen ist. Wahrscheinlich spielen mehrere Faktoren eine Rolle: die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes, die Anbindung Holz – Klebstoff, die Eindringtiefe des Klebstoffes in die Furniere und die Schichtdicke.

Normiert auf die Kennwerte von Leim wurden mit dem SE-Polymer um 15 % und dem Epoxydharz um bis zu 50 % höhere Kennwerte erreicht. Durch die Wahl des Klebstoffes können die Druckeigenschaften des FSHs somit deutlich gesteigert werden. Je nach geforderter Anwendung des Materials kann die Wahl des Klebstoffes erfolgen.

3.3 Biegeeigenschaften

Neben der Zug- und Druckbelastung gehört die Biegung zu den grundlegenden Belastungsarten von Bauteilen und Strukturen. Die Biegeeigenschaften von Holz werden parallel und senkrecht zur Faserrichtung, in einer Kombination aus beiden Richtungen und unter 45° bestimmt. Bei fehlerfreiem Vollholz liegt die Biegefestigkeit zwischen der Zug- und der Druckfestigkeit. Diese Ergebnisse werden zur Validierung der Materialkarte verwendet. Zusätzlich wird der Einfluss, der bei der Herstellung des Furnierschichtholzes verwendeten Klebstoffart auf die Biegeeigenschaften untersucht. Diese Erkenntnisse können zur Konzeptionierung des Demonstrators genutzt werden. Die Kennwerte, die Prüfung und die Einflussfaktoren für Biegung bei Vollholz werden von *Niemz und Sonderreger* [NS17] zusammengefasst.

In diesem Kapitel werden die aufgenommenen Kennwerte von biegebelasteten FSH-Probenkörpern vorgestellt. Die Ergebnisse der Studienarbeit von *Gundlach* [Gun17] und *Neuser* [Neu18] sind hier eingeflossen.

3.3.1 Materialien und Methoden

Die Untersuchungen der Biegeeigenschaften wurden in Anlehnung an DIN EN 310 durchgeführt. Die Probengeometrie und der Versuchsaufbau sind in Abbildung 3-9 dargestellt.

Die Probenkörper sind aus vier symmetrisch zur Probenmitte angeordneten Furnierschichten aus Buche aufgebaut. Die Faserrichtung in den einzelnen Lagen und der Klebstoff können beliebig definiert werden. Die Dicke der Furnierlagen beträgt etwa 2,5 mm. Durch den Pressdruck von 6 N/mm² wurde die Oberfläche der Furniere geglättet und die Furniere minimal zusammengepresst, sodass die Probendicke nach dem Fügeprozess 9 mm betrug.

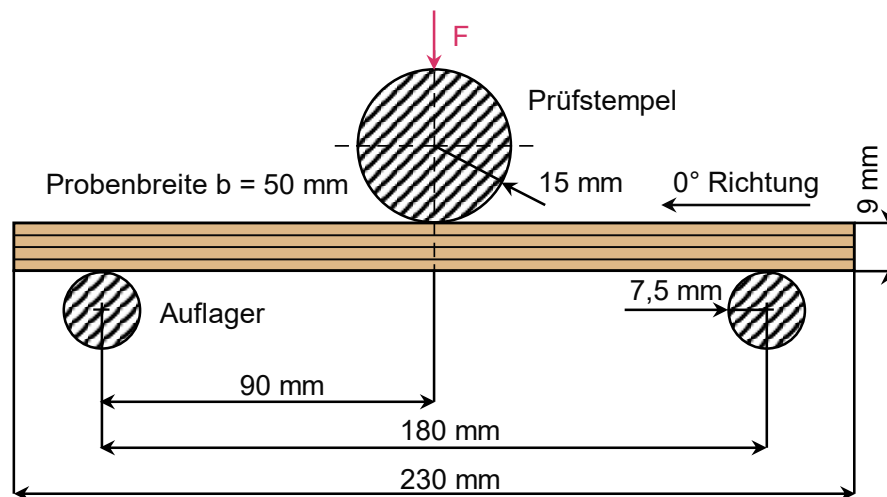


Abbildung 3-9: Probengeometrie und Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegung

An allen Probekörpern wurden die Biegefestigkeit und der Biege E-Modul ermittelt. Die Messungen erfolgten an einer Universalprüfmaschine MTS Criterion Model 45 der Firma MTS Systems Corporation. Die Prüfgeschwindigkeit wurde für alle Prüfkörper nach DIN EN 310 auf 7 mm/min festgelegt (ermittelt an den Prüfkörpern mit Faserrichtung längs des Prüfkörpers: 0°-Richtung). Die Wegmessung erfolgte mittels optischer Verfahren.

Die Ermittlung des Biege E-Moduls erfolgte nach DIN EN 310 über die Steigung der Verläufe des Kraft – Durchbiegung – Diagramms des jeweiligen Probekörpers. Für die Berechnungen wurde der Bereich 10 % - 40 % der Biegefestigkeit einbezogen. Die Biegefestigkeit wurde ebenfalls nach DIN EN 310 ermittelt.

Variation der Faserrichtung in den Lagen

Die Prüfkörper wurden vor der Prüfung unter Normalklima in Anlehnung an DIN 52377 (2016) bei 20 ± 1 °C und 65 ± 3 % relativer Luftfeuchte konfektioniert. Die Holzfeuchte wurde mittels Darmmethode an je fünf zufällig ausgewählten Probekörpern ermittelt. Diese lag im Durchschnitt bei 10 %. Als Klebstoff diente ein Zweikomponentendispersionsleim.

In Abbildung 3-9 ist die 0° - Richtung zur Festlegung der Faserorientierung angegeben. Liegt die Faserrichtung in einer Lage in die 0° - Richtung, dann wird diese Lage als 0° - Lage bezeichnet. Eine 90° - Lage / 45° - Lage liegt entsprechend in einem 90° / 45° Winkel in der Probenebene dazu. Die Zusammensetzung der untersuchten Lagenanordnungen ist in der Tabelle 3-6 dargestellt.

Variation der Klebstoffart

Die Holzfeuchte wurde mittels Darmmethode an je fünf zufällig ausgewählten Probekörpern ermittelt. Diese lag im Durchschnitt bei 5 %. Die verwendeten Klebstoffe sind Dispersionsleim (Leim), Epoxidharz (EP), SE-Polymer (Silan-terminierte Polymere in Kom-

bination mit Epoxidharz - SE) und Polyurethanklebstoff (PUR). Die Untersuchungen wurden unter statischer Beanspruchung durchgeführt. Die Faserorientierung entsprach für alle Probenkörper der 0° - Richtung.

Tabelle 3-6: Faserorientierung in den Lagenanordnungen, Symmetrieebene zwischen Lage 2 und Lage 3

Bezeichnung	0°	90°	0°/90°	90°/0°	±45°
Lage 1	0°	90°	0°	90°	45°
Lage 2	0°	90°	90°	0°	-45°
Lage 3	0°	90°	90°	0°	-45°
Lage 4	0°	90°	0°	90°	45°

3.3.2 Kennwerte bei variierendem Lagenaufbau

In Abbildung 3-10 sind Kraft – Durchbiegung – Diagramme von biegebelasteten Probenkörpern mit unterschiedlichem Lagenaufbau dargestellt. Nach einem linearen Anstieg der Verläufe tritt bei allen Lagenaufbauten bis zum Erreichen der Biegefestigkeit degresitives Verhalten auf. Die höchsten Kennwerte werden wie erwartet bei den Probenkörpern mit der 0° Lagenanordnung und die niedrigsten mit der 90° Lagenanordnung erreicht. Die errechneten Kennwerte für die Biegefestigkeit und der Biege E-Modul sind in Tabelle 3-7 zusammengefasst. Auffällig ist, dass sowohl der Kurvenverlauf als auch die Kennwerte für die 90°/0° und die 45° Lagenanordnung nahezu identisch sind.

Die aufgenommenen Werte für die 0° und 90° Lagenanordnungen stimmen mit den Literaturangaben für Vollholz gut überein (Tabelle 3-7). Für die anderen Lagenanordnungen wurden in der Literatur keine Vergleichswerte gefunden. Die Streuung der Kennwerte ist für Holzwerkstoffe angemessen.

Die Dehnungsverteilung über dem Probenquerschnitt ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Bei den Probenkörpern mit der 0° Lagenanordnung wird die für das Vollholz typische Verschiebung der neutralen Faser in Zugrichtung deutlich. Bei geringen Kräften tritt zunächst eine lineare Spannungsverteilung auf. Wird die Druckspannung des Materials auf der Druckseite der Biegeprobe überschritten, dann ist die Proportionalitätsgrenze erreicht. Bei höherer Belastung steigt die Spannung im Zugbereich weiter an, bis die Zugfestigkeit überschritten wird und es zum Bruch kommt. Die Spannung im Zug- und Druckbereich wird nicht mehr gleichförmig verteilt, die neutrale Faser verschiebt sich. Die Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede bei Zug- und Druckbelastung bei Holz sind die Ursachen dafür [NS17].

Bei 90° und 90°/0° Lagenanordnungen tritt dieser Effekt nicht auf. Zwar gibt es in 90° weiterhin einen Festigkeitsunterschied (3,5 N/mm² bei Zug, mindestens 20 N/mm² bei Druck) im Zug- und Druckbereich, die Probenkörper versagen aber nach Erreichen der Zugfestigkeit im Zugbereich, bevor die deutlich höhere Druckfestigkeit im Druckbereich

erreicht wird. Die Steifigkeit in 90° liegt für Zug und Druck im gleichen Bereich von etwa 1200 N/mm^2 .

Bei der $0^\circ/90^\circ$ Lagenanordnung ist der Bereich der Spannungsverteilung um die Lasteinleitungsstelle konzentriert. Auch die Verschiebung der neutralen Faser ist deutlich ausgeprägter als bei der 0° Lagenanordnung. Nur die äußere Lage wird auf Zug belastet, die anderen Lagen werden auf Druck belastet. Das Versagensverhalten entspricht der Belastung und der Faserrichtung der äußeren Schicht.

Liegt eine 0° Lage außen, ist das Bruchbild faserig mit Ausbrüchen in Faserrichtung. Bei 90° hat das Bruchbild einen geradlinigen Verlauf entlang der Lasteinleitung.

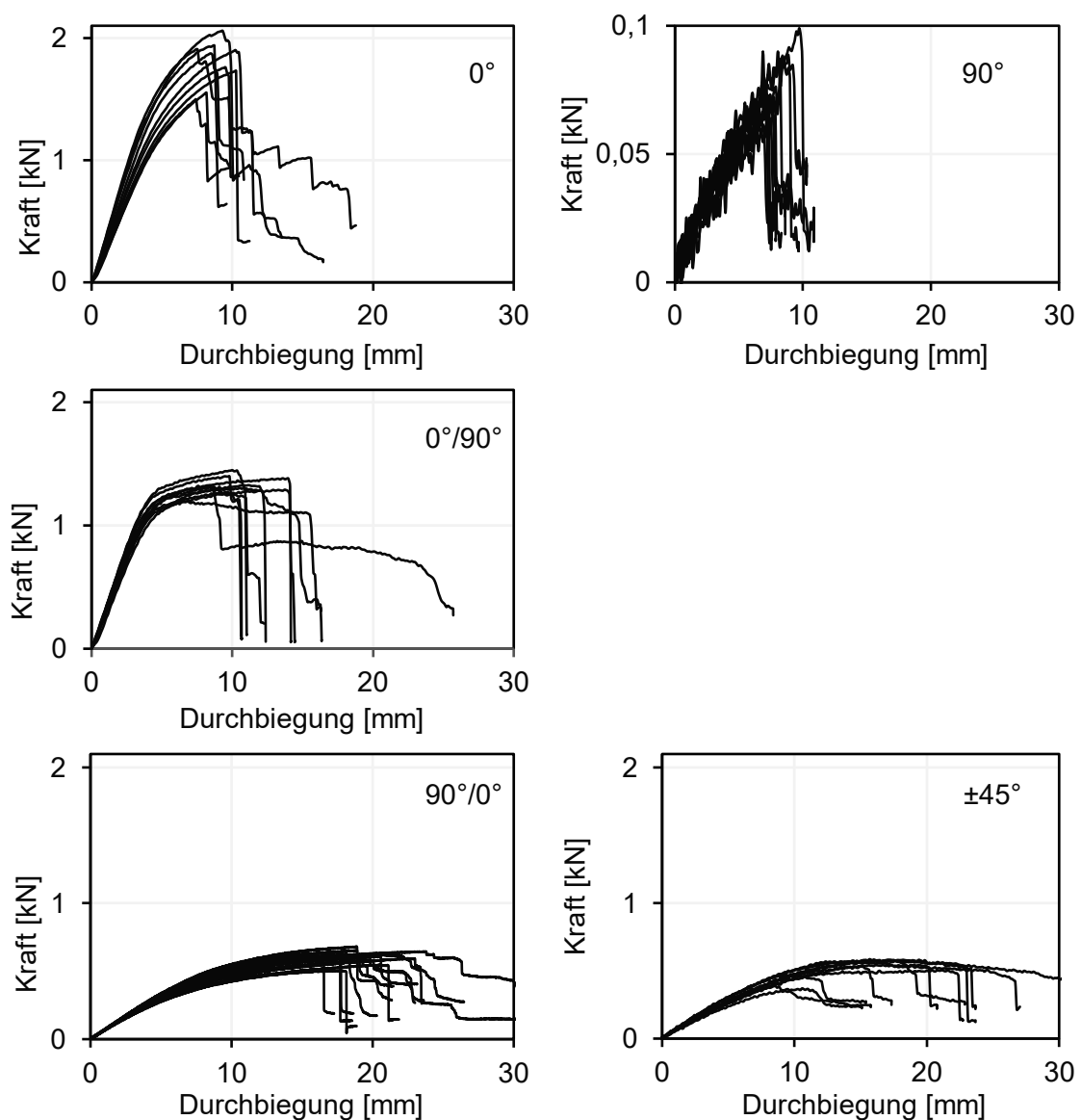


Abbildung 3-10: Kraft – Durchbiegung – Diagramme von biegebelasteten Probenkörpern mit unterschiedlichem Lagenaufbau; Orientierungen 0° , 90° , $0^\circ/90^\circ$, $90^\circ/0^\circ$, $\pm 45^\circ$ nach Tabelle 3-6

Tabelle 3-7: Biegefestigkeit und Biege E-Modul nach Lagenanordnung

Lagenanordnung	0°	90°	0°/90°	90°/0°	±45°
Biegefestigkeit [N/mm ²]	124	5,2	86	36	34
Standardabweichung [N/mm ²]	14	0,6	8	3	5
Variationskoeffizient [%]	11	13	9	8	15
Biege E-Modul [N/mm ²]	13.265	438	12.743	2.139	2.270
Standardabweichung [N/mm ²]	1.805	43	694	170	195
Variationskoeffizient [%]	14	10	5	8	9
Biegefestigkeit Vollholz [NOHS15] [N/mm ²]	95				
Biegefestigkeit Vollholz [DIN 68364] [N/mm ²]	120				
Biegefestigkeit Vollholz [NS17] [N/mm ²]	133				
Biege E-Modul Vollholz [NS17] [N/mm ²]	13.140				
Biege E-Modul Vollholz [NOHS15] [N/mm ²]	11.090				

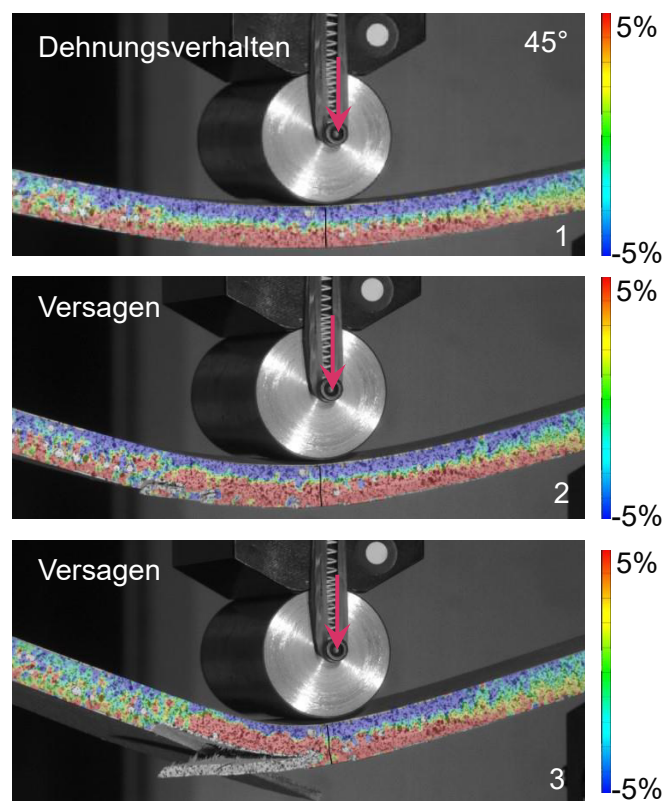


Abbildung 3-11: Dehnungsverhalten und Versagensdarstellung von biegebelastetem Probenkörper mit dem ±45° Lagenaufbau, Farbskala: ±5 % Dehnung

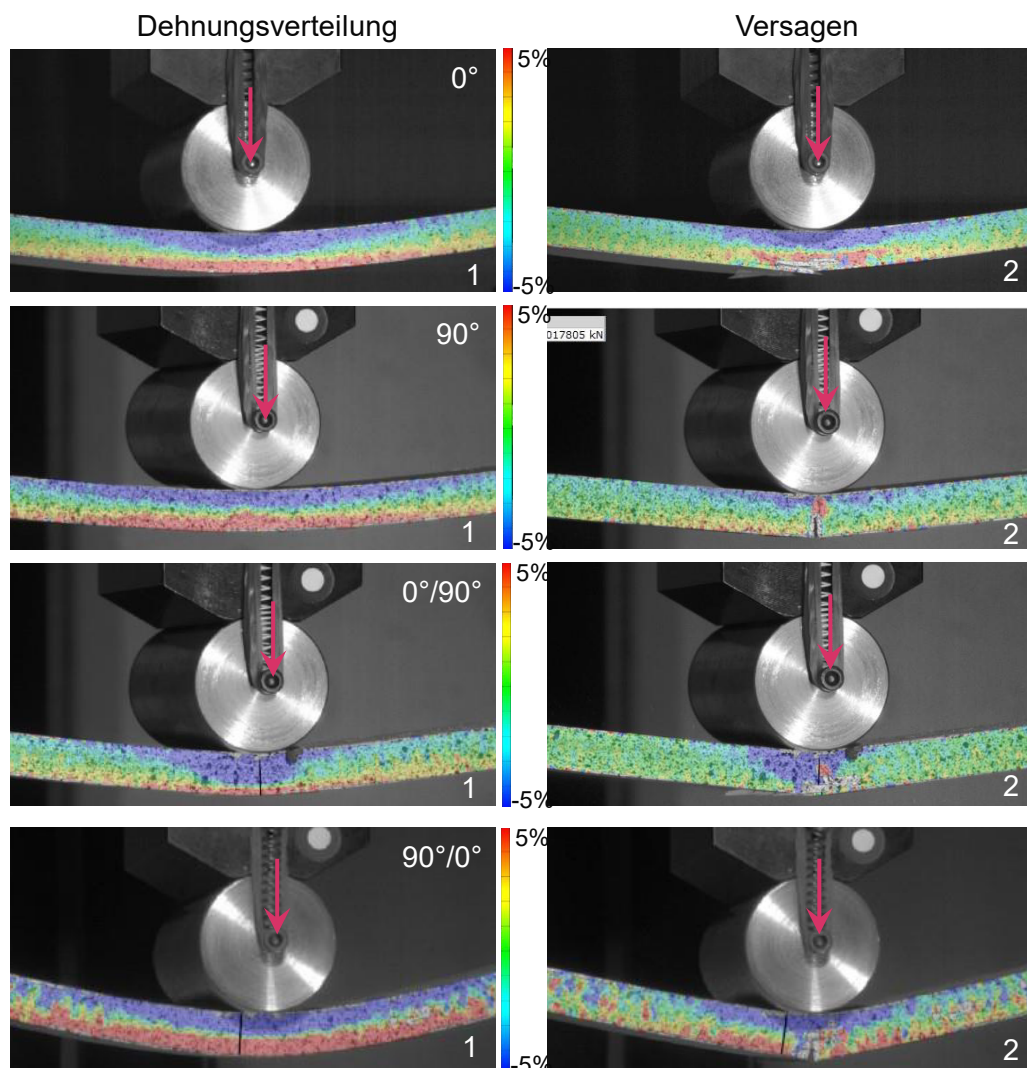


Abbildung 3-12: Dehnungsverteilung und Versagensdarstellung von biegebelasteten Probenkörpern mit unterschiedlichem Lagenaufbau, Farbskala: $\pm 5\%$ Dehnung; 1 – vor dem Bruch; 2 – nach dem Bruch

Beim $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau ist das Versagensbild etwas anders (Abbildung 3-11). Eine Verschiebung der neutralen Faser wurde nicht festgestellt. Die äußere Lage versagt im Bereich zwischen den Fasern im 45° Winkel. Die weiter außen liegenden Ecken werden dabei aufgeschält. Im Bereich der Schälung sind deutliche Faserausbrüche erkennbar. Das deutet auf ein Materialversagen nahe der Zwischenschicht hin und nicht auf das Versagen der Klebschicht selbst.

3.3.3 Einfluss der Klebstoffart

Der Verlauf der Kraft – Durchbiegung – Diagramme (Abbildung 3-13) ist für alle verwendeten Klebstoffe ähnlich: linearer Anstieg, gefolgt von einem degressiven Verlauf bis zur Biegefestigkeit. Jedoch weichen die Steigungen im linearen Bereich, also der Biege E-Modul und die Biegefestigkeiten voneinander ab.

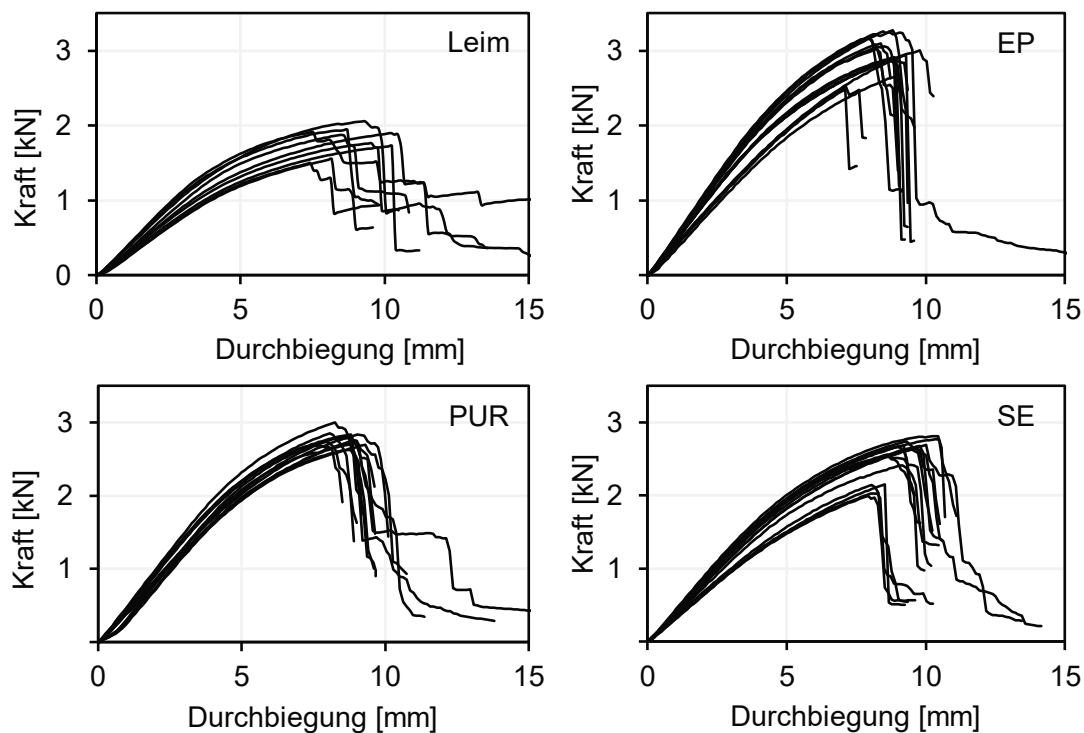


Abbildung 3-13: Kraft – Durchbiegung – Diagramme von biegebelasteten Probenkörpern nach verwendeten Klebstoffart

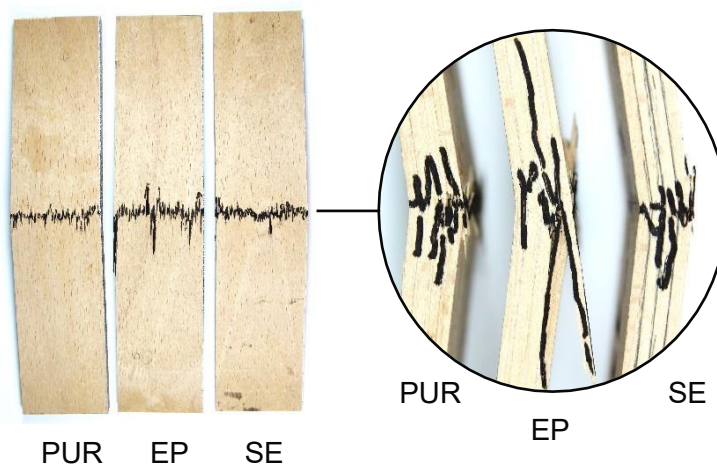


Abbildung 3-14: Bruchbilder der Biegeproben

Die Abbildung 3-14 zeigt die Bruchbilder der Biegeproben. Das Versagen tritt zuerst in der Zugzone auf. Die Versagensbilder sind für alle geprüften Probenkörper gleich und deuten auf einen Zugbruch hin.

Die errechneten Werte für die Biegefestigkeit und den Biege E-Modul sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Neben den Kennwerten, der Standardabweichung und dem Variationskoeffizienten sind die auf den Leim normierten Werte angegeben. Demnach können mit allen untersuchten Klebstoffen die Kennwerte von Probenkörpern mit Leim übertroffen werden. Die höchsten Kennwerte werden mit EP (Epoxidharz) erreicht. Die Biege-

festigkeit kann hierbei sogar um 40 % gegenüber dem Leim erhöht werden. Entsprechend der Festigkeit wurde auch eine höhere Steifigkeit der Probenkörper erreicht. Der Variationskoeffizient liegt (außer bei Leim) unter 10 % und gibt somit eine vergleichsweise geringe Streuung der Ergebnisse wieder.

Tabelle 3-8: Biegefestigkeit und Biege E-Modul in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffes sowie der Klebstoffanteil bei den Probenkörpern

Klebstoffart	Leim	SE	PUR	EP
Biegefestigkeit [N/mm ²]	124	151	164	175
Standardabweichung [N/mm ²]	14	12	8	12
Variationskoeffizient [%]	11	8	5	7
Biegefestigkeit normiert [%]	100	121	132	140
Biege E-Modul [N/mm ²]	13.265	14.744	15.768	16.375
Standardabweichung [N/mm ²]	1.805	1.197	1.094	1.321
Variationskoeffizient [%]	14	8	7	8
Biege E-Modul normiert [%]	100	111	119	123
Klebstoffanteil [%]	0,8	2,8	1,9	2,8

Äquivalent zu den Probenkörpern für die Druckprüfung wurde auch für die Biegeproben der Klebstoffanteil rechnerisch ermittelt (gleiche Klebstoffdicke gemessen). Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst und weichen nur geringfügig von den Werten für die Druckprobenkörper ab. Auch hier kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Klebstoffanteil und den Biege – Kennwerten festgestellt werden, vgl. Kapitel 3.2.4.

Normiert auf die Kennwerte von Leim konnte je nach Klebstoff eine Erhöhung der Biege - Kennwerte um bis zu 40 % erreicht werden. Durch die Wahl des Klebstoffes können die Biegeeigenschaften des FSHs somit deutlich gesteigert werden. Je nach geforderter Anwendung des Materials kann die Wahl des Klebstoffes erfolgen.

4 Auswahl automobiler Strukturbauteile zur Auslegung mit Holzwerkstoffen

Das Anforderungsprofil jedes Fahrzeugbauteils ergibt sich aus den strukturellen und funktionellen Aufgaben des Bauteils in der Gesamtstruktur. Die Eigenschaften der Bauteile werden durch ihre Form und das Material bestimmt. Welche Eigenschaften und Kennwerte für die Werkstoffauswahl herangezogen werden können, wird zu einer zentralen Fragestellung.

Mechanische Eigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit oder die Dichte eines Werkstoffes können genutzt werden, um eine erste Einschätzung zur Materialeignung hinsichtlich des Anforderungsprofils eines Bauteils vorzunehmen. Daneben müssen die fertigungstechnischen Faktoren berücksichtigt werden. Zu dieser Faktorengruppe gehören die Fertigungs- und Bearbeitungsverfahren (z. B. Fügbarkeit, Spanbarkeit, Umformbarkeit), die zur Bauteilherstellung notwendig sind. Ein Vergleich dieser Faktoren mittels Kennwerte ist an dieser Stelle i. d. R. kaum möglich, da sich die Verfahren zwischen den Werkstoffgruppen stark unterscheiden. Zumindest genauso wichtig sind die wirtschaftlichen Faktoren. Als Indikator dafür wird oft der Energieaufwand zur Bereitstellung einer bestimmten Werkstoffmenge genutzt. Zunehmend wichtig werden auch die einhergehenden ökologischen Faktoren. Charakteristisch dafür ist das CO₂ – Äquivalent je Tonne Werkstoff. [MEKW12]

Die Ergebnisse der Projektarbeit von *Neitzel* [Nei18] sind in dieses Kapitel eingeflossen.

4.1 Potenziale des Furnierschichtholzes für den Einsatz im Automobil

In Kapitel 2.1.4 und Kapitel 3.2 sind bereits die Druckeigenschaften von Holz und das Energieaufnahmevermögen von auf Druck belasteten Probenkörpern erläutert worden. Demnach ist Holz gut für den Einsatz in Bauteilen und Strukturen geeignet, die in Falle eines Crashes bei geringem Eigengewicht viel Energie abbauen müssen.

Vergleich der spezifischen Eigenschaften von Holz mit anderen technischen Werkstoffen

Um eine Vorauswahl zwischen den Werkstoffen für eine Struktur mit definierter Belastung treffen zu können, werden im Leichtbau die spezifischen Eigenschaftswerte miteinander verglichen. Um die spezifischen Eigenschaftswerte zu bestimmen, werden die mechanischen Kennwerte, wie z. B. die Zugfestigkeit oder der Elastizitätsmodul, auf die Dichte des Werkstoffes bezogen. In Tabelle 4-1 sind einige spezifische Eigenschaftswerte für ausgewählte Werkstoffe berechnet.

Das in dieser Arbeit untersuchte FSH ist unter den aufgeführten Werkstoffen der Leichteste und hat nur die Hälfte der Dichte eines kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes (CFK). Bei der spezifischen Steifigkeit und Festigkeit können mit FSH in etwa die Werte der festeren metallischen Werkstoffe erreicht werden. Im Vergleich zu den FKV liegt das

FSH nur bei der spezifischen Steifigkeit annähernd im Bereich von GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff). Bei der spezifischen Festigkeit der FKV und der spezifischen Steifigkeit von CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) kann das FSH rechnerisch nicht mithalten. Bei der Biegesteifigkeit erreicht das FSH sogar das Niveau von CFK und übertrifft die metallischen Werkstoffe und das GFK deutlich.

Tabelle 4-1: Spezifische Werkstoffeigenschaften einiger ausgewählter Werkstoffe in Anlehnung an [Kle13] (GFK – glasfaserverstärkter Kunststoff, CFK – kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, UD – unidirektional ausgerichtete Fasern, // – in Faserrichtung)

Kennwert	Dichte ρ $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Elastizitätsmodul E $[N/mm^2]$	Zugfestigkeit R_m $[N/mm^2]$	Spezifische Steifigkeit $\frac{E}{g \times \rho}$ $[km]$	Spezifische Festigkeit $\frac{R_m}{g \times \rho}$ $[km]$	Biegesteifigkeit Balken bzw. Beulstabilität von Platten $\frac{E}{g \times \rho}$ $[km]$
Baustahl	7,85	210.000	300-1.300	2.726	4-17	0,8
Alu-Legierung	2,70	70.000	200-700	2.643	8-26	1,6
Ti-Legierung	4,50	110.000	300-1.200	2.492	7-27	1,1
GFK-UD (50 %)	2,25	39.000	1.150	1.767	52	1,5
CFK-UD (50 %)	1,50	120.000	1.700	8.155	116	3,4
FSH-Buche //	0,75	15.000	150	2.038	20	3,4

Im Kapitel 3.2.3 ist die spezifische Energieaufnahme von den Druckprobenkörpern mit 17 kJ/kg angegeben. Damit werden auch bei der Energieaufnahme typische Werte für Stahl (20 kJ/kg) annähernd erreicht. Zur Energieaufnahme optimierte Strukturen aus Aluminium oder CFK erreichen Werte für die spezifische Energieaufnahme von 45 bis 100 kJ/kg [Fei12].

Bei der Betrachtung spezifischer Werkstoffeigenschaften kann bereits das Potenzial der Holzwerkstoffe identifiziert werden. Vor allem für den Einsatz in biegebelasteten Balken oder Platten sollten vorrangig die Möglichkeiten zur Nutzung der Holzwerkstoffe geprüft werden. Aber auch im Bereich der Energieaufnahme unter Druckbelastung können vielversprechende Entwicklungen zu einer energieoptimierten Struktur aus FSH vorangetrieben werden.

Fertigung und Bearbeitung von Holzwerkstoffen

Neben der ansprechenden Oberflächenästhetik und der guten Verfügbarkeit sind es die äußerst positiven Bearbeitungseigenschaften von Holz und auch den zahlreichen Holzwerkstoffen, die es für viele Anwendungen so attraktiv macht.

Beim Trennen von Holz muss im Vergleich zu Stahl nur ein Zehntel der Kraft aufgewendet werden, was sogar eine Bearbeitung oder auch Nachbearbeitung von Hand möglich macht. Schon lange sind nicht nur handwerkliche Unikate, sondern massenmarktfähige Erzeugnisse mit hoher Wiederholgenauigkeit fertigbar. Trotz der hochmodernen Zerspanungstechnik mit effizienter Antrieb- und Spanabsaugtechnik bleiben werkstoffbedingte Restriktionen erhalten. Die inhomogene Werkstoffstruktur erfordert den Einsatz von angepassten Zerspanungsprozessen. Die Hygroskopizität von Holz erlaubt nicht den Einsatz von flüssigen Werkzeugkühlmitteln. Die schlechte Temperaturleitung und die Brennbarkeit von Holz müssen ebenfalls bei der Be- und Verarbeitung beachtet werden. Trotz dieser Einschränkungen gehört ein hoher Mechanisierungs- und Automatisierungsgrad zum aktuellen Stand der Technik. Zu den etablierten Bearbeitungsverfahren gehören: Sägen, Fräsen, Bohren, Drehen, Schleifen, Finieren, Wasserstrahlspanen, Schälen, Messern.

Das Umformen vom nicht fließfähigen Holz und den Holzwerkstoffen erfolgt meist durch Biegen oder Pressen. Beim Biegen können gekrümmte Profile und Flächen bevorzugt aus Sperrholz hergestellt werden. Durch das Pressen entstehen sphärisch verformte, dünnwandige Körper, die in der Regel aus Spänen und Fasern hergestellt werden. [WS18]

Das Biegen erfolgt in drei Arbeitsschritten. Durch Wasser oder Wasserdampf wird das Holz zunächst plastifiziert. Nun wird das elastische Holz gebogen. Anschließend findet der Trocknungsprozess im verformten Zustand statt. Buchenholz eignet sich sehr gut für das Biegen, da es vergleichsweise kurze Fasern aufweist. Damit bei engeren Biegeradien kein Materialversagen in der Zugzone des Werkstoffes stattfindet, wird zur Entlastung ein sogenanntes Biegeband (auch Zugband) eingesetzt. Das Biegeband wird an der Zugzone des Bauteils angebracht und bildet mit dem Holz eine Einheit. Dadurch ändert sich die Spannungsverteilung in der Werkstoffdicke. Die neutrale Faser wandert Richtung Zugzone, der Randbereich der Zugzone wird entlastet. Das Biegeband verbleibt so lange mit dem Holz verbunden, bis die zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeit wieder ausgedampft ist. Nach der Trocknung und dem Entfernen des Biegebandes bleibt das Holz in seiner gebogenen Form stabil. [WS18]

Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Holzprodukten

Die notwendigen Bearbeitungs- und Veredelungsschritte auf dem Weg vom Baum zum Rohstoff Holz und weiter zum Holzwerkstoff sind nur unter Einsatz von Energie und somit auch Kosten möglich. Dieser Energieaufwand beschränkt sich auf Transport, Kochen, Trocknen und die mechanische Bearbeitung (Sägen, Schälen, Schneiden usw.) vom

Baum und Holz. Hochtemperaturbehandlungen, wie z. B. Schmelzen im Hochofen, entfallen. Untersuchungen belegen, dass bei allen Holzprodukten der größte Energiegehalt dem Heizwert des Holzes zuzuschreiben ist [RG96]. Am Ende der Nutzungsphase können die Holzprodukte noch thermisch verwertet werden, sodass die gespeicherte Energie mit geringen Verlusten genutzt wird.

Der Energieaufwand bei der Werkstoffherstellung für typische Konstruktionswerkstoffe (Metalllegierungen, Kunststoffe, Verbundwerkstoffe) und die Holzwerkstoffe sind von *Müller et. al.* [MEKW12] untersucht worden. Holz punktet mit deutlichen Vorteilen. Am Beispiel eines Profilhalbzeuges wurde von den Autoren gezeigt, dass ein Holzprofil im Vergleich zu einem Stahlprofil mit gleicher Biegesteifigkeit nicht nur leichter (35 %) und günstiger (66 %), sondern auch mit geringerem Energieaufwand (26 %) und einem deutlich geringeren CO₂-Äquivalent (83 %) realisiert werden kann.

Materialbedarf und Verfügbarkeit von Holzwerkstoffen für Serienbauteile in Fahrzeugstrukturen

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft legt regelmäßig einen Waldbericht vor, in dem der Zustand deutscher Wälder und die Strategie zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung erklärt werden. Der letzte Bericht wurde im Jahr 2017 verfasst. Demnach prägt der Wald mit einem Flächenanteil von 32 % erheblich das Landschaftsbild in Deutschland. Die dritthäufigste Baumart ist die Buche mit einem Anteil von 15 %. Grundsätzlich nimmt der Anteil der Laubbäume stetig zu, während der Anteil der Nadelbäume rückläufig ist. Technologisch gesehen ist diese Entwicklung eine Herausforderung für die auf Nadelholz ausgerichtete Sägeindustrie. Massenprodukte aus Laubholz sind im Baubereich kaum verfügbar und wenig konkurrenzfähig (krumme Stämme, viele Äste). Deswegen wird Laubholz noch überwiegend energetisch genutzt. Daraus ergibt sich die Herausforderung für die Forst- und Holzwirtschaft die Entwicklung von neuen, innovativen und vor allem marktauglichen Laubholzprodukten voranzutreiben. [Wal17]

Die Holzvorräte liegen seit Beginn einer geregelten Forstwirtschaft auf dem bisher höchsten Stand von 336 m³ pro Hektar. Der jährliche Holzzuwachs beträgt 122 Mio. m³ (mit Rinde). Der jährliche Holzeinschlag liegt bei 76 Mio. m³ Rohholz (ohne Rinde). Dabei ist Deutschland nach China und den USA der größte Exporteur von Holz und Holzprodukten. [Wal17]

Im Jahr 2017 wurden weltweit 84,7 Mio. Fahrzeuge (PKW) produziert. Aus der Holzverfügbarkeit (Differenz aus Holzzuwachs und Holznutzung/Holzeinschlag) und einem angenommenen Fertigungsverchnitt von 30 % kann mit den allein in Deutschland verfügbaren Holzjahresressourcen in jedes produzierte Fahrzeug etwa 143 kg Holz verbaut werden. Wird nur das Buchenholz betrachtet, dann sind es etwa 5 kg Buche, die pro Fahrzeug genutzt werden können.

4.2 Festlegung der zu entwickelnden Demonstratoren

Das Gewährleisten der passiven Sicherheit von Personen in einem PKW gehört zu den wichtigsten Aufgaben bei der Fahrzeugauslegung, aber auch zu den Gewichts- und Kostentreibern. Die Fahrzeughersteller unternehmen erhebliche Anstrengungen, um die Sicherheit der Insassen zu erhöhen und gleichzeitig das Gewicht der Fahrzeuge zu reduzieren. Nach der Unfallstatistik, untersucht von *Otte* [Ott91], befinden sich etwa die Hälfte der primären Aufprallpunkte im Bereich des Vorderwagens.

Die Frontstrukturen moderner Fahrzeuge sind derart ausgelegt, dass bei einer Frontkollision einzelne Elemente der Fahrzeugfront nacheinander deformieren und Aufprallenergie aufnehmen. Dies wird möglich, wenn einzelne Elemente unterschiedliche Festigkeiten besitzen, die sich ausgehend von der Fahrzeugfront in Richtung der Fahrgastzelle progressiv erhöhen. Die Anordnung dieser Elemente ist in Abbildung 4-1 dargestellt. [Krö02]

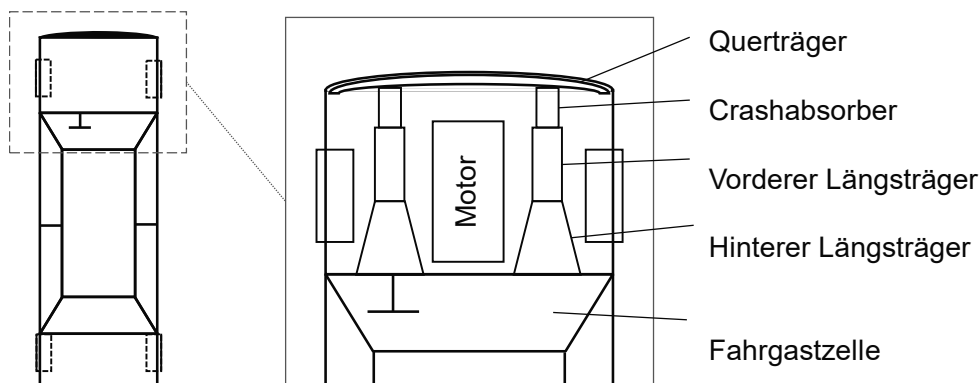


Abbildung 4-1: Prinzipieller Aufbau einer Vorderwagenstruktur im Hinblick auf das Crashverhalten nach [Krö02].

Bei kleineren Aufprallgeschwindigkeiten bis ca. 4 km/h wird der Stoßfänger und der zwischen dem Querträger und dem Stoßfänger angeordnete Schaum elastisch verformt. Eine bleibende Verformung der Elemente ist hierbei nicht gewünscht. Der Querträger erfüllt zwei Funktionen. Er nimmt einen Teil der Kollisionsenergie durch plastische Verformung auf und leitet die Kollisionskraft in die nachfolgenden Crashstrukturen weiter. Die darauffolgende Struktur mit der nächsthöheren Festigkeit ist der Crashabsorber. Dieser wird in der Regel so ausgelegt, dass er bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 15 km/h die gesamte Aufprallenergie durch plastische Verformung aufnimmt. Der darauf angebundene Längsträger sollte in diesem Falle unbeschädigt bleiben. Erst bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten trägt dieser ebenfalls durch plastische Verformung zur Aufnahme der Kollisionsenergie bei. Der gestufte Deformationskraftverlauf im Falle eines Frontalaufpralls ist in Abbildung 4-2 beispielhaft dargestellt. [Krö02], [Ans97], [Kra06]

Etwa 85 % aller Frontalunfälle finden bei Relativgeschwindigkeiten zwischen den Unfallbeteiligten von unter 15 km/h statt [Krö02]. Somit hat der Crashabsorber eine besondere Bedeutung, wenn es um die Höhe der nach einem Unfall anfallenden Reparaturkosten geht. Die Crashabsorber sind kompakt gebaut, werden i. d. R. frontal auf Druck belastet

und müssen auf kurzen Wegen möglichst viel Energie abbauen. Holzwerkstoffe eignen sich hervorragend zur Energieaufnahme bei Druckbelastung. Im Rahmen dieser Arbeit wird deswegen ein Demonstrator eines Crashabsorbers aus Holzwerkstoffen ausgelegt und getestet.

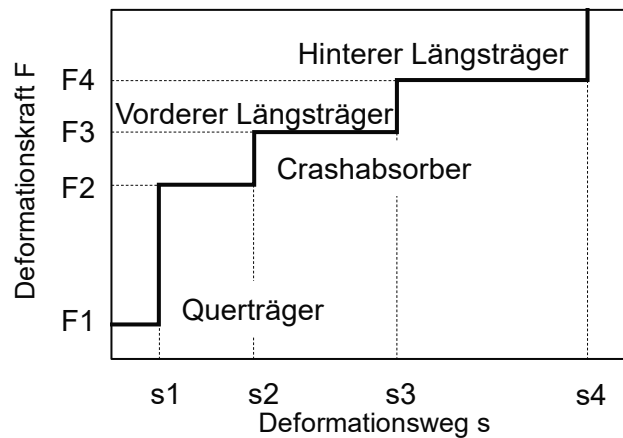


Abbildung 4-2: Gestufter Deformationskraftverlauf tragender Strukturen des Vorderwagens nach [Krö02].

Neben einer crashrelevanten Struktur wird auch ein Demonstrator eines Bauteils aus dem Fahrzeugsitz entworfen und ebenfalls untersucht.

Autositze nehmen inzwischen erheblichen Bauraum in einem Fahrzeug ein und können ein Gewicht von über 30 kg erreichen. Dabei steigen die Anforderungen an die modernen Fahrzeugsitze mit jedem neuen Fahrzeugmodell. Immer mehr Komfortfunktionen, wie Heizen, Kühlen, elektrische Verstellung der Komponenten sollen auf kleinstem Raum im Sitz untergebracht werden. Dabei müssen die Sitze nicht nur den aktuellen Sicherheitsanforderungen entsprechen, sondern am besten auch noch immer leichter werden. Vor allem die notwendige Gewichtsreduzierung treibt die Entwicklungen an. Um das Potenzial der Holzwerkstoffe für diese Bauteile auszuloten, wurde als Demonstrator die Sitzrückwand (Abbildung 4-5) eines Rücksitzes ausgewählt. Hierbei handelt es sich um ein dünnes flächiges Bauteil, das am stärksten auf Biegung belastet wird. Die Biegekennwerte der Holzwerkstoffe sind vergleichbar mit denen der FKV und übertreffen die Kennwerte der metallischen Werkstoffe. Somit eignen sich die Holzwerkstoffe theoretisch für die vorliegende Anwendung.

4.3 Charakteristik der Referenzstrukturen

Nachdem die zu entwickelnden Demonstratoren festgelegt wurden, werden nun die genauen Anforderungen geklärt. Hier sind neben den technischen auch weitere wichtige Aspekte wie Preis, Gewicht, Beständigkeit gegen die Umwelteinwirkungen von Bedeutung.

4.3.1 Ausführung und Anforderungen an Stoßabsorptionsvorrichtungen aus Metallen und faserverstärkten Kunststoffen

In der Abbildung 4-3 sind Beispiele von Lösungsprinzipien irreversibler Crashabsorber aus metallischen Werkstoffen abgebildet. Diese Crashabsorber heißen irreversibel, weil sie nur einmalig verwendet werden können. In den modernen Fahrzeugen wird meist das Prinzip des Faltbeulens umgesetzt. Dabei wird die Entstehung der Falten durch das Einbringen definierter Verformungsstellen im Bauteil eingeleitet.

Neben dem Faltbeulen finden auch Lösungsprinzipien Anwendung, bei denen der Absorber umformtechnisch verformt wird: die Inversion, die Längung und die Verjüngung/Aufweitung.

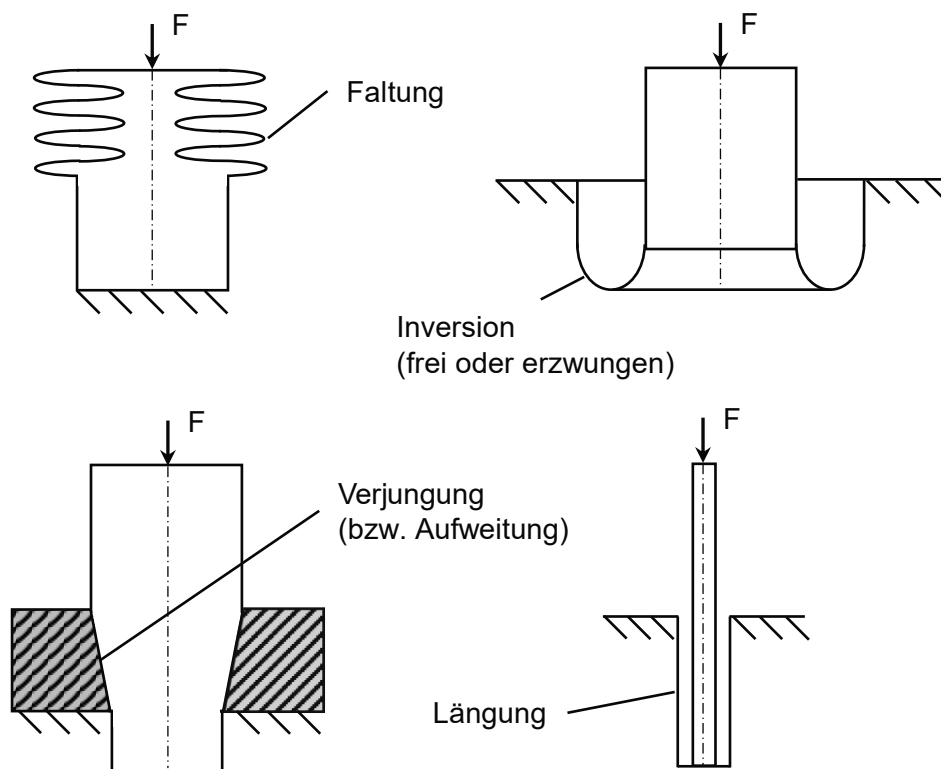


Abbildung 4-3: Beispiele von Lösungsprinzipien irreversibler Crashabsorber (Crashboxen) nach [Krö02]

Neben den metallischen Werkstoffen können auch Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) für den Zweck der Energieabsorption erfolgreich eingesetzt werden. Diese Werkstoffgruppe weist aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Kennwerte und der Möglichkeit, durch die Gestaltung des Lagenaufbaus die mechanischen Eigenschaften in einem weiten Bereich frei einzustellen, ein hohes Leichtbaupotenzial auf. [Fei12]

Während metallische Strukturen kinetische Energie vorwiegend durch plastische Deformation abbauen, wird bei einer Struktur aus FKV ein kontinuierliches Versagen initiiert. Dieses Versagen wird bei axialer Belastung durch Faserbrüche, Matrixbrechen, Delamination und Reibung charakterisiert. Diese Art von Bruchcharakteristik führt bei Struktura-

ren aus FKV zu einem höheren Energieaufnahmepotenzial als bei metallischen Strukturen und ermöglicht eine optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraumes. Ein charakteristisches Versagensverhalten einer axial belasteten Struktur als Kraft-Weg-Diagramm ist in Abbildung 4-4 dargestellt. [Fei12]

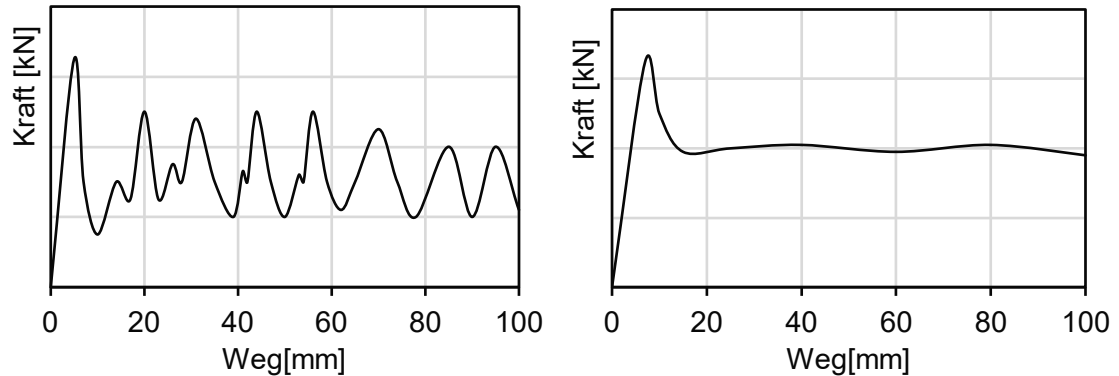


Abbildung 4-4: Vergleich des charakteristischen Versagensverhaltens von metallischen (links) und FKV – Strukturen (rechts) nach [Fei12]

Während bei der metallischen Struktur deutliche Schwankungen in dem Kraftsignal bedingt durch die Faltung der Struktur auftreten, bleibt das Kraftniveau einer FKV - Struktur durch einen kontinuierlich progressiven Versagensprozess auf einem annähernd konstanten Niveau. Die Fläche unter der Kurve ist ein Maß für die Energieabsorption, das durch das konstante Kraftniveau maximiert ist. Durch das konstante Kraftniveau wird der zur Verfügung stehende Bauraum optimal ausgenutzt. Bezogen auf die Masse der Struktur kann die absorbierte Energie in dem Kennwert der spezifischen Energieaufnahme (SEA) ausgedrückt werden. Dieser ist stark von der Strukturgeometrie und dem Werkstoff abhängig. Typische Werte für Stahl sind 20 kJ/kg, für Aluminium bis zu 45 kJ/kg und für CFK zwischen 60 und 100 kJ/kg. [Fei12]

Da energieabsorbierende FKV – Strukturen noch keine Anwendung in modernen Karosserien finden, werden bei der Anforderungsanalyse nur die metallischen Strukturen betrachtet. Zur Definition genauer Anforderungsprofile für den zu entwickelnden Demonstrator wurden aktuelle Crashabsorber aus aktuellen Produktionen als Vergleichsbauteile aufgegriffen. Die daraus definierten technischen Anforderungen für den aus Holz zu entwickelnden Demonstrator sind:

- | | |
|------------------------------|------------|
| - Maximale Deformationskraft | < 100 kN |
| - Mittlere Deformationskraft | 80 kN |
| - Deformationsweg | 60 - 70 mm |
| - Energieabsorption | 5 kJ |

Weitere Anforderungen:

- Bauraum 105 mm x 120 mm x 250 mm
- Gewicht <1 kg
- Kosten max. 5 €
- Temperaturbeständigkeit von -30°C bis +80°C
- Korrosionsbeständigkeit
- Recycling nach Altautoverordnung
- Anbindung an die metallische Karosserie

4.3.2 Strukturbeschreibung und Anforderungen an eine Sitzrückwand

In Abbildung 4-5 ist die Rahmenstruktur eines aktuellen Rücksitzmodells eines PKWs dargestellt. Dieses ist aus zwei Rahmenstrukturen (komplexer Rahmen in der Sitzfläche und rechteckiger Rahmen in der Sitzlehne) und einer Sitzrückwand aufgebaut. Das gesamte Sitzgestell wird in der Regel aus metallischen Werkstoffen gefertigt. Die Sitzrückwand wird durch Schweißpunkte an dem Rahmen der Sitzlehne befestigt. Die Materialdicke der Rückwand liegt bei 0,6 mm (variiert je nach Fahrzeugmodell). Um einer derart dünnen Struktur mehr Steifigkeit zu verleihen, werden Sicken in die Struktur eingebracht.

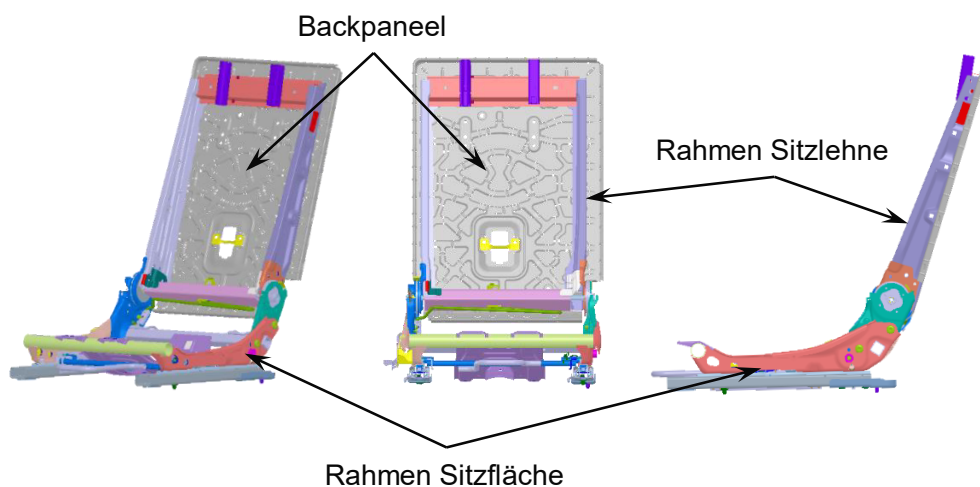


Abbildung 4-5: Das Gestell eines aktuellen Fahrzeugsitzes [angelehnt an einen Rücksitz aus der Serienfertigung der Firma Adient]

Am Rand ist die Sitzrückwand in Richtung des Sitzrahmens gebogen und hat Ausprägungen im Blechwerkstoff, die als Trimeinhängung bezeichnet werden. Diese dient zum Einhängen der Stoffverkleidung, die die hintere Seite des Sitzes verdeckt. Die im unteren Teil eingefügte Aussparung dient zur Befestigung von Kindersitzen überwiegend in Fahrzeugen für den amerikanischen Markt.

Mechanische Belastung

Die Rückwand muss sowohl statische als auch dynamische Lasten aufnehmen. Bei der statischen Last wird von einer Belastung ausgegangen, die durch das Abstützen eines Knies einer erwachsenen Person auf die umgeklappte Sitzlehne entsteht.

Es wird von einer Belastung mit folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Zentrische punktuelle Belastung
- Angriffspunkt: Punkt mit größter anzunehmender Durchbiegung
- Druckkraft 1000 N
- Stempeldurchmesser 100 mm

Als Ergebnis ist eine bleibende Verformung von weniger als 3 mm zugelassen. Die Verformungen dürfen keine Verletzungsgefahr für die Insassen darstellen. Materialausbrüche sind nicht zugelassen.

Bei der dynamischen Last handelt es sich um den Test zum Schutz vor Ladung nach ECE-R 17 beim Frontalaufprall eines Fahrzeuges. Dabei gelten folgende Randbedingungen:

- 2 x 18 kg Prüfkörper: Geometrie und Aufbau nach DIN ISO 27955 Typ I
- Aufprallgeschwindigkeit: 54,8 + 2 km/h

Als Ergebnis sind geringe Deformationen und Anrisse zulässig, jedoch dürfen keine Bauteile brechen und keine scharfen Kanten oder Ecken entstehen. Das Ladegut muss hinter der Sitzlehne verbleiben.

Umweltbelastung

Zwar sind die Fahrzeugsitze nicht direkt den Umwelteinflüssen ausgesetzt, die Veränderungen der Lufttemperatur und -feuchtigkeit müssen jedoch berücksichtigt werden. Der Betriebstemperaturbereich für die Fahrzeugsitze liegt zwischen -40 °C und 85 °C und der Lagertemperaturbereich zwischen -40 °C und 120 °C. Folgende Tests können zur Simulation des Umwelteinflusses genutzt werden:

- Wechselwärmetest
- Daueralterung
- Salzsprühnebeltest nach EN ISO 9227
- Schwerentflammbarkeit nach FMVSS 302 bzw. ISO 3795

Nach diesen Umweltsimulationstests müssen die statischen und dynamischen Prüfungen mit positivem Ergebnis bestanden werden.

Außerdem sind die Stoffverbote gemäß "Altautoverordnung" inklusive der jeweils aktuellen Fassung des Anhangs II nach EU-Richtlinie 2000/53/EG und inklusive der neuesten Version GADSL "Deklarationspflichtige Substanzliste der weltweiten Automobilproduktion" einzuhalten.

5 Konzeptentwicklung der Demonstratoren

Zurzeit der Bearbeitung dieses Vorhabens existierten keine Entwicklungen zu den angedachten Fahrzeugstrukturen aus den Holzwerkstoffen. Demnach konnte hier nicht auf bereits vorhandenes Wissen aufgebaut werden. Es wurde von der ersten Konzeptentwicklung bis zur Ausarbeitung vielversprechender Lösungen erfolgreich experimentiert und Konstruktionen fertiger Demonstratoren erarbeitet.

5.1 Stoßabsorptionsvorrichtung

Als Vorbereitung zur Demonstratorentwicklung einer Stoßabsorptionsvorrichtung wurde eine ausführliche Recherche zu den bestehenden Lösungen aus anderen Werkstoffen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Variationen der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Prinziplösungen, jedoch keine grundlegend neuen Konzepte entdeckt. Ausgewählte Beispiele sind u. a. [AMHS03], [Fei12], [JMLR00], [LSY12], [Krö02], [MSL+20], [Tho90] oder auch Patente EP 1 316 409 B1, DE 102013215064 A1, DE 19745656 C2, EP 0 899 168 A2, DE 10 2011 116 114 A1, DE 1963 3110 B4.

Bei der Beurteilung der aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufe von axial belasteten Stoßabsorptionsvorrichtungen werden die in Abbildung 5-1 dargestellten Begrifflichkeiten verwendet.

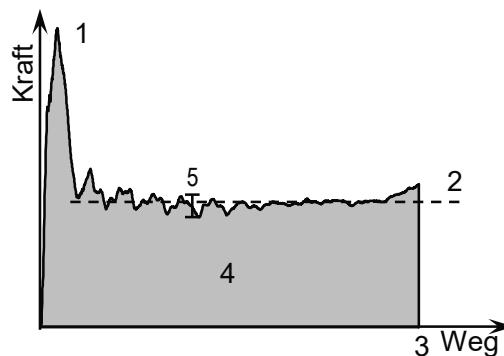


Abbildung 5-1: Beschreibung des Kraft-Weg-Verlaufes einer Stoßabsorptionsvorrichtung:
 1 – Kraftpeak F_{peak} , 2 – mittleres Kraftniveau F_m , 3 – Intrusion I_{max} , 4 – absorbierte Energie E_{abs} , 5 – Oszillation

Nach Erreichen eines Kraftpeaks F_{peak} bildet sich ein konstantes mittleres Kraftniveau F_m aus. Um das mittlere Kraftniveau tritt immer Oszillation auf, die stark probenabhängig ist. Die vom Prüfkörper bis zur maximalen Intrusion I_{max} aufgenommene Energie E_{abs} entspricht der Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve und kann durch Integration ermittelt werden. Die genauen Anforderungen an den Demonstrator bezüglich des gewünschten Kraftverlaufes sind bereits in Kapitel 4.3.1 definiert worden.

5.1.1 Voruntersuchungen zum Versagensverhalten und der Energieabsorption von geometrisch unterschiedlichen Holzstrukturen

Um Ansätze für funktionsfähige Konzepte einer Stoßabsorptionsvorrichtung aus Holzwerkstoffen zu generieren, wurde ein Workshop mit Vertretern der Automobilindustrie, der Holzforschung und der Holzverarbeitenden Industrie durchgeführt. Neben dem Vollholz als geeignetem Werkstoff wurden auch Konzepte zur Ausführung aus Furnierwerkstoffen und Partikelwerkstoffen entwickelt. Die einzelnen Konzepte wurden mit einfach ausgeführten Prüfkörpern auf Ihre Funktion geprüft. Die Konzepte, die zu einer späteren Lösung geführt haben, sind in Abbildung 5-2 aufgeführt.

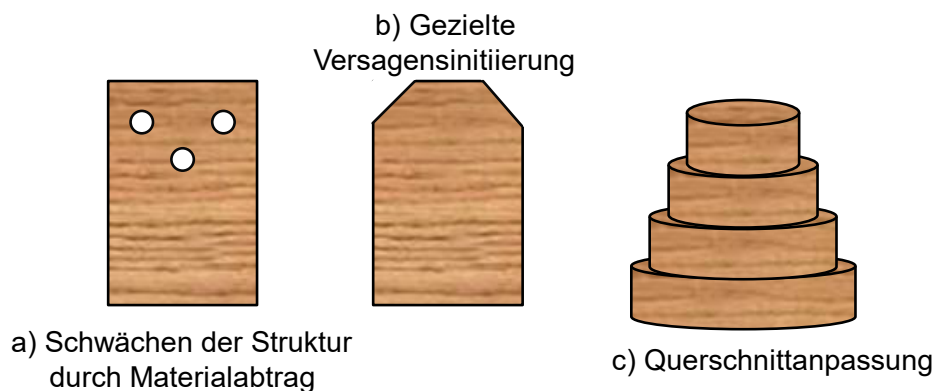


Abbildung 5-2: Ausgewählte Konzepte zur Ausführung von Stoßabsorptionsvorrichtungen aus Holzwerkstoffen

Die Ergebnisse der Druckprüfung haben gezeigt, dass Strukturen mit einem konstanten Querschnitt nach dem Erreichen der Versagensspannung undefiniert versagen. Nur ein geringer Anteil des Materials wird verformt oder bricht. Der überwiegende Teil des Materials splittet ab und trägt somit nicht zur Energieaufnahme bei. Um die Energieaufnahme zu erhöhen, können konstruktive Anpassungen an der Form der Struktur vorgenommen werden. Z. B. durch Veränderungen in der Querschnittsfläche über die Länge der Struktur entsteht ein variabler Spannungszustand, der ein stufenweises oder sogar kontinuierliches Versagen hervorrufen kann. Durch dieses Versagen trägt mehr Material zur Energieaufnahme bei. Diese Überlegungen haben zu den in Abbildung 5-2 aufgeführten Konzepten geführt.

Diese Konzepte wurden in Prüfkörpern umgesetzt und in einer Prüfmaschine statisch auf Druck belastet. Diese Prüfkörper hatten eine Gesamthöhe von 60 mm, eine Breite und Dicke von 30 mm und wurden aus Buche – FSH mit 1 mm dicken Furnierlagen und einem Dispersionsleim hergestellt. Die Dimensionierung der Prüfkörper entsprach den Druckprobenkörpern aus Kapitel 3.2. Das Versagensverhalten und die Dehnungsverteilung im Prüfkörper sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Faserrichtung lag bei allen Prüfkörpern in die Belastungsrichtung, weil damit von der Struktur höhere Druckkräfte aufgenommen werden können. Im Vordergrund dieser Voruntersuchungen lag zunächst das Versagensverhalten der Prüfkörper und das Ausbilden eines mittleren Kraftniveaus,

was einen direkten Einfluss auf die Menge der aufgenommenen Energie hat. Die Höhe des Kraftniveaus wurde zunächst nicht beachtet.

Bei keiner Prüfung der Prüflingsform a und weiterer ähnlich aufgebauter Körper mit unterschiedlichen Bohrmustern (Variation der Anzahl an Bohrungen in einer Reihe und die Anzahl der Reihen) konnte das gewünschte kontinuierliche Versagensverhalten mit einem mittleren Kraftniveau erreicht werden. Das Konzept zur Schwächung der Struktur durch Materialabtrag wurde somit nicht weiterverfolgt.

Der Bereich der Versagensinitiierung bei der Prüflingsform b erfüllte seine Funktion. Das Versagen erfolgte zunächst in diesem Bereich. Das nachfolgende Versagen des übrigen Körpers entsprach aber eher dem eines standardisierten Prüfkörpers. Bei der Prüflingsform c wurde ein vergleichsweise konstantes Kraftniveau gemessen (Abbildung 5-6) und auch ein kontinuierliches Versagen mit feinen Bruchpartikeln festgestellt.

Ein optimierter Ansatz und das Versagen eines Prüfkörpers der Prüflingsform d ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Prüflingsform d wurde als eine Mischung aus der Prüflingsform b und c entworfen. Diese Prüfkörper haben eine von den anderen Prüflingsformen abweichende Höhe von 100 mm. Die abgeschrägten Seiten des Prüfkörpers erlauben ein kontinuierliches, annähernd stufenloses (im Vergleich zu Prüflingsform c) Versagen des Körpers. Im Vergleich zu Strukturen aus CFK waren die entstandenen Bruchpartikeln grob und das damit verknüpfte Energieaufnahmevermögen zu gering. Dies zeigt sich auch in der Darstellung des Kraft – Weg – Verlaufes in Abbildung 5-6.

Im nächsten Schritt wurde aus bis dahin eckigen Formen a - d kegelförmige Prüflingsformen e und f gestaltet (Abbildung 5-5). Hierbei wurde die Faserrichtung in den Prüfkörpern variiert: Form e – senkrecht zur Belastungsrichtung, Form f – in die Belastungsrichtung.

Bei der Prüflingsform e wurde kein kontinuierliches Versagensbild erreicht, da nur ein Abgleiten zwischen den Holzfasern stattgefunden hat. Die Prüflingsform e punktet mit dem gewünschten Versagensverhalten. Die Spannung in dem Prüfkörper steigt mit der Belastung. In dem Bereich des kleinsten Querschnittes ist diese am höchsten. An dieser Stelle werden die Fasern zuerst instabil und knicken aus. Es bilden sich Querkzugspannungen, die zum Splitting einzelner Bereiche führen. Mit fortschreitender Belastung bildet sich eine homogene kontinuierliche Bruchfront am Impaktor aus. Die restliche Struktur bleibt aufgrund größerer Dimensionen und entsprechend geringer Spannung unbeschädigt. Der entsprechende Kraft – Weg – Verlauf ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Das Versagensverhalten spiegelt sich in einem konstanten Kraftverlauf wider.

Die favorisierten Prüflingsformen c, d und f werden als Nächstes einer dynamischen Belastung ausgesetzt. Das Versagensverhalten der Prüflingsformen c und f (Probenhöhe 60 mm) ist in Abbildung 5-7 gezeigt. Die Prüflingsform c bricht unter einer dynamischen Last schlagartig zusammen, während die Prüflingsform f ein ähnliches Versagensverhalten wie bei statischer Belastung aufweist. Die Körper der Prüflingsform d

(Probenhöhe 100 mm) behalten auch bei dynamischer Last ihr Versagensverhalten bei, jedoch treten mehr Delaminationsrisse zwischen den Furnierlagen auf.

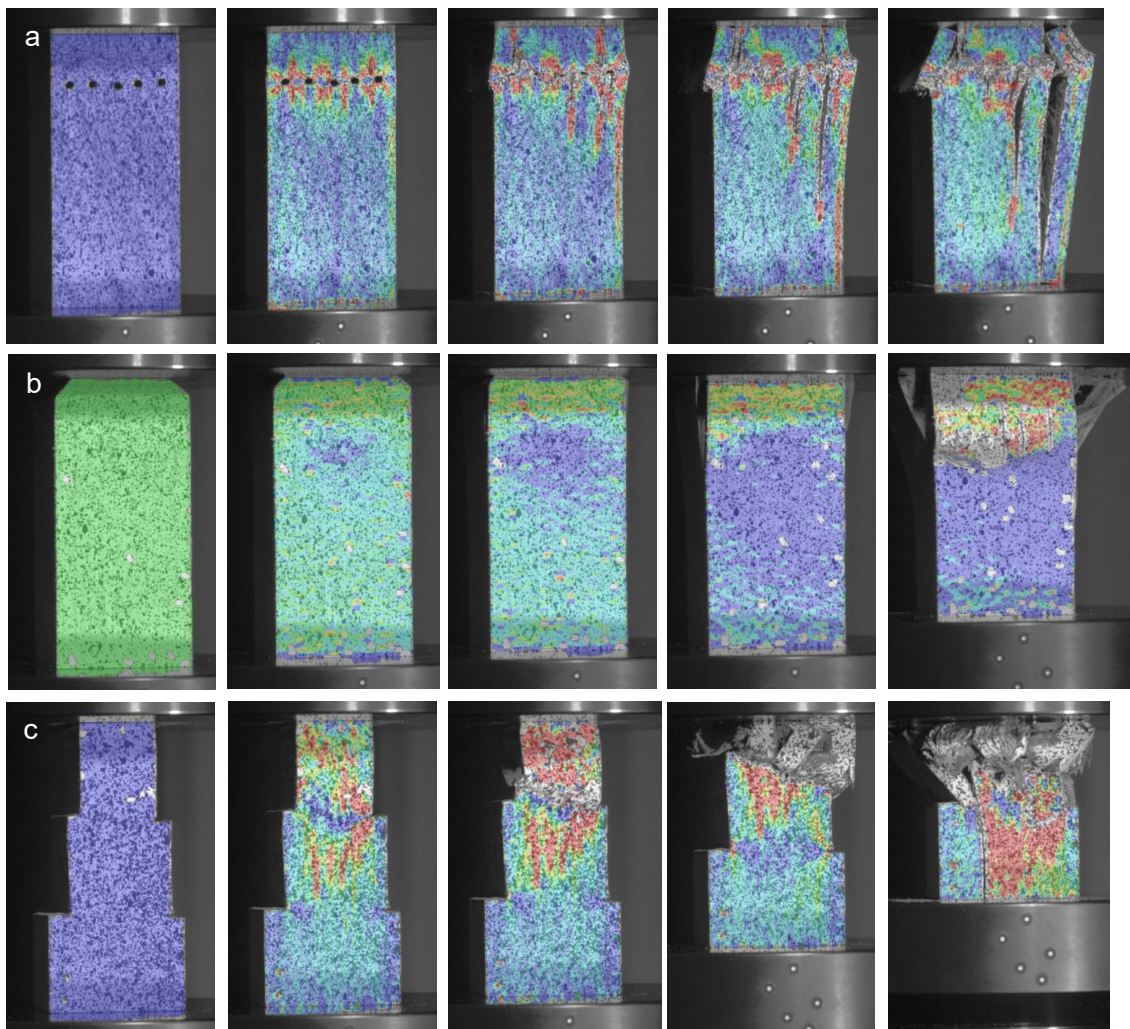


Abbildung 5-3: Statische Prüfung ausgewählter Konzepte, farbliche Darstellung der Dehnungsverteilung: Prüflingsform a – Schwächen der Struktur durch Materialabtrag; Prüflingsform b – Versagensinitiierung; Prüflingsform c – Querschnittanpassung



Abbildung 5-4: Versagensverhalten einer energieabsorbierenden Struktur aus Holzwerkstoff bei statischer Belastung

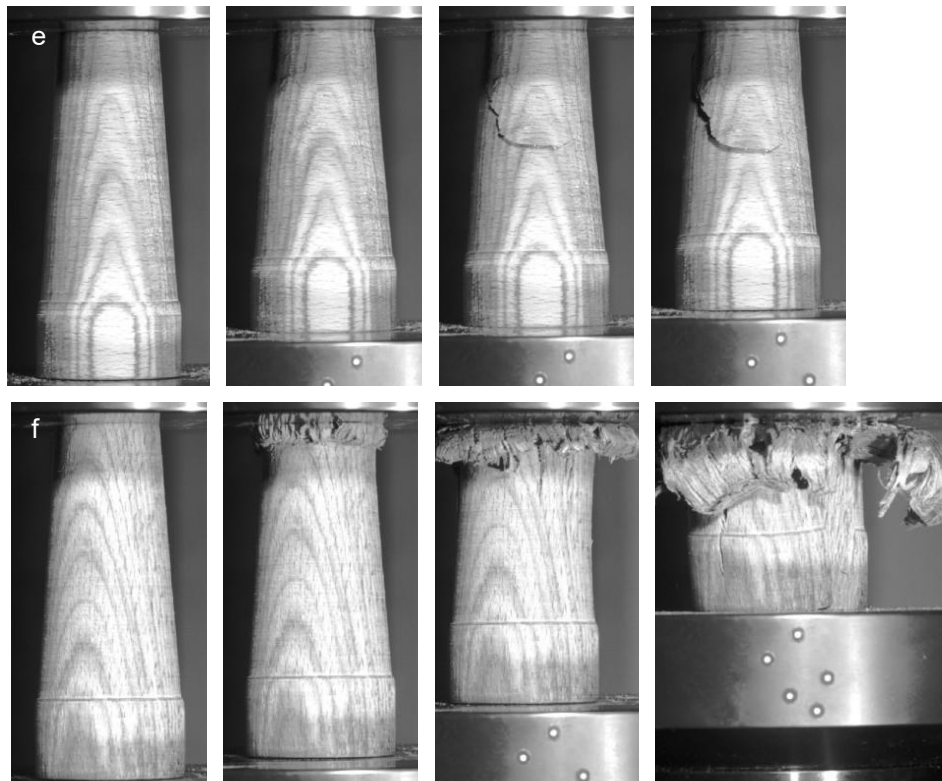


Abbildung 5-5: Versagensverhalten einer energieabsorbierenden Struktur aus Holzwerkstoff bei statischer Belastung: Prüflingsform e – Kegel mit Faserverlauf quer zur belastungsrichtung, Prüflingsform f – Kegel mit Faserverlauf längs der belastungsrichtung

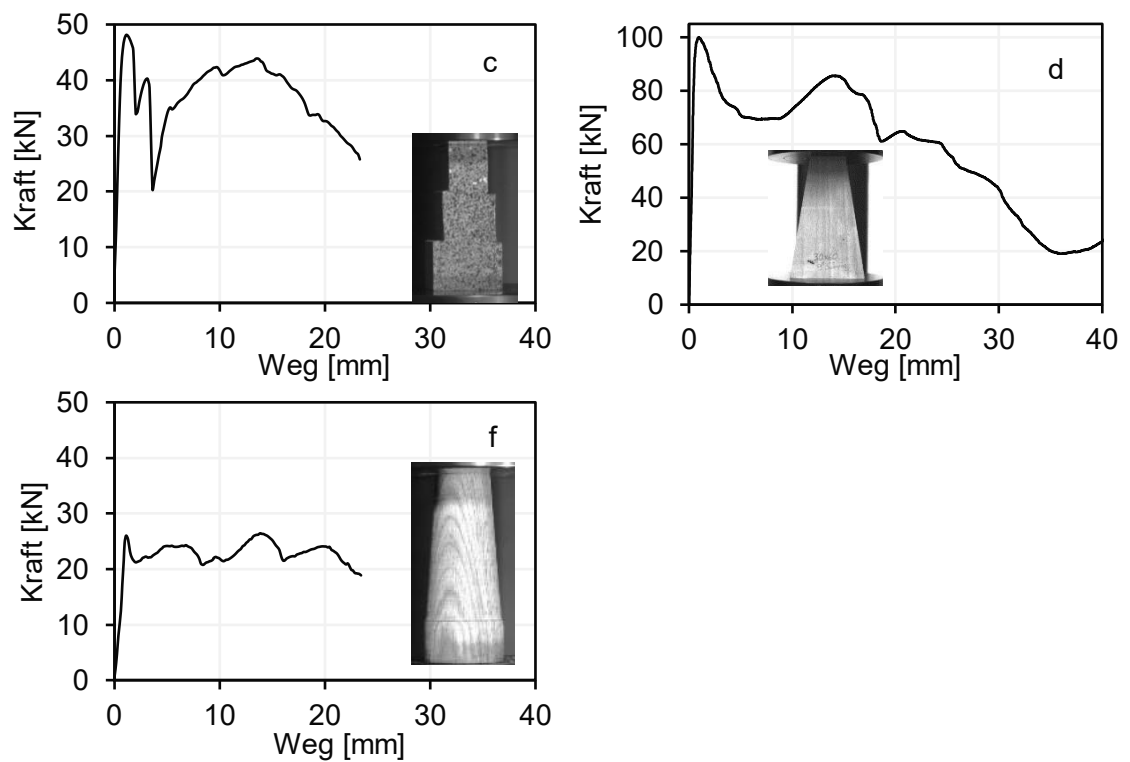


Abbildung 5-6: Kraft – Weg – Verläufe von Prüflingen der Form c, d und f bei statischer Belastung

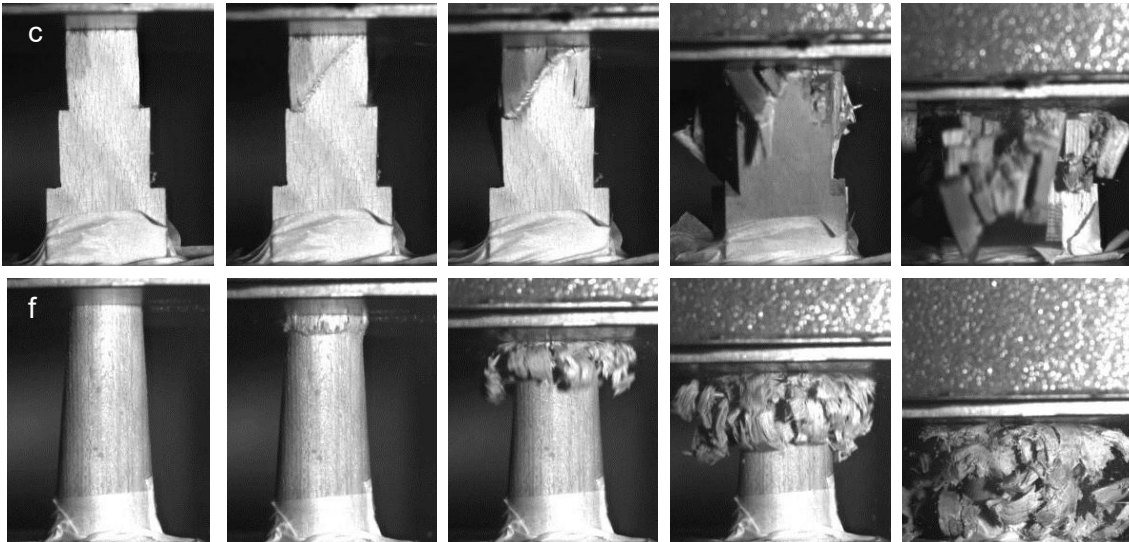


Abbildung 5-7: Versagensverhalten der Prüflingsform c und f bei einer dynamischen Belastung

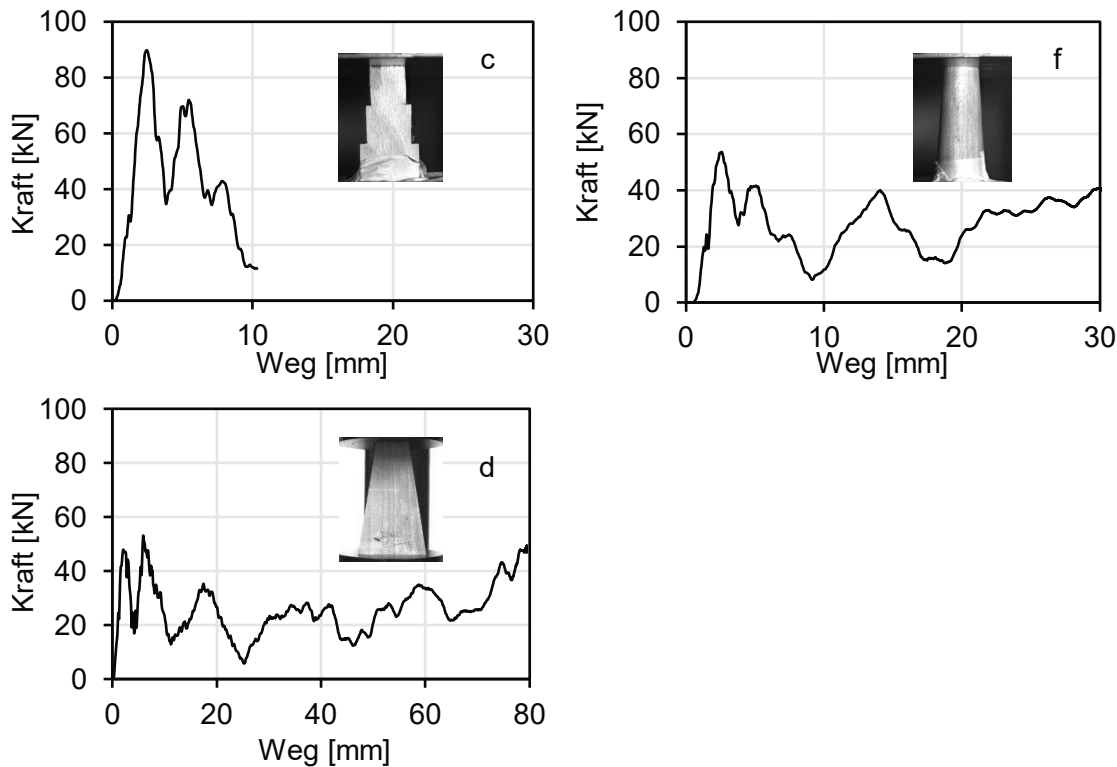


Abbildung 5-8: Kraft – Weg – Verläufe von Prüfkörpern der Form c, d und f bei dynamischer Belastung

Der Blick auf die Kraft – Weg – Verläufe bestätigt, dass die Prüflingsform c bereits bei 10 mm Weg kaum noch Kraft aufnehmen kann. Aus diesem Grund werden Untersuchungen dieser Prüflingsform zunächst nicht weitergeführt.

Der Verlauf des Diagramms der Prüflingsform f weist zwar lokale Minima bei 10 mm und 20 mm Weg, der Prüfkörper nimmt aber bei einer Masse von 7 g etwa 865 J Energie auf. Das entspricht einem SEA von 123 kJ/kg (bezogen auf den zerstörten Bereich, nicht auf den gesamten Körper). Im Vergleich dazu liegen typische Werte für Stahl bei 20 kJ/kg

und CFK bei 60 – 100 kJ/kg (Kapitel 4.3.1). Diese Prüflingsform wird somit als vielversprechend eingestuft und weiterentwickelt.

Der Diagrammverlauf der Prüflingsform d ähnelt dem der Prüflingsform f. Das Kraftniveau ist annähernd konstant und mit lokalen Minima versehen. Bei einem Gewicht des zerstörten Bereiches von 50 g wurde 2,4 kJ Energie (höherer Prüfkörper - längerer Verformungsweg) aufgenommen. Das entspricht einem SEA von 41 kJ/kg. Somit ist das Versagensverhalten und die Energieaufnahme bei dieser Prüflingsform schlechter als bei der Prüflingsform f, sodass auch dazu keine weiteren Entwicklungen geführt werden.

Die Untersuchungen zum Versagensverhalten der Holzstrukturen haben das Potenzial dieses Werkstoffes im Hinblick auf die Energieaufnahme oder den Energieabbau verdeutlicht. Es zeigt sich bei dem untersuchten Holzwerkstoff ein ähnliches Versagensverhalten wie bei anderen faserverstärkten technischen Werkstoffen, z. B. CFK. Die Energieaufnahme erfolgt durch ein progressives Versagensverhalten der Struktur und das Splitten in feine Partikel. Schon mit kleinstem Gewicht können so große Energiemengen abgebaut werden. Am vielversprechendsten erscheint für den untersuchten Holzwerkstoff die Form eines Kegels, wobei die Faserrichtung entlang der Belastungsrichtung angeordnet wird. Im nächsten Kapitel wird aus den bisher getesteten Probenkörpern eine bauteilähnliche Struktur ausgearbeitet.

5.1.2 Ausarbeitung eines erfolgsversprechenden Konzeptes

Bei den Voruntersuchungen zu einer optimalen Form eines Stoßabsorptionselementes aus dem vorliegenden Holzwerkstoff wurde festgestellt, dass die Form eines Kegels besonders gut zur Energieaufnahme geeignet ist. Daraufhin wurden unterschiedliche Kegelgrößen getestet. Da bereits bei kleineren Probenkörpern aus dem vorangegangenen Kapitel Kräfte von 40 – 60 kN erreicht wurden, wurden bei den Kegeln mit einem Außendurchmesser ab 50 mm Kernbohrungen vorgenommen. Die Kegelform wurde durch die Variation von einem äußeren (α) und einem inneren (β) Winkel erreicht (Abbildung 6-2). Dadurch entstanden stabile Hohlkegel mit einer einstellbaren Wandstärke und einer Splitterabführung nach Außen und Innen.

Nach zahlreichen Tests an unterschiedlichen Hohlkegelgeometrien wurden zwei wesentliche Effekte beobachtet.

- Je größer die Wanddickenänderung des Kegels von der Spitze zur Auflagefläche, desto steiler steigt die Kraft an,
- Bei dünnwandigen Kegeln treten Instabilitäten in der Form und dem Versagen auf.

Die Versagensbilder sowie die Kraft-Weg-Verläufe zu den Effekten sind in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 dargestellt.

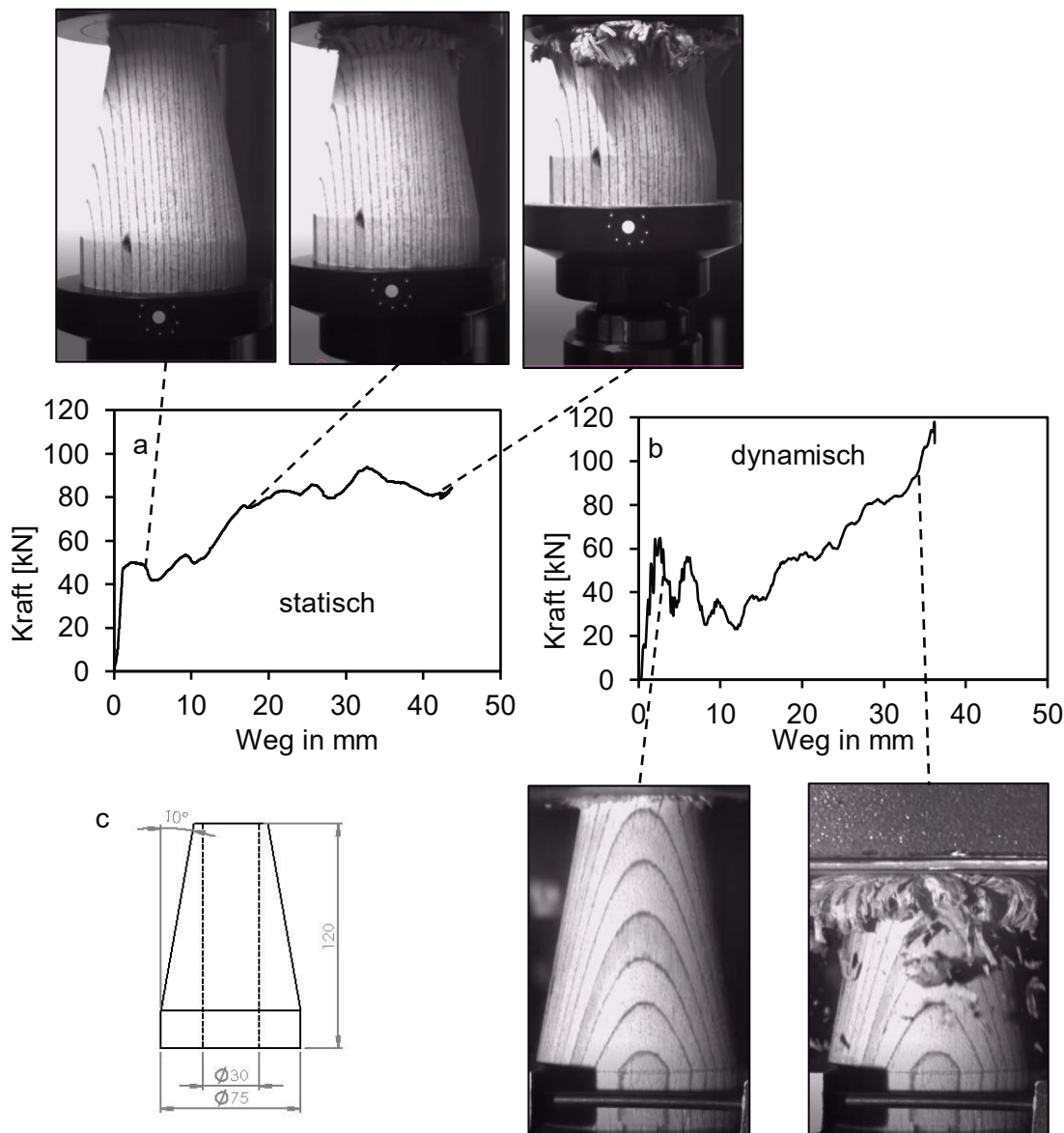


Abbildung 5-9: a – Kraft – Weg – Verlauf eines statisch belasteten Kegels inkl. Versagensbilder;
 b – Kraft – Weg – Verlauf eines dynamisch belasteten Kegels inkl. Versagensbilder;
 c – Abmessungen des geprüften Kegels

Ein starker Anstieg der Kraft mit der fortschreitenden Intrusion führt dazu, dass der vorhandene Versagensweg nicht optimal zur Energieaufnahme ausgenutzt wird. Die Festigkeit der nachfolgenden Strukturen darf dabei ebenfalls nicht überschritten werden.

Ein instabiles Versagen führt zu einem unregelmäßigen Kraftverlauf. Ein konstantes mittleres Kraftniveau wird nicht erreicht. Die Energieaufnahme kann noch weiter optimiert werden. Die beiden aufgeführten Beispiele zeigen die angesprochenen Effekte deutlich. Durch die Variation der beiden Winkel (innen und außen) des Kegels kann die Wanddickenänderung und damit das geforderte mittlere Kraftniveau und der Kraftanstieg sowie ein stabiles Versagen gezielt eingestellt werden.

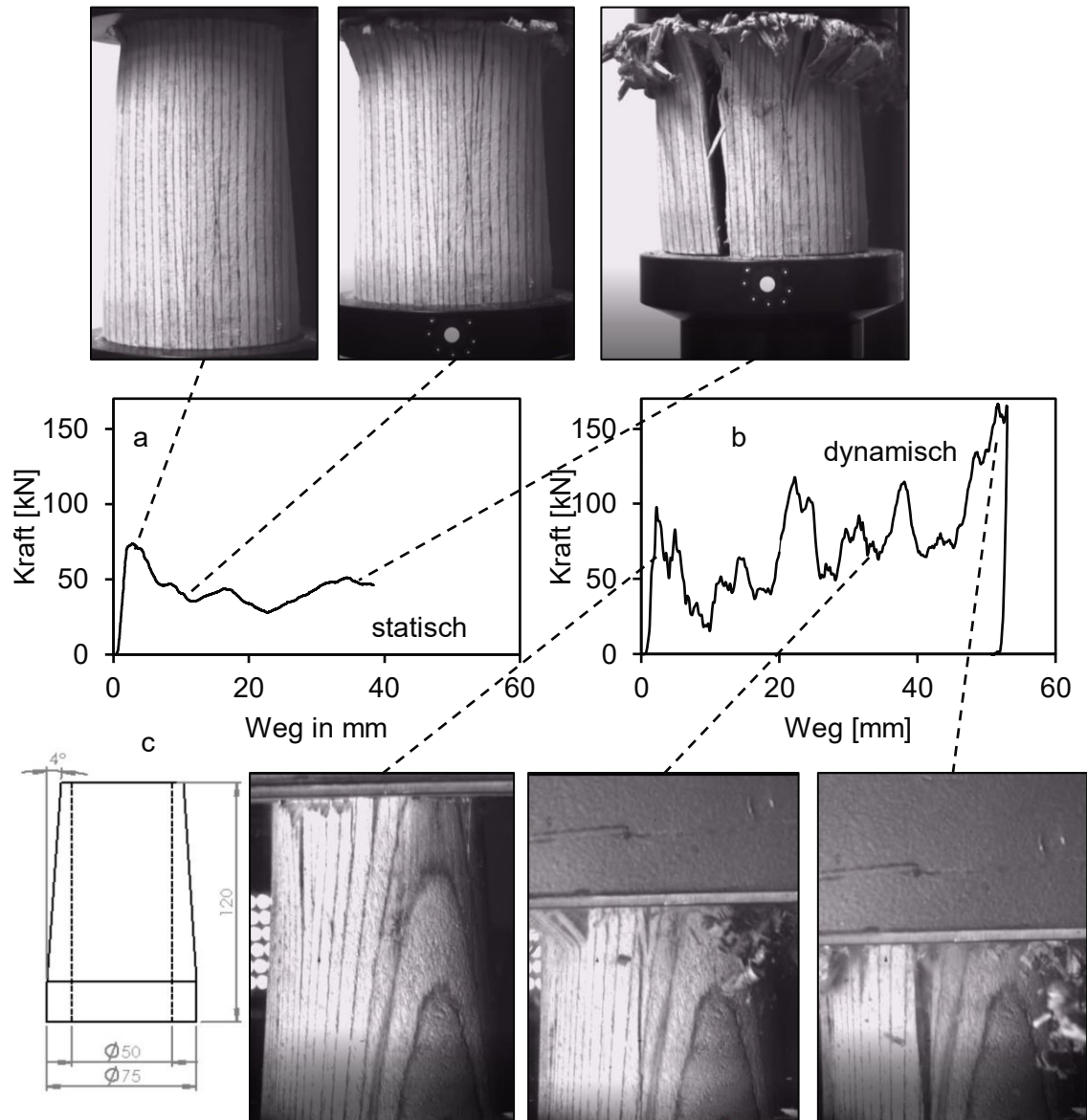


Abbildung 5-10: a – Kraft – Weg – Verlauf eines statisch belasteten Kegels inkl. Versagensbilder;
 b – Kraft – Weg – Verlauf eines dynamisch belasteten Kegels inkl. Versagensbilder;
 c – Abmessungen des geprüften Kegels

Um den Anstieg der Versagenkraft mit der fortschreitenden Intrusion zu reduzieren, wurden auch Kegeln mit einer konstanten Wanddicke, aber einer weiterhin ansteigenden Querschnittsfläche getestet. Das wurde durch den gleichen Außen- und Innenwinkel des Kegels erreicht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

Die Kegel mit einer konstanten und einer steigenden Wanddicke wurden hierbei statisch belastet. Ein mittleres Kraftniveau konnte bei dem Kegel mit einer konstanten Wanddicke nicht ausgebildet werden, obwohl der Durchmesser des Kegels und somit die gesamte Querschnittsfläche mit der ansteigenden Intrusion immer größer wurde. Der Kegel mit konstanter Wanddicke versagte bereits nach dem ersten Kraftpeak. Es wurde keine fortlaufende Bruchfront ausgebildet.

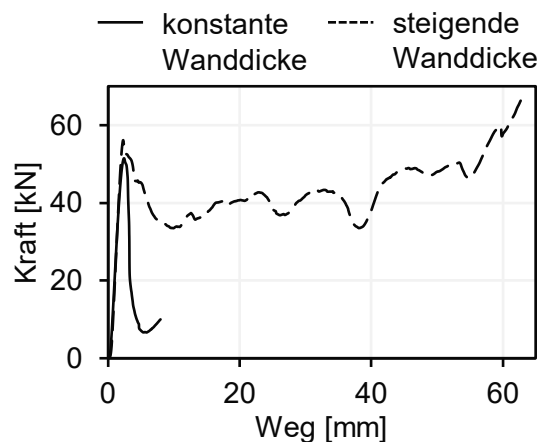


Abbildung 5-11: Einfluss der Wanddickenänderung auf den Kraft – Weg – Verlauf

Je nach Größe der Querschnittsfläche beim Auftreffen der Fallmasse auf den Kegel variiert der erste Kraftpeak F_{peak} und kann auch Werte von 100 kN erreichen. Um den Kraftpeak zu reduzieren, wurden Fasen mit unterschiedlichen Winkeln (45° - 75°) und Fasenlängen (5 mm – 17 mm) untersucht. Schon mit einer Fase von 5 mm Länge und einem Winkel von 60° wurde eine Reduzierung des Kraftpeaks auf Werte unter das mittlere Kraftniveau erreicht.

Die zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung getesteten Kegel hatten ein Gewicht in einem Bereich von 70 g – 150 g. Im Vergleich dazu wiegen die modernen Crashboxen bis zu einem Kilogramm. Somit können durch den Einsatz vom hier untersuchten Holzwerkstoff eine Gewichtsersparnis für eine Crashbox von etwa 90 % realisiert werden.

Nach den zahlreichen Untersuchungen an den Kegeln wurde für die optimale Geometrie des Demonstrators eine Hohlkegelstruktur mit einem Außendurchmesser von 65 mm und einem Innendurchmesser von 30 mm festgelegt. Der Innen- und Außenwinkel des Demonstrators werden in weiteren Untersuchungen variiert. Zur Reduzierung des ersten Kraftpeaks wird eine Fase in einige Kegel eingebracht. Der genaue Prüfungsablauf und die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

5.2 Sitzrückwand

Die Struktur einer Sitzrückwand wurde von Fahrzeugherstellern und deren Zulieferern auf hohe Steifigkeit bei minimalem Gewicht optimiert. Bei einer statischen oder dynamischen Belastung darf das Paneel nicht versagen. Die heutigen Serienbauteile sind mit aufwendig entwickelten Sickenstrukturen versehen, damit das Optimum zwischen den gewünschten mechanischen Eigenschaften und dem Bauteilgewicht bestmöglich erreicht werden kann. Sicken sind in dünne Platten eingebrachte Versteifungen, wobei die Tiefenprägung meist klein gegenüber der Längenprägung ist [Kle13]. Durch die Sicken nimmt das Flächenträgheitsmoment der Struktur zu. Das ist wiederum neben anderen Größen entscheidend für den Beulwiderstand von dünnen Platten oder Scheiben. Dieser

Zusammenhang ist unabhängig vom verwendeten Werkstoff und gilt somit auch für Strukturen aus Holzwerkstoffen.

In der Literatur sind keine Hinweise auf Untersuchungen zur Sickengestaltung oder -einbringung in FSH oder andere Holzwerkstoffe zu finden. Dieser Forschungsgegenstand ist also eine der zentralen Fragestellungen bei der Entwicklung der Sitzrückwand, da mit einer flachen Struktur wesentlich höhere Waddicken und damit Massen erforderlich wären. Die genaue Vorgehensweise ist in Abbildung 5-12 schematisch dargestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst an einer Testgeometrie die produktionstechnischen Randbedingungen zur Einbringung von Sicken in eine Struktur aus dünnen Furnierlagen untersucht. Es wird ermittelt, unter welchen Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Klebstoffe) welche Radien und Tiefen der Sicken fertigbar sind, ohne dass die einzelnen Lagen beschädigt werden.

Sind die Randbedingungen und die geometrischen Restriktionen geklärt, wird anhand der Referenzstruktur ein Demonstrator einer Sitzrückwand aus FSH entwickelt. Der Demonstrator wird gefertigt und statisch und dynamisch nach den Vorgaben in Kapitel 4.3.2 belastet.

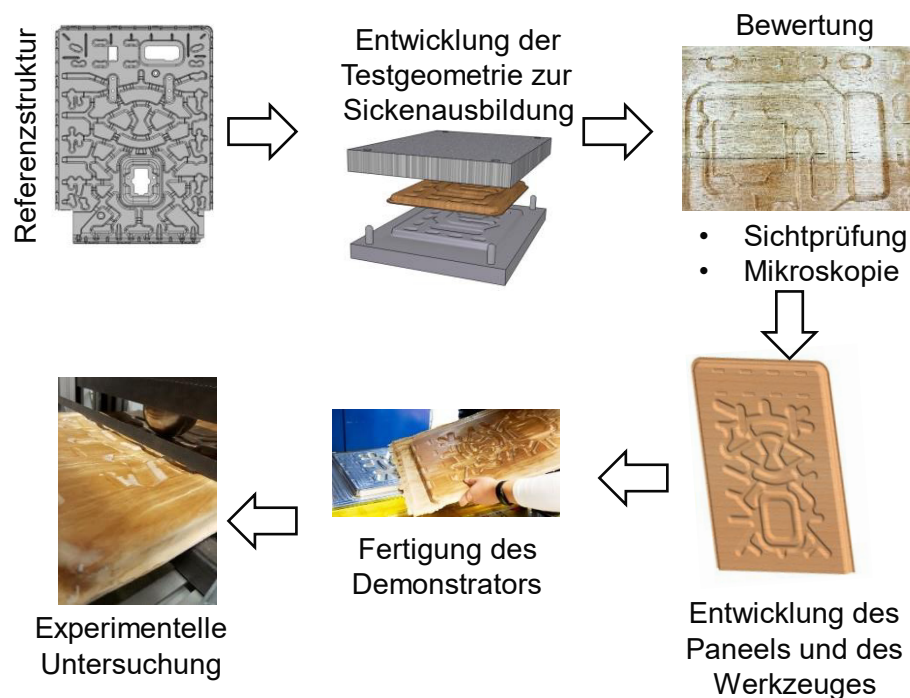


Abbildung 5-12: Vorgehensweise bei der Entwicklung der Sitzrückwand aus FSH

5.2.1 Analyse der Ausbildung von Sickenstrukturen an flachen Holzelementen

Bei der zu entwickelnden Sitzrückwand liegt der Fokus der Entwicklung zunächst weniger auf der genauen Geometrie des Bauteils, sondern viel mehr auf den fertigungstechnischen Aspekten. Zur Untersuchung dieser wurde ein Werkzeug konstruiert und gebaut, mit dem flache Bauteile mit zahlreichen Sickenstrukturen gefertigt werden können. In Abbildung 5-13 ist die grafische Darstellung dieser Form abgebildet. An der Schnittdarstellung A-A ist die Variation der Sickentiefe und der -radien erkennbar.

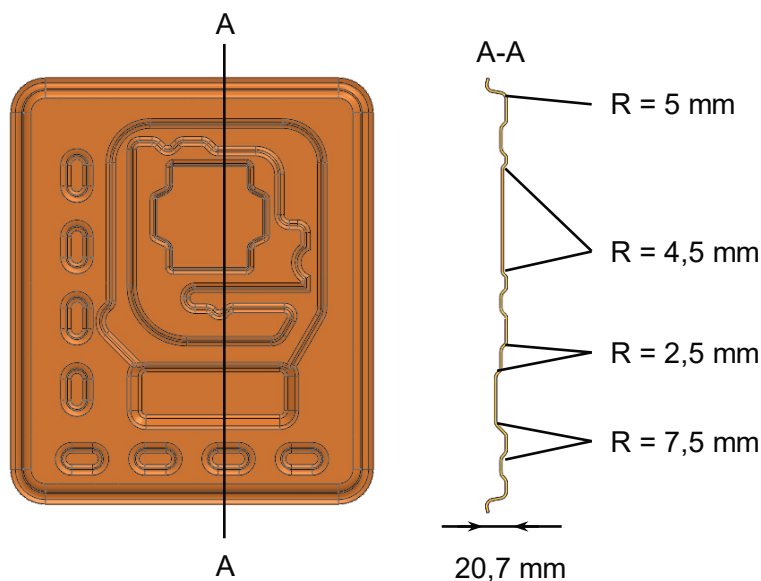


Abbildung 5-13: grafische Darstellung der Form zur Untersuchung fertigungstechnischer Randbedingungen zur Ausbildung von Sicken in FSH [Konstruktion der Form und des Werkzeuges durch Pollmeier Maschinenbau GmbH & Co.KG]

Als Werkstoff zur Bauteilfertigung wurden Birkenfurniere mit einer Dicke von 0,3 mm eingesetzt. Leider stand kein entsprechender Furnierwerkstoff aus Buche für diese und nachfolgende Untersuchungen zur Verfügung. Die Eigenschaften der Birke entsprechen annähernd denen der Buche, vor allem im Bereich der Umformung, sodass hier vergleichbare Ergebnisse erwartet werden. Der Klebstoffauftrag erfolgt manuell unter Laborbedingungen.

Weitere variierte Randbedingungen waren:

- | | |
|-----------------------|--|
| - Klebstoff | Dispersionsleim, Epoxidharz |
| - Lagenanzahl | 4 Lagen, 6 Lagen, 8 Lagen |
| - Werkzeugtemperatur | RT, 80 °C |
| - Art der Befeuchtung | Keine, Sprühverfahren, Nebelsprühverfahren |

In Abbildung 5-14 sind einige ausgewählte Fehlerbilder dargestellt, die bei der Fertigung von FSH mit Sicken aufgetreten sind. Die Risse in Aufnahme A und B sind vor allem in den Formen mit dem Dispersionsleim entstanden. Holz kann aufgrund seiner Beschaffenheit beim Umformen nur bedingt nachfließen, wie es z. B. bei den Tiefziehstählen der

Fall ist. Ein Verdünnen des Werkstoffes ist ebenfalls nicht möglich, da der Werkstoff keine plastische Verformung zulässt. Dadurch reißt das Material an durch die Umformung besonders belasteten Stellen vollständig auf. Die Risse können sowohl zwischen den Fasern als auch quer zu den Fasern verlaufen. Da ein Dispersionsleim einen nur geringeren Feststoffanteil (60 %) aufweist, fungiert er nicht als Füllmaterial. Die Risse bleiben offen, das Tragverhalten der Struktur ist reduziert. Die Feuchtigkeit, die durch den Klebstoff zusätzlich in die Form eingebracht wird, erhöht die Flexibilität der Furniere. Eine ähnliche Wirkung hat auch die zusätzliche Befeuchtung der Furniere vor dem Klebstoffauftrag. Die Anzahl und die Ausprägung der Risse werden dadurch geringer, ein fehlerfreies Bauteil kann aber trotzdem nicht gefertigt werden.

Beim Sprühverfahren werden feine Wasserpartikel direkt auf die Furniere gesprüht. Dadurch und durch die Feuchtigkeit aus dem Klebstoff erhöht sich der Feuchtegehalt in den Furnieren so, dass die Form einige Tage nach dem Fügeprozess durch den Trocknungsprozess verdrillt. Der nach der Fertigung hohe Feuchtegehalt sinkt bei Raumtemperatur. Der dadurch entstandene Verzug in den einzelnen Furnierlagen führt zu Eigenspannungen, diese werden zum Teil durch das Verdrillen des Bauteils abgebaut. Die Anpassung der Lagenanzahl und der Lagenausrichtung zueinander im Verbund und die Erhöhung der Fügetemperatur auf 80 °C führten ebenfalls nicht zu einem fehlerfreien Bauteil.

Mit Epoxidharz hergestellte Bauteile (RT, keine Befeuchtung) wiesen zunächst ebenfalls zahlreiche Risse im Verbund auf (Abbildung 5-14, Aufnahme C, D). Der Unterschied zu den mit Leim hergestellten Bauteilen liegt darin, dass die entstandenen Risse mit dem überschüssigen Epoxidharz gefüllt werden. Durch den Einsatz von Nebelsprühverfahren zur Befeuchtung der Furniere vor dem Klebstoffauftrag und einer Temperaturerhöhung im Fügeprozess (Verbund wird vor dem Fügen im 80 °C warmen Werkzeug erwärmt) wurden äußerlich nahezu einwandfreie Bauteile hergestellt. Allerdings wurden an zahlreichen Rundungen und Ecken Anhäufungen vom überschüssigen Klebstoff festgestellt (Abbildung 5-14, Aufnahme E). Wegen dieser Klebstoffanhäufungen entspricht die Form des Bauteils nicht vollständig der des Werkzeuges. Die Dicke des Klebstoffes an diesen Stellen liegt im Bereich unter der Dicke einer einzelnen Furnierlage, also unter 0,3 mm.

Da der Klebstoff nicht durchsichtig ist, kann die Rissfreiheit dieser Bereiche durch optische Prüfung nicht eindeutig bestätigt werden. Aus diesem Grunde wurde ein Bauteil, wie in Abbildung 5-15 dargestellt, zugeschnitten. Die Schnittkanten wurden poliert und unter einem Lichtmikroskop untersucht. Das Bauteil wurde aus 8 Furnierlagen der Dicke 0,3 mm gefertigt. Nach dem Fertigungsprozess hat das Bauteil demnach eine Gesamtdicke von etwa 2 mm. Der Lagenaufbau ist in Abbildung 5-15 dargestellt. Der Aufbau wurde nach den Berechnungen in Kapitel 5.2.2 ausgewählt.

Die Aufnahmen 1 und 4 in Abbildung 5-15 zeigen beispielhaft die fehlerfreien Ränder in dem untersuchten Bauteil. Die Aufnahmen 2 und 3 wiederum zeigen Bereiche, die von außen als fehlerfrei eingestuft werden, obwohl in den innen liegenden Lagen Risse in den Furnieren vorhanden sind. Hier muss allerdings zwischen den beiden Aufnahmen

unterschieden werden. Aufnahme 3 zeigt Risse senkrecht zum Faserverlauf. Der Faserverlauf ist unterbrochen, die Tragkraft der Furniere geschwächt. Im Bereich der Aufnahme 2 verlaufen die Risse zwischen den Fasern (wie auch in Abbildung 5-14, Aufnahme D), also im Bereich, der grundsätzlich nur eine geringe Tragfähigkeit aufweist. Der Klebstoff füllt den Zwischenraum auf, sodass weiterhin Kraftübertragung möglich ist.

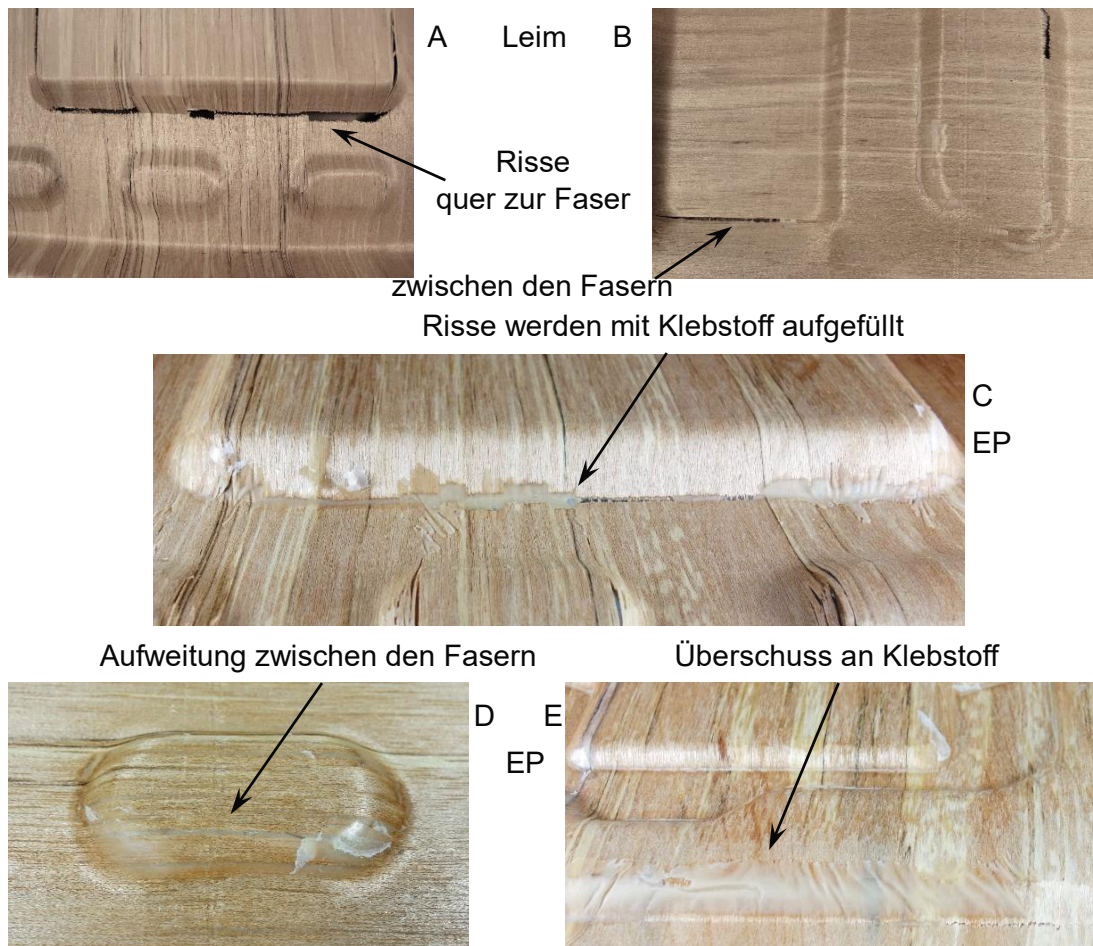


Abbildung 5-14: Ausgewählte Fehlerbilder von mit Sicken hergestellten Strukturen aus FSH

Nach einer eingehenden Analyse aller Schnittkanten wurde die Abhängigkeit zwischen dem Radius der Sicken und dem Auftreten von Rissen in den Furnierlagen ermittelt. Bei Rundungen mit einem Durchmesser unter 15 mm treten vermehrt Risse sowohl in den äußeren als auch in den inneren Lagen auf. Bei größeren Rundungen sind kaum Risse aufgetreten. Nur an fünf Stellen wurden weitere Fehler im Verbund entdeckt, wie kleine Lufteinschlüsse / Poren oder fehlende Verbindung zwischen den Lagen (nur wenige Millimeter lang).

Die Dicke des Bauteils liegt bei etwa 2 mm. Mit einem Mindestbiegeradius von 7,5 mm (Durchmesser 15 mm) ergibt sich daher, dass der Biegeradius mindestens $3,75 \times \text{Materialdicke}$ sein muss, damit eine fehlerfreie Umformung stattfinden kann. Bei metallischen Werkstoffen liegt dieser Wert je nach Werkstoff und Blechdicke bei $1 - 3 \times \text{Materialdicke}$. Eine Verallgemeinerung der Feststellung auf beliebige Bauteildicken und Furnierdicken

kann an dieser Stelle nicht erfolgen, da vergleichende Untersuchungen an anderen Dicken nicht vorgenommen wurden.

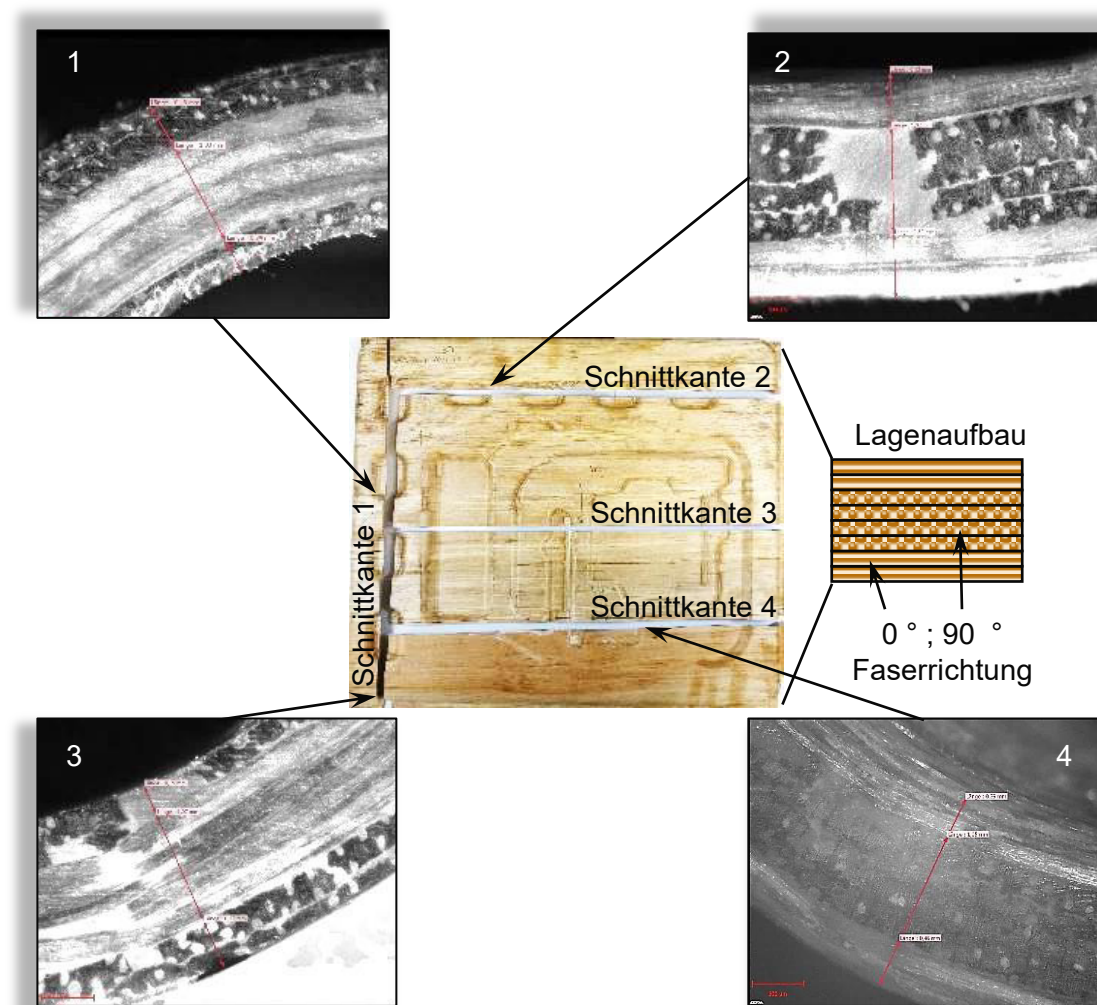


Abbildung 5-15: Ausgewählte mikroskopische Aufnahmen der Schnittkanten

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Fertigung von Sicken in dem untersuchten Holzwerkstoff möglich ist. Es wurden fertigungstechnische Einflussgrößen ermittelt.

5.2.2 Berechnungen zum optimalen Lagenaufbau

Zur Ermittlung eines optimierten Lagenaufbaus für den Sitzrückwand - Demonstrator wurden Berechnungen mit Altair OptiStruct durchgeführt. Hierfür wurde ein abstraktes Modell der Rückwand (Abbildung 5-16) genutzt, also eine fest eingespannte Schale, die in der Mitte mit einer Einzellast beansprucht wird. Der Werkstoff wurde als orthotropes, linear elastisches Material angenommen. Die Anzahl der Lagen wurde auf 8 und 10 festgelegt, da ein symmetrischer Aufbau zur Reduzierung von Eigenspannungen notwendig

ist. Grundsätzlich können Strukturen auch mit einer ungeraden Anzahl an Lagen symmetrisch aufgebaut werden. Bei den Schäl furnieren wirkt sich die ehemalige Krümmung des Baumes in der Furnierebene noch zusätzlich auf die Eigenspannungen und Verformungen eines Bauteils aus, sodass hier eine gerade Anzahl an Lagen und eine definierte Stapelung der Lagen notwendig sind.

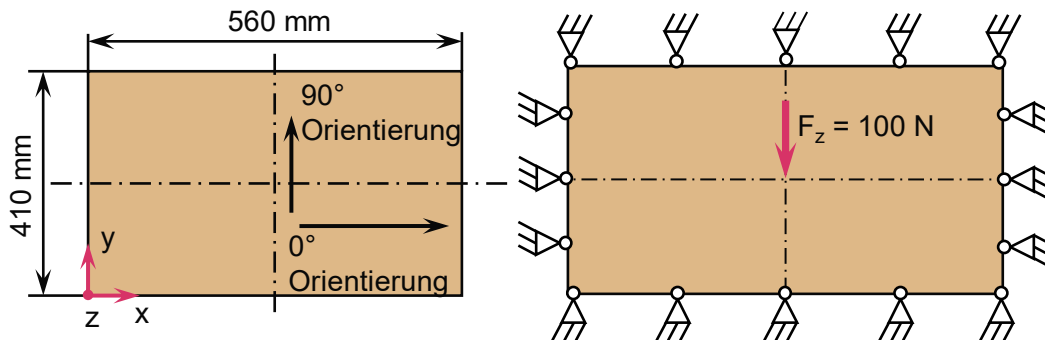


Abbildung 5-16: Modell zur Berechnung des Lagenaufbaus: 0° Orientierung – die Holzfasern sind in der Längsrichtung des Bauteils orientiert; 90° Orientierung – die Holzfasern sind in der Querrichtung des Bauteils orientiert

Tabelle 5-1: Der genaue Lagenaufbau und die berechnete Durchbiegung für unterschiedliche Varianten des Aufbaus

	Variante 1: 0°/90°	Variante 2: 0°/90°/±45°	Variante 3: ±45°	Variante 4: 0°/90°	Variante 5: 0°/90°/±45°	Variante 6: 0°/30°/60°/90°	
Durchbiegung	6,93 mm	7,08 mm	8,13 mm	13,63 mm	13,76 mm	13,98 mm	Durchbiegung
1	90	90	45				
2	90	0	-45	90	90	90	1
3	0	90	-45	90	45	0	2
4	0	-45	45	0	-45	60	3
5	0	45	45	0	0	30	4
6	0	45	45	0	0	30	5
7	0	-45	45	0	-45	60	6
8	0	90	-45	90	45	0	7
9	90	0	-45	90	90	90	8
10	90	90	45				

Die Diskretisierung wurde mit 2D Schalenelementen vorgenommen. Als Zielfunktion wurde die Minimierung der Verschiebung an der Lasteinleitungsstelle gewählt. Die Berechnung der effektiven Eigenschaften des Laminats erfolgte auf Basis der klassischen Laminattheorie (erläutert in z. B. [Sch07]). Es wurde eine Optimierung der Lagenorientierung des Mehrschichtverbundes durchgeführt, nach der eine Minimierung der Zielfunktion durch Variation der initialen Laminatanordnung erzielt wird.

In Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der Analyse zusammengefasst. Es sind 6 verschiedene Varianten an möglichen Lagenausrichtungen vorgegeben worden. Das heißt, bei der Variante 1 können nur 0° und 90° Lagen genutzt werden usw. Der mit der Software errechnete optimale Lagenaufbau mit insgesamt 8 oder 10 Lagen ist ebenfalls in der Tabelle 5-1 zu der jeweiligen Variante beigefügt. Die sich dabei einstellende Durchbiegung ist angegeben.

Der Unterschied in der Durchbiegung zwischen dem 8 und 10 – lagigen Aufbau beträgt etwa Faktor zwei. Durch die zwei zusätzlichen Lagen kann die Durchbiegung etwa zur Hälfte reduziert werden (gilt nur für die Erweiterung von acht auf zehn Lagen). Das liegt daran, dass die Höhe des Bauteils dreifach in das Flächenträgheitsmoment eingeht. Somit ist das Flächenträgheitsmoment des 10 – lagigen Bauteils etwa doppelt so groß und die Biegespannung beträgt etwa die Hälfte der Biegespannung des 8 – lagigen Bauteils. Da die äußeren Lagen entscheidend für die Tragfähigkeit auf Biegung belasteter Bauteile sind, ist die Orientierung dieser Lagen für das Spannungsverhältnis im Bauteil wichtig. Die Orientierung der Fasern der äußeren Lagen in die Querrichtung des Bauteils reduziert um bis zu 30 % das Biegemoment und somit die Biegespannung aufgrund des geringeren Abstandes der Lastangriffsstelle zu der Einspannung. Die geringste Durchbiegung stellt sich unter den 10 – lagigen Varianten bei dem Lagenaufbau der Variante 1. Bei der Variante 2 ist die Durchbiegung nur um 0,15 mm größer. Da der Aufbau der Variante 1 aus fertigungstechnischer Sicht einfacher ist und die Durchbiegung rechnerisch am geringsten, wird diese Variante für die Fertigung des Demonstrators bevorzugt. Unter den Varianten mit 8 Lagen wird die Variante 4 wegen analoger Überlegungen für den Aufbau des Demonstrators genutzt.

5.2.3 Konstruktion und Fertigung der Ersatzgeometrie

Unter der Berücksichtigung der Ergebnisse zur Sickenausbildung und der geometrischen Ausprägungen der Referenzstruktur wurde eine Ersatzgeometrie in Zusammenarbeit mit Pollmeier Maschinenbau GmbH & Co.KG für die Sitzrückwand aus FSH entwickelt. Die Konstruktion der Ersatzgeometrie wurde von der Pollmeier Maschinenbau GmbH & Co.KG übernommen. Die Darstellung der Referenzstruktur einer Sitzrückwand und die entwickelte Ersatzgeometrie aus FSH sind in Abbildung 5-17 dargestellt.

Wie bereits erläutert, ist der Einfluss der Sicken auf die Steifigkeit von flächigen Strukturen werkstoffunabhängig. Aus diesem Grunde wurden die Sicken der Ersatzgeometrie nach dem Vorbild der Referenzstruktur mit Berücksichtigung der fertigungstechnischen

Aspekte erstellt. Der Bereich der Anbindung der Rückwand an den Sitzrahmen wurde frei gestaltet. In diesem Bereich ist möglichst eine flächige klebtechnische Verbindung der beiden Bauteile (Rahmen - Paneel) vorgesehen. Die Maße der Ersatzgeometrie mit Breite $b = 400 \text{ mm}$ und Höhe $h = 560 \text{ mm}$ entsprechen in etwa den Maßen der Referenzstruktur.

Neben der Ersatzgeometrie wird auch ein entsprechendes Werkzeug zur Fertigung des Bauteils konstruiert und gefertigt. Das Werkzeug kann beheizt werden.

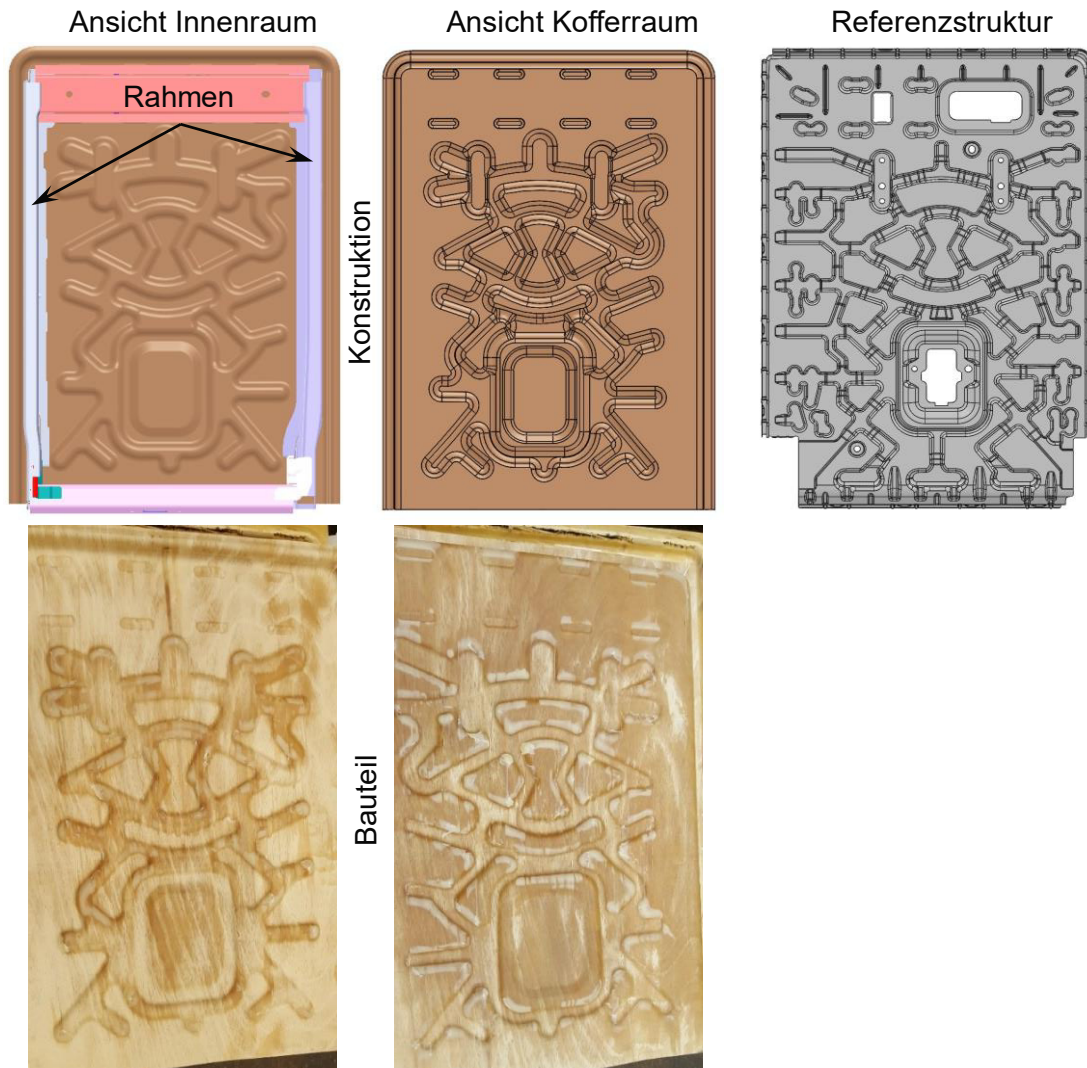


Abbildung 5-17: Darstellung der Referenzstruktur einer Sitzrückwand und der Ersatzgeometrie aus FSH

Die Demonstratoren der Sitzrückwand aus FSH werden aus acht bzw. zehn Furnierlagen aus Birke gefertigt. Die Lagendicke beträgt etwa $0,3 \text{ mm}$. Zum Fügen der Furnierlagen wurde das im Kapitel 3.3.3 und 5.2.1 ebenfalls genutzte Epoxidharz eingesetzt, da damit die höchste Festigkeit erreicht wurde. Vor dem Klebstoffauftrag wurden die Furniere mittels Nebelsprühverfahren angefeuchtet. Das Werkzeug wurde zur Fertigung auf 80 °C

erwärmt. Die bereits mit Klebstoff benetzten und gestapelten Furniere wurden in dem warmen Werkzeug vorgewärmt, unter Temperatur gefügt und ausgehärtet.

Die gefertigten Prototypen weisen von außen keine Bruchstellen oder weitere Beschädigungen in der Struktur auf. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen zur Sickenfertigung korrekt getroffen wurden.

6 Prüfung der entwickelten Demonstratoren

Unter der Berücksichtigung der Anforderungen aus Kapitel 4 wurden die entwickelten Demonstratoren getestet. Vorrichtungen und Prüfstände wurden entwickelt und aufgebaut.

6.1 Stoßabsorptionselement

Entsprechend der Vorentwicklungen wurden fünf Crashelemente unterschiedlicher Geometrien als Demonstratoren konstruiert. Diese wurden dynamisch in einem Fallmasseprüfstand belastet. Aus den vorliegenden Ergebnissen wurden Konstruktionsrichtlinien zur Auslegung von Stoßabsorptionselemente abgeleitet.

6.1.1 Prüfstandaufbau und Prüfelemente

Die Demonstratoren wurden dynamisch unter einer geführten Fallmasse belastet. Die Prüfelemente wurden, wie in Abbildung 6-1 dargestellt, an dem Messaufbau fest eingespannt, wie die entsprechenden Referenzstrukturen im Fahrzeug. In dem Messaufbau sind drei piezoelektrische Kraftaufnehmer der Firma Kistler im Kreis angeordnet und direkt unter dem Prüfkörper platziert. Der von der Fallmasse zurückgelegte Weg wird zwischen der Fallmasse und dem Führungsgestell mit einem magnetischen Längenmesssystem ermittelt.

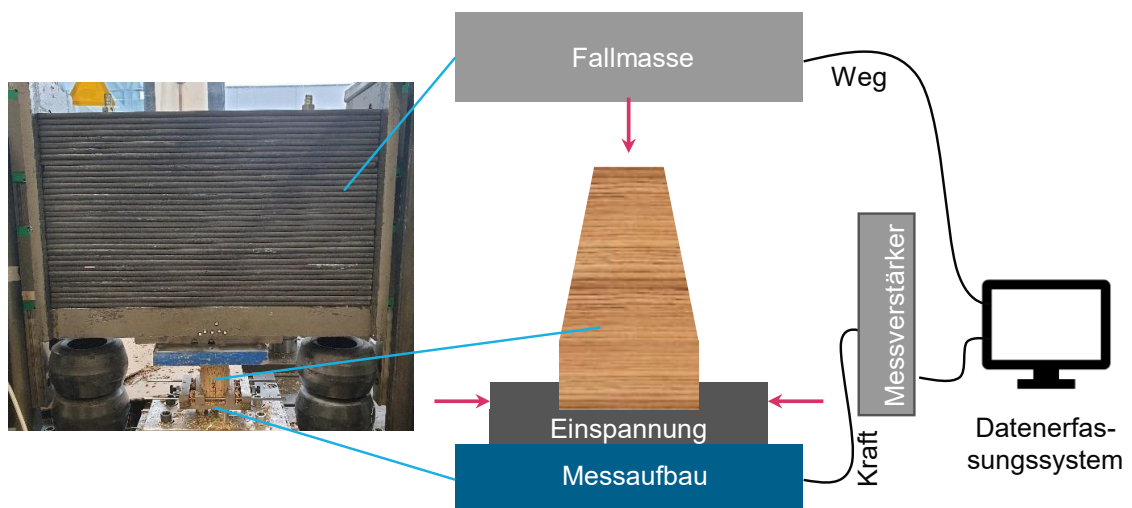


Abbildung 6-1: Prüfstandaufbau zur dynamischen Belastung des Demonstrators eines Stoßabsorptionselementes aus Holzwerkstoffen

Das Gewicht der Fallmasse beträgt 460 kg. Die Fallhöhe liegt bei einem Meter. Somit ergibt sich ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste eine Energie von 4,6 kJ, die von dem Prüfelement aufgenommen werden muss. Die tatsächlich aufgenommene Energie wird für das jeweilige Prüfelement nachträglich einzeln berechnet. Die Auftreffgeschwindigkeit der Fallmasse liegt bei 4,5 m/s.

Die fünf Crashelemente / Prüfelemente weisen grundsätzlich die gleiche Grundform auf und unterscheiden sich nur in dem äußeren (α) und inneren (β) Winkel und dem Vorhandensein eines Triggers in der Form einer Fase (s. a. Kapitel 5.1.2). Die Fase wurde in einem Winkel von 70° eingebracht und ragte etwa 13 mm in die Länge der Elemente hinein. Mit dieser Konstellation kann der Einfluss des Triggers und der Winkel auf das Versagensverhalten ermittelt werden. Die Werte für die geometrischen Merkmale basieren auf den Erfahrungswerten aus der Konzeptentwicklung. Die grafische Darstellung der Prüfelemente im Querschnitt und die Winkelabmessungen sind in der Abbildung 6-2 und der Tabelle 6-1 gezeigt.

Tabelle 6-1: Geometrische Merkmale der Prüfelemente des Demonstrators eines Stoßabsorptionselementes aus Holzwerkstoffen

Kegelform	Trigger	Winkel α	Winkel β
1	ja	6°	2°
2	ja	6°	0°
3	nein	6°	2°
4	nein	6°	0°
5	nein	3°	0°

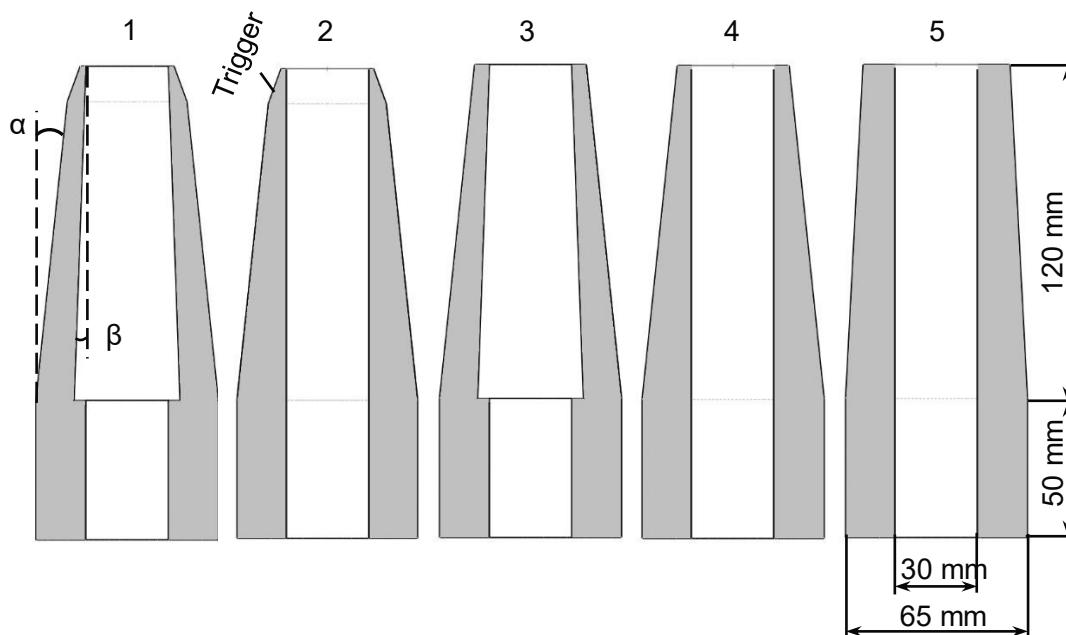


Abbildung 6-2: Grafische Darstellung der Prüfelemente im Querschnitt (grau)

6.1.2 Prüfergebnisse

In den Abbildung 6-3 bis 6-7 sind die Kraft-Weg-Verläufe zu den Prüfelementen mit unterschiedlicher Kegelform dargestellt. Für jede Kegelform sind mindestens drei Elemente dynamisch belastet worden.

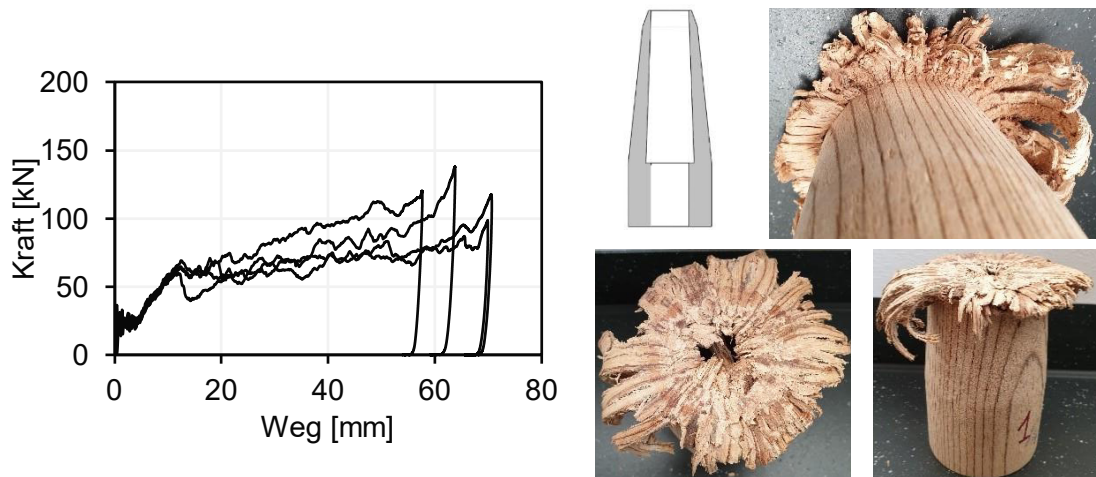


Abbildung 6-3: Kraft-Weg-Diagramm zur dynamischen Belastung der Kegelform 1 und das belastete Prüfelement

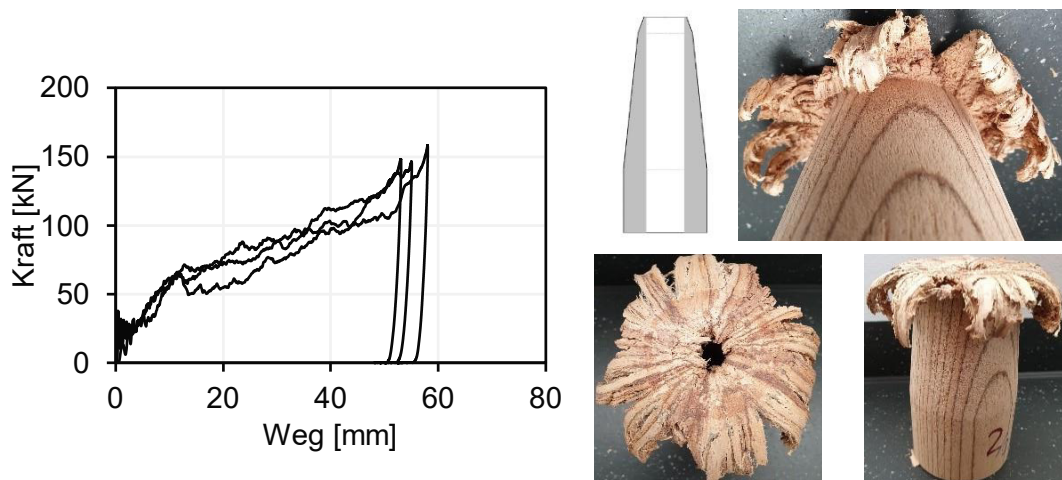


Abbildung 6-4: Kraft-Weg-Diagramm zur dynamischen Belastung der Kegelform 2 und das belastete Prüfelement

Bei den Prüfelementen ohne einen Trigger (Kegelformen 3 - 5) ist ein typischer Verlauf erkennbar. Zunächst steigt das Kraftsignal linear bis auf einen für die jeweilige Kegelform charakteristischen Kraftpeak an. Mit der steigenden Querschnittsfläche des Prüfelementes, steigt auch der Kraftpeak. Nach Überschreiten des Kraftpeaks bildet sich ein mittleres Kraftniveau mit unterschiedlicher Oszillationsamplitude aus. Aufgrund der Kegelform ist das mittlere Kraftniveau nicht konstant, sondern steigt linear mit der fortschreitenden Intrusion an.

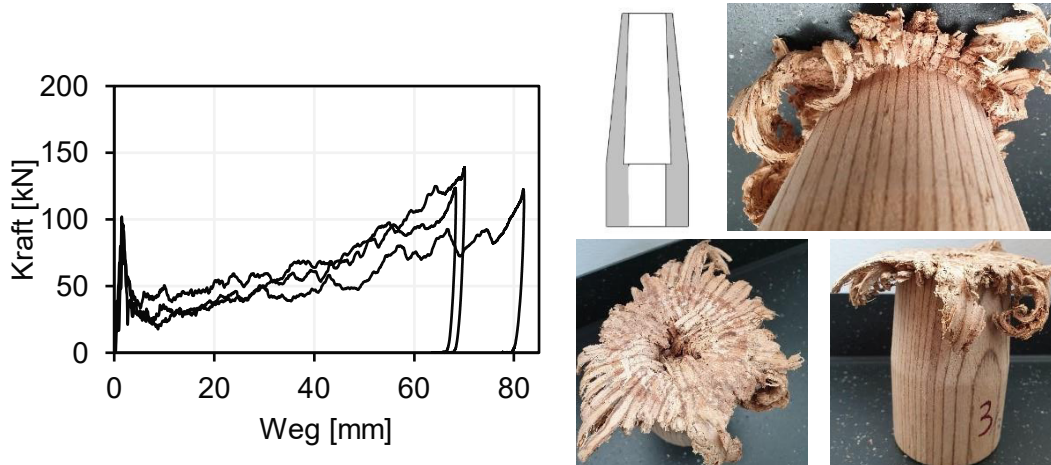


Abbildung 6-5: Kraft-Weg-Diagramm zur dynamischen Belastung der Kegelform 3 und das belastete Prüfelement

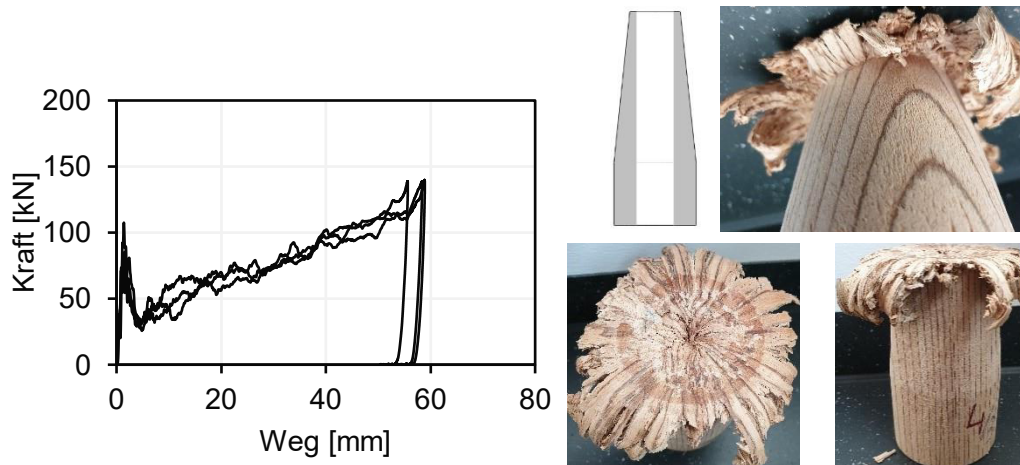


Abbildung 6-6: Kraft-Weg-Diagramm zur dynamischen Belastung der Kegelform 4 und das belastete Prüfelement

Der Kraftverlauf bei den Prüfelementen mit einem Trigger (Kegelform 1 - 2) ist dem Verlauf der Prüfelemente ohne einen Trigger bis auf den Kraftpeak identisch. Mit dem eingebrachten Trigger kann der erste Impuls beim Auftreffen der Fallmasse auf das Prüfelement deutlich abgeschwächt werden.

Für alle Kegelformen fällt auf, dass die Oszillation im Bereich des mittleren Kraftniveaus und die Streuungen innerhalb der jeweiligen Probenvariante eher gering sind. Da Holzwerkstoffe in ihren Eigenschaften grundsätzlich einer beachtlichen natürlichen Streuung unterliegen, ist diese Erkenntnis besonders positiv.

Je höher das mittlere Kraftniveau oder je höher die Steigung des mittleren Kraftniveaus ist, desto geringer ist die maximale Intrusion. Die Energie der Fallmasse wird mit steigendem Kraftniveau auf einem geringeren Intrusionsweg abgebaut. Im Bereich der maximalen Intrusion ist außerdem noch ein weiterer geringfügiger Kraftpeak erkennbar, der von Prüfelement zu Prüfelement unterschiedlich groß ausfällt.

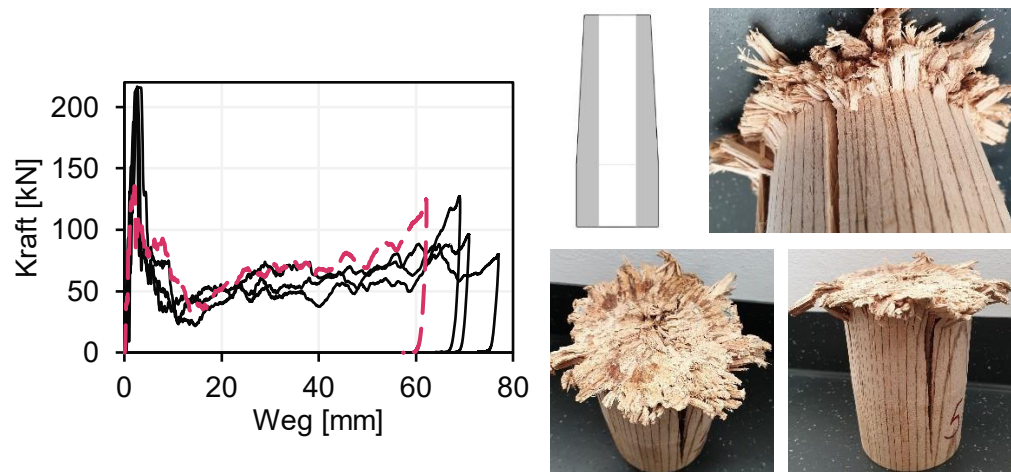


Abbildung 6-7: Kraft-Weg-Diagramm zur dynamischen Belastung der Kegelform 5 und das belastete Prüfelement

Bei dem Versagensverhalten der Prüfelemente wurden keine Unterschiede zwischen den Kegelformen festgestellt. Alle Prüfelemente versagten im Bereich der Bruchfront, während am restlichen Probenelement keine Stabilitätsprobleme aufgetreten sind. Somit kann das Versagen als kontinuierlich progressiv bezeichnet werden. Das abgesplitterte Material der Probenelemente wird sowohl nach außen als auch in den Hohlraum des Elementes verdrängt. Da die Prüfelemente ausreichend hoch dimensioniert wurden, ist bei keinem der Elemente der innere Hohlraum vollständig gefüllt gewesen. Somit wird nicht von einer messbaren Auswirkung durch innen liegende Splitter auf den Kraftverlauf ausgegangen. Die nach außen verdrängten Splitter haben sich weiträumig im gesamten Innenraum des Prüfstandes verteilt.

Bei einem der Prüfelemente mit der Kegelform 5 wurde ebenfalls ein Trigger eingebracht. Das Ergebnis der Prüfung ist in Abbildung 6-7 mit einer rot gestrichelten Linie dargestellt. Der Kraftpeak wurde durch den Trigger um etwa ein Drittel reduziert. Der restliche Kraftverlauf stimmt annähernd mit den anderen Verläufen dieser Kegelform überein.

Tabelle 6-2: Gemittelte Werte zur aufgenommenen Energie, dem Gewicht und SEA der Prüfelemente unterschiedlicher Kegelformen

Prüfelement	Aufgenommene Energie [J]	Gewicht des belasteten Bereiches [g]	SEA [kJ/kg]
Kegelform 1 Mittel	4493	45	106
Kegelform 2 Mittel	4442	38	120
Kegelform 3 Mittel	4515	55	87
Kegelform 4 Mittel	4445	42	108
Kegelform 5 Mittel	4567	95	47

Neben dem Kraft – Weg – Verhalten sind die aufgenommene Energie und die SEA berechnet worden. Die gemittelten Werte für alle untersuchten Kegelformen sind in der Tabelle 6-2 aufgelistet.

Durchschnittlich über alle Kegelformen wurden 45 g Holz zerstört (ausgenommen Kegelform 5), um etwa 4,5 kJ Energie abzubauen. Das entspricht einem SEA von 100 kJ/kg. Die Ausnahme stellt die Kegelform 5 dar mit einem SEA von 47 kJ/kg. Damit können mit dem untersuchten Holzwerkstoff vergleichbare Werte wie mit den Strukturen aus FKV erreicht werden. Im Vergleich zu metallischen Werkstoffen ist das Energieaufnahmevermögen vom Holz mehr als doppelt so groß (vgl. Kapitel 4.3.1).

6.1.3 Analyse des Versagensverhaltens

Die entwickelten Demonstratoren aus dem vorliegenden Holzwerkstoff zeigen einen typischen Kurvenverlauf eines axial belasteten Energie-, oder Stoßabsorptionselementes aus Metallen oder FKV mit einem ausgeprägten ersten Kraftpeak und anschließendem mittlerem Krafniveau (vergl. [RST17]). Im Vergleich zu den Elementen als FKV bleibt das mittlere Krafniveau bei den untersuchten Prüfelementen aus Holz nicht konstant, sondern steigt linear an. Das liegt an der konischen Form des Kegels und der sich daraus ergebenden Wandstärkenänderung längs der Belastungsrichtung. Mit der fortschreitenden Intrusion wird die Querschnittsfläche des Prüfelementes immer größer. Solange ausreichend Energie im System vorhanden ist, steigt die Kraft in der jeweiligen Prüfebene des Prüfelementes an, bis die Bruchspannung im Material erreicht ist und dieses versagt. In den nachfolgenden Ebenen ist die Druckspannung geringer, da diese bei gleicher Kraft auf eine größere Fläche verteilt wird.

In der Abbildung 6-8 ist exemplarisch ein Längsschnitt durch ein belastetes Prüfelement dargestellt. Auch in dem Querschnitt sind optisch keine Schädigungen außerhalb der Bruchfront erkennbar. Mikroschädigungen im Bereich der Fasern können hiermit allerdings nicht ausgeschlossen werden. Die senkrecht zur Belastungsrichtung liegenden Fasern werden wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben zunächst gestaucht und dann im Knickband zur Seite ausgelenkt. Die Auslenkung geschieht sowohl nach außen als auch nach innen. Weitergehende Belastung führt anschließend zum Splitten der Form. Ein ähnliches Versagensverhalten weisen auch die Formen aus FKV, die von *Reuter* [Reu16] untersucht wurden.

Der Kraftpeak kann durch das Einbringen eines Triggers in das Element beeinflusst werden. Je größer die Querschnittsfläche des Prüfelementes in der Aufprallebene ist, desto höher ist der Kraftpeak. Dadurch kann gezielt eingestellt werden, wie hart oder weich der Aufprall vom Element aufgenommen wird. Vor allem im Bereich des Personenschutzes kann es signifikante Vorteile für die Gesundheit und das Überleben der Unfallbeteiligten (sowohl innerhalb als auch außerhalb des Fahrzeuges) bringen.

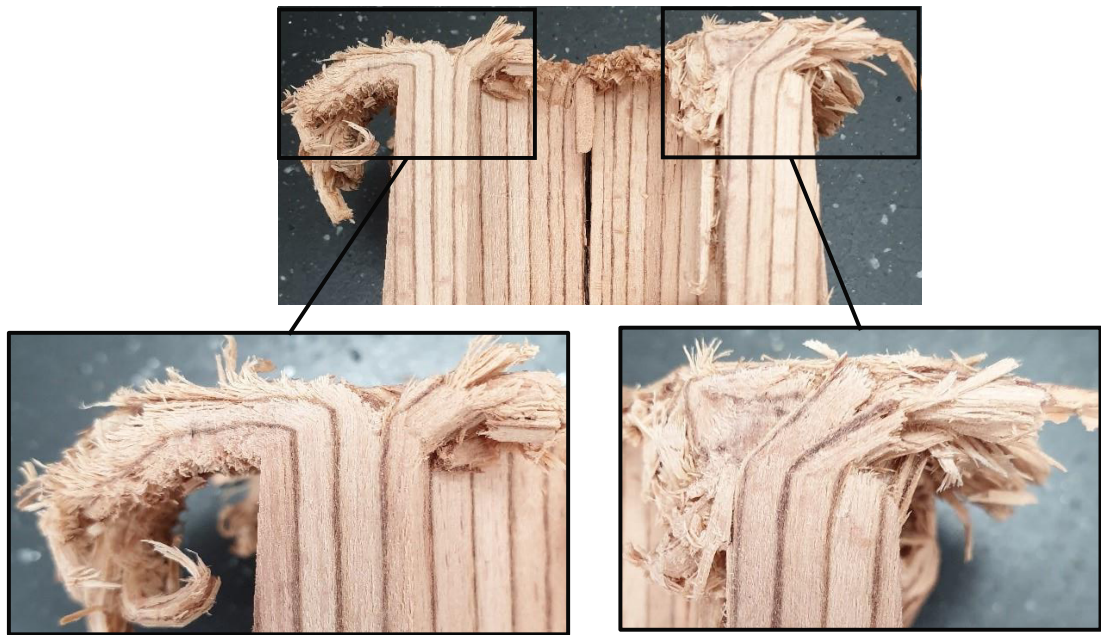


Abbildung 6-8: Längsschnitt eines belasteten Prüfelementes

Der weitere geringfügige Kraftanstieg bei maximaler Intrusion kann auf die für den Bruch einer weiteren Ebene steigende Querschnittsfläche zurückgeführt werden. Da dieses Phänomen laut [RST17] nicht bei vergleichbaren Elementen aus FKV beobachtet wurde, kann die Ursache dafür in dem Holzwerkstoff selbst oder an der kontinuierlich steigenden Wanddicke der Prüfelemente liegen. Das Splitten des Holzwerkstoffes verändert den realen Querschnitt des Prüfelementes in der Bruchfront. Das äußert sich auch in der Oszillation des mittleren Kraftniveaus. Mit der fast vollständig aufgebrauchten Belastungsenergie kann die zum Splitten benötigte Bruchspannung nicht mehr überwunden werden. Die Restenergie wird dann nur noch elastisch abgebaut.

Kegelform 1 unterscheidet sich von der Kegelform 2 nur durch den inneren Winkel β . Das Gleiche gilt auch für die Kegelformen 3 und 4. Die Streuung der Ergebnisse bei den dünnwandigeren Kegelformen 1 und 3 ist deutlich größer als bei den dickwandigeren Kegelformen 2 und 4. Das wirkt sich unmittelbar auch auf die maximale Intrusion aus, die bei den Kegelformen 2 und 4 kaum zwischen den Prüfelementen einer Form streut. In den vorangegangenen Untersuchungen (Kapitel 5.1.2) wurde ebenfalls Instabilität bei dünnwandigen Strukturen beobachtet. Es kann von einer minimalen kritischen Wandstärke S_{\min} ausgegangen werden, bei deren Unterschreitung für vorgegebene Elementdurchmesser zunächst die Streuung der Ergebnisse erhöht wird und bei weiterer Verdünnung des Elementes zur Instabilität der Form führt. Wobei bei dem Kegel keine konstante kritische Wandstärke, sondern eher die Wandstärkenänderung, die sich aus der Kombination der Winkel α und β ergibt, gemeint ist.

Bei den Kegelformen 1 – 4 wurde mit steigendem Querschnitt der Prüfelemente auch eine höhere Kraft aufgenommen. Demnach sollte das mittlere Kraftniveau bei der Kegelform 5 höher als bei den anderen Formen ausfallen. Das kann durch die aufgenomme-

nen Kraftverläufe nicht bestätigt werden. Für eine qualitative Bewertung des Zusammenhangs zwischen der Querschnittsfläche der Prüfelemente und der aufgenommenen Kraft wurden entsprechende Korrelationen grafisch (Abbildung 6-9) ausgearbeitet.

Für einen Intrusionsbereich von 10 mm bis 70 mm wird für alle Datensätze einer Kegelform eine Regressionsgerade berechnet, also ein über alle Kegel einer Kegelform mittleres Kraftniveau. Die Querschnittsfläche der Prüfelemente wird aus den theoretischen geometrischen Maßen errechnet. Mögliche produktionsbedingte Schwankungen der Abmessungen werden hier nicht berücksichtigt.

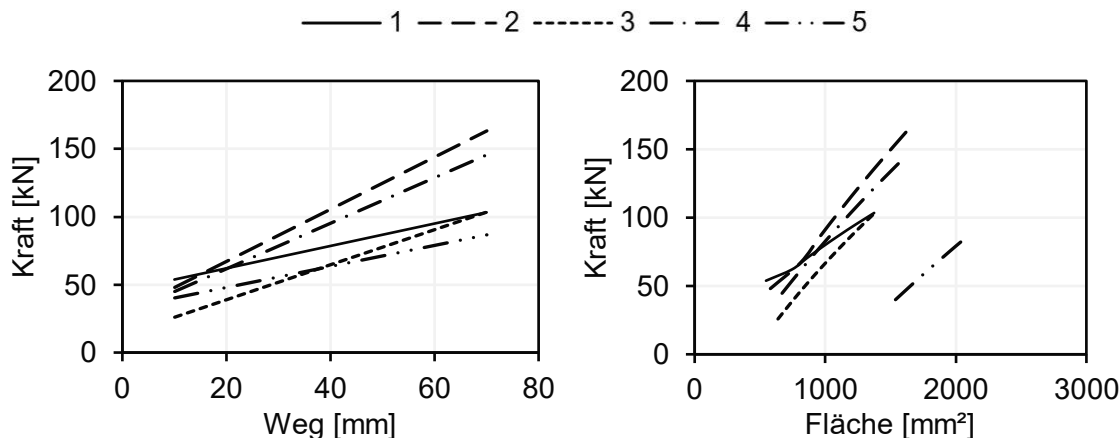


Abbildung 6-9: links: idealisierte Kraft-Weg-Diagramme zur den Ergebnissen in Abbildung 6-3 bis 6-7 (die Zahlen 1 - 5 in der Legende entsprechen den Kegelformen 1 - 5); rechts: grafische Darstellung der Korrelation zwischen der Querschnittsfläche der Prüfelemente und der aufgenommenen Kraft

In der Abbildung 6-9 (rechts) sind die gemittelten Kraft-Weg-Verläufe für alle Kegelformen dargestellt. Die Steigung der Kraft für die Kegelformen 2 und 4 (minimale kritische Wandstärke S_{\min} wird überschritten) ist höher als die der anderen Formen. Das mittlere Kraftniveau für Kegelform 5 (größter Querschnitt) liegt sogar insgesamt eher im unteren Bereich, auch im Vergleich zu der deutlich dünnwandigeren Kegelform 1.

Bei der Korrelation von Kraft und Fläche weicht die Kegelform 5 deutlich von den anderen Formen ab. Die aufgenommenen Kräfte sind unerwartet geringer im Vergleich zu der Querschnittsfläche und somit der Wanddicke des Prüfelementes. Eine reine Erhöhung der Wanddicke und somit ein höherer Materialeinsatz führen bei konstant bleibendem Außendurchmesser nicht zur Erhöhung des mittleren Kraftniveaus. Folglich muss die reale Querschnittsfläche von der theoretischen abweichen. Das lässt sich durch z. B. das gleichzeitige Absplittern größerer Bereiche erklären. Eine Änderung in der Größe der Splitter wurde nicht beobachtet, wobei diese Aussage nur anhand bereits belasteter Prüfelemente getroffen wurde. Die Splitter konnten nicht untersucht werden, da diese durch das großflächige Verteilen im Innenraum des Prüfstandes nach der Prüfung nicht mehr den jeweiligen Prüfelementen zuzuordnen waren.

Aus diesen Überlegungen kann abgeleitet werden, dass neben der minimalen kritischen Wandstärke S_{\min} auch eine maximale kritische Wandstärke S_{\max} existiert. Nach Unterschreiten von S_{\min} treten Stabilitätsprobleme auf, die zur Erhöhung der Streuung der Ergebnisse führen. Nach Überschreiten von S_{\max} treten geringfügige Veränderungen in dem Versagensverhalten auf, wodurch das mittlere Kraftniveau sinkt. Die Werte für S_{\min} und S_{\max} müssen individuell für unterschiedliche Außendurchmesser der Prüfelemente ermittelt werden.

6.1.4 Beurteilung der Demonstratoreigenschaften

Die Untersuchungen an den unterschiedlichen Kegelformen aus FSH haben gezeigt, dass Holz hinsichtlich der Energieabsorption unter Druckbelastung ausgezeichnete Eigenschaften aufweist. Neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften ist es auch aus ökologischer Sicht den bisher typischerweise im Automobil eingesetzten Werkstoffen überlegen.

Die zur Energieaufnahme effektive Form des Kegels bietet einige Vorteile gegenüber bisherigen Lösungen. Durch das Verdünnen des Materials an der Bruchfront kann der erste Impuls des Aufpralls so weit abgemildert werden, dass die Belastung für die am Unfallgeschehen beteiligten Personen reduziert werden kann.

Die Höhe des mittleren Kraftniveaus kann durch die Wanddicke der Struktur gezielt der Anforderung angepasst werden. Der übliche stufige Deformationskraftverlauf tragender Strukturen des gesamten Vorderwagens (Abbildung 4-2) kann durch einen stufenlosen Verlauf einer Struktur aus Holz abgelöst werden. Somit wird sichergestellt, dass die weiter hinten liegenden Bereiche, wie der Längsträger, nicht frühzeitig versagen. Um die Wirtschaftlichkeit von Reparaturen nach Fahrzeugkollisionen zu gewährleisten, kann eine stufenlos verlaufende Vorderwagenstruktur aus Holz auch in einzelne Abschnitte unterteilt werden, wie es bei den modernen Fahrzeugkarosserien der Fall ist. Aufgrund der einfachen Kegelform wird keine Einschränkung der Funktion einzelner Abschnitte durch die Trennung erwartet.

In dieser Arbeit stand das Erreichen der gewünschten Materialperformance im Vordergrund. Die Anbindung von Strukturen aus Holzwerkstoffen an die bestehenden Karosserien, der Schutz der Holzstrukturen vor Umwelteinflüssen, Veränderung der Materialeigenschaften über die Lebensdauer sowie die Möglichkeiten zur Massenfertigung wurden hier nicht näher betrachtet. Das geringe Gewicht von Stoßabsorptionselementen aus Holz, der einfache und energieeffiziente Herstellungsprozess (Sägen und Drehen), die kompakte Bauweise und unkomplizierte Recyclingprozesse sind weitere positive Aspekte, die den Werkstoff Holz für diese Anwendung attraktiv machen.

6.2 Sitzrückwand

Der entwickelte und gefertigte Demonstrator der Sitzrückwand aus FSH wird einer statischen Prüfung unterzogen. Die Prüfung ist an die mechanischen Anforderungen eines Fahrzeugsitzes angelehnt, die in Kapitel 4.3.2 angesprochen wird. Die dynamische Prüfung aus Kapitel 4.3.2 wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da es sich hierbei nicht um eine Einzelprüfung der Sitzrückwand handelt, sondern um die Prüfung einer Rücksitzgruppe. Die Verformung der gesamten Sitzgruppe wirkt sich auf die Belastung der Sitzrückwand aus. Eine sinnvolle Prüfung kann entsprechend nur zusammen mit einer Sitzgruppe durchgeführt werden. Das ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Die Ergebnisse der Bachelorarbeit von *Wanke* [Wan18] sind in Kapitel 6.2.1 eingeflossen.

6.2.1 Prüfstandaufbau und Prüfmethode

Da im Rahmen dieser Arbeit nicht der gesamte Fahrzeugsitz getestet wird, sondern nur ein Komponententest der Sitzrückwand durchgeführt werden soll, werden eine Prüfmethode und eine entsprechende Prüfvorrichtung entwickelt. Die Anforderungen an die Prüfung mittels statischer Belastung werden durch die Vorgaben der Automobilzulieferer definiert (Kapitel 4.3.2).

Mit der statischen Prüfung wird die Belastung durch das Knie einer 100 kg schweren Person auf der Rückseite einer umgeklappten Rückenlehne eines Rücksitzes nachgestellt (Knieprüfung). Eine entsprechende Prüfvorrichtung wurde entwickelt. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

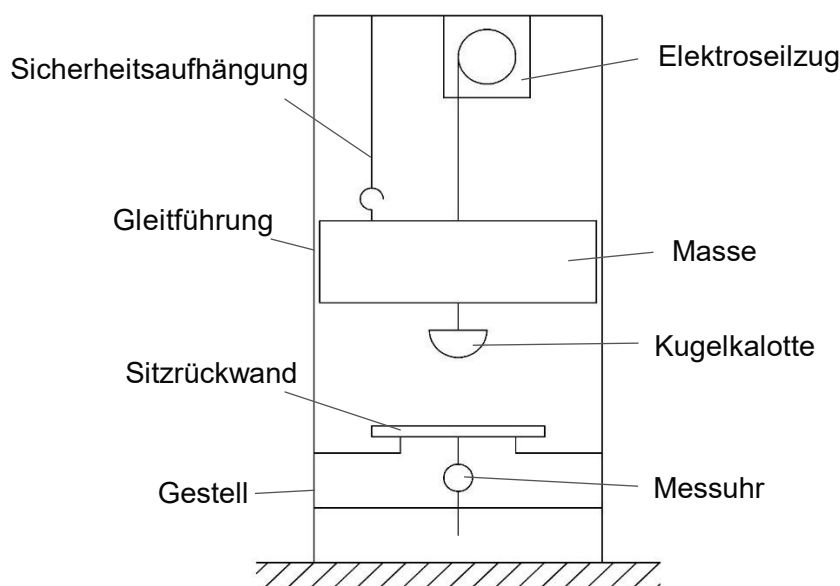


Abbildung 6-10: Konzept des Prüfaufbaus „Knieprüfung“

Eine definierte und in einer Gleitführung bewegte Masse mit einer Kugelkalotte wird definiert auf die Sitzrückwand gesetzt. Durch das Gewicht der Masse mit der Kalotte (Durchmesser 100 mm) wird die notwendige Kraft von etwa 1000 N (real: $101,77 \text{ kg} \pm 998,36 \text{ N}$ bei $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) erzeugt. Die Führung verhindert ein Kippen der Masse. Mit einer unter der Sitzrückwand angebrachten Messuhr kann die maximale Verformung der Sitzrückwand an dem Kraftangriffspunkt gemessen werden.

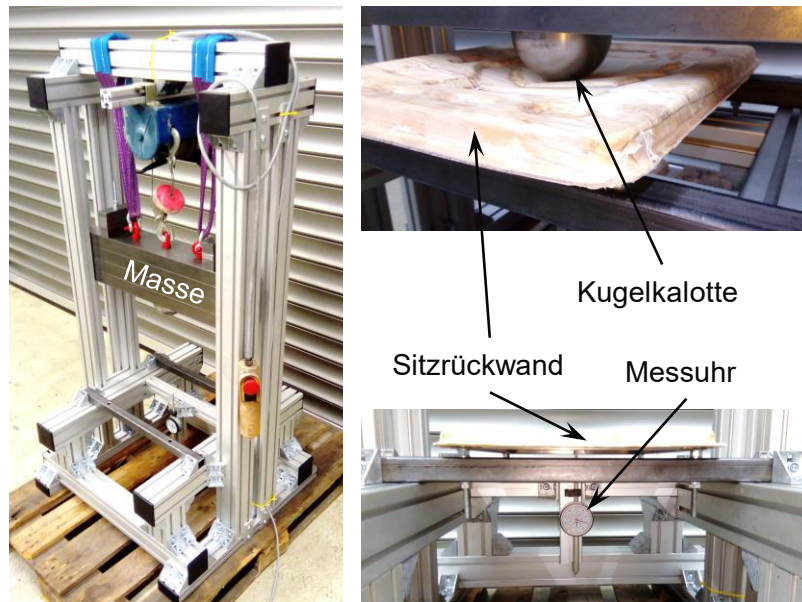


Abbildung 6-11: Prüfaufbau zur „Knieprüfung“

Die Sitzrückwand wird auf einem metallischen Rahmen gelagert, ähnlich dem in der realen Sitzstruktur (Abbildung 5-17). Eine Fixierung der Sitzrückwand wird nicht vorgenommen. Die Masse wird mithilfe eines Seilzuges mit der kleinstmöglichen Geschwindigkeit auf die Sitzrückwand aufgelegt. Die genaue Lage des Kraftangriffspunktes ist in Abbildung 6-12 angegeben.

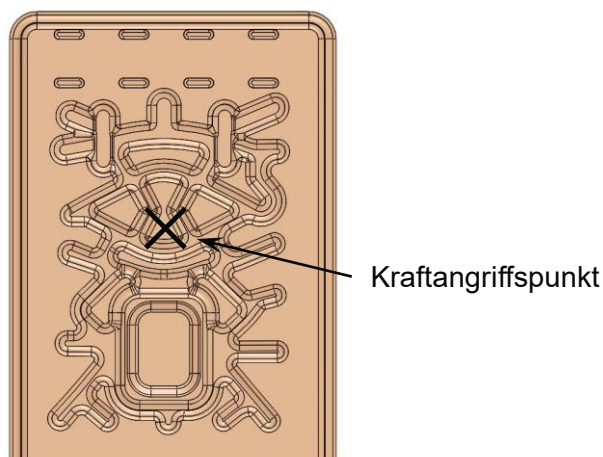


Abbildung 6-12: Lage des Kraftangriffspunktes bei der statischen Belastung

Der Demonstrator der Sitzrückwand wird wiederholt mit der Masse belastet. Die Abstände zwischen den Belastungen und die Belastungsdauer wurden so gewählt, dass keine Änderung der Verformung im statischen Gleichgewichtszustand des Gesamtsystems innerhalb einer Minute stattfindet.

6.2.2 Prüfergebnisse

Zunächst wurde der achtlagige Demonstrator in die Prüfvorrichtung eingebaut. Bereits beim Absenken des Gewichtes sind laute Geräusche aufgetreten, die auf ein Versagen der Struktur hindeuteten. Die Kalotte mit dem Gewicht konnte nicht vollständig auf der Struktur abgesenkt werden, da diese mit der Bewegung der Kalotte immer weiter versagt ist. Das Versagensbild ist in Abbildung 6-13 dargestellt.

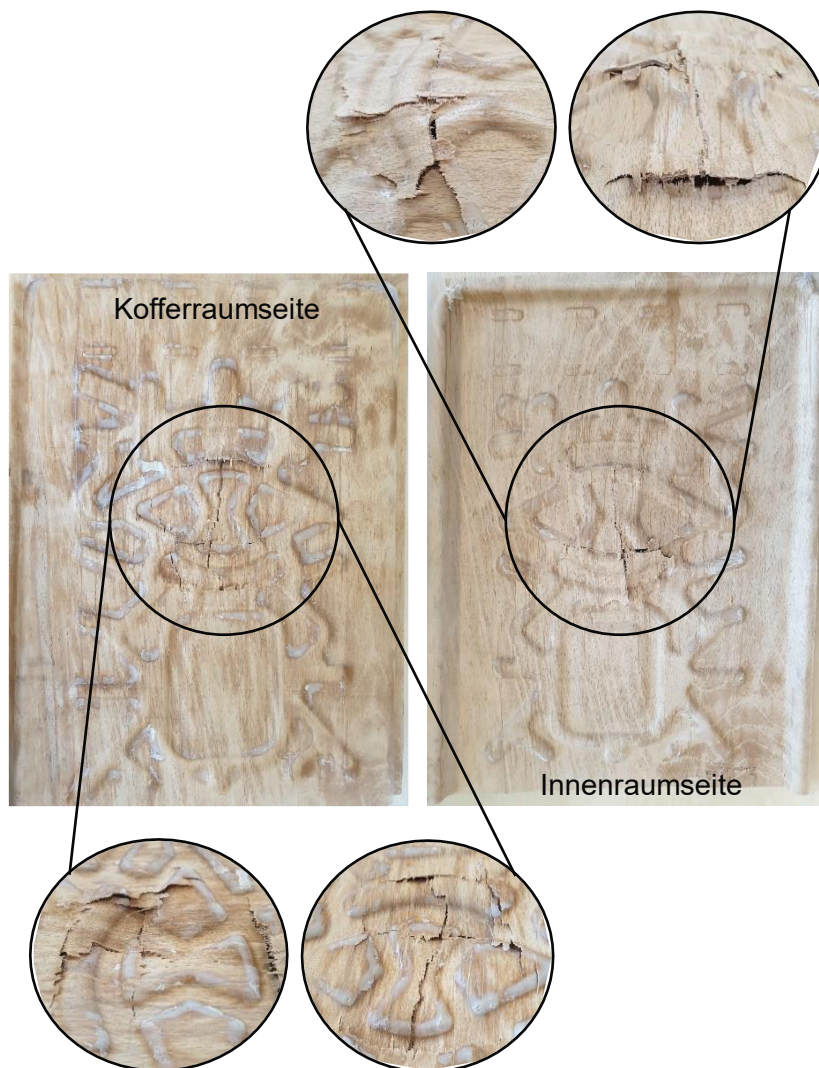


Abbildung 6-13: Achtlagiger Demonstrator der Sitzrückwand nach der statischen Belastung

Es können zwei Rissstrukturen beobachtet werden. Eine verläuft kreuzförmig um den Kraftangriffspunkt. Die anderen Risse verlaufen kreisförmig um den Kraftangriffspunkt in

einem Abstand, der etwa dem Radius der Kalotte entspricht. Es entstehen Ausbrüche, die bei Personen zu Verletzungen führen können.

Nach dem Versagen des dünnwandigen Demonstrators wurde der zehnlagige Demonstrator in die Prüfvorrichtung eingebaut. Die belastete Rückwand ist in Abbildung 6-14 gezeigt. Die Belastung erfolgt fast ausschließlich im elastischen Bereich. Es wurden im Durchschnitt von vier Messungen 9,8 mm Durchbiegung an der Belastungsstelle mittels einer Messuhr ermittelt. Durch die rheologischen Eigenschaften des Werkstoffes Holz stellt sich die maximale Durchbiegung erst nach einigen Minuten der Belastung an. Die Tiefe der Durchbiegung steigt in dieser Zeit im Bereich von 0,5 mm bis 1 mm.

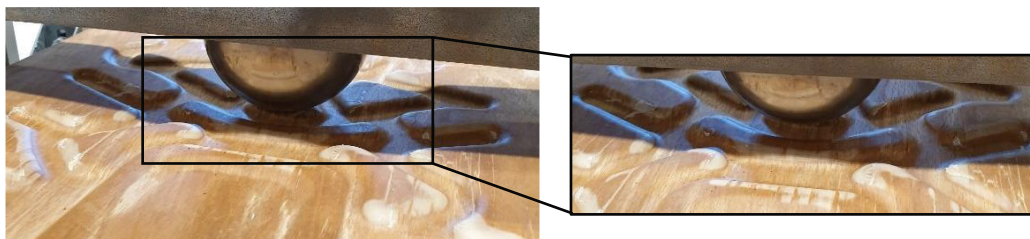


Abbildung 6-14: Statische Belastung eines zehnlagigen Demonstrators der Sitzrückwand

Nach der Entlastung bildet sich die Verformung auf etwa 0,4 mm zurück. Nach weiteren 10 Minuten verringert sich die Durchbiegung um weitere 0,1 mm. Da im weiteren Verlauf keine Änderungen festzustellen sind, können die verbleibenden 0,3 mm als dauerhafte Verformung angesehen werden. Demnach liegt der Anteil der bleibenden Verformung bei 3 %. Das Kriechverhalten des Holzwerkstoffes wirkt sich also auf das Verhalten des Demonstrators aus. Trotz mehrmaliger aufeinanderfolgender Belastungszyklen wurden keine nennenswerte Erhöhung der maximalen Durchbiegung festgestellt. Nach den Anforderungen aus Kapitel 4.3.2 liegt die bleibende Verformung bei einem Zehntel der maximal erlaubten Verformung von 3 mm. Somit gilt diese Prüfung für den zehnlagigen Demonstrator als bestanden.

Die Masse der achtlagigen Sitzrückwand beträgt 840 g und der zehnlagigen 1050 g (variiert leicht in Abhängigkeit vom Zuschnitt des Bauteilrandes). Die Referenzstruktur vom aktuellen Serienbauteil weist ein Gewicht von etwa 1150 g auf. Da nur der zehnlagige Demonstrator die statische Prüfung bestanden hat, wird nur dieses Gewicht mit dem der Referenzstruktur verglichen. Der Demonstrator erzielt somit eine Gewichtsersparnis von 9 %.

7 **Adaptieren eines Materialmodells für Nadelholz an Buchen - FSH**

Zu den wichtigen Treibern in der Automobiltechnik gehören u. a. die Beschleunigung der Produktentwicklung, die Verbesserung der Fahrzeugqualität und somit auch eine Kostenersparnis. Diese Entwicklungen werden durch den Einsatz von computergestützten Berechnungs- und Simulationsverfahren wesentlich unterstützt. Da die Holzwerkstoffe nicht im Bereich der Karosserie verwendet werden, sind entsprechende Simulationsmodelle und Materialkarten für die gängigen Softwarelösungen rar. Für die Simulationssoftware LS – DYNA wurde von Yvonne D. Murray ein Materialmodell MAT-143 (auch MAT-WOOD) für Vollholz entwickelt [Mur05], [Mur07], [Mur99]. Das MAT-143 entspricht eher einer Materialmodellsammlung, weil sowohl das elastische als auch das plastische und das Bruch- und Nachbruchverhalten mit jeweils einem anderen Materialmodell beschrieben werden.

Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten Aspekte dieses Materialmodells, sowie den Aufbau und die Validierung einer Materialkarte für FSH aus Buche. Die Ergebnisse der Studienarbeit von *Hanses* [Han18] sind in dieses Kapitel eingeflossen.

7.1 **Beschreibung des Materialmodells MAT-143 für LS – DYNA**

Die Beschreibung des Materialmodells ist ausführlich [Mur05] und [Mur07] dargestellt. Hier werden die wichtigsten Aspekte zusammengefasst. Das Materialmodell kann nur mit Solid-Elementen genutzt werden.

Materialkarte

Die Materialkarte für das Modell MAT-143 ist in Tabelle 7-1 dargestellt. Die einzelnen Parameter sind farblich in Gruppen gegliedert.

Elastisches Verhalten

Das Werkstoffverhalten wird in diesem Modell als transversal-isotrop angenommen. Das Verhalten in tangentialer (T) und radialer (R) Richtung wird nicht differenziert betrachtet. Zwar sind die Werkstoffeigenschaften in T- und R-Richtung deutlich geringer als in Faserichtung (L), das Verhältnis liegt zueinander aber bei 1:2, sodass durch die getroffene Annahme die Genauigkeit der Berechnungen abnimmt.

Das mechanische Verhalten wird mit fünf Parametern beschrieben: vier Steifigkeiten (EL, ET, GLT, GTR) und der Querkontraktion (PR). (Tabelle 7-1)

Tabelle 7-1: Materialkarte MAT-143

MAT_Wood						MAT_143	
MID	RO	NPLOT	ITERS	IRATE	GHARD	IFAIL	IVOL
MOIS	TEMP	QUAL_T	QUAL_C	UNITS	IQUAL		
EL	ET	GLT	GTR	PR			
XT	XC	YT	YC	SXY	SYZ		
GF1	GF2	BFIT	DMAX	GF1 _⊥	GF2 _⊥	DFIT	DMAX _⊥
FLPAR	FLPARC	POWPAR	FLPER	FLPERC	POWPER		
NPAR	CPAR	NPER	CPER				
AOPT	MACF	BETA					
XP	YP	ZP	A1	A2	A3		
D1	D2	D3	V1	V2	V3		
1. Material – ID und Dichte				2. Steifigkeiten und Querkontraktion			
3. Festigkeiten				4. Verfestigung bei Druckbelastung			
5. Nachbruchverhalten				6. Dehnratenabhängigkeit			
7. Simulationsparameter				8. Definition Materialachsen			
9. Parameter für vordefinierte Standardmaterialien (nicht verwendet)							

Bruchverhalten

Das Bruchverhalten eines Werkstoffes wird mit einem Bruchkriterium beschrieben. Hier wird ein komplexes Bruchkriterium genutzt, das einem modifizierten Hashin-Kriterium entspricht. Der Ursprung und die Herleitung dieses Kriteriums werden in [Has80] näher betrachtet. Es wird dabei zwischen parallelem und senkrechtem Versagen unterschieden.

Das Verhalten wird mit sechs Festigkeitsparametern beschrieben: Zugfestigkeiten parallel XT und senkrecht YT zur Faser, Druckfestigkeiten parallel XC und senkrecht YC zur Faser, SXY (S_{||}) und SYZ (S_⊥) Scherfestigkeiten in den Ebenen XY und YZ.

Bruchkriterium in Faserrichtung:

$$f_{||} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^2} \right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{||}^2} - 1 \quad X = \begin{cases} X_T & \text{für } \sigma_1 > 0 \\ X_C & \text{für } \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad (7-1)$$

Bruchkriterium senkrecht zur Faserrichtung:

$$f_{\perp} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y^2} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{\perp}^2} - 1 \quad Y = \begin{cases} Y_T & \text{für } \sigma_{22} + \sigma_{33} > 0 \\ Y_C & \text{für } \sigma_{22} + \sigma_{33} < 0 \end{cases} \quad (7-2)$$

σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} – Normal- oder Hauptspannungen

τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} – Schubspannungen

Nach diesen Bruchkriterien liegt Versagen vor, wenn $f_{\parallel} \geq 0$ oder $f_{\perp} \geq 0$ erreicht wird. Berücksichtigt wird hier auch die Spannungsinteraktion zwischen den Schubspannungen und den Zug- bzw. Druckspannungen. Damit wird der Einfluss von Schubbelastungen auf das Versagen abgebildet.

Verfestigung bei Druckbelastung

Bei Druckbeanspruchung verhält sich Holz in alle Richtungen verfestigend (Kapitel 3.2.2). Dieses nicht lineare Verhalten wird in MAT-143 durch vier Parameter hinterlegt. Die Parameter NPAR und NPER definieren die lineare Abhängigkeit der Fließfestigkeit von der maximalen Festigkeit. Die Steigung, mit der die Spannung von der Fließgrenze auf die Bruchspannung steigt, wird durch die Parameter CPAR und CPER definiert.

Neben diesen Parametern kann optional der Parameter GHARD (zwischen 0 und 1 definiert) genutzt werden. Dieser Parameter wirkt sich stark auf die Steigung der Spannung nach der Fließgrenze aus und kann zur genaueren Abbildung des Druckverhaltens eingesetzt werden.

Nachbruchverhalten

Um das Nachbruchverhalten in Abhängigkeit vom Lastfall abzubilden, ist in MAT-143 ein Degradationsmodell hinterlegt. Mit dem Modell werden die Spannungen in einem linearen Verhältnis mittels eines Schädigungsparameters reduziert (auch Entfestigung genannt). Dieses Verhalten wird mit den Entfestigungsparametern DFIT und BFIT und den Löschparametern DMAX $_{\parallel}$ und DMAX $_{\perp}$ eingestellt.

Mit den Entfestigungsparametern kann der Verlauf des Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung beim Nachversagen reguliert werden. Je kleiner die Parameter, desto größer ist die Resttragfähigkeit und desto höher die Dehnung, bei der das Element gelöscht wird.

Dieses Degradationsmodell ruft eine Netzgrößenabhängigkeit der Simulationsergebnisse hervor, da die Schädigung anhand lokaler Dehnungen eines Elementes ermittelt wird. Zum Beispiel ergeben 5 % Dehnung je nach Elementgröße eine andere lokale Verschiebung sowie eine Veränderung der Energieaufnahme. Das Gesamtergebnis wird dadurch beeinflusst.

Um die Netzgrößenabhängigkeit mit geringem Aufwand zu regulieren, werden in MAT-143 die Parameter für die Bruchenergien GF1 $_{\parallel}$, GF2 $_{\parallel}$, GF1 $_{\perp}$ und GF2 $_{\perp}$ genutzt. Diese Bruchenergien werden mit der Elementgröße verrechnet und in das Degradationsmodell als Einflussparameter auf den Schädigungsparameter integriert. Die Entfestigung wird somit netzgrößenunabhängig.

Dehnratenabhängiges Verhalten

Holz weist ein dehnratenabhängiges Verhalten auf (Kapitel 2.1.4). In MAT-143 wird dieses Verhalten mit sechs Parametern FLPAR, FLPARC, POWPAR, FLPER, FLPERC und POWPER und dem Schalter IRATE (zur Aktivierung des Dehnratenmodells) eingestellt.

Mit diesen Parametern werden die statischen Festigkeiten abhängig von der gewünschten Dehnrates des Elementes skaliert. Hierbei kann zwischen einer linearen und einer nicht linearen Skalierung gewählt werden.

7.2 Aufbau der initialen Materialkarte für FSH aus Buche

Um die ersten Simulationen durchführen zu können, wurde eine initiale Materialkarte erstellt. Dafür wurden Kennwerte zu dem untersuchten Holzwerkstoff (Kapitel 3), einige Literaturangaben für Buchenvollholz und auch im Handbuch [Mur07] empfohlene Standardparameter genutzt. Die genauen Werte sind mit Berücksichtigung entsprechender Einheiten (hier Tonnen [t], Megapascal [N/mm²], Millimeter [mm], Sekunden [s]) in Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Initiale Materialkarte

MAT_Wood					MAT_143		
MID	RO	NPLOT	ITERS	IRATE	GHARD	IFAIL	IVOL
1	8e-8	1	1	0	0	0	1
EL	ET	GLT	GTR	PR			
15000	1170	520	400	0,4			
XT	XC	YT	YC	SXY	SYZ		
140	80	4	40	7	9,8		
GF1	GF2	BFIT	DMAX	GF1⊥	GF2⊥	DFIT	DMAX⊥
42,7	3	30	0,9999	0,4	0,8	30	0,99
FLPAR	FLPARC	POWPAR	FLPER	FLPERC	POWER		
0	0	0	0	0	0		
NPAR	CPAR	NPER	CPER				
0,5	100	0,5	100				

Eine Korrektur gegenüber dem Experiment wurde bei dem Wert für die Querkontraktion PR eingeführt. Der gemessene Wert für die Querkontraktion in LT – Richtung liegt bei 0,58. Der im Modell erlaubte Wert darf nur kleiner oder gleich 0,5 sein. Zudem treten erfahrungsgemäß bei Werten über 0,4 numerische Probleme in den Simulationen auf. Der Kennwert PR wird entsprechend zunächst auf 0,4 gesetzt.

Die Werte für den Schubmodul GLT und die Scherfestigkeit SXY werden aus früheren Untersuchungen der Autorin, die nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, entnommen. Nach dem Handbuch [Mur07] muss, um numerische Probleme zu vermeiden, die Bedingung $4 * GTR \geq ET$ erfüllt sein. Der Schubmodul GTR wird somit auf 400 N/mm² festgelegt. Für die Scherfestigkeit SYZ wird nach dem Handbuch die Näherung $SYZ = 1,4 * SXY$ genutzt.

Für die Werte zum Nachbruchverhalten und der Verfestigung werden Standardwerte aus dem Handbuch genutzt. Die Dehnratenabhängigkeit wird zunächst nicht betrachtet.

7.3 Parameteranpassung der Materialkarte an Grundprüfungen

Zur Validierung des Modells mit der aufgestellten Materialkarte werden zunächst die in Kapitel 3 beschriebene Grundprüfungen (Zug, Druck, Biegung) simulativ nachgestellt. Die vernetzten Prüfkörper und Prüfaufbauten sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

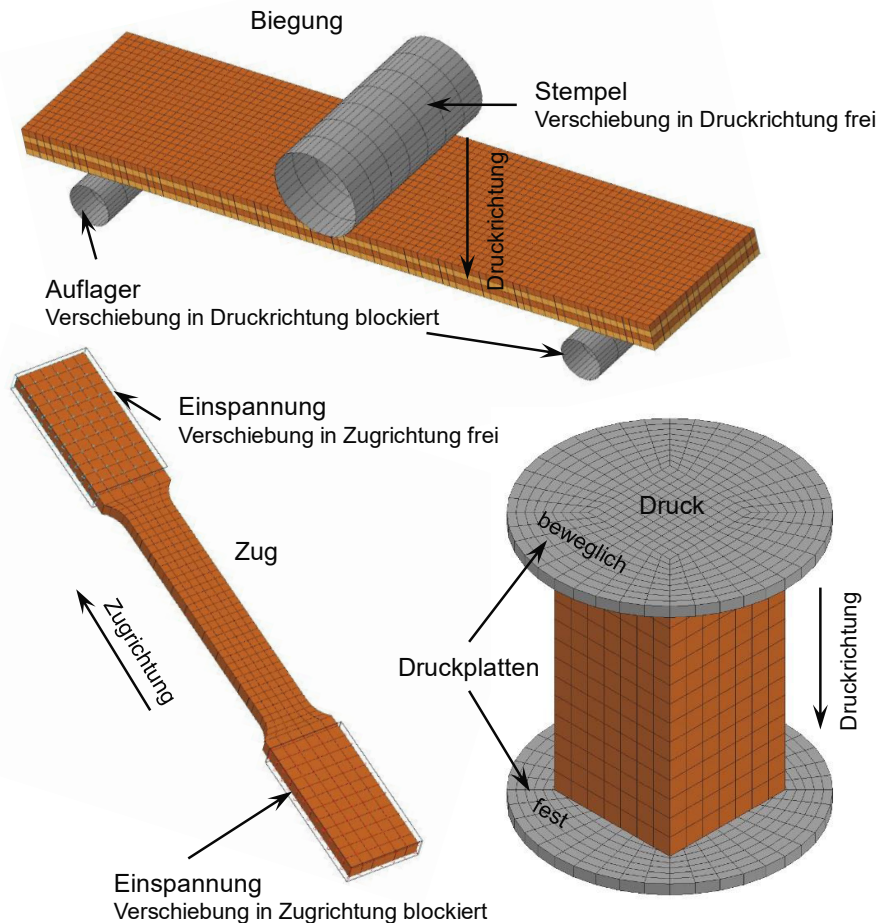


Abbildung 7-1: Modelle der Probenkörper zur Simulation der Zug-, Druck- und Biegebelastung.

Die Probenkörper und der Prüfaufbau werden aus den experimentellen Untersuchungen übernommen. Die Maschinenkomponenten wie Auflager oder Stempel werden mit Rigid-Bodys (Starrkörper: bestehen aus Elementen mit unendlich hoher Steifigkeit) modelliert. Bei der Druckprüfung wird ein automatischer Single-Surface-Kontakt für den Kontakt zwischen Druckplatten und Probenkörper mit einem Reibungskoeffizienten von 0,2 verwendet. Die Biegeprüfkörper werden aus vier Lagen modelliert. Jede Lage wird als eine eigene Komponente realisiert. Jeder Komponente wird MAT-143 zugewiesen, lediglich die Materialachsenorientierung ist verschieden. Der verwendete Klebstoff wird vernachlässigt und entsprechend nicht modelliert. Da die Lagen die gleiche Vernetzung aufweisen, wird der Kontakt zwischen den Lagen durch das Zusammenlegen von koinzidenten Elementknoten realisiert. Die Probenkörper werden mit Hexaeder-Solid-Ele-

menten diskretisiert. Die Elementgröße wird so ausgewählt, dass geometriebedingt hinreichend genau vernetzt wird. Die Prüfgeschwindigkeiten werden so skaliert, dass keine dynamischen Effekte auftreten.

Zugbeanspruchung

Bei der Zugbelastung wird zur Validierung die Belastung in 0° und 90° Faserrichtung simuliert. Da das verwendete Materialmodell von der transversalen Isotropie des Werkstoffes ausgeht, muss hier ein Kompromiss zwischen der R und der T Richtung erreicht werden. In Abbildung 7-2 wird der Unterschied zwischen der LT und LR bzw. zwischen der TL und RL Richtung in der Steifigkeit und Festigkeit deutlich. In der Materialkarte wird deswegen der Wert der höchsten Steifigkeit in LR bzw. RL Richtung genutzt.

Die Ergebnisse der Simulationen mit der initialen Materialkarte bilden die experimentellen Ergebnisse bereits gut ab. Zwei Parameter werden dennoch zur weiteren Übereinstimmung angepasst.

1. Da in 0° Richtung in den Simulationen nach dem Versagen noch ein Resttragverhalten von etwa 10 N/mm^2 vorlag, wurde die Bruchenergie auf $GF1_{\parallel} = 7 \text{ N/mm}$ reduziert. Der Wert wurde mittels einer Parametervariation (Fitting) im Bereich von 1 N/mm bis zum Ausgangswert von $42,7 \text{ N/mm}$ ermittelt.
2. In 90° Richtung wird ebenfalls ein Resttragverhalten simuliert. Zudem bildet sich bei der initialen Simulation bei 4 N/mm^2 ein Spannungsplateau aus, das bei Materialprüfungen nicht gemessen wurde und auch nicht dem spröden Bruchverhalten der Holzwerkstoffe entspricht. Durch eine weitere Parametervariation wurde die Bruchenergie von $0,4 \text{ N/mm}$ auf $GF1_{\perp} = 0,21 \text{ N/mm}$ korrigiert

Die Ergebnisse der Simulationen mit den angepassten Parametern für Bruchenergien sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Die angepasste Materialkarte wird als „Initial V2“ bezeichnet.

---- Zug 0° LT — Zug 0° LR — Simulation ---- Zug 90° TL — Zug 90° RL

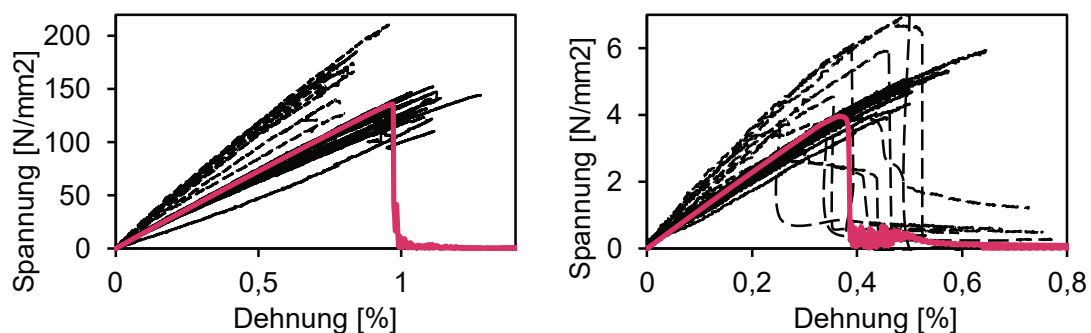


Abbildung 7-2: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen nach der Parameteranpassung - Zugbeanspruchung

Druckbeanspruchung

Bei der Simulation der Druckbeanspruchung wird die initiale Materialkarte „Initial V2“ mit den nach der Simulation der Zugbeanspruchung geänderten Parametern für die Bruchenergien genutzt. Die Materialkarte „Initial V2“ bildet das Materialverhalten unter Druckbeanspruchung in 0° Richtung (in Faserrichtung) bereits recht gut ab und in 90° Richtung (senkrecht zur Faserrichtung) sind zunächst grundlegendere Abweichungen im Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten vorhanden. Zur weiteren Übereinstimmung werden einige Parameter angepasst.

Tabelle 7-3: Zusammenfassung der Änderungen der Materialkarte bei Druckbeanspruchung

Abweichung Simulation / Experiment	Änderung in der Materialkarte	Ergebnis
0° Richtung		
Steifigkeit in der Simulation zu hoch	EL = 14.500 N/mm ² (früher 15.000 N/mm ²)	Bessere Übereinstimmung in der Steifigkeit bei Druckbelastung. Keine Differenzierung des Elastizitätsmoduls für Zug- und Druckbelastung. Achtung: Änderung des Simulationsergebnisses auch in Zugrichtung.
Festigkeit zu hoch	XC = 77 N/mm ² (früher 80 N/mm ²)	Bessere Übereinstimmung in der Festigkeit bei Druckbelastung.
Kein Versagen / Elementlöschung	CPAR = 60 (früher 100)	Versagen / Elementlöschung bei 5,3 % Schubverformung.
90° Richtung		
Festigkeit zu hoch	YC = 37 N/mm ² (früher 40 N/mm ²)	Bessere Übereinstimmung in der Festigkeit bei Druckbelastung.
Übergang zwischen dem elastischen und dem verfestigenden Verhalten stimmt nicht überein.	CPER = 5,5 (früher 100) NPER = 0,514 (früher 0,5)	Verfestigungsverlauf wird jetzt ausreichend abgebildet. Bessere Übereinstimmung im Nachversagen.

Die Änderungen aus Tabelle 7-3 werden in der Materialkarte „Initial V3“ zusammengeführt. Der graphische Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und den Simulationsergebnissen ist in Abbildung 7-3 dargestellt.

Die Steifigkeiten und Festigkeiten sowie der Spannungsverlauf bei Druckbeanspruchung können mit der Materialkarte „Initial V3“ zufriedenstellend genau abgebildet werden.

Biegebeanspruchung

Bei der Simulation der Biegebeanspruchung wird die initiale Materialkarte „Initial V3“ mit den nach der Simulation der Zug- und Druckbeanspruchung geänderten Parametern

genutzt. Zur Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Daten sind weitere Anpassungen der Parameter vorgenommen worden, die in Tabelle 7-4 zusammengefasst sind.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der Änderungen der Materialkarte bei Biegebeanspruchung

Abweichung Simulation / Experiment	Änderung in der Materialkarte	Ergebnis
Lagenaufbau 0°		
Fließbeginn bereits ab 38,5 N/mm ²	NPAR = 0,25 (früher 0,5)	Fließbeginn ab einer Spannung von 57,8 N/mm ² anstatt 38,5 N/mm ²
Steigrate der Verfestigung im Druckbereich zu groß	CPAR = 5 (früher 100)	Der Verlauf und die maximale Festigkeit wurden angepasst.
Versagen der ersten und zweiten Lage findet bei zu großer Verformung statt	GF1 = 4,5 N/mm (früher 42,7 N/mm)	Versagen / Kraftabfall bei 8,3 mm und 11,5 mm.
Lagenaufbau 90°		
Die Steifigkeit in dem simulierten Modell ist zu hoch	keine	Eine Halbierung des E-Moduls würde das Simulationsergebnis verbessern, ist aber physikalisch kein korrekter Ansatz.
Lagenaufbau 0°/90°		
Steigrate der Verfestigung im Druckbereich zu groß	NPER = 0,8 (früher 0,514)	Der Verlauf und die maximale Festigkeit wurden angepasst.
Der Versagenspunkt entspricht nicht dem Experiment	keine	Konnte nicht korrigiert werden.
Lagenaufbau ±45°		
Verhalten im Bereich des plastischen Fließens und der Versagenspunkt stimmen nicht gut überein.	SXY = 9 N/mm ² (früher 7 N/mm ²) SYZ = SXY * 1,4 SYZ = 12,6 N/mm ²	Bessere Übereinstimmung beim plastischen Fließen. Versagen bei 27 mm Weg.

Bei den Simulationen zum Lagenaufbau 0°/90° und ±45° sind auch die Änderungen aus den Simulationen zum Lagenaufbau in 0° eingeflossen. Die Biegebelastung von den experimentell untersuchten Biegeprüfkörpern konnte nach den durchgeführten Parameteranpassungen in den meisten Lagenaufbauten hinreichend genau simulativ abgebildet werden (Abbildung 7-4).

Lediglich die Versagensinitiierung beim Lagenaufbau $0^\circ/90^\circ$ und die Steifigkeit beim Lagenaufbau 90° konnten nicht nachgestellt werden. In Abbildung 7-4 sind die Simulationsergebnisse 90° mit der „Initial V3“ und der möglichen Halbierung der Steifigkeit auf $ET = 500 \text{ N/mm}^2$ dargestellt. Es ist eindeutig, dass das Materialverhalten bei dieser Prüfung maßgeblich vom Zugverhalten senkrecht zur Faserrichtung bestimmt wird.

Die Materialkarte „Initial V3“ wird nach der Parameteranpassung an Biegeprüfungen angepasst und im Weiteren als Materialkarte „Initial V4“ verwendet.

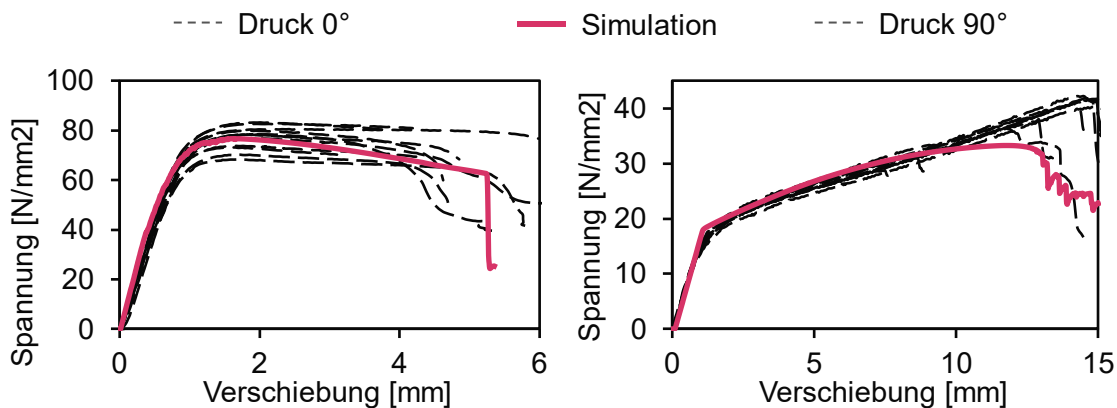


Abbildung 7-3: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen nach der Parameteranpassung – Druckbeanspruchung

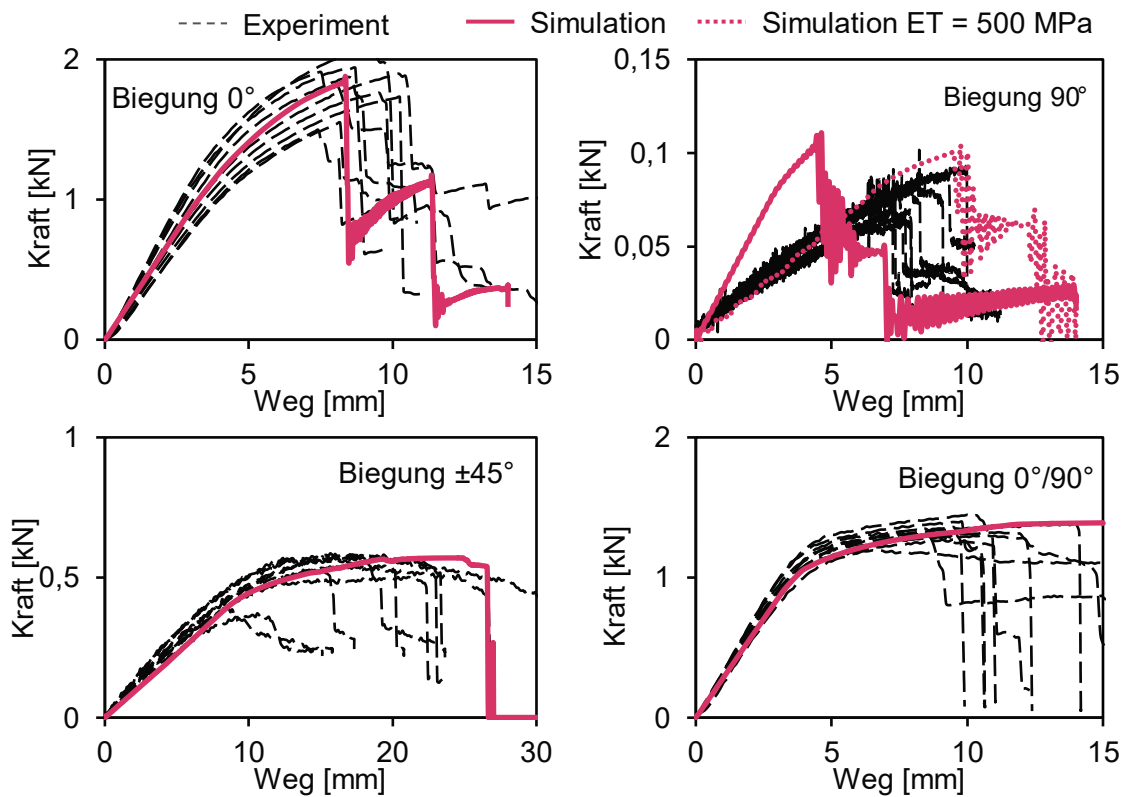


Abbildung 7-4: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen nach der Parameteranpassung - Biegebeanspruchung

7.4 Validierung des Materialmodells an den Stoßabsorptionselementen

Die erste Parameteranpassung an statischen Grundprüfungen wurde erfolgreich abgeschlossen und ist im Kapitel 7.3 beschrieben. Auf Basis dieser Anpassungen wurde die Materialkarte „Initial V4“ erstellt. Nun wird die Materialkarte an dynamisch belasteten Strukturen validiert. Zum einen wird die Eignung des Modells und der Materialkarte zur Nutzung für komplexere Strukturen geprüft, zum anderen können damit die Parameter zur Dehnratenabhängigkeit eingestellt werden.

Tabelle 7-5: Angaben zu geometrischen Merkmalen der Prüfstrukturen

Prüfstruktur	K1	K2	K3	K4
Winkel α	10°	4°	7°	7°
Winkel β	90°	90°	92°	93°
Durchmesser d	30 mm	45 mm	36 mm	36 mm
Stirnfläche A	533 mm ²	1333 mm ²	980 mm ²	980 mm ²
Auflagefläche B	3711 mm ²	2827 mm ²	2870 mm ²	2568 mm ²

Als Prüfstrukturen wurden kegelförmige Körper in Anlehnung an die Stoßabsorptionselemente aus Kapitel 5.1.2 gewählt. Die Validierung des Materialmodells wurde parallel zu der Konzeptentwicklung der Stoßabsorptionsvorrichtung durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Validierung stand die Geometrie der Demonstratoren noch nicht fest. Aus diesem Grund ist das Modell nicht an den Demonstratoren selbst validiert worden. In Abbildung 7-5 und Tabelle 7-5 sind die Geometrie der Prüfkörper und der Prüfaufbau dargestellt. Zur Reduzierung der Rechenzeit, wurde nur der obere Bereich der Prüfkörper fein vernetzt.

Die obere Druckplatte trifft mit einer initialen Geschwindigkeit von 3,4 m/s und einer Masse von 360 kg auf den Prüfkörper. Die Systemsteifigkeit des Prüfstandes wird anhand experimenteller Untersuchungen auf 1.350.000 N/mm bestimmt und als ein Federelement in das Modell eingebaut (Abbildung 7-5). Am unteren Punkt des Federelementes wird die Verschiebung blockiert. Die Bewegung der unteren Druckplatte in Druckrichtung wird freigegeben. Die Klemmvorrichtung, die den Prüfkörper am unteren Ring senkrecht zur Druckrichtung fixiert, wird ebenfalls simuliert. Eine Verschiebung der Prüfstruktur auf der unteren Druckplatte wird somit verhindert.

Die Dehnratenparameter wurden aktiviert und nach dem Handbuch [Mur07] gesetzt, da diese nicht mit den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes zusammenhängen und somit nicht experimentell zu ermitteln sind.

IRATE = 1

FL = FLPAR = FLPARC

FLPER = FLPERC

FLPER = 20 * FLPAR

POWPAR = POWPER = 0

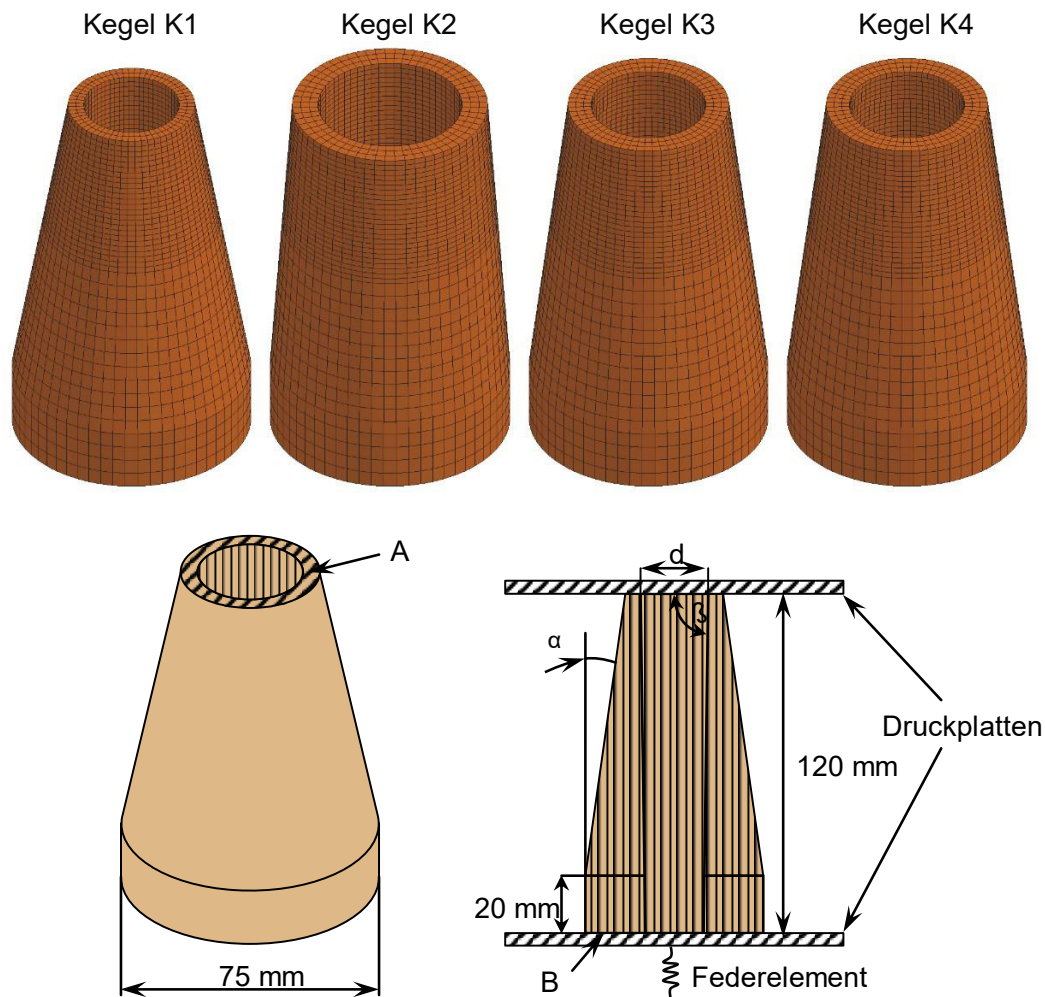


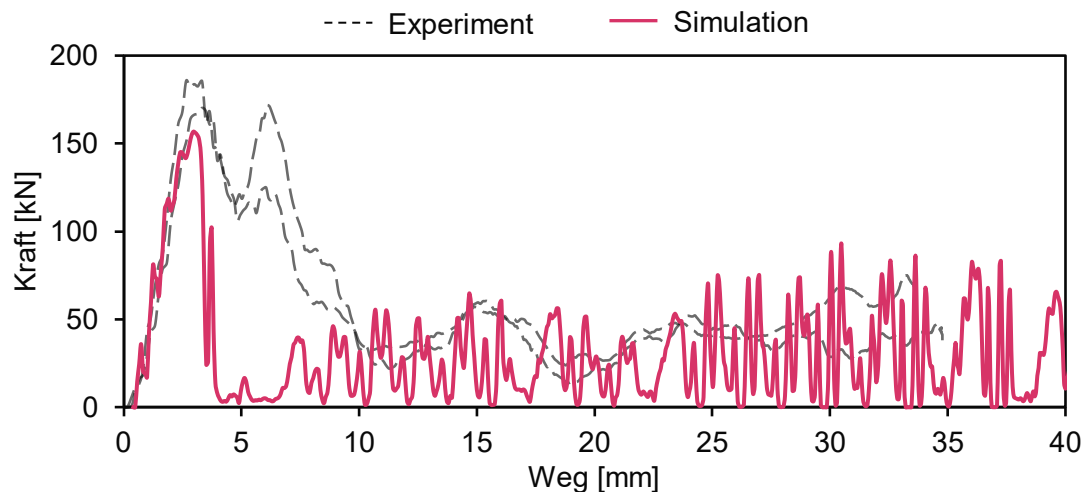
Abbildung 7-5: Vernetzung und Geometrie der Strukturen sowie der Prüfaufbau

Um den Wert für den Parameter FL zu ermitteln, wurde zuerst die Belastung des Kegels K2 simuliert. Durch Parameteranpassung von FL wurde die Höhe des ersten Kraftpeaks auf ca. 165 kN eingestellt. Der entsprechende Wert liegt bei $FL = 0,000016$.

Zwar kann der Kraftpeak so exakt eingestellt werden, der darauffolgende Kraftverlauf schwankt aber stark und bildet nicht annähernd das reale Materialverhalten ab. Die einzelnen Kraftpeaks erreichen das Niveau der experimentellen Daten, also wird die Festigkeit einzelner Elemente entsprechend der Dehnrateskaliert. Das ständige Absinken der Kraft ist auf sprödes Elementlöschen unmittelbar nach Erreichen der Elementfestigkeit zurückzuführen.

An einigen 1-Element-Tests wird deutlich, dass zwar die Festigkeiten mit der Dehnrateskaliert werden, das Nachversagen aber nicht. Daraus folgt, je höher die Dehnrates, desto spröder ist das Bruchverhalten. Die für das Resttragverhalten verantwortlichen Bruchenergien müssen zur Lösung der Fragestellung ebenfalls mitskaliert werden. Diese Skalierung ist in dem vorliegenden Modell nicht vorgesehen und wird daher durch die Anpassung der Simulationsparameter gelöst.

Um einen Ansatzpunkt für die Skalierung der Bruchenergien zu erhalten, werden die Prüfgeschwindigkeiten betrachtet. Zwischen der statischen und dynamischen Belastung wird die Geschwindigkeit etwa um den Faktor 33 erhöht. Nun werden auch die Bruchenergien um diesen Faktor erhöht, da die Anpassung mit der Geschwindigkeitsänderung einhergeht. Die geänderten Werte sind in Tabelle 7-6 zusammengefasst.

**MAT_Wood****MAT_143**

FLPAR	FLPARC	POWPAR	FLPER	FLPERC	POWER
0,000016	0,000016	0	0,00032	0,00032	0

Abbildung 7-6: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen – Kegel K2 mit den eingestellten Parametern zur Dehnratenabhängigkeit

Tabelle 7-6: Skalierung der Bruchenergien für die dynamische Simulation

Parameter	GF1	GF2	GF1 _⊥	GF2 _⊥
Initial V4	4,5 N/mm	3 N/mm	0,21 N/mm	0,8 N/mm
Dynamisch	148,5 N/mm	99 N/mm	6,93 N/mm	26,4 N/mm

Die Ergebnisse der erneut durchgeführten Simulationen sind in Abbildung 7-7 (schwarzer Verlauf) dargestellt. Die Skalierung der Bruchenergien hat einen deutlich regelmäßigeren Kraftverlauf zur Folge und somit eine bessere Abbildung des Resttragverhaltens.

Ein weiterer einzustellender Parameter zur besseren Abbildung des realen Versagensverhalten ist $DMAX_{||}$. Die Änderung dieses Parameters von 0,9999 auf 0,99 ergibt eine höhere Dehnung, bei der ein Element versagt. Die Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen wird dadurch nochmals erhöht (Abbildung 7-7, roter Verlauf). Der maximale Weg liegt sowohl in der Simulation als auch im realen Verlauf bei 35 mm, die aufgenommene Energie bei ca. 2 kJ.

Das Versagensverhalten der simulierten Struktur ist deutlich duktiler geworden. Die Elemente werden nicht mehr abrupt gelöscht, sodass keine schlagartigen Kraftabfälle mehr

stattfinden. Dieses simulierte Verhalten bildet das reale Versagensverhalten deutlich besser ab (Abbildung 7-8).

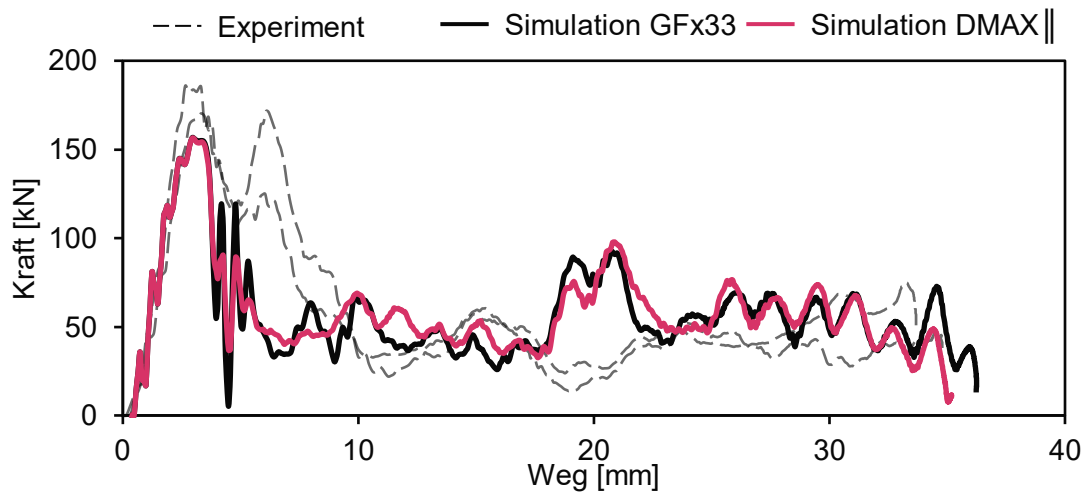


Abbildung 7-7: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen – Kegel K2 mit den skalierten Bruchenergien und DMAX||

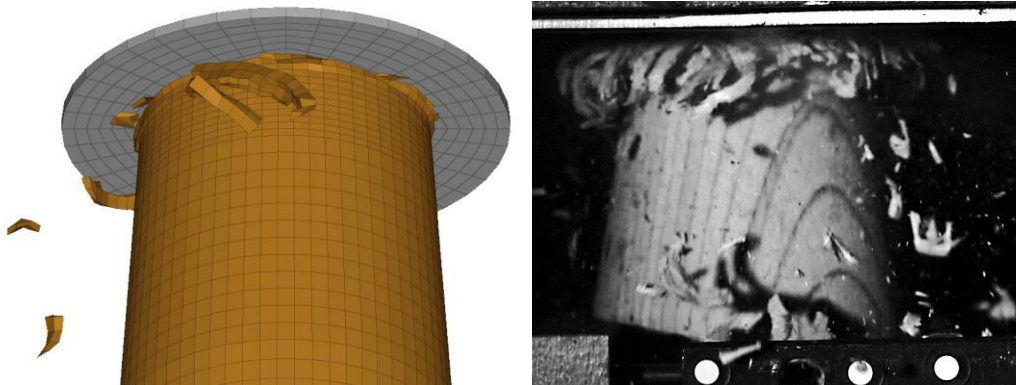


Abbildung 7-8: Versagensverhalten in der Simulation und reales Versagen

Mit der nun angepassten Materialkarte werden auch die Kegel K1, K3 und K4 simuliert. Die Höhe des ersten Kraftpeaks wird bei allen Kegeln realitätsnah abgebildet. Der maximale Weg wird zum Teil überschritten, die aufgenommene Energie unterschritten. Um das Simulationsergebnis weiter zu verbessern, wird der Parameter FL auf $FL = 0,00002$ angepasst. Die Simulationsergebnisse für alle Kegelformen im Vergleich zu den experimentellen Daten sind in Abbildung 7-9 dargestellt.

Tendenziell kann mit diesem Modell das reale Verhalten bis etwa 30 mm Weg gut abgebildet werden. Danach weicht das Kraftniveau in der Simulation stärker ab. Die Abbildung des zweiten Kraftpeaks konnte durch die Parameteranpassung bis auf K1 nicht erreicht werden.

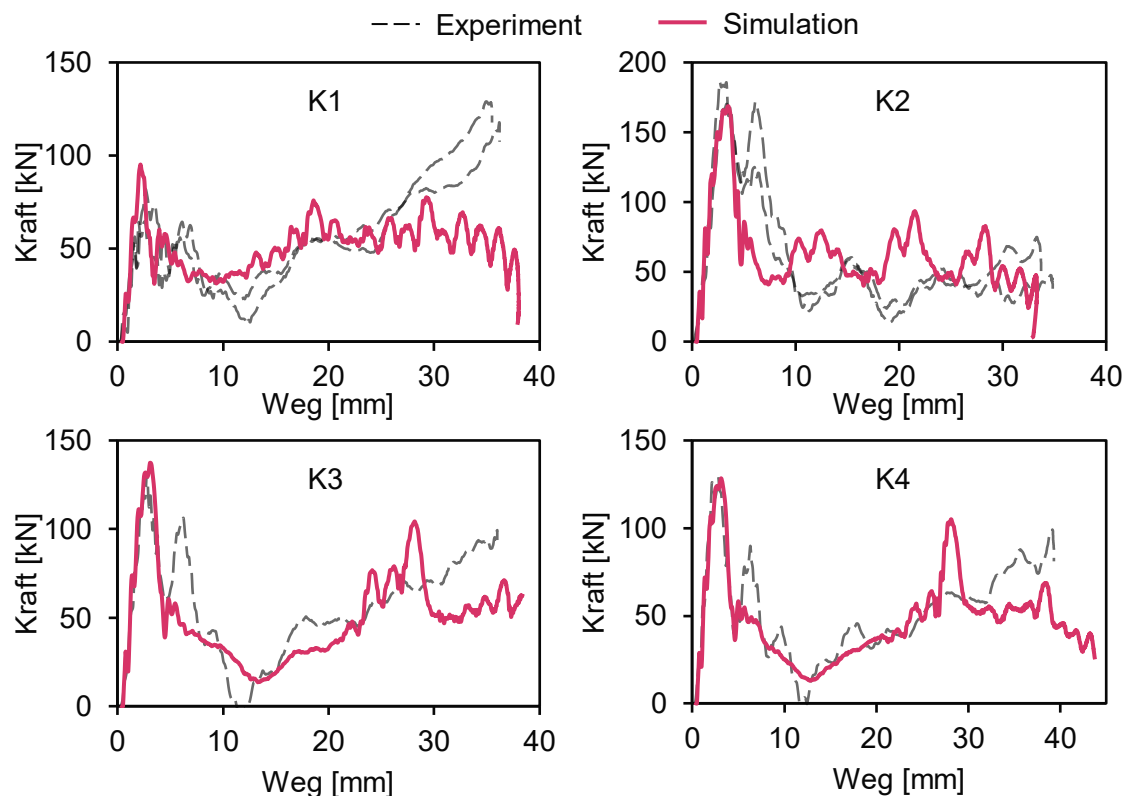


Abbildung 7-9: Graphischer Vergleich zwischen den experimentellen Untersuchungen und Simulationsergebnissen – Kegel K1, K2, K3, K4

7.5 Finale Materialkarte für FSH aus Buche

Da die zur Simulation des dynamischen Versagensverhaltens erforderliche Skalierung der Bruchenergien nicht in dem vorliegenden Materialmodell implementiert ist, werden zwei finale Materialkarten erstellt. In Tabelle 7-7 ist die Materialkarte zur Simulation des Materialverhaltens bei quasistatischer Belastung dargestellt. Diese Materialkarte wurde anhand quasistatischer Zug-, Druck- und Biegeprüfungen erstellt.

Die Werte für die Bruchenergien (GF) wurden ebenfalls an den quasistatischen Grundprüfungen angepasst. Um die Bruchenergien genauer zu bestimmen, können standardisierte bruchmechanische Prüfungen durchgeführt werden.

In Tabelle 7-8 ist die Materialkarte zur Simulation des Materialverhaltens bei dynamischer Belastung dargestellt. Die im Vergleich zur quasistatischen Materialkarte geänderten Werte für die Parameter zur Dehnratenabhängigkeit und Bruchenergien sind unterstrichen.

Die ermittelten Parameter können nur für die Simulationen mit den in Kapitel 7.4 untersuchten Dehnraten genutzt werden, da ein manuelles Anpassen der Bruchenergien vorgenommen wurde. Diese Parameter müssen für andere Dehnraten entsprechend erneut angepasst werden.

Tabelle 7-7: Materialkarte MAT-143 für Simulationen mit quasistatischer Belastung

MAT_Wood					MAT_143		
MID	RO	NPLOT	ITERS	IRATE	GHARD	IFAIL	IVOL
1	8e-8	1	1	0	0	0	1
EL	ET	GLT	GTR	PR			
14500	1170	520	400	0,4			
XT	XC	YT	YC	SXY	SYZ		
140	77	4	37	9	12,6		
GF1	GF2	BFIT	DMAX	GF1 _⊥	GF2 _⊥	DFIT	DMAX _⊥
4,5	3	30	0,99	0,21	0,8	30	0,99
FLPAR	FLPARC	POWPAR	FLPER	FLPERC	POWPER		
0	0	0	0	0	0		
NPAR	CPAR	NPER	CPER				
0,25	5	0,8	5,5				

Tabelle 7-8: Materialkarte MAT-143 für Simulationen mit dynamischer Belastung

MAT_Wood					MAT_143		
MID	RO	NPLOT	ITERS	IRATE	GHARD	IFAIL	IVOL
1	8e-8	1	1	<u>1</u>	0	0	1
EL	ET	GLT	GTR	PR			
14500	1170	520	400	0,4			
XT	XC	YT	YC	SXY	SYZ		
140	77	4	37	9	12,6		
GF1	GF2	BFIT	DMAX	GF1 _⊥	GF2 _⊥	DFIT	DMAX _⊥
<u>148,5</u>	<u>99</u>	30	0,99	<u>6,93</u>	<u>26,4</u>	30	0,99
FLPAR	FLPARC	POWPAR	FLPER	FLPERC	POWPER		
<u>0,00002</u>	<u>0,00002</u>	0	<u>0,0004</u>	<u>0,0004</u>	0		
NPAR	CPAR	NPER	CPER				
0,25	5	0,8	5,5				

7.6 Schwächen und Potenziale des Materialmodells MAT-143 für Simulationen im Automobilbereich

In dem Materialmodell MAT-143 sind einige für Holzwerkstoffe wichtige Zusammenhänge zum Versagensverhalten implementiert. Dazu gehört das elastische Werkstoffverhalten, die Verfestigung bei Druckbelastung, die Dehnratenabhängigkeit und das Nachbruchverhalten.

Das elastische Verhalten wird unter der Annahme der transversalen Isotropie abgebildet. Das stellt nach den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen für den Buchen FSH eine zu große Idealisierung dar. Dadurch kann es zu Unter- oder Überschätzung des Materials in den Simulationen kommen. Auch bei der Modellierung des Versagensverhaltens durch die modifizierten Hashin-Kriterien können durch die gleiche Idealisierung Abweichungen auftreten.

Die Verfestigung bei Druckbeanspruchung kann mit diesem Modell mit den vorliegenden Parametern übereinstimmend nachgestellt werden. Die rheologischen Eigenschaften der Holzwerkstoffe (z. B. Kriechen, Spannungsrelaxation) werden mit diesem Modell nicht abgebildet.

Bei der Abbildung des dehnratenabhängigen Verhaltens wird die Festigkeit abhängig von der Dehnrateskaliert. Die Entfestigung des Materials wird durch ein elementgrößenunabhängiges Degradationsmodell bis hin zur Elementlöschung modelliert. Das Nachversagen (repräsentiert durch die Bruchenergien) wird dabei nicht skaliert, sodass ein sprödes und nicht realitätsnahes Elementversagen auftritt. Das muss bei Simulationen des dynamischen Versagens berücksichtigt werden. Mit den manuellen Anpassungen der Bruchenergien wurden teilweise zufriedenstellende Übereinstimmungen zum realen Versagensverhalten von kegelförmigen Strukturen erreicht.

Die Notwendigkeit, mit Solid-Elementen zu agieren, kann bei diesem Materialmodell ebenfalls nachteilig sein. Die Wahl der diskretisierten Elemente hat eine erhebliche Auswirkung auf die Berechnungsdauer einer Simulation. Vor allem im Automobilbau werden dünnwandige Bauteile in expliziten FEA durch 2D-Shell-Elemente diskretisiert, da dadurch die Berechnungszeit deutlich reduziert werden kann.

Das MAT-143 bietet eine gute Möglichkeit, das Materialverhalten des untersuchten Holzwerkstoffes abzubilden, bedarf aber weiterer Untersuchungen zur Implementierung anderer Verhaltensweisen des Materials und Anpassungen durch Validierung an komplexeren Strukturen und anderen Lastfällen.

8 Bewertung des untersuchten Holzwerkstoffes für den prinzipiellen Einsatz im Automobil und die Formulierung forschungsrelevanter Herausforderungen

Die Motivation für die vorliegende Arbeit lieferte das immer stärker werdende Bedürfnis der Gesellschaft nach nachhaltiger Technik und Werkstoffnutzung im Sinne der Werterhaltung unseres Planeten. Der Einsatz nachwachsender Werkstoffe in weiteren Anwendungsbereichen, die bisher deutlich von anderen Werkstoffgruppen dominiert werden, wird als ein wichtiger Schritt in diese Richtung angesehen. Daneben wird auch der Druck zur Entwicklung weiterer Leichtbaumaßnahmen in der Automobilindustrie immer stärker. Auch hier bildet die Nutzung von Leichtbauwerkstoffen, zu denen auch die nachwachsenden Werkstoffe zählen, einen wichtigen Baustein. Moderne Holzwerkstoffe erreichen spezifische mechanische Eigenschaften, die zum Teil im Bereich der metallischen und auch faserverstärkten Werkstoffe liegen. Mit einer Dichte von $0,3 \text{ g/cm}^3$ bis $1,5 \text{ g/cm}^3$ ermöglichen sie ein breites Anwendungsspektrum für viele technische Anwendungen und stellen somit eine interessante Alternative dar.

Eine besondere Bedeutung unter den Holzwerkstoffen stellt das Furnierschichtholz (FSH) dar. Durch den schichtweisen Aufbau können die Eigenschaften homogenisiert werden oder durch die gezielte Lagenorientierung die mechanischen Eigenschaften entsprechend der Belastung ähnlich wie bei FKV angepasst werden. Der in dieser Arbeit untersuchte FSH aus Buche weist ähnliche Eigenschaften unter Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung wie Vollholz auf. Die Festigkeit und die Steifigkeit in Faserrichtung können bis zum 36-fachen bzw. 15-fachen der Werte senkrecht zur Faserrichtung betragen. Eine eindeutige Abhängigkeit der Eigenschaften von der Lagendicke der Furniere konnte hingegen nicht festgestellt werden.

Vor allem unter Druck- und Biegebeanspruchung sind die spezifischen Eigenschaften dieses FSH denen der anderen Materialien überlegen. Das Energieaufnahmevermögen ist bereits bei einfachen Strukturen beachtlich und liegt mit 17 kJ/kg bei nicht optimierten Strukturen bereits auf dem Niveau der metallischen Werkstoffe. Bei der spezifischen Biegesteifigkeit werden sogar die Kennwerte von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erreicht. Die Festigkeiten sowohl bei Druck- als auch bei Biegebeanspruchung können durch die Varianz der Klebstoffe verändert werden. Die höchsten Kennwerte wurden bei Probenkörpern mit Einsatz eines Epoxidharzklebstoffes ermittelt. Die epoxidharzbasierten Klebstoffe erhöhen die Festigkeit der gesamten Struktur, dabei wird das Strukturverhalten nicht spröder.

Diese Erkenntnisse wurden im Rahmen der Demonstratorentwicklung bestätigt. Als Demonstratoren wurden zwei Bauteile aus der Fahrzeugkarosserie ausgewählt: der Crashabsorber aus dem Bereich des Vorderwagens und eine Sitzrückwand eines Rücksitzes. Bei dem Crashabsorber handelt es sich um ein Bauteil, das primär zur Energieaufnahme

durch axiale Druckbelastung während einer Fahrzeugkollision genutzt wird. Die Sitzrückwand wird statisch auf Biegung belastet und schützt Personen vor ungesicherter Ladung aus dem Fahrzeugkofferraum.

Die dafür benötigte hohe Steifigkeit der Struktur wird wie bei der Referenzstruktur aus metallischen Werkstoffen durch das Einbringen von Sickenstrukturen erreicht. Die geometrischen und fertigungstechnischen Randbedingungen zur Sickenausbildung in FSH wurden ermittelt und bei der Entwicklung des Demonstrators berücksichtigt. Der gefertigte Demonstrator aus FSH wurde statisch belastet und hat die an ihn gestellten statischen Anforderungen erfüllt. Bei dem Demonstrator aus FSH wurde im Vergleich zur metallischen Referenzstruktur eine Gewichtsersparnis von 100 g erreicht, was einer Reduktion des Gewichtes von etwa 9 % entspricht.

Für den Demonstrator des Crashabsorbers wurde zunächst eine Bauteilform ermittelt, die sich besonders gut zur Aufnahme von Belastungsenergie bei Druckbelastung eignet. Bei der Form eines Kegels entsteht ein kontinuierlich progressives Versagensverhalten mit einer definierten Bruchfront. Durch die Skalierung der Dimensionen der Kegelform und einer Aushöhlung des inneren Bereiches entsteht eine Struktur, deren Eigenschaften durch eine gezielte Einstellung der Wanddicke bzw. der Wanddickenänderung an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden können. Das bei einer axialen Belastung sich ausbildende mittlere Kraftniveau ist bei den entwickelten Demonstratoren aus FSH nicht konstant, sondern leicht linear steigend. Hieraus können alternative Vorwiderlagen – Konzepte hinsichtlich des Deformationskraftverlaufes entwickelt werden. Bei dem Demonstrator des Crashabsorbers aus FSH wurde eine Gewichtsersparnis von etwa 90 % gegenüber der metallischen Referenzstruktur erreicht. Mit einem Gewicht von 100 g erreicht der Demonstrator mit „Leichtigkeit“ die gestellten Anforderungen.

Um die Auslegung von Bauteilen und Strukturen aus Holzwerkstoffen zu beschleunigen, werden zuverlässige Simulationswerkzeuge und Materialkarten benötigt. Die vorhandenen Werkzeuge sind nicht universell für alle Holzarten, alle Belastungsfälle und Bauteilgruppen geeignet. In dieser Arbeit wurde das Materialmodell MAT-143 für LS-Dyna genauer betrachtet. Dafür wurde eine Materialkarte für FSH aus Buche erstellt und an Grundprüfungen und Strukturtests validiert. Das Materialmodell beschreibt wichtige Zusammenhänge zum Versagensverhalten von Holzwerkstoffen zuverlässig. Die Annahme der transversalen Isotropie ist dafür eine zu grobe Idealisierung. Die rheologischen Eigenschaften werden nicht abgebildet und das dehnratenabhängige Verhalten nur unzureichend. Die Notwendigkeit, mit Solid-Elementen zu agieren, ist in vielen Fällen zu zeitintensiv. Hier besteht daher ein weiterer intensiver Entwicklungsbedarf.

Einige offene Fragen ergeben sich beim Einsatz von Holzwerkstoffen wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber den Umwelteinflüssen. Zwar gilt diese Problematik auch für metallische Werkstoffe, da kann dem aber mit vergleichsweise einfachen Beschichtungssystemen effizient begegnet werden. Auch bei den Holzwerkstoffen kann die gewünschte Witterungsbeständigkeit durch langlebige angepasste Beschichtungssysteme

(physikalischer oder chemischer Holzschutz) erreicht werden. Diese Beschichtungssysteme sind aber besonders kosten- und zeitintensiv und müssen für einen Großserieneinsatz geprüft und ggfs. optimiert werden. Diese Holzschutzsysteme können außerdem Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Holzwerkstoffes haben, die bisher von den entsprechenden Experten nicht ausreichend untersucht wurden.

Bei genauerer Betrachtung der im Holzbereich möglicher Fertigungs- und Montageprozesse sind kaum Restriktionen zu erwarten. Sowohl spanende Fertigung als auch klebtechnisches Fügen von Bauteilen aus Furnierlagen ist unter Beachtung einiger Regeln (z. B. Biegeradien) möglich. Die Anbindung von Holzwerkstoff-Bauteilen an Strukturen aus anderen Materialien (z. B. bei der Anbindung an die bestehende Karosserie) kann sowohl durch klebtechnisches Fügen als auch über z. B. Arretierungen, Bolzen oder Halterungen erfolgen, die zwischen den Furnierlagen im Fertigungsprozess eingebracht werden können.

9 Literaturverzeichnis

- [AMHS03] Abosbaia, A.A.S., Mahdi, E., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.B. (2003). *Quasi-static axial crushing of segmented and non-segmented composite tubes*. Composite Structures Volume 60, Issue 3 S. 327 – 343. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00341-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00341-0)
- [Ans97] Anselm, D. (1997). *Die PKW-Karosserie: Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung* (1. Auflage). Würzburg: Vogel Verlag. ISBN 3-8023-1706-8
- [Bae15] Baensch, F. (2015). *Damage evolution in wood and layered wood composites monitored in situ by acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy*. Dissertation, ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010411928>
- [Bau17] www.bauhandwerk.de (2017). http://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Holzfeuchte_richtig_messen_1400532.html. Zuletzt aufgerufen am 14.12.2017
- [BCCP02] Byskov, E., Christoffersen, J., Christensen, C., D., Poulsen, J., S., (2002). *Kinkband formation in wood and fiber composites - morphology and analysis*. International Journal of Solids and Structures 39, S. 3649 – 3673. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00174-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00174-9)
- [Bic19] Bicke, S. (2019). *Dimensionsstabile und pilzresistente Furnierwerkstoffe durch Zellwandmodifizierung mit niedermolekularem Phenol-Formaldehyd*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- [BJ93] Bodig, J., Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company. ISBN 0–89464–777–6
- [BP11] Buchelt, B., Pfriem, A. (2011). *Influence of wood specimen thickness on its mechanical properties by tensile testing: solid wood versus veneer*. Holzforschung, Vol. 65, S. 249 - 252. <https://doi.org/10.1515/hf.2011.032>
- [Bra07] Braess, H.-H. (2007). *Automobildesign und Technik* (1. Ausg.). (S. Ulrich, Hrsg.) Wiesbaden: Vieweg Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9411-3>
- [BSWN15] Buchelt, B., Siegel, C., Wagenführ, A., Nendel, W. (2015). *Furnier-Prepreg – biobasiertes Halbzeug für thermoplastische Verarbeitungsverfahren*. Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology, 06/2015, S. 355 – 374

- [BW08] Buchelt, B., Wagenführ, A. (2008). *The mechanical behaviour of veneer subjected to bending and tensile loads*. European Journal of Wood and Wood Products 66, S. 289-294. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0235-7>
- [DN02] Dunky, M., Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime: Holzwerkstoffe und Leime*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-62754-5
- [Doc07] Doctorow, C. (2007). *Wooden car with split modern/vintage personality*. Zuletzt aufgerufen am 28.08.2017, <http://www.boingboing.net/2007/11/23/wooden-car-with-spli.html>
- [Dol13] Dolezal, F. (2013). *Ökobilanzierung von Holzprodukten – Methodik und Beispiele*. 19. Internationales Holzbau-Forum
- [Duc16] Ducker Worldwide (2016). *The Road Ahead - Automotive Materials*. Veröffentlicht bei: www.statista.com
- [ENP11] Esteves, B., Nunes, L., Pereira, H. (2011). *Properties of furfurylated wood (Pinus pinaster)*. Eur. J. Wood Prod. 69, S. 521 – 525. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0480-4>
- [Fan06] Fanmercedesbenz.com. 2006 Mercedes-Benz RECY. Zuletzt aufgerufen am 28.08.2017, <https://www.fanmercedesbenz.com/2006-mercedes-benz-recy/>
- [Fei12] Feindler, N. (2012). *Charakterisierungs- und Simulationsmethodik zum Versagensverhalten energieabsorbierender Faserverbundstrukturen*. Dissertation, Technische Universität München. ISBN 978-3-8439-1557-1
- [Fli08] flickriver.com (2008). <http://www.flickriver.com/photos/mitopencourseware/popular-interesting/>. Bildtitel: Cross-section of a Tree Trunk. Herausgeber: MIT OpenCourseWare
- [Fri13] Friedrich H. E. (2013). *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1467-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2110-2>
- [FWS+18] Frey, M., Widner, D., Segmehl, J. S., Casdorff, K., Keplinger, T., Burgert, I. (2018). *Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering*. ACS applied materials & interfaces 2018, 10, S. 5030 – 5037. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18646>
- [GA97] Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids*. Cambridge Univ. Press. ISBN 0-521-49560-1
- [Gla04] Glaser, O. (2004). Patent AT501113B1: *Elektrisch leitfähiges Holz und Holzwerkstoffe sowie Verfahren zur Vorsehung elektrischer Leitfähigkeit bei Holz und Holzwerkstoffen*.
- [Gri99] Grimsel, M. (1999). *Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes*. Dissertation, Technische Universität Dresden. ISBN 3-933592-66-6

- [Gro05] Grosse, M. (2005). *Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- [Har02] Harrington, J. (2002). *Hierarchical modelling of softwood hygro-elastic properties*. Dissertation an der University of Canterbury.
- [Has80] Hashin, Z. (1980). *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. J. Appl. Mech. Volume 47, Issue 2, S. 329–334.
<https://doi.org/10.1115/1.3153664>
- [Hän12] Hänsel, A. (2012). *Holz und Holzwerkstoffe: Prüfung-Struktur-Eigenschaften*. Lehrbuch für das Bachelorstudium an Berufsakademien und dualen Hochschulen. Logos Verlag Berlin. ISBN 978-3-8325-3697-8
- [HE15] Hassan, J., Eisele, M. (2015). BauBuche – *Der nachhaltige Hochleistungswerkstoff*. Bautechnik Vol. 92, Nr. 1, S. 40 – 45.
<https://doi.org/10.1002/bate.201400093>
- [JMLR00] Jiménez, M.A., Miravete, A., Larrodé, E., Revuelta, D. (2000). *Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles*. Composite Structures Volume 48, Issue 1-3 S. 107 – 111. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00081-1)
- [Key51] Keylwerth, R. (1951). *Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer*. Düsseldorf: VDI Verlag, VDI Forschungsheft 430.
- [Kle13] Klein, B. (2013), *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Auflage, Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-02271-6
- [Koc92] Koch, P. (1992). *Wood versus nonwood materials in U.S. residential construction: some energy-related global implications*. Forest products journal (USA) Volume 42, Issue 5, S. 31 – 42.
- [Kra06] Kramer, F. (2006). *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen* (2. Auflage). Wiesbaden: Vieweg Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9042-9>
- [Krö02] Kröger, M. (2002). *Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen*. Dissertation an der Universität Hannover. ISBN 978-3-18-349612-9
- [LSY12] Lau, S. T. W., Said, M. R., Yaakob, M. Y. (2012). *On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: A literature review*. Composite Structures, 94, S. 803 – 812. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.09.013>
- [LW10] Lambertz, G., Welling, J. (2010). *Die chemische Zusammensetzung von naturbelassenem Holz: Expertise im Auftrag des Bundesverbandes Holzpack-*

mittel, Paletten, Exportverpackung (HPE) e.V. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Holztechnologie und Holzbiologie

- [MB86] Madsen, B., Buchanan, A. H. (1986). *Size effects in timber explained by a modified weakest link theory*. Canadian Journal of Civil Engineering. Volume 13, Issue 2, S. 218 - 232. <https://doi.org/10.1139/l86-030>
- [MCK+15] Merk, V., Chanana, M., Keplinger, T., Gaan, S., Burgert, I. (2015). *Hybrid wood materials with improved fire retardance by bio-inspired mineralisation on the nano- and submicron level*. Green Chemistry 2015, 17, S. 1423 – 1428. <https://doi.org/10.1039/C4GC01862A>
- [MEKW12] Müller, C., Eichhorn, S., Krug, D., Weber, A. (2012). *Holzwerkstoffe in technischen Anwendungen – Anforderungen aus Sicht des Maschinenbaus*. Tagungsband, narotech 2012, 9. Internationales Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“.
- [Mer16] Merk, V. (2016). *Mineralization of wood cell walls for improved properties*. Dissertation ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010780481>
- [Mor21] Morgan Park Hamburg (2021) <https://www.morganpark.de/morgan-produktion/>, zuletzt aufgerufen am 09.09.2021
- [Mör31] Mörath, E. (1931). *Beiträge zur Kenntnis der Quellungserscheinungen des Buchenholzes*. Kolloid-Beihefte 33, S. 131 - 178. <https://doi.org/10.1007/BF02559038>
- [MSL+20] Ming, S., Song, Z., Li, T., Du, K., Zhou, C., Wang, B. (2020). *The energy absorption of thin-walled tubes designed by origami approach applied to the ends*. Materials & Design, 192. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108725>
- [Mue03] Müller, U. (2003). *Effects of wood macro – and micro-structure on selected mechanical properties*. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien.
- [Mur05] Murray, Y. D. (2005). *Evaluation for LS-DYNA wood material model 143* (No. FHWA-HRT-04-096). United States. Federal Highway Administration.
- [Mur07] Murray, Y. D. (2007). *Manual for LS-DYNA wood material model 143* (No. FHWA-HRT-04-097). United States. Federal Highway Administration.
- [Mur99] Murray, Y. D. (1999). *Development of a Wood Material Model for Roadside Safety Applications*. Colorado Springs.
- [Nie06] Niemz, P. (2006) *Holzphysik*. Skript zur Vorlesung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

- [NS03] Niemz, P., Sonderegger, W. (2003). *Untersuchungen zur Korrelation ausgewählter Holzeigenschaften untereinander und mit der Rohdichte unter Verwendung von 103 Holzarten*. Wood Research, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 154 (12), S. 489 – 493. <https://doi.org/10.3188/szf.2003.0489>
- [NS17] Niemz, P., Sonderegger, W. (2017). *Holzphysik – Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. ISBN 978-3-446-44526-0
- [NOHS15] Niemz, P., Ozyhar, T., Hering, S., Sonderegger, W. (2015). *Zur Orthotropie der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Rotbuchenholz*. Bau-technik 92, S. 3 - 8. <https://doi.org/10.1002/bate.201400079>
- [Ott91] Otte, D. (1991). *Realitätsbezug von Crashbedingungen zu den Situationen des realen Unfallgeschehens*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 29, S. 329 – 336.
- [OHN12] Ozyhar, T., Hering, S., Niemz, P. (2012). *Moisture-dependent elastic and strength anisotropy of European beech wood in tension*. Journal of Materials Science 47, S. 6141 – 6150. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6534-8>
- [OHN13] Ozyhar, T., Hering, S., Niemz, P. (2013). *Time dependence of the orthotropic compliance in tension and compression*. Journal of Rheology 57, S. 699 – 717. <https://doi.org/10.1122/1.4790170>
- [PCDH03] Pedersen, M. U., Clorius, C. O., Damkilde, L., Hoffmeyer P. (2003). *A simple size effect model for tension perpendicular to the grain*. Wood Science and Technology 37, S. 125 – 140. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0168-6>
- [PMSB97] Poulsen, J. S.; Moran, P. M.; Shih, C. F.; Byskov, E. (1997). *Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading*. Mechanics of materials, Volume 25, Issue 1, S. 67 - 77. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(96\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(96)00043-9)
- [PN09] Popper, R., Niemz, P. (2009). *Wasserdampfabsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten*. Bauphysik 31 (2), S. 117 - 121.
- [Ran07] Ranz, T. (2007). *Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz*. Beiträge zur Materialtheorie, Heft 2/07. ISSN 1862-5703
- [Reu16] Reuter, C. (2016). *Versagensverhalten und Energieabsorptionssimulation von Faser-Kunststoff-Verbunden und Aluminium-FKV-Hybridwerkstoffen*. Dissertation Universität Paderborn
- [RG96] Richter, K., Gugerli, H. (1996). *Holz und Holzprodukte in vergleichenden Ökobilanzen*. Holz als Roh-und Werkstoff 54, S. 225 – 231. <https://doi.org/10.1007/s001070050172>

- [RP97] Reid, S. R., Peng, C. (1997). *Dynamic uniaxial crushing of wood*. International Journal of Impact Engineering 19, S. 531 – 570. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00016-X)
- [RST17] Reuter, C., Sauerland, K.-H., Tröster, T. (2017). Experimental and numerical crushing analysis of circular CFRP tubes under axial impact loading. Composite Structures 174, S. 33 – 44. <https://doi.org/10.1016/j.comp-struct.2017.04.052>
- [Sch07] Schürmann, H. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-72189-5
- [SF13] Schneeweiß, G., Felber, S. (2013). *Review on the bending strength of wood and influencing factors*. American journal of materials science 2013, 3 (3), S. 41 – 54. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20130303.01> <http://article.sapub.org/10.5923/j.materials.20130303.01.html>
- [SLG03] Smith, I., Landis, E., Gong, M. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley & Sons Ltd, England. ISBN 0-471-48708-2
- [SNB+17] Schlotzhauer, P., Nelis, P. A., Bollmus, S., Gellerich, A., Miltz, H., Seim, W. (2017). *Effect of size and geometry on strength values and MOE of selected hardwood species*. Wood Material Science & Engineering, Volume 12, Issue 3, S. 149-157. <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1073175>
- [Sta18] www.statista.com, zuletzt aufgerufen 14.03.2018
- [Tho90] Thornton, P. H. (1990). *The Crush Behavior of Pultruded Tubes at High Strain Rates*. Journal of Composite Materials, Volume 24, Issue 6, S. 594 – 615. <https://doi.org/10.1177/002199839002400602>
- [Toy16] Toyota (2016). *Meet Toyota's Time Machine, the Setsuna Concept*. <https://global.toyota/en/detail/11559474>, zuletzt aufgerufen 14.05.2020
- [Wag99] Wagenführ, R. (1999). *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik-Identifizierung-Nomenklatur-Mikrotechnologie*. DRW-Verlag, 5.überarbeitete Auflage. ISBN 3-87181-351-6
- [Wal06] Walker, J. C. (2006). *Primary wood processing: principles and practise* (2. Ausgabe). Dordrecht: Springer. ISBN 978-1-4020-4392-5
- [Wal17] Waldbericht der Bundesregierung 2017. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Deutschland
- [Wei39] Weibull, W. (1939). *A Statistical theory of the Strength of materials*. Ingeniörsvetenskapsakademiens Handligar Nr. 151.
- [Wen08] Wendtlandt, H. (2008). *Oldtimer aus Europa und ihre Geschichte*. Klagenfurt: Kaiser Verlag.

- [WHO+16] Wouts, J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. (2016). *Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities – Part A: Experimental investigations*. Composite Structures 149, S. 315 – 328. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.058>
- [Wol09] Wolpensinger, H. (2009). *Ökobilanz: Punkten mit dem Plusenergiebaustoff Holz*. 15. Internationales Holzbau-Forum
- [Wood] www.woodanatomy.ch
- [WS18] Wagenführ, A., Scholz, F. Hrsg. (2018). *Taschenbuch der Holztechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-45440-8
- [Zus03] Zuschnitt (2003). *Zuschnitt: Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz: ... aber der Wagen, der rollt*. Holz im modernen Fahrzeug- und Rennwagenbau. proHolz Austria. Nr.: 12

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung der Betreuenden Swetlana Schweizer und Thomas Tröster. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen.

- [Din17] Dingfelder, M. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Christian Lauter, Thomas Tröster): *Ermittlung der Materialkennwerte von Buchenfurnieren für den Einsatz in der Simulationssoftware*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Masterarbeit, 2017
- [Gun17] Gundlach, J. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Thomas Tröster): *Bestimmung der Materialeigenschaften von Furnierholzwerkstoffen in Abhängigkeit der Lagenanordnung anhand von Biegeversuchen*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Studienarbeit, 2017
- [Han18] Hanses, J. J. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Thomas Tröster): *Validierung eines Materialmodells für Holzwerkstoffe*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Studienarbeit, 2018
- [Nei18] Neitzel, F. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Thomas Tröster): *Materialbedarf und Verfügbarkeit von Holzwerkstoffen für Serienbauteile in Fahrzeugstrukturen*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Projektarbeit, 2018

- [Neu18] Neuser, M. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Thomas Tröster): *Analyse des Klebstoffeinflusses auf die Druck- und Biegeeigenschaften von Furnierwerkstoffen aus der Rotbuche*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Studienarbeit, 2018
- [Wan18] Wanke, S. (Betreuende: Swetlana Schweizer, Thomas Tröster, Thorsten Marten): *Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung der Lastaufnahme einer Sitzrückwand*. Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2018

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 08.11.2021