



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Formoptimierte Holzbauträger: Evaluierung eines analytischen Modells auf Basis von Realversuchen

verfasst von

Stefan HÖCHTL, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Holztechnologie und Management

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Jänner 2022

Betreut von:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth
Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben und mich über die Dauer dieser immer unterstützt haben.

Herzlichen Dank gilt auch meinen beiden Betreuern Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth und Dipl.-Ing. Dr. Maximilian Pramreiter B.Sc. für die gute Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung.

Ein besonderes Dankeschön gilt auch Herrn Paul Mayencourt, der für die hier vorliegende Arbeit die formoptimierten Querschnitte generiert hat. Herr Mayencourt arbeitet ansonsten als Postdoc an der University of California Berkeley, Department of Environmental Science, Policy and Management und ist Bauingenieur.

Ein weiteres Dankeschön gebührt auch der Firma Mayr-Melnhof Holz Gaishorn GmbH, welche die Prüfkörper für die Versuche zur Verfügung gestellt hat und Herrn Max Grabner für die Unterstützung bei der Probenkörperherstellung.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift

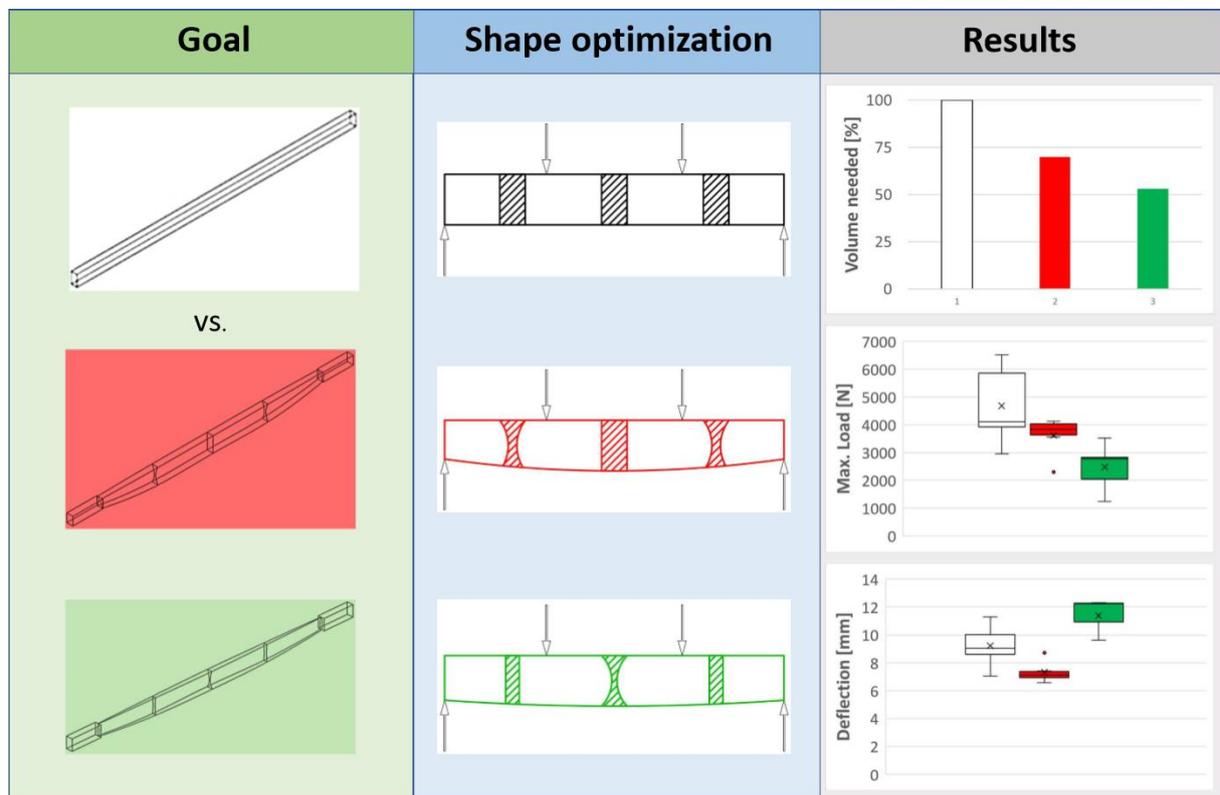
Kurzfassung

Zielsetzung in der vorliegenden Arbeit ist es, einen Träger in seiner Form so zu optimieren, dass weniger Material benötigt wird und dennoch die Leistungsfähigkeit eines typischerweise verwendeten Rechtecksquerschnittes erreicht wird. Durch die Optimierung wird das Material an den Stellen des Trägers verwendet, wo es aufgrund der Tragfähigkeit benötigt wird. Dadurch kann wertvolles Rohmaterial eingespart werden. Hierfür wurde ein hybrider Berechnungsansatz verwendet, um einen 4-Punkt-Biegeträger mit veränderlicher Höhe und Breite über seine Trägerlänge zu optimieren. Der optimierte Träger wurde aus einem Brettschichtholzträger (GL24h) mittels CNC-Fräse hergestellt und in einer ersten Versuchsreihe auf seine mechanische Leistungsfähigkeit hin überprüft. Dabei wurde er in einem 4-Punkt-Biegeversuch bis zum Bruch belastet. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für eine zweite Formoptimierung. Die Ergebnisse zeigen für die erste Versuchsreihe bei einer Volumeneinsparung von rund 30 % eine vergleichbare Performance (Maximalkraft und Durchbiegung). Die zweite Formoptimierung, bei der eine Einsparung von 50 % erzielt wurde, führte jedoch zu einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit. Grund waren eine zu hohe Schlankheit der Träger und damit einhergehende Stabilitätsprobleme. Für die optimierten Querschnitte wurden eine höhere Beanspruchung quer zur Faser und eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber festigkeitsreduzierenden Merkmalen wie z. B. Ästen festgestellt. Daher bietet sich für die praktische Herstellung dieser Träger ein Ausgangsmaterial an, das homogener als Vollholz ist und schichtweise, z. B. durch Strands oder Furnierstreifen, angeordnet werden kann.

Abstract

The goal of this work is to optimize the shape of a beam in order to use less material and achieve the performance of a typically used rectangular cross-section. Through the optimization the material is used at the parts of the beam where it is needed due to the load-bearing capacity, which can save valuable raw material. For this purpose, a hybrid calculation approach was used to optimize a 4-point bending beam with variable height and width over the beam length. The optimized beam was manufactured from a glulam (GL24h) using a CNC machine and its mechanical performance was tested in a first series of experiments. The beam was loaded until failure in a 4-point bending test. These findings served as the basis for a second shape optimization. The results show a comparable performance (maximum force and deflection) for the first series of experiments with a volume reduction of about 30%. However, the second shape optimization, which achieved a 50% saving, led to a deterioration in performance due to a high slenderness and ongoing stability problems. For the optimized cross-sections a higher stress transverse to the fiber and an increased sensitivity to strength-reducing characteristics, such as knots were observed. Therefore, a more homogeneous material than solid wood could be considered for a practical production of these optimized beams e. g. by strands or veneer strips, which could be arranged in layers.

Graphical Abstract



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Material und Methode	11
2.1 Prüfkörper	11
2.1.1 Rohmaterial	11
2.1.2 Formoptimierung	12
2.1.3 Herstellen der formoptimierten Proben	16
2.1.4 Bestimmung der Maße	18
2.1.5 Bestimmung der Materialeinsparung	19
2.1.6 Bestimmung der Rohdichte und Holzfeuchte	19
2.2 Mechanische Charakterisierung	20
2.2.1 Bestimmung ausgewählter Biegeeigenschaften	20
2.2.2 Bestimmung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls	21
2.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation	22
2.3.1 Herstellung des Speckle Musters	23
2.3.2 Bildaufnahme	25
2.3.3 Bildanalyse	27
3. Ergebnisse	30
3.1 Prüfkörper	30
3.1.1 Geometrie der formoptimierten Träger der ersten Versuchsreihe	30
3.1.2 Adaptierte Geometrie der formoptimierten Träger der zweiten Versuchsreihe	31
3.1.3 Abweichung der Geometrie durch die CNC-Bearbeitung	32
3.1.4 Materialeinsparung durch die Formoptimierung	33
3.1.5 Holzfeuchte und Rohdichte	34
3.2 Mechanische Charakterisierung	36
3.2.1 Biegefestigkeit in Faserrichtung	36
3.2.2 Maximalkraft der Biegeprüfung	37
3.2.3 Verformung bei 2187N	40
3.2.4 Globaler Biege-Elastizitätsmodul	43
3.2.5 Bruchbilder und Kraft- Weg- Diagramme	44

3.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation	48
3.3.1 Dehnungsverhalten der Probe B1 (erste Versuchsreihe und ganzer Träger)	48
3.3.2 Dehnungsverhalten der Probe G1 (zweite Versuchsreihe und halber Träger)	51
3.3.3 Rauschen der Dehnungswerte.....	53
3.3.4 Ergebnisse der Verformungsmessmethoden	54
3.3.5 Ergebnisse der Verformungsmessmethoden bei 1500N.....	55
4. Diskussion	56
4.1 Prüfkörper.....	56
4.1.1 Geometrie der formoptimierten Träger.....	56
4.1.2 Abweichung der Geometrie durch die CNC- Bearbeitung.....	59
4.1.3 Materialeinsparung durch die Formoptimierung und Fertigungstechnologien.....	60
4.1.4 Holzfeuchte und Rohdichte	64
4.2 Mechanische Charakterisierung	64
4.2.1 Biegefestigkeit in Faserrichtung	64
4.2.2 Maximalkraft der Biegeprüfung	65
4.2.3 Verformung bei 2187N	68
4.2.4 Globaler Biege-Elastizitätsmodul	68
4.2.5 Bruchbilder und Kraft- Weg- Diagramme	69
4.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation	70
4.3.1 Dehnungsverhalten anhand der digitalen Bildkorrelation	70
4.3.2 Genauigkeit der digitalen Bildkorrelation.....	71
5. Schlussfolgerung	72
6. Literaturverzeichnis.....	73

1. Einleitung

Die Verwendung von Holzträgern spielt in Österreich seit langer Zeit eine wichtige Rolle. Hetzer (1906) reichte bereits vor mehr als hundert Jahren ein Patent für das Verbinden von Holzbrettern ein. Das Produkt zeichnet sich dadurch aus, dass mehrere Bretter zu einem Träger verbunden werden. Seither hat sich diese Technik nicht wesentlich weiterentwickelt. Nach wie vor werden einzelne Bretter zu einem Rechtecksquerschnitt mit typischerweise konstanten Dimensionen über die Länge verbunden (Hetzer 1906).

Diese Rechtecksquerschnitte weisen nach Mayencourt & Mueller (2020) bei standardisierten Elementen wie Balken eine sehr geringe Materialeffizienz auf, da bei der Geometrie der Träger die einzelnen Lastfälle der jeweiligen Anwendung nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. Daher haben sich in den letzten hundert Jahren einige optimierte Biegeträgerformen etablieren können. Diese weisen zum einen eine Änderung des Querschnittes (z. B. I-Querschnitt) und zum anderen eine Variation des Querschnittes über die Länge (z. B. Fischbauchträger mit I-Querschnitt) auf, um Material einzusparen.

Abgeleitet vom Stahlbau konnten sich auch für den Holzbau I-Träger-inspirierte Tragsysteme entwickeln, die eine Änderung des Querschnittes aufweisen. Dabei wird das Material so angeordnet, dass die Gurte die Zug- und Druckkräfte aufnehmen und der Steg die Scherkräfte. Nach dem Deutsche Institut für Bautechnik (2016) wurde ein Holzschalungsträger entwickelt, bei dem die Gurte aus einer Kombination von Fichten- und Birkenvollholz ausgebildet werden und der Steg aus Pappelsperholz. Kämpf (1951) stellt in seinem Patent einen Holzträger vor, bei dem die Steglagen um 2–15° geneigt sind. Dadurch können die auftretenden Scherkräfte effektiver aufgenommen werden. Weiters wurde ein Holzgurträger nach Hess (1957) und Hess (1966) entwickelt, bei dem der Steg wellenförmig angeordnet ist, um eine höhere Steifigkeit zu erreichen. In einem neuartigen Herstellungsprozess beschreiben Bliem et al. (2020) ein Formpressverfahren für I-Träger unter der Verwendung von Makrofasern.

Eine weitere Möglichkeit, die einzelnen Elemente eines Trägers effizienter anzuordnen, stellen Fachwerkträger dar. Hier wird nach Brennecke (1980) zwischen der Dreieck-Streben-Bauart (DSB) und der Trigonit-Bauweise unterschieden. Dabei sind bei der DSB die Steglagen durchgehend, wohingegen bei der Trigonit-Bauweise die Gurte durchgehen.

Auch Sandwich-Konstruktionen sind materialsparend. Hier ist es beispielsweise möglich, den Kern als gewellte Form auszubilden. Banerjee & Bhattacharyya (2011) und Kavermann & Bhattacharyya (2019) zeigen Optionen mit einem gewellten Hohlkern aus Sperrholz auf. Mohammadabadi et al. (2019) und Voth et al. (2015) weisen auf das Potential von biaxial gewellten Kernen aus Strands hin.

In dem Patent von Schweitzer (2016) wird ein Herstellungsverfahren für Wellfurniere für das Produkt aerowood (Sperrholzwerk Schweitzer GmbH 2020) vorgestellt. Weitere Leichtbauprodukte sind Kielsteg nach Deutsche Institut für Bautechnik (2019), Dendrolight nach Dendrolight Latvija Ltd (2011) und Lisocore nach Pyrus Panels GmbH (2019).

In einem weiteren Schritt können die Elemente des Trägers mit einem anderen Material verstärkt werden, um eine höhere Tragfähigkeit zu erreichen. Diese Hybridträger werden in Ghanbari-Ghazijahani et al. (2020) und Triantafillou (1997) beschrieben. Klinkenberg (1974) präsentiert in seinem Patent die Möglichkeit einer Kombination von Holz und Stahl oder Aluminium.

Mayencourt & Mueller (2020) zeigen in ihrer Arbeit, dass das Material möglichst weit von der neutralen Achse entfernt werden sollte, um das Flächenträgheitsmoment zweiter Ordnung und damit auch das Widerstandsmoment des Querschnittes zu maximieren. Zusätzlich kann der Querschnitt entlang der Längsachse variiert werden, um Material dort zu verwenden, wo es aufgrund der Beanspruchung benötigt wird, da das Biegemoment und die Schubverteilung entlang der Biegeträger nicht homogen sind. Die beiden Autoren zeigen das Materialeinsparungspotential von Biegeträgern durch eine neue hybride Methode der Formoptimierung auf. In ihr werden numerische und analytische Modelle kombiniert, um für den jeweiligen Lastfall einen Träger mit veränderlichem Querschnitt über die Trägerlänge zu kreieren. Dafür wurde von den Autoren eine Optimierungsschleife entwickelt und in einer Fallstudie angewendet.

Unter Einhaltung einer maximalen Spannung und Durchbiegung wird das Volumen der Träger minimiert. Die Fallstudie zeigt, dass bei einer Gleichlast von 26 kN/m und einem Durchbiegungslimit von $Länge/360$ bei einer Stützweite von 10 m eine Volumsreduktion auf 30,4 % möglich ist. Somit ist eine Materialersparnis von etwa 70 % für einen Träger mit variabler Höhe und Breite erreichbar. Der Träger ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Modell im Beispiel arbeitet mit isotropem Materialverhalten und berücksichtigt keine Stabilitätsprobleme und keine Querschnittserhöhung auf Grund anzunehmender Sicherheiten im Brandfall. Weiters besteht die Möglichkeit die Anzahl der Freiheitsgrade der Optimierung insoweit einzuschränken, dass lediglich die Breite bzw. die Höhe variiert wird. Damit könnte auf etwaige Produktionsbedingungen Rücksicht genommen werden, was jedoch eine geringere Materialersparnis bedeutet (Mayencourt & Mueller 2020).

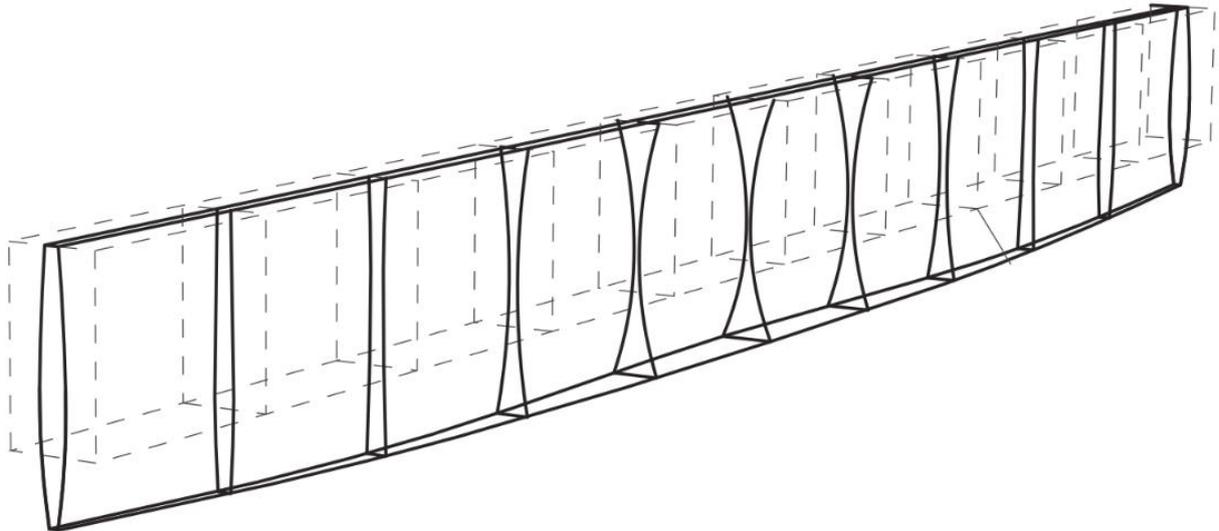


Abbildung 1: Beispiel eines formoptimierten Trägers mit Gleichlast und Auflager an den jeweiligen Trägerenden mit veränderlicher Höhe und Breite über die Trägerlänge nach Mayencourt & Mueller (2020)

In der vorliegenden Arbeit wurde die Optimierungsmethode nach Mayencourt & Mueller (2020), die isotropes Materialverhalten vorsieht, in zwei Versuchsreihen anhand verschiedener mechanischer Versuche untersucht, um die Genauigkeit des Modells an realen Bedingungen zu testen. Die Ergebnisse einer ersten Versuchsreihe dienten als Grundlage für eine zweite Optimierungsschleife.

Folgende Forschungsfragen wurden formuliert:

- Wie ist die mechanische Performance der optimierten Träger gegenüber dem Standard-Rechtecksquerschnitt?
- Welche Komplikationen bringen die formoptimierten Träger bei der Optimierung, Herstellung, Prüfung und in der Anwendung mit sich?
- Gibt es eine geeignete und ausreichend genaue Methode, um das Dehnungsverhalten der Proben evaluieren zu können?

Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass die formoptimierten Träger eine mechanische Performance aufweisen, die mit der eines rechteckigen Vollquerschnittes vergleichbar ist. Als Referenzwerte wurden die maximale Kraft und die Durchbiegung bei einer 4-Punkt-Biegung eines rechteckigen Vollquerschnittes herangezogen.

2. Material und Methoden

2.1 Prüfkörper

2.1.1 Rohmaterial

Als Prüfkörper wurde Brettschichtholz der Holzart Fichte von dem Produzenten Mayr-Melnhof Holz Gaishorn GmbH verwendet. Hierzu wurde eine ganze Stange mit $13500 \times 100 \times 160$ mm (Länge \times Breite \times Höhe) auf neun gleichlange Stücke mit jeweils 1500 mm Länge abgelängt. Das Brettschichtholz ist aus vier Lamellen mit einer Stärke von je 40 mm aufgebaut (siehe Abbildung 2A). Laut Herstellerangaben und ÖNORM EN 14080 (2013) ist die Festigkeitsklasse GL24h und das Produktionsdatum lautet auf den 31.05.2021. Der Produzent gibt die Rohdichte mit 450 kg/m^3 bei einer zu erzielenden Holzfeuchte von $12 \% \pm 2 \%$ an.

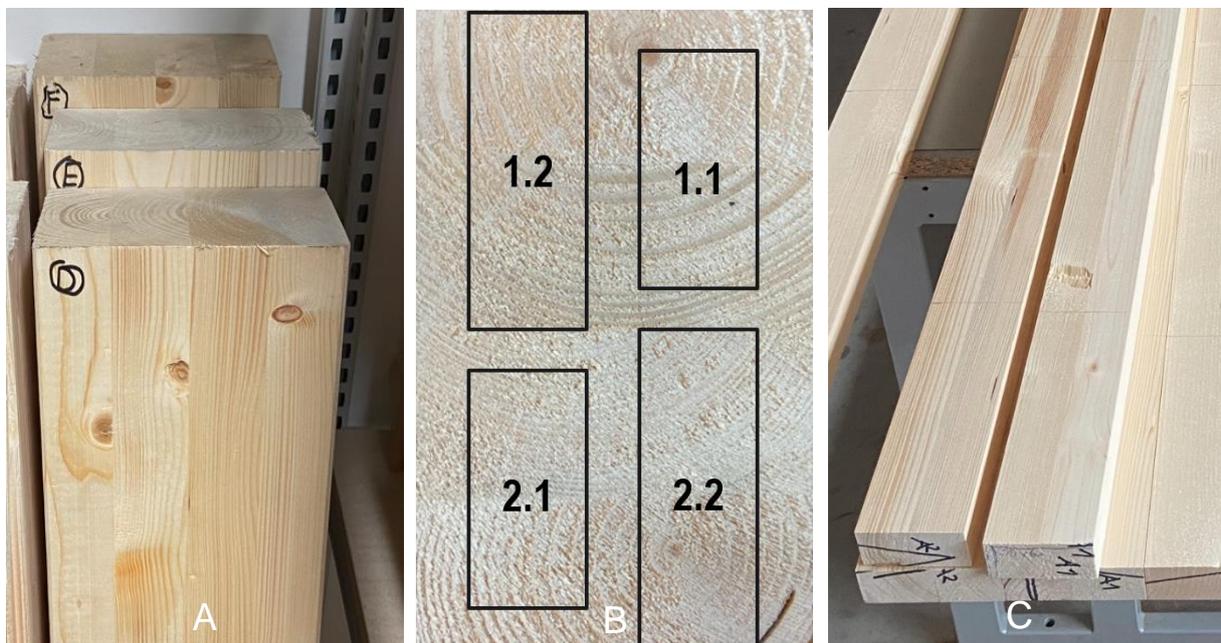


Abbildung 2: A: Verwendete Brettschichtholzstücke mit $13500 \times 100 \times 160$ mm
B: Brettschichtholzquerschnitt mit der Aufteilung der Prüfkörper
C: Aus dem Rohmaterial generierte Referenz-Prüfkörper und Rohlinge mit den Abmessungen 30×60 mm bzw. 30×80 mm

Die Prüfkörper wurden für die erste Versuchsreihe aus den vier Brettschichtholzstücken A, B, C und D herausgeschnitten, wie in Abbildung 2B dargestellt. Für die zweite Versuchsreihe wurden die Proben aus E, G, H und I herausgeschnitten. Dabei wurden jeweils zwei Proben 1.1 und 2.1 mit den Dimensionen 30×60 mm als Referenzproben und zwei Proben 1.2 und 2.2 mit 30×80 mm für die Formoptimierung erzeugt, wie in Abbildung 2C zu sehen ist.

Die Referenzproben wurden in weiterer Folge als voller Rechtecksquerschnitt verwendet. Die formoptimierten Proben wurden einerseits als volle Rechtecksquerschnitte mit 30 × 80 mm und andererseits für die formoptimierten Querschnitte mit 30 × 76 mm verwendet. Um aussagekräftige Werte zu erhalten, wurden jeweils die Proben 1.2 und 1.1 bzw. 2.1 und 2.2 miteinander verglichen. Dabei wurde versucht, die jeweils gleiche Rohlamelle vorzugsweise mit denselben Holzmerkmalen bzw. Wuchseigenschaften miteinander zu vergleichen. Besonders wurde darauf geachtet, dass die Klebefuge jeweils in der Mitte des Prüfkörpers lag. Eine Auflistung der verwendeten Proben ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Proben für die erste und zweite Versuchsreihe

	Probenbezeichnung 1. Versuchsreihe						Probenbezeichnung 2. Versuchsreihe				
Referenz 30x60mm	A1.1	B1.1	B2.1	C1.1	C2.1	D2.1	E1.1	E2.1	G1.1	H1.1	I2.1
Voll 30x80mm	A1.2	B1.2	B2.2	C1.2	C2.2	D2.2					
Optimiert 30x76mm							E1.2	E2.2	G1.2	H1.2	I1.2

Die Proben wurde im Normklima ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ und $65 \pm 5\%$ relative Luftfeuchte) klimatisiert, bis sie die Massenkonstanz nach ÖNORM EN 408 (2012) erreicht hatten.

2.1.2 Formoptimierung

Mayencourt & Mueller (2020) beschreiben in ihrer Arbeit eine Formoptimierungsmethode für tragende Elemente, insbesondere für Träger. Für die vorliegende Arbeit hat sich Paul Mayencourt bereiterklärt, die Formoptimierung der Träger an eine 4-Punkt-Belastungssituation mit einer Auflagerlänge von 1,15 m bzw. 1,2 m anzupassen. Diese Anforderung ergab sich aufgrund der Dimensionsbeschränkung der verfügbaren Prüfmaschine.

Die Formoptimierung umfasst dabei folgende Schritte:

Für den ersten Schritt der Optimierung wird das **Tragsystem in Form von Schub- und Biegemoment-Diagrammen abgebildet**. Dabei werden die Bemessungskriterien mit einem **Durchbiegungslimit von 7,5 mm unter maximaler Materialausnutzung** festgelegt. Das Durchbiegungslimit ergibt sich nach ÖNORM B 1995-1-1 (2019), wo es mit $l/200$ angegeben wird. Da für die vorliegenden Versuche eine Trägerlänge von 1500 mm angenommen wird, ergibt sich für diese Arbeit eine maximale Durchbiegung von 7,5 mm (siehe Abbildung 3).

Tabelle 2: Charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitswerte in N/mm² für homogenes Brettschichtholz nach ÖNORM EN 14080 (2013)

Eigenschaft	Symbol	Festigkeitsklasse von Brettschichtholz						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Biegefestigkeit	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Zugfestigkeit	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Druckfestigkeit	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Schubfestigkeit (Schub und Torsion)	$f_{v,g,k}$	3,5						
Rollschubfestigkeit	$f_{r,g,k}$	1,2						
Elastizitätsmodul	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Schubmodul	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
Rollschubmodul	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Rohdichte	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Nach der Prüfnorm für Brettschichtholz, der ÖNORM EN 408 (2012), wird bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wie Elastizitätsmodul oder Biegefestigkeit ein **Auflagerabstand von 18 ± 3-facher Trägerhöhe** vorgegeben. Der maximale Auflagerabstand, der auf der verwendeten Universalprüfmaschine (Zwick/Roell Z100, ZwickRoell GmbH, Ulm, Deutschland) eingestellt werden kann, ist auf 1150 mm limitiert. Dadurch hat sich für die Optimierung **eine maximale Trägerhöhe von 1150/15 ≈ 76 mm** ergeben.

Im zweiten Teil der Optimierung, dem numerischen Teil, wird die **Anfangsgeometrie** mittels Geometrieberechnungen und parametrischer Modellierungsverfahren bestimmt. Dabei wird das initiale Balkenvolumen **auf 30 × 76 × 1500 mm festgelegt**. Die Werte für Breite und Höhe sind jene Werte, die der Balken **maximal annehmen darf**. Die **Länge von 1500 mm ist eine fixe Länge**. Zusätzlich können auch weitere Restriktionen, die sich etwa aufgrund der Konstruktion ergeben, durch die Parametrisierung realisiert werden.

Mayencourt & Mueller (2020) beschreiben in ihrer Arbeit bei modernen Holzkonstruktionen ein Verhältnis von Breite zu Höhe von 1:2 bis 1:3. Daher wird für den **Referenzquerschnitt** ein Verhältnis am unteren Bereich von **1:2 oder 30 × 60 mm** festgelegt. Um eine potentielle Höhenzunahme bei der Formoptimierung zu ermöglichen, wird ein Verhältnis von **2,53 oder maximal 30 × 76 mm** gewählt. Dadurch kann das **Widerstandsmoment des Querschnittes erhöht** werden, ohne dass dieser einer Kippgefahr aufgrund seiner Schlankheit ausgesetzt ist.

Um das Volumen des Trägers und somit die Materialeinsparung berechnen zu können, wird im nächsten Schritt **eine Vielzahl von Ebenen**, die senkrecht zur Längsachse des Trägers stehen, **in den Träger gelegt**. Die Anzahl der Ebenen ist vom jeweiligen Modell abhängig. Weiters werden für die extrahierten Ebenen bzw. Querschnitte **die Widerstandsmomente, die Breiten und die Schwerpunktabstände** generiert. Weitere Parameter wie **Fläche oder Volumen** werden mithilfe rechnerischer Geometrieoperationen ermittelt.

Diese Werte werden im nächsten Schritt, dem **analytischen Modell**, verwendet. Dort werden die **Spannungsverteilungen** infolge der **Querkraft berechnet**. Sie werden mit einem **Bruchmodell speziell für Holzkonstruktionen** verglichen, um die Tragsicherheit zu gewährleisten oder einen Bruch zu vermeiden. Dabei wird **die Verformung an den vorher definierten Ebenen bzw. Punkten** berechnet. Dieser Optimierungsprozess ist in eine **Schleife programmiert**, die so lange läuft, bis ein stabiles Ergebnis erreicht wird. Ein **globales Optimum der Lösung kann daher nicht garantiert** werden. Deshalb wird die Lösung mit **verschiedenen Algorithmen und Ausgangspunkten durchgeführt**. Die Optimierung wird mit den Softwares Radical für Grasshopper (Robert McNeel & Associates) und Goat (Robert McNeel & Associates) durchgeführt. In Radical wird der Algorithmus COBYLA verwendet. In Goat wird der Algorithmus verfeinert, bis **mindestens zwei Ergebnisse übereinstimmen oder sich die Lösung nicht mehr verbessert**.

Im nächsten Schritt, der **Querschnittskontrolle**, wird eine **parametrische Formkontrolle** durchgeführt. Dazu werden **beliebig viele Kontrollabschnitte** in die Längsachse des Balkens gelegt und Kontrollpunkte platziert. Es können z. B. drei Kontrollabschnitte mit jeweils vier Kontrollpunkten gewählt werden. Durch diese Kontrollpunkte wird die **lokale Breite des Abschnittes** bestimmt. Weiters werden die Kontrollpunkte durch einen **Höhenparameter miteinander verbunden, der die Gesamthöhe des Abschnittes** relativ zum ursprünglichen Querschnitt definiert. Sobald die Kontrollpunkte in den drei Dimensionen parametrisch festgelegt sind, wird eine Reihe von Kurven zwischen den Kontrollpunkten interpoliert. Abschließend wird mit den **Kurven eine Fläche abgetragen und die Grenzen des Volumens werden aufgezeigt**.

Durch diese Kontrollpunkte können verschiedenste Formoptimierungen durchgeführt werden. In der ersten Stufe kann die **Höhe des Trägers variiert** werden. In der zweiten Stufe kann die **Breite** des Trägers **geändert** werden und in der dritten und letzten Stufe können **sowohl Höhe als auch Breite geändert** werden. Der beschriebene Ablauf wird in der 3D-CAD-Software Rhinoceros5 mit der parametrischen Umgebung Grasshopper (Robert McNeel & Associates) durchgeführt.

Für den Versuch wird das Design mit **variierender Höhe und Breite** gewählt, um eine maximale Materialersparnis zu generieren.

Im letzten Schritt werden die vorher gewonnenen Querschnittseigenschaften in ein **analytisches Modell** eingespeist. In diesem Schritt wird das Modell um die **Biegespannungen, die Schubspannungsverteilung und die Querzugfestigkeit ergänzt**. Dadurch können die Breitenvariationen in Längsrichtung und die Neigung der Seiten für jeden Abschnitt im bestehenden Modell ergänzt werden.

Innerhalb des Querschnittes werden für jeden Punkt die einzelnen Spannungskomponenten berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Träger einer **Biegebelastung ausgesetzt sind und keine axialen Kräfte oder Instabilitäten wirken**. Für die Schubspannung wird der höchste Wert am Rand der Trägerlänge verwendet. Die Spannung quer zu Faser wird konstant über die gesamte Trägerhöhe angenommen, um mit den Werten um akkurate Werte zu gewährleisten.

Die einzelnen Werte der **Biegespannungen, Schubspannung und Querzugfestigkeit** werden einem Bruchmodell zugeführt und dürfen nicht höher sein als die vorher in Tabelle 2 definierten charakteristischen Festigkeitswerte für GL24h. Dabei werden die Werte der Biegefestigkeit, der Zugfestigkeit quer zur Faser, der Schubfestigkeit, des Elastizitätsmoduls und des Schubmoduls für die Optimierung dieser Tabelle entnommen.

Folgende Restriktionen werden für die Versuchsreihen festgelegt:

- Die Durchbiegung des Trägers darf bei einer **Biegespannung von 24 N/mm²** nicht höher als **7,5 mm** liegen.
- 95% der Probekörper dürfen bei einer Biegespannung von 24 N/mm² nicht brechen.

Die charakteristische Biegefestigkeit beträgt 24 N/mm². Daraus resultieren für den Prüfaufbau die folgenden Kräfte:

$$\text{Referenzquerschnitt} = 30 \times 60 \text{ mm}$$

$$\text{Widerstandsmoment} = \frac{30 * 60^2}{6} = 18.000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Biegefestigkeit} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Biegemoment} = 18000 * 24 = 0,432 \text{ kN} * \text{m}$$

$$\frac{F}{2} = \frac{0,432}{0,395} = 1,09 \text{ kN}$$

In Abbildung 3 ist der Prüfaufbau für die formoptimierten Träger zusammengefasst. Die Formoptimierung hat für die erste Versuchsreihe zwischen den beiden Innenkanten der Auflager über eine Länge von 1100 mm und für die zweite Versuchsreihe über eine Länge von 1150 mm stattgefunden. **Auflagerbereich und Auskragung werden als Rechtecksquerschnitt** ausgebildet. Dabei wird die Breite mit den vollen 30 mm und die Höhe mit dem Wert, die das Modell an der Innenkante der Auflager liefert gewählt (siehe Abbildung 7). Da außerhalb der Auflager keine Verformung stattfindet und der Träger ideal auf den Auflagerrollen gelagert werden kann.

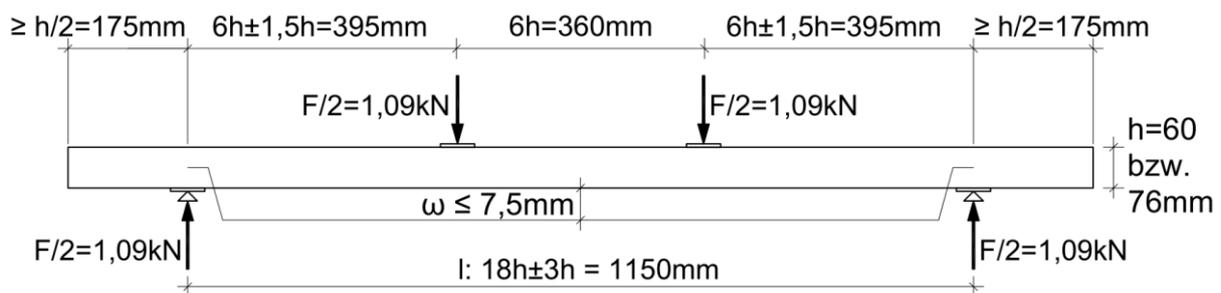


Abbildung 3: Prüfaufbau nach ÖNORM EN 408 (2012) für die formoptimierten Träger inklusive der einwirkenden Kräften und des Durchbiegungslimits

In einigen Fällen kann es sein, dass der Träger durch das Durchbiegungslimit gesteuert wird und dadurch ein höherer Querschnitt als der Ausgangsquerschnitt generiert wird. Dann kann der Träger in der Mitte der Spannweite tiefer werden. Jedoch wird immer davon ausgegangen, dass die **Oberkante des Trägers flach bleibt**. Zum einen kann dadurch die Last der Prüfmaschine ideal aufgebracht werden, zum anderen können in der Praxis z. B. Deckenkonstruktionen mit einem Fußbodenaufbau realisiert werden.

2.1.3 Herstellen der formoptimierten Prüfkörper

Für die Herstellung der formoptimierten Proben wurden die Vollquerschnitte (siehe Abbildung 2C) herangezogen und die von Mayencourt übermittelte Geometrie mittels CNC-Fräse herausgefräst (subtraktive Fertigung). Dabei wurde die CNC-Maschine HOMAG Venture 115M verwendet. Die Bearbeitung erfolgte zunächst auf einer Seite (siehe Abbildung 4A). Anschließend wurde die Probe gewendet und die zweite Seite inklusive des Fischbauchs gefräst, wie in Abbildung 4B zu sehen ist. Abschließend wurde der Auflagerbereich mittels Bandsäge nachgearbeitet (siehe Abbildung 4C). Bei sämtlichen mechanischen Prüfungen wurde darauf geachtet, dass die Proben ident geprüft wurden. Dementsprechend wurde auch darauf geachtet, die Proben so zu fräsen, dass die Zug- und die Druckseite in den Versuchen gleich blieben. Die Fräszeit pro Träger belief sich auf etwa 30 Minuten.

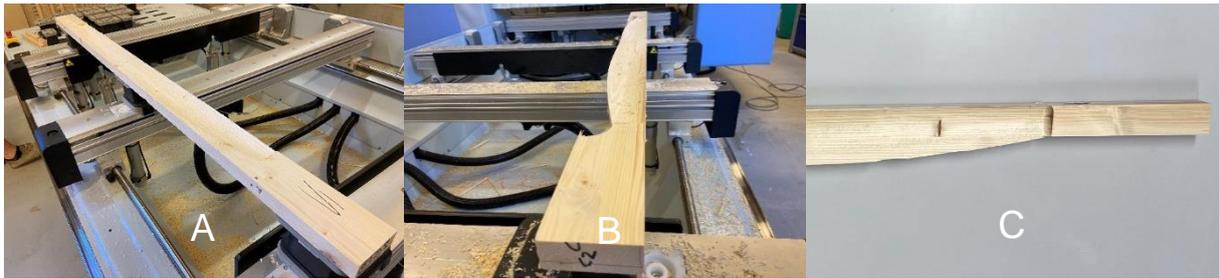


Abbildung 4: A: Fräsvorgang des optimierten Querschnittes aus dem vollen Querschnitt von 30 x 80 mm auf der ersten Seite mittels CNC-Fräse
 B: Herausfräsen des optimierten Querschnittes auf der zweiten Seite
 C: Mittels Bandsäge nachgearbeiteter Auflagerbereich

Abbildung 5 zeigt die formoptimierten Proben, die in der ersten Versuchsreihe für die weiteren mechanischen Prüfungen verwendet wurden. Die zweite Probe von oben wurde aufgrund eines starken Ausrisses durch die CNC-Bearbeitung ausgeschlossen und durch die Probe D2.2 ersetzt, die in Abbildung 5 unten dargestellt ist. Die ausgeschlossene Probe A2.2 wurde zur Bestimmung der Abweichung der Geometrie verwendet.



Abbildung 5: Formoptimierte Prüfkörper für die erste Versuchsreihe inklusive der nicht verwendeten Probe A2.2

In Abbildung 6 sind die formoptimierten Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe dargestellt.



Abbildung 6: Formoptimierte Prüfkörper der zweiten Versuchsreihe

2.1.4 Bestimmung der Maße

An den Referenzproben wurden die Breite und die Höhe an fünf Messpunkten mittels Schiebelehre (0,01 mm) bestimmt und der Mittelwert wurde gebildet. Zusätzlich wurden für die erste Versuchsreihe die Maße an den Vollquerschnittproben erhoben. Die Messpunkte lagen 175 mm, 463 mm, 750 mm, 1038 mm und 1325 mm vom Endpunkt der Probe entfernt.

Um die Abweichung der Geometrie durch die CNC-Bearbeitung zu bestimmen, wurden die Soll-Werte nach dem Modell mit den Ist-Werten der ersten Versuchsreihe verglichen. Die Ist-Werte wurden mittels Schiebelehre (0,01 mm) erhoben. Die Breitenmessungen wurden an einem halben Träger der Probe A2.2 erhoben. Dabei wurde er in sieben Stücke geteilt, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Die einzelnen Stücke wurden abgelängt, sodass die Messungen genau an den Messpunkten 175 mm (Ende Auflagerbereich), 293 mm, 385 mm, 478 mm, 570 mm (Krafteinleitung), 660 mm und 750 mm (Mitte des Trägers) durchgeführt werden konnten. Die Messungen fanden an der Ober- bzw. Unterkante und jeweils genau in der Mitte der einzelnen Stücke statt. Es wurden jeweils die Flächen herangezogen, die nach Abbildung 7 von vorne zu sehen sind. Die Höhenmessungen erfolgten bei allen formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe an den Messpunkten 175 mm, 293 mm, 385 mm, 478 mm, 570 mm, 660 mm, 750 mm, 840 mm, 930 mm, 1023 mm, 1115 mm, 1208 mm und 1325 mm. Die Maße wurden in der Mitte des jeweiligen Punktes erhoben.

Diese gemessenen Werte oder Ist-Werte wurden mit den Werten des Modells, den Soll-Werten, verglichen und die Abweichungen in Prozent berechnet.



Abbildung 7: Ermittlung der Geometrie-Abweichung durch die CNC-Bearbeitung auf einem halben Träger, der in sieben Stücke geteilt wurde

2.1.5 Bestimmung der Materialeinsparung

Um die exakte Materialeinsparung an den zusammengehörigen Prüfkörpern zu ermitteln, wurden die Masse der Referenzproben und die der formoptimierten Proben mittels Präzisionswaage (DS 16K0.1, KERN & Sohn GmbH, Balingen, Deutschland) auf 0,1 g genau erhoben und die Materialeinsparung in Prozent berechnet. Dabei wurde der volle Auflagerbereich der Dichte entsprechend abgezogen, um die exakte Einsparung durch die Optimierung bestimmen zu können.

2.1.6 Bestimmung der Rohdichte und Holzfeuchte

Die beiden Parameter wurden für die erste Versuchsreihe erhoben. Für die Ermittlung der Rohdichte wurden die Maße bestimmt, wie in Kapitel 2.1.4 dargelegt. Die Masse wurde unmittelbar nach Entnahme aus dem Klimaraum mittels Präzisionswaage (DS 16K0.1, KERN & Sohn GmbH, Balingen, Deutschland) auf 0,1 g genau bestimmt. Die Bestimmung erfolgte an den Referenzproben und an den Vollquerschnittproben. In dieser Arbeit wird angenommen, dass sich die Dichte durch die CNC-Bearbeitung nicht wesentlich verändert. Daher können die Werte für die Vollquerschnittproben und die formoptimierten Proben gleichgesetzt werden. Die Dichtewerte wurden abweichend von der ÖNORM EN 408 (2012) nicht an einem Teilbereich in der unmittelbaren Bruchzone bestimmt, sondern über den gesamten Querschnitt. Die Berechnung der Rohdichte erfolgte bei etwa 12 % Holzfeuchte bzw. bei der Ausgleichsfeuchte zum Normklima und setzte sich wie folgt zusammen:

$$\rho_{12} = \frac{\text{Masse}}{\text{Höhe} \cdot \text{Breite} \cdot \text{Länge}} \quad [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (1)$$

Die Holzfeuchte wurde nach ÖNORM EN 13183 (2004) ermittelt. Hierbei wurde die Masse (0,01 g) mittels Präzisionswaage (SI-6002, Denver Instruments, New York, USA) bestimmt.

2.2 Mechanische Charakterisierung

2.2.1 Bestimmung ausgewählter Biegeeigenschaften

Die Biegefestigkeit in Faserrichtung wurde nach ÖNORM EN 408 (2012) bestimmt. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 8 zusammengefasst. Für den Versuch wurden die Referenzproben und die formoptimierten Proben gegenübergestellt und auf einer Universalprüfmaschine (Z100, Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) getestet. Die Breite der Auflagerrollen bzw. die der Kraftereinwirkungsrollen betrug 50 mm.

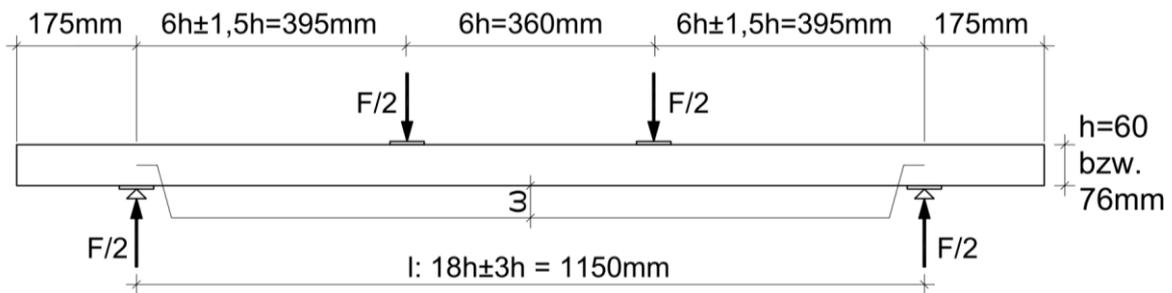


Abbildung 8: Prüfaufbau für die Ermittlung der Biegefestigkeit in Faserrichtung

Die Mindestlänge der Proben mit 19-facher Querschnittshöhe wurde eingehalten. Die Vorkraft betrug 100 N , damit die beiden einwirkenden Kraftrollen vollständig auf der Probe auflagen und eine symmetrische Belastung gegeben war.

Die Prüfgeschwindigkeit wurde für die erste Referenzprobe A1.1 mit 3 mm/min gewählt. Aufgrund einer deutlichen Überschreitung der vorgeschriebenen Prüfzeit (300 ± 120 Sekunden) wurde die Geschwindigkeit auf 5 mm/min erhöht. Dadurch konnte bei den restlichen Referenzproben die Prüfzeit eingehalten werden. Für die formoptimierten Träger wurde die Geschwindigkeit von 5 mm/min beibehalten, um vergleichbare Werte zu erhalten. Das Abbruchkriterium der Biegeprüfung wurde mit 90% Lastabfall festgelegt, um ein möglichst umfangreiches Bild des Versagensverhaltens zu erfassen. Der Prüfaufbau für die formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe wurde aufgrund der höheren Länge des optimierten Querschnittes angepasst. In Abbildung 9 ist der Prüfaufbau zusammengefasst.

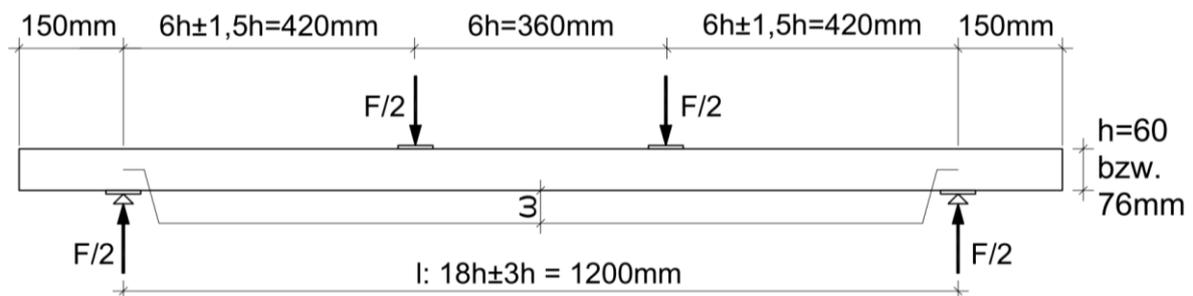


Abbildung 9: Prüfaufbau für die Ermittlung der Biegefestigkeit in Faserrichtung für die formoptimierten Querschnitte der zweiten Versuchsreihe

Zusätzlich zur Prüfnorm wurde die Verformung bzw. ω bis zum Bruch bestimmt, wie die Abbildungen 8 und 9 zeigen. Dabei wurde die Verformung mit einem einteiligen makromechanischen Extensometer (Makrosense, Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) in der Mitte der Probe bis 1500 N gemessen und auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau bestimmt. Über 1500 N wurde die Verformung bis zum Bruch mit der Traverse gemessen.

Um die Referenzproben und die formoptimierten Proben gegenüberstellen zu können, wurden die Werte der maximalen Kraft bei Bruch (F_{max}) und die Werte der Durchbiegung bei 2187 N ($dL_{2187\text{N}}$) verglichen. Weiters wurde für die Referenzproben die Biegefestigkeit (f_m) bestimmt. Die Zusammensetzung der ermittelten Werte bei 2187 N kann Kapitel 2.1.2 entnommen werden.

Zusätzlich wurde ein abhängiger t-Test in Excel (2109, Microsoft) für F_{max} und $dL_{2187\text{N}}$ für die Referenzproben und die formoptimierten Proben durchgeführt. Der abhängige Test (mit $\alpha = 0,05$) wurde gewählt, da unterstellt wurde, dass die jeweilige Referenzprobe und die formoptimierte Probe eine gleichwertige Performance aufweisen, wenn eine unabhängige Variabel, in diesem Versuch die Geometrie geändert wird. Die Hypothesen lauten demnach:

- H0: Es gibt keine Änderung der Performance durch die optimierte Geometrie.
- H1: Es gibt eine Änderung der Performance durch die optimierte Geometrie.

2.2.2 Bestimmung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls

Der globale Biege-Elastizitätsmodul wurde nach ÖNORM EN 408 (2012) bestimmt. Der Prüfaufbau ist den Abbildungen 8 und 9 zu entnehmen. Der Parameter wurde parallel zur Biegefestigkeitsprüfung an den Referenzproben bestimmt.

Die Prüfgeschwindigkeit von maximal $0,003 \cdot h$ mm/s wurde mit 5 mm/min eingehalten.

Die Verformung ω wurde für die Referenzproben zwischen 150 N und 600 N mit einem einteiligen makromechanischen Extensometer (Makrosense, Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) an der Trägerunterseite in der Mitte der Spannweite gemessen.

Für die Berechnung wurden die Werte der Breite und Höhe nach Kapitel 2.1.4 bestimmt.

2.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation

Dong & Pan (2017) beschreiben die digitale Bildkorrelation oder Digital Image Correlation (DIC) als leistungsfähige und flexible Methode für die Form-, Bewegungs- und Verformungsmessung von Werkstoffen. Daher wurde diese Methode eingesetzt, um Unterschiede im Verformungsverhalten zwischen allen Vollquerschnitten und formoptimierten Proben für die erste Versuchsreihe und zwischen je zwei Referenzproben und formoptimierten Proben für die zweite Versuchsreihe zu erkennen.

Die beiden Autoren erläutern in ihrer Arbeit die unterschiedlichen Methoden zur Durchführung einer DIC. Die wesentlichen Schritte sind dabei die Herstellung eines Specklemusters, die Bildaufnahme und die Bildanalyse. Aufgrund der geringen Kosten und der leichten Handhabung wurde die artificial-Technik für den Versuch in der vorliegenden Arbeit gewählt. Diese Technik setzt sich aus dem Sprühen eines deckenden Hintergrundes und dem händischen Aufbringen eines Specklemusters zusammen. Die Bildaufnahme erfolgte mit einer handelsüblichen Spiegelreflexkamera (Nikon D5300, Nikon, Tokio, Japan) und einem Objektiv mit fixer Brennweite (AF-S DX NIKKOR 35 mm 1:1.8G, Nikon, Tokio, Japan). Die Bildanalyse wurde mit der Software GOM Correlate (2020 Hotfix 5, Zeiss Gruppe) durchgeführt.

DIC ist eine optisch basierte Technik, bei der 2D- oder 3D-Koordinaten während der mechanischen Prüfung aus dem Specklemuster auf der Oberfläche gemessen werden können. Dabei wird durch eine Folge von Bildern, die während der Verformung aufgenommen werden, das aufgebrachte Muster jeweils mit einem Referenzzustand durch Bild-Muster-Korrelation verglichen. Auf diese Weise können Darstellungen generiert werden, die der Bewegung und der Verformung des Prüfkörpers folgen. Es wird zwischen 2D-DIC-Systemen, die eine Kamera benötigen, und 3D-DIC bzw. Stereo-DIC unterschieden, das mindestens zwei Kameras erfordert (International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. 2018).

Für den Versuch in dieser Arbeit wurde die Verschiebung und Dehnung während eines 4-Punkt-Biegeversuches mit einem 2D-DIC-System erhoben. Das Field of View (FOV) wurde bei fünf Proben A1.2, B2.2, C1.2, D2.2, G1.1 und G1.2 auf den halben Träger zwischen der Innenkante des Auflagers und der Mitte des Trägers gelegt. Somit betrug die Länge des FOV 550 mm und 575 mm für G1.2. Die gesamte Trägerhöhe betrug 80 mm bzw. 76 mm und 60 mm. Für die Proben B1.2, C2.2, H1.2 und H1.1 wurde das FOV zwischen den beiden Innenkanten des Auflagers gelegt. Somit wurden die Träger in ihrer ganzen Länge von 1100 mm (1150 mm für H1.2) und in ihrer gesamten Höhe betrachtet. Die Proben B1.2 und C2.2 wurden auch zum Zwecke des kleinen FOV herangezogen. Die Auswertung der ersten Versuchsreihe erfolgte beispielhaft an der Probe B1, die zweite Versuchsreihe wurde beispielhaft an der Probe G1 ausgewertet. Die restlichen Proben wurden ausgewertet und die Erkenntnisse wurden in der Arbeit berücksichtigt, jedoch wurden die einzelnen Abbildungen nicht eingefügt.

2.3.1 Herstellung des Specklemusters

Die Grundanforderung an das Muster ist, dass es die Bewegung des Prüfkörpers exakt nachbildet. Bei der Herstellung des Specklemusters ist außerdem darauf zu achten, dass ein hoher Kontrast, eine Zufälligkeit und keine Richtungsabhängigkeit im Muster gegeben sind. Unter Richtungsabhängigkeit wird verstanden, dass die Lücken zwischen den Punkten nahezu gleichgroß sind (Dong & Pan 2017).

Nach der International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (2018) beträgt die ideale Größe eines Speckles zwischen 3 und 5 Pixel. Die Dichte des Musters geben die Autoren mit 50 % an. Das heißt, auf dem Prüfkörper soll die gleiche Fläche an weißen und schwarzen Pixeln vorhanden sein. Weiters ist für den deckenden Hintergrund eine matte Farbe zu wählen, um eine spiegelnde Reflexion zu vermeiden und somit eine Blendung der Kamera zu verhindern.

Für den Versuch in dieser Arbeit wurde die Auflösung 1280 × 720 Pixel gewählt. Dadurch wurde die Größe der Speckles mit 550 mm bzw. 575 mm/1280 Pixel = 0,44 mm/Pixel berechnet. Dieser Wert wurde mit der idealen Pixelgröße von 3 bis 5 multipliziert. Es ergibt sich eine ideale Specklegröße von 1,3 mm bis 2,2 mm. Dieser Wert wurde mit den empfohlenen Werten der Tabelle 3 von Correlated Solutions, Inc. (2021) verglichen und als passend empfunden.

Tabelle 3: Specklegröße je nach Größe des Field Of View für die digitale Bildkorrelation nach Correlated Solutions, Inc. (2021)

	Field of View					
	0.007" (0.18 mm) Dot Size	0.013" (0.33 mm) Dot Size	0.026" (0.66 mm) Dot Size	0.05" (1.27 mm) Dot Size	0.10" (2.54 mm) Dot Size	0.20" (5.08 mm) Dot Size
1 MP Camera 1024 pixels across	0.9" - 2.4" 2.3 cm - 6.1 cm	1.7" - 4.4" 4.2 cm - 11 cm	3.3" - 8.9" 8.4 cm - 23 cm	6.4" - 17.1" 16 cm - 43 cm	12.8" - 34.1" 33 cm - 87 cm	26.6" - 68.3" 65 cm - 173 cm
2.3 MP Camera 1920 pixels across	1.7" - 4.5" 4.3 cm - 11 cm	3.1" - 8.3" 7.9 cm - 21 cm	6.2" - 16.6" 16 cm - 42 cm	12.0" - 32.0" 31 cm - 81 cm	24.0" - 64.0" 61 cm - 163 cm	48.0" - 128.0" 122 cm - 325 cm
5 MP Camera 2448 pixels across	2.1" - 5.7" 5.4 cm - 15 cm	4.0" - 10.6" 10 cm - 27 cm	8.0" - 21.2" 20 cm - 54 cm	15.3" - 40.8" 39 cm - 103 cm	30.6" - 81.6" 78 cm - 207 cm	61.2" - 163.2" 155 cm - 415 cm
16 MP Camera 4872 pixels across	4.3" - 11.4" 11 cm - 29 cm	7.9" - 21.1" 20 cm - 54 cm	15.8" - 42.2" 40 cm - 107 cm	30.5" - 81.2" 77 cm - 206 cm	60.9" - 162.4" 155 cm - 413 cm	121.8" - 324.8" 309 cm - 825 cm

Das Muster wurde mit der Software Speckle Generator (Correlated Solutions, Inc. 2021) erstellt. Die Einstellungen wurden mit einem Durchmesser von 1,7 mm, einer Dichte von 50 %, einer Variation von 75 %, einer Breite von 550 mm und einer Höhe von 80 mm erstellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 gezeigt.

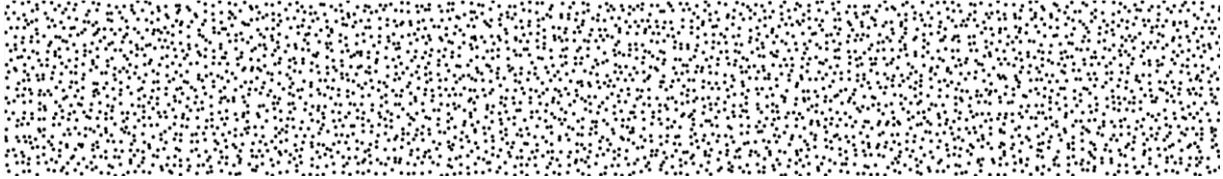


Abbildung 10: Specklemuster für die Versuchsreihen mit den Abmessungen 550 × 80 mm, generiert mittels Speckle Generator (Correlated Solutions, Inc. 2021)

Für die Herstellung des Musters wurde dieses, wie in Abbildung 10 zu sehen ist, im Maßstab 1:1 ausgedruckt und als Vorlage zur Aufbringung verwendet. Zuvor wurden die Proben dem Field of View entsprechend, zuzüglich 100 mm im Auflagerbereich und über die Mitte hinaus, mit weißem Haftgrundierspray (Peter Kwasny GmbH, Gundelsheim, Deutschland, Art.-Nr.: 340121) mit dem Glanzgrad matt zweimal lackiert. Die formoptimierten Träger wurden vor der Lackierung händisch mit einem Schleifpapier der Körnung 150 geschliffen, um eine glatte Oberfläche zu erreichen. Bei der Lackierung wurde auf einen deckenden Lackauftrag geachtet. Im nächsten Schritt wurde das Muster händisch mittels Permanentmarker mit runder Spitze und einer Strichstärke von 1 bis 3 mm bzw. 1,5 bis 3 mm auf die Proben aufgetragen. Während des Auftrags wurden das Muster und die Strichstärke fortlaufend mit der Vorlage abgeglichen. Gegebenenfalls wurde der Stift nach zu starker Abnutzung der Spitze und damit einhergehender zu breiter Strichstärke ausgetauscht. Das Muster wurde, wie zuvor bei der Lackierung beschrieben, auch über das FOV hinaus aufgetragen. Die Proben mit dem aufgetragenen Muster sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 zu sehen. Dasselbe Specklemuster wurde für das FOV mit $l = 550$ mm bzw. 575 mm und für das FOV mit $l = 1100$ mm bzw. 1115 mm aufgetragen. Es wurde darauf geachtet, den Durchmesser der Speckles beim größeren FOV gemäß Tabelle 3 um 1 mm größer aufzutragen.

Um die Flächenkomponente der DIC-Software von der richtigen Stelle aus aufziehen zu können, wurden die Mitte des Auflagers, die Innenkante des Auflagers, der Kräfteeinleitungspunkt und die Mitte des Trägers bzw. der Punkt der Verformungsmessung auf der Fläche des DIC-Musters mit rotem Stift angezeichnet, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.



Abbildung 11: Aufgetragenes Muster am Beispiel der Vollquerschnittproben C1.2 mit kleinem FOV und C2.2 mit großem FOV

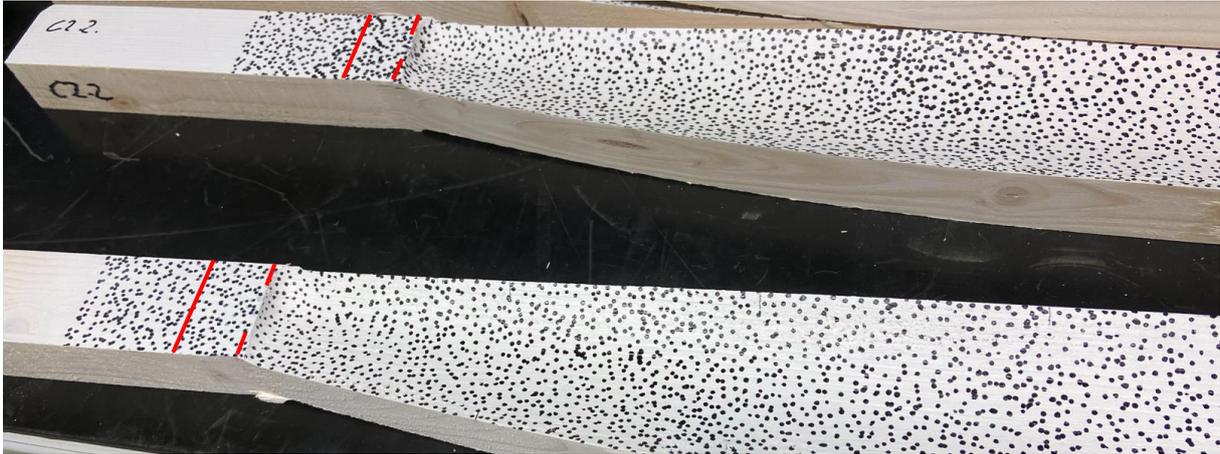


Abbildung 12: Aufgetragenes Muster inklusive Kennzeichnung der Flächenkomponenten am Beispiel der formoptimierten Proben

2.3.2 Bildaufnahme

Die Bildaufnahme erfolgte während der 4-Punkt-Biegeprüfung mit dem Prüfaufbau, wie er dem Kapitel 2.2.1 zu entnehmen ist. Dabei wurden für die erste Versuchsreihe die Vollquerschnittproben und die formoptimierten Proben bis 1500 N belastet und ihr Verformungsverhalten mittels einer Serie von 24 Bildern pro Sekunde (Video) aufgenommen. Weiters wurde die DIC während der Bestimmung der Biegefestigkeit in Faserrichtung bei den formoptimierten Trägern der ersten Versuchsreihe und bei den Referenzproben und formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe durchgeführt.

Für den Versuch wurde eine Kamera des Herstellers Nikon mit der Modellbezeichnung D5300 Elektronik und dem Objektiv AF-S DX NIKKOR 35 mm 1:1,8G verwendet. Die Auflösung der Kamera betrug im Video 1280 × 720 Pixel im Format 16:9. Die Bildrate wurde mit 24 Bildern pro Sekunde eingestellt. Gemäß der International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (2018) wurde der Autofokus der Kamera deaktiviert.

Die Positionierung der Kamera erfolgte zuerst nach den Proben mit kleinerem FOV. Die Kamera wurde dabei so weit von der Probe entfernt, dass das FOV gerade noch im Sucher sichtbar war. Der Abstand vom Sucher zur Probe betrug 114,9 cm. Es wurden ein handelsübliches Stativ und eine Holzstufe verwendet, um die richtige Höhe der Kamera einzustellen. Hierzu wurde die horizontale Mitte des Suchers auf die Mitte des Prüfkörpers gerichtet und das Stativ entsprechend adjustiert. Weiters wurde entsprechend der Empfehlungen der International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (2018) die optische Achse des Objektivs senkrecht zur Oberfläche des Prüfkörpers eingestellt. Die Kamera wurde normal (Winkel von 90°) zum Mittelpunkt des FOV positioniert.

Es wurde darauf geachtet, dass die Position der Kamera nicht verschoben oder verstellt wurde. Zwischen den Prüfungen der Proben wurde die exakte Position der Kamera mit Klebeband fixiert. Der Höhenunterschied zwischen den Proben wurde nicht berücksichtigt.

Aufgrund des schrägliegenden Biegebalkens der Prüfmaschine konnte die Positionierung der Kamera für die Proben mit großem FOV nicht normal zur Probe stattfinden. Für diese Proben wurde die Kamera in einem Winkel von 30° zur Probenoberfläche positioniert. Dadurch konnte die gesamte Probenoberfläche gefilmt werden.

Die International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (2018) beschreiben, dass für ausreichend Belichtung und einen guten Kontrast während des Versuches zu sorgen ist. Daher wurden zwei LED-Lichtleisten mit 110 cm Länge und 4100 Lumen unmittelbar vor der Probe angebracht. Des Weiteren wurde ein Hintergrund in Form eines braunen Backpapierstreifens hinter der Probe angebracht, um Bewegungen von Personen oder Objekten während des Versuches nicht aufzuzeichnen und einen negativen Einfluss auf die Bilder zu vermeiden. Der Prüfaufbau für die DIC ist in Abbildung 13 zusammengefasst.



Abbildung 13: Prüfaufbau für die digitale Bildkorrelation inklusiver Belichtung, Hintergrund, Stativ und Kamera

Nach der Positionierung der Kamera wurde das Objektiv eingestellt und einige Fotos wurden aufgenommen, um die Schärfe der Bilder zu kontrollieren. Im Anschluss wurde die Position des Objektivs mit Klebeband fixiert.

Für die Bildaufnahme wurde die Vorkraft mit 100 N durch die Prüfmaschine auf die Proben aufgebracht. Das Video wurde nach dem Erreichen der Vorkraft ausgelöst. Nach 5–7 Sekunden wurde der Start der Prüfmaschine eingezählt und sie wurde durch einen möglichst lauten Mausklick gestartet. Nach Erreichen des Abbruchkriteriums, einer Kraft von 1500 N oder 90 % Kraftabfall bei der Bestimmung der Biegefestigkeit, wurde das Video beendet.

2.3.3 Bildanalyse

Die Bildanalyse erfolgte mit der freien Software GOM Correlate (2020 Hotfix 5, Zeiss Gruppe). Die Auswertung der Videos wurde analog zu GOM Metrology (2016) durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde die Bildserie mit Drag-and-Drop in die Software eingespeist. Daraufhin wurde das Video in der Windows-App Filme & TV geöffnet und der Startpunkt der Prüfung wurde durch den lauten Mausklick mittels Zeitlupenfunktion auf 0,1 Sekunden genau bestimmt. Von der Prüfmaschine wurden die Kanalwerte der Verformung im Intervall von 0,02 Sekunden ausgegeben. Dies geschah auf Basis des makromechanischen Extensometers und des Traversenwegs sowie der Standardkraft für die Prüfzeit. Anhand der Daten der Prüfmaschine konnte das Ende der Prüfung abgelesen werden.

Im nächsten Schritt wurde in GOM Correlate der Bereich der Prüfung festgelegt, indem die Stufen verwaltet wurden. Dabei wurde die Referenzstufe auf den Zeitpunkt des Mausklicks und das Ende auf den Wert der Prüfmaschine (z. B. 100 Sekunden, um 1500 N zu erreichen) gelegt. Bei den Proben, die bis zum Bruch belastet wurden, wurde das Ende auf das Bild gelegt, das sich exakt vor dem Bruch der Probe befand. In diesem Bereich wurde alle 83,3 Hundertstelsekunden ein Bild von der Prüfung für die Auswertung herangezogen – dies war jedes 20. Bild.

Im Folgenden wurde eine Flächenkomponente auf der Prüfkörperoberfläche, dem FOV entsprechend, von der Innenkante des Auflagers bis zum Mittelpunkt der Probe bzw. bis zur zweiten Innenkante des Auflagers aufgezogen. Dabei wurde auch die vorliegende Musterqualität automatisch von der Software evaluiert und für alle Proben als passend ausgegeben. Im Anschluss wurden die Bilder in der Probenmitte auf den realen Messwert der Höhe nach der Schiebelehre (0,01 mm) kalibriert. Weiters wurde das Koordinatensystem auf den äußersten und obersten Punkt des FOV im Bereich des Auflagers parallel zu den Gitterlinien in der Software gelegt. Diese Schritte wurden alle auf der Referenzstufe durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Schritte ist in den Abbildungen 14 und 15 zu sehen.

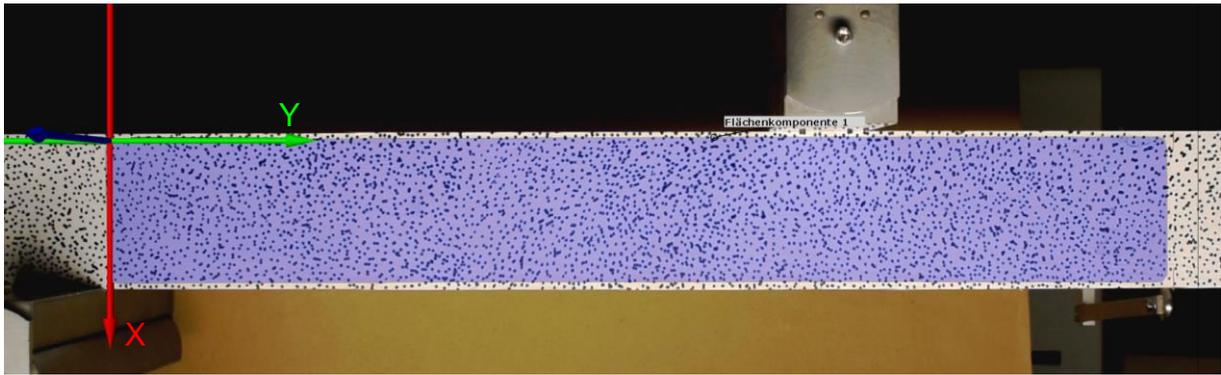


Abbildung 14: Flächenkomponente dem FOV entsprechend und Koordinatensystem der Probe A1.2 mit Vollquerschnitt

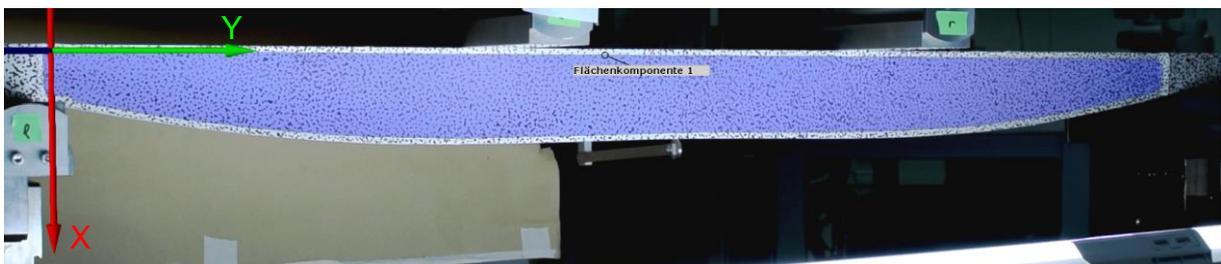


Abbildung 15: Flächenkomponente dem FOV entsprechend und Koordinatensystem der formoptimierten Probe C2.2

Ausgewertet wurde die Dehnung (in Prozent) aufgrund von Normalspannungen in X- und Y-Richtung, um die Proben vergleichen zu können. Für die Auswertung der ersten Versuchsreihe wurden die Dehnungsbilder bei 1500 N verglichen. Weiters wurde die Dehnung bis zum Bruch für die formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe und für die Referenzproben und formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe ausgewertet. Dabei wurde das Dehnungsbild unmittelbar vor dem Bruch herangezogen. Die Dehnung wurde mit Formel 2 von der Software automatisch zu der Referenzstufe mit dem Quotienten aus Längenänderung und Ursprungslänge berechnet.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Um die Genauigkeit von GOM Correlate evaluieren zu können, wurde zum einen das Rauschen der Dehnungswerte in X- und Y-Richtung bestimmt. Zum anderen wurde die Verschiebung in X-Richtung in unmittelbarer Nähe zur Probenmitte mit den Werten des makromechanischen Extensometers und der Traversenverschiebung im Bereich von 100 N bis 1500 N verglichen. Außerdem wurde bei 1500 N der Wert des mechanischen Makro-Extensometers dem Wert von GOM Correlate gegenübergestellt. Die Evaluierung fand an der ersten Versuchsreihe statt.

Für die Ermittlung des Rauschens wurde der unmittelbare Bereich drei Sekunden vor dem Start der Prüfung herangezogen. Dabei wurden sämtliche Bilder des Videos bei gleichbleibender Vorkraft von 100 N verglichen. Denn dabei dürfte der Wert von 0 für alle Bilder nicht über- oder unterschritten werden. Die Anzahl der Bilder betrug für alle Proben 73. Es wurden die Werte der Vollquerschnitte und der formoptimierten Querschnitte betrachtet. Der Fehler im Minimum, Maximum und im arithmetischen Mittel wurde ausgewertet.

Die Evaluierung der Verschiebung in X-Richtung wurde parallel zum oben beschriebenen Prüfverlauf durchgeführt. Die Verschiebung bezieht sich auf die Abweichung in mm zu der Referenzstufe. Nur die Flächenkomponente wurde in unmittelbarer Nähe zur Verformungsmessung des mechanischen Makro-Extensometers gelegt, wie den Abbildungen 16 und 17 zu entnehmen ist. Für die Auswertung wurden die Werte der Prüfmaschine und von GOM Correlate alle 83,3 Hundertstelsekunden während der Prüfung einander gegenübergestellt. Bei den Werten von GOM Correlate wurde der Maximalwert der jeweiligen Stufe herangezogen.

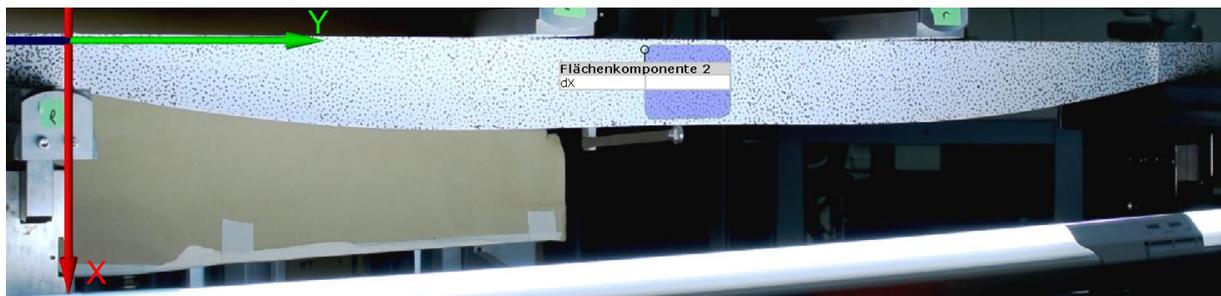


Abbildung 16: Lage der Flächenkomponente für die Evaluierung der Verschiebungswerte in X-Richtung am Beispiel der formoptimierten Probe B1.2

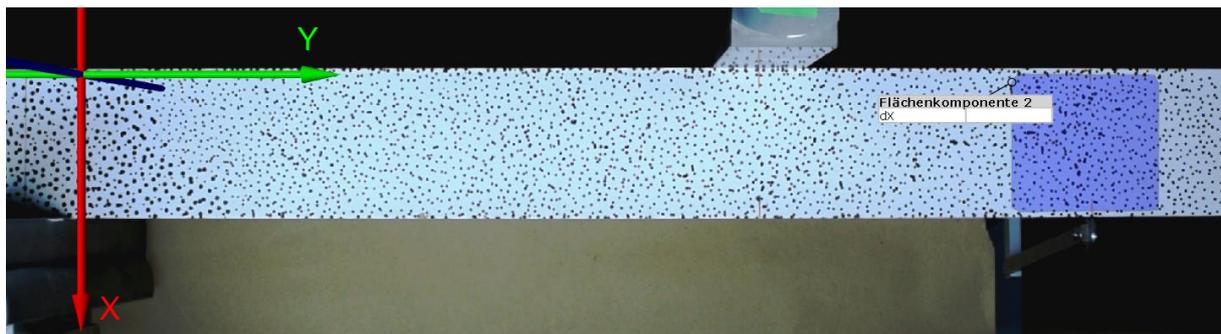


Abbildung 17: Lage der Flächenkomponente für die Evaluierung der Verschiebungswerte in X-Richtung am Beispiel der Probe D2.2 mit Vollquerschnitt

3. Ergebnisse

3.1 Prüfkörper

3.1.1 Geometrie der formoptimierten Träger der ersten Versuchsreihe

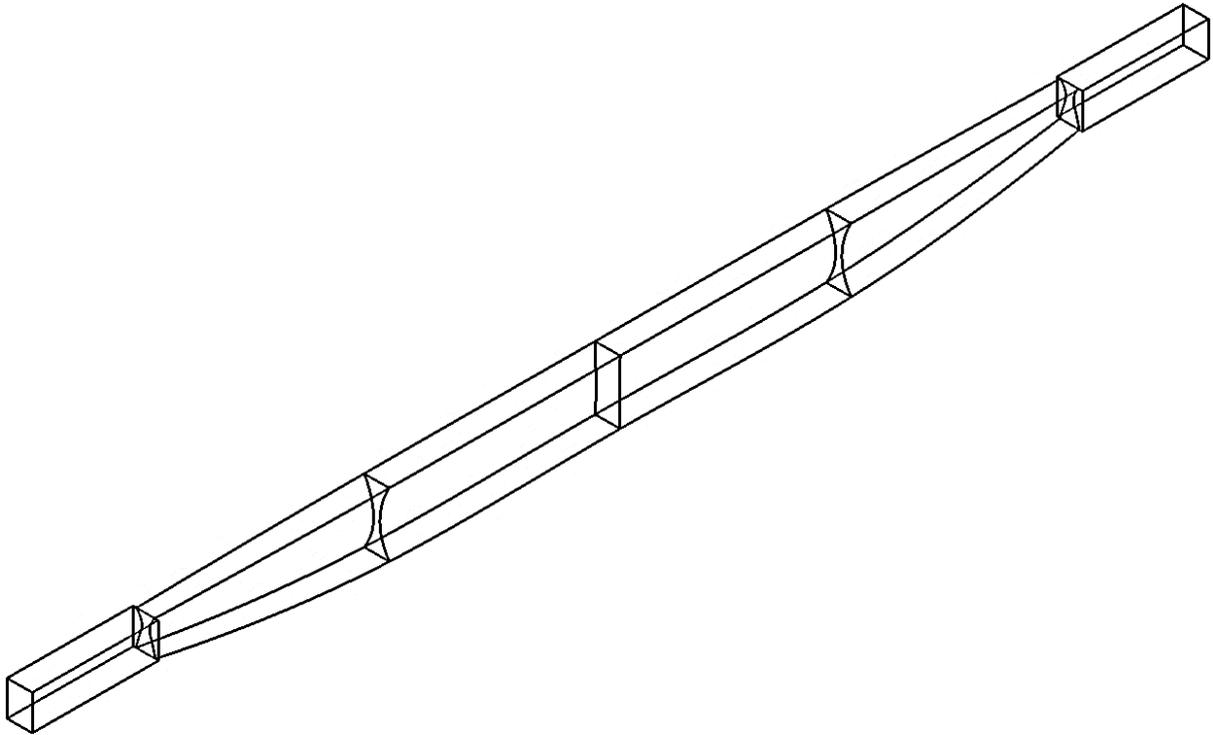


Abbildung 18: Geometrie der formoptimierten Proben für die erste Versuchsreihe

Durch die Formoptimierung konnte das Volumen auf 70,1 % reduziert werden und somit eine Materialersparnis von rund 30 % gegenüber dem Referenzquerschnitt von 30 x 60 mm erreicht werden. Die Formoptimierung ergab für beide Restriktionen (Durchbiegung und Festigkeit) eine ähnliche Geometrie. Der Träger weist im Mittelpunkt, wie in Abbildung 18 zu sehen ist, einen annähernd rechteckigen Querschnitt auf, weil er auf eine maximale Höhenzunahme von 21 % begrenzt ist und das Modell im nächsten Schritt versucht, die Breite zu maximieren. Der Querschnitt im Bereich des Auflagers wird annähernd als I-Querschnitt ausgebildet und die Unterseite des Trägers verjüngt sich in Richtung des Auflagers.

3.1.2 Adaptierte Geometrie der formoptimierten Träger der zweiten Versuchsreihe

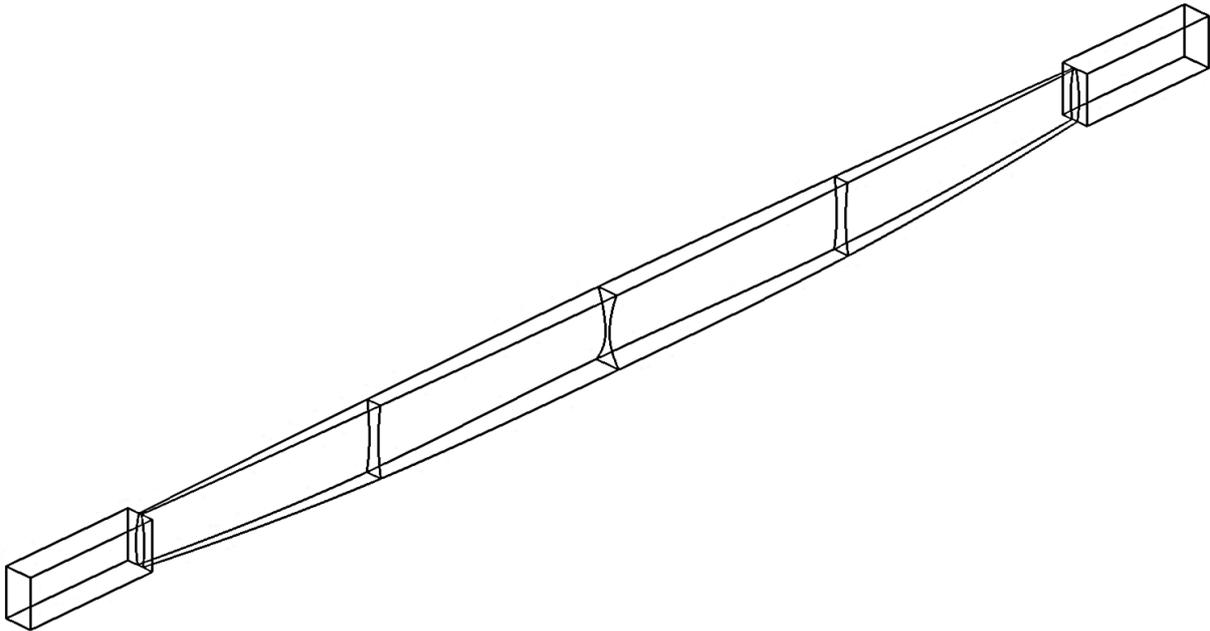


Abbildung 19: Geometrie der formoptimierten Proben für die zweite Versuchsreihe

Die Formoptimierung lieferte für die zweite Versuchsreihe eine Materialersparnis von 47,4 %, bzw. wurde das Volumen auf 52,6 % gegenüber des Referenzquerschnittes reduziert. Durch den vorzugsweisen Schubbruch in der Nähe des Auflagers der ersten Versuchsreihe, siehe Kapitel 3.2.5 und 4.2.5, wurde der Wert der Schubfestigkeit von 3,5 N/mm² nach ÖNORM EN 14080 (2013) auf 2,5 N/mm² reduziert. Dadurch wurde die Schubauslastung von 95–100 % auf 45 % verringert.

Weiters ist in der Geometrie nach Abbildung 19 zu erkennen, dass der Auflagerbereich bzw. der Bereich mit der höchsten Querkraft im Gegensatz zur Geometrie nach Abbildung 18 nicht mehr die Form eines I-Trägers annimmt, sondern der Querschnitt nach außen gewölbt ist. Damit weist der Querschnitt im Bereich der höchsten Schubkräfte eine größere Breite und folglich eine erhöhte Schubfläche auf. Die Geometrie nimmt in Richtung Mitte der Probe die Form eines I-Trägers an. Die Unterseite des Trägers verjüngt sich in Richtung Auflager weniger als der Träger der ersten Versuchsreihe, um die auftretenden Schubkräfte nach Mayencourt & Mueller (2020) niedriger zu halten.

3.1.3 Abweichung der Geometrie durch die CNC-Bearbeitung

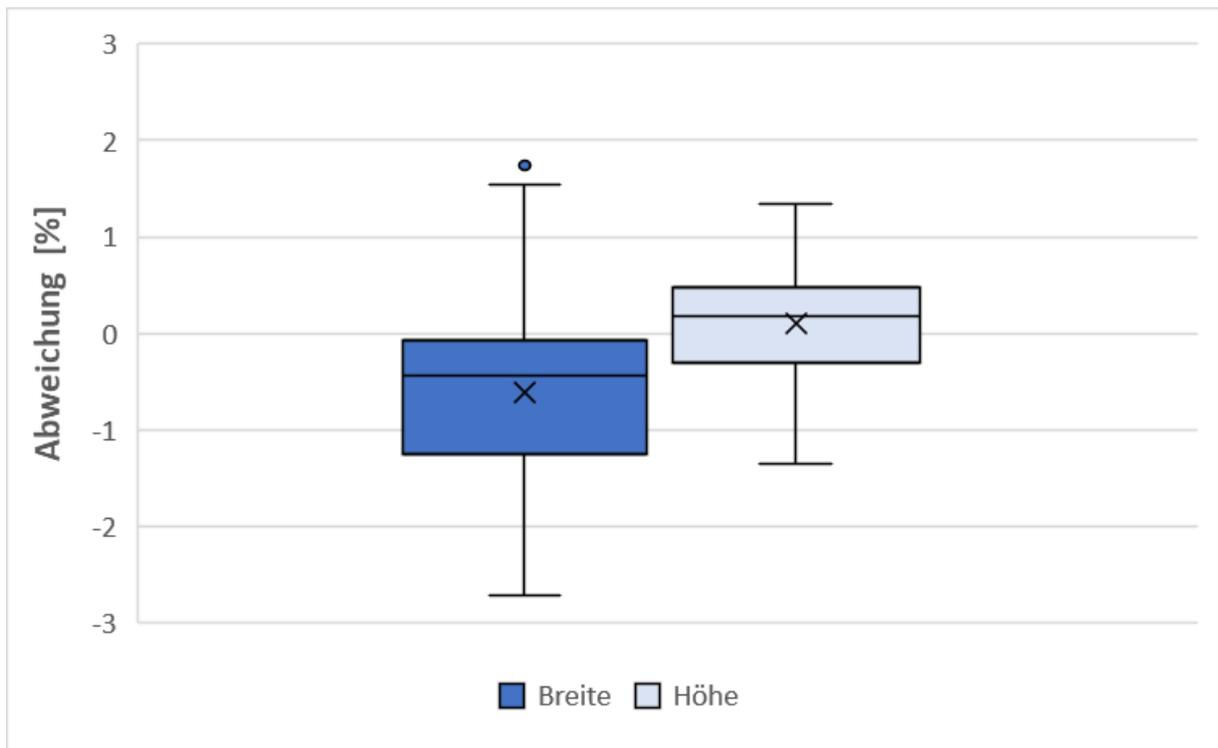


Abbildung 20: Abweichung der Ist-Breiten ($n = 19$) bzw. Ist-Höhen ($n = 78$) von den Soll-Werten des Modells nach der CNC-Bearbeitung

Nach Abbildung 20 beträgt die mittlere Abweichung der Höhe $+0,1 \%$ oder $+0,05 \text{ mm}$. Die mittlere Abweichung der Breite beträgt $-0,6 \%$ oder $-0,14 \text{ mm}$. Eine negative Abweichung ist gleichbedeutend damit, dass die realen Maße der gefrästen Proben kleiner sind als die Maße im Modell, bzw. ist eine positive Abweichung gleichbedeutend damit, dass die realen Maße größer sind als die Maße im Modell.

3.1.4 Materialeinsparung durch die Formoptimierung

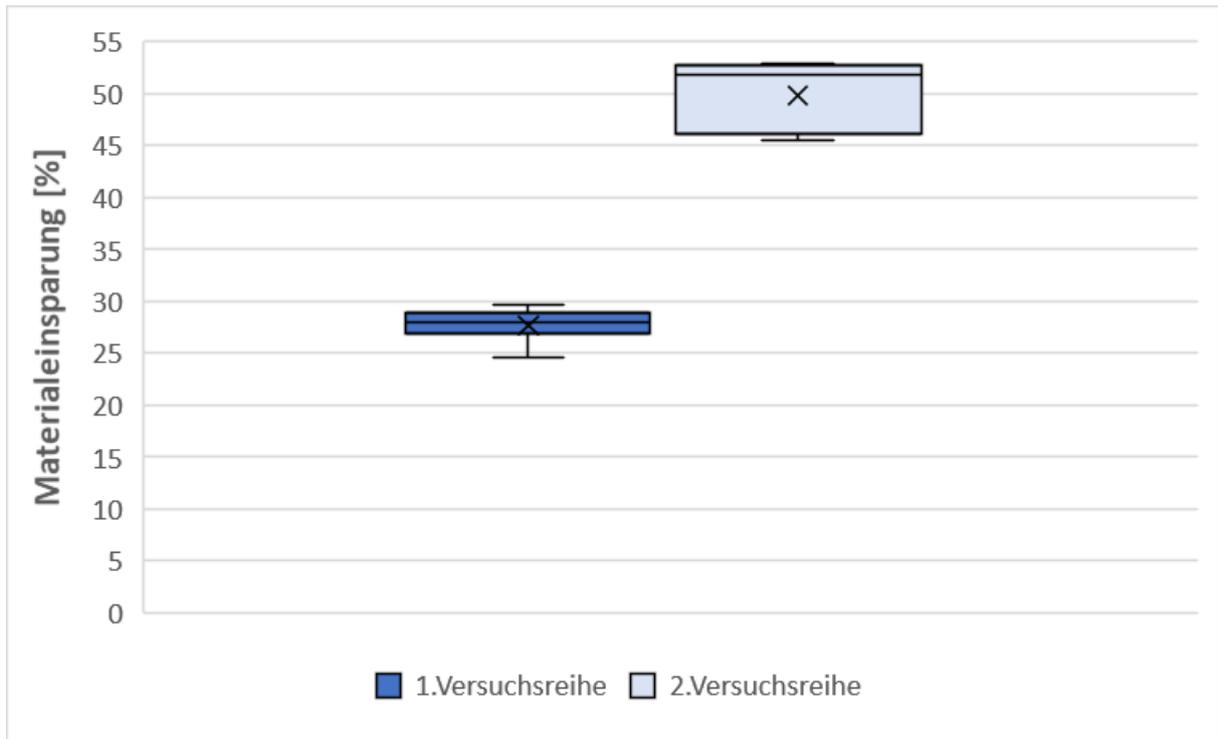


Abbildung 21: Materialeinsparung der formoptimierten Proben gegenüber den Referenzproben für die erste Versuchsreihe (n = 6) und die zweite Versuchsreihe (n = 5)

Abbildung 21 zeigt die Materialeinsparung der gefrästen Träger für die erste und für die zweite Versuchsreihe. Die Materialeinsparung für die erste Versuchsreihe beträgt im Mittel 27,4 % und reicht von 24,6 % bis 29,6 %. Für die zweite Versuchsreihe beträgt die mittlere Materialeinsparung 49,8 %, in einem Bereich von 45,5 % bis 53 %.

3.1.5 Holzfeuchte und Rohdichte

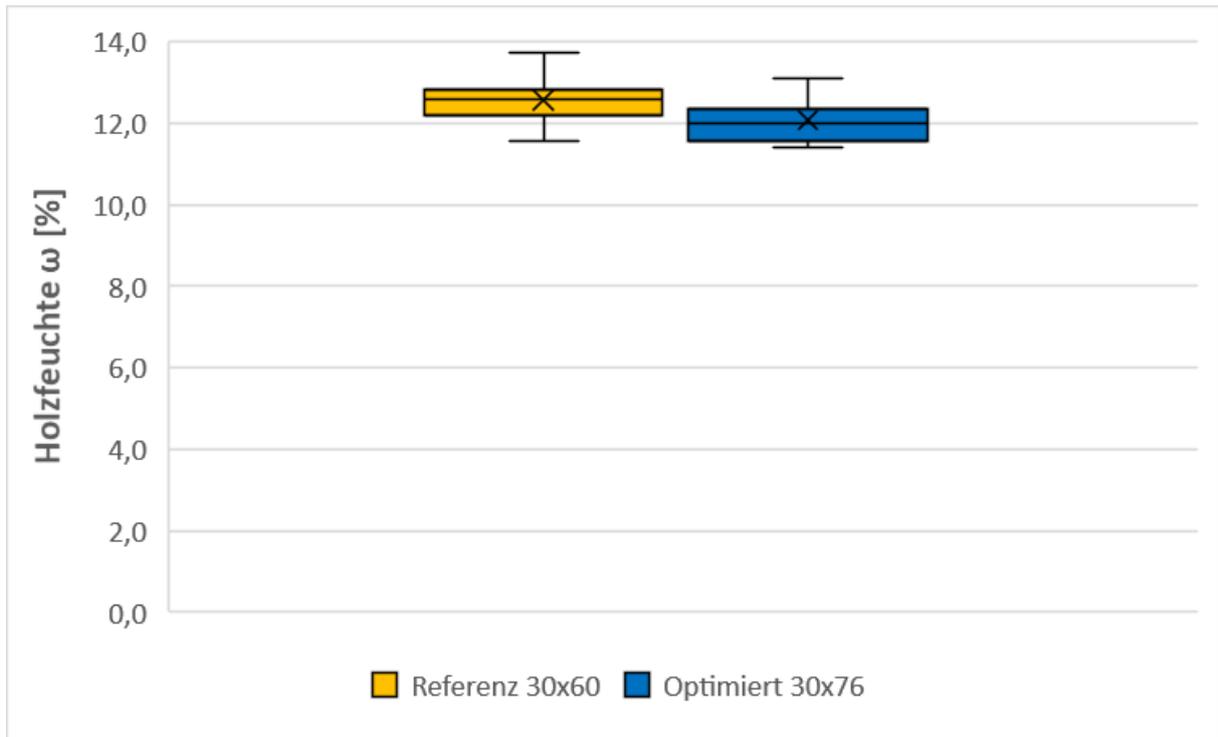


Abbildung 22: Holzfeuchte der Referenzproben (n = 6) und der formoptimierten Proben (n = 6) bei den mechanischen Prüfungen für die erste Versuchsreihe

Die Holzfeuchte (siehe Abbildung 22) liegt für die Referenzproben zwischen 11,6 % und 13,7 % und für die formoptimierten Proben zwischen 11,4 % und 13,1 %. Der Mittelwert beträgt 12,6 % bzw. 12,1 %. Die größte Differenz der zusammengehörenden Proben beträgt 1,3 %; die Differenzen der restlichen Proben liegen ausschließlich unter 1 %.

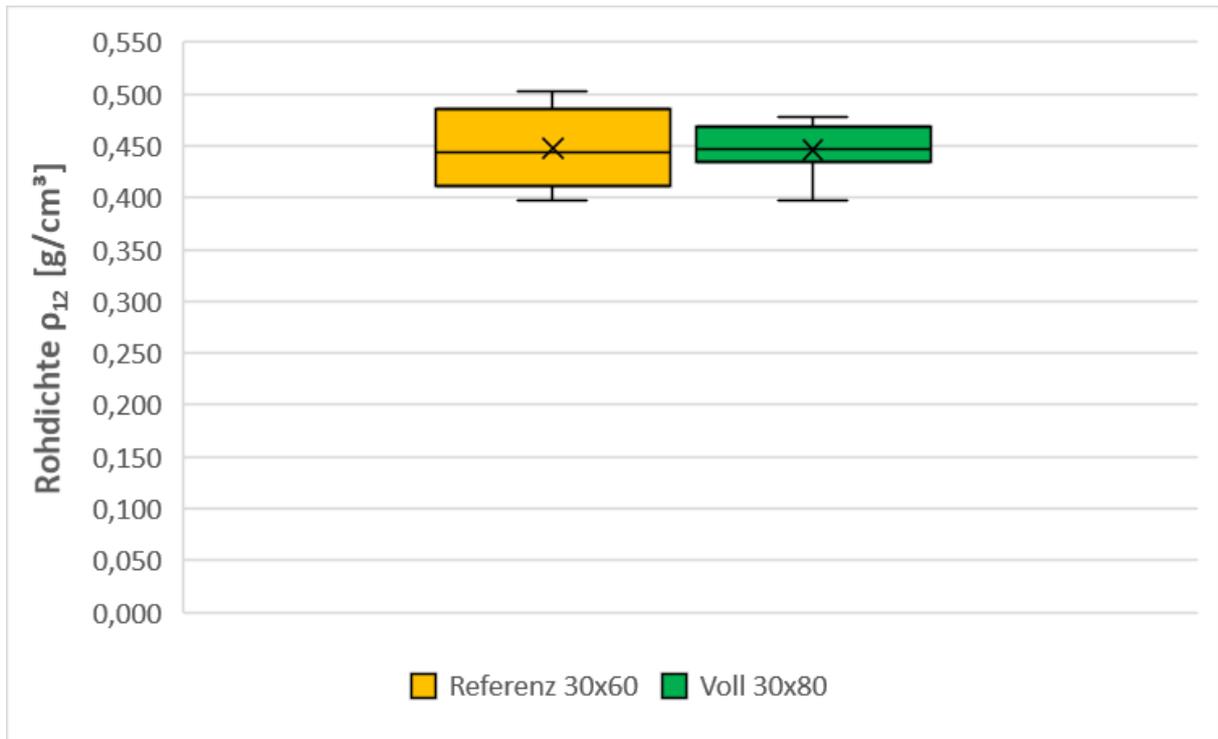


Abbildung 23: Rohdichte bei etwa 12 % Holzfeuchte für die erste Versuchsreihe von den Referenzproben (n = 6) und den Proben mit Vollquerschnitt (n = 6), wobei die Vollquerschnittproben den formoptimierten Proben gleichgesetzt werden können

Die Rohdichte nach dem Normklima bei etwa 12 % Holzfeuchte beträgt nach Abbildung 23 für die Referenzproben im Mittelwert 0,448 g/cm³ im Bereich von 0,397 g/cm³ bis 0,502 g/cm³. Für die Vollquerschnittproben bzw. die formoptimierten Proben beträgt der Mittelwert 0,446 g/cm³ im Bereich von 0,397 g/cm³ bis 0,478 g/cm³.

3.2 Mechanische Charakterisierung

3.2.1 Biegefestigkeit in Faserrichtung

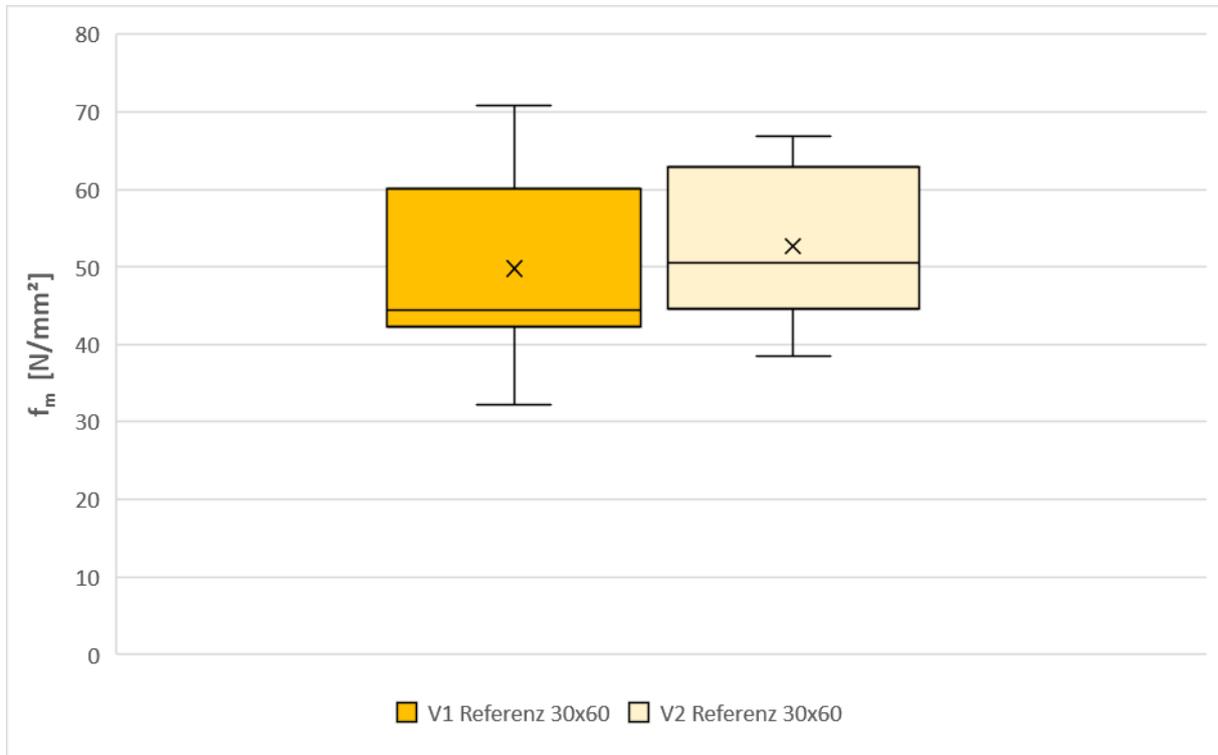


Abbildung 24: Biegefestigkeit (f_m) der Referenzproben ($n = 6$) der ersten Versuchsreihe (V1) und der Referenzproben ($n = 5$) der zweiten Versuchsreihe (V2)

Die Biegefestigkeit in Faserrichtung beträgt nach Abbildung 24 für die Referenzproben der ersten Versuchsreihe im Mittelwert 50 N/mm^2 in einem Bereich von 32 N/mm^2 bis 71 N/mm^2 . Für die zweite Versuchsreihe beträgt der Mittelwert der Referenzproben 53 N/mm^2 im Bereich von 38 N/mm^2 bis 67 N/mm^2 .

3.2.2 Maximalkraft der Biegeprüfung

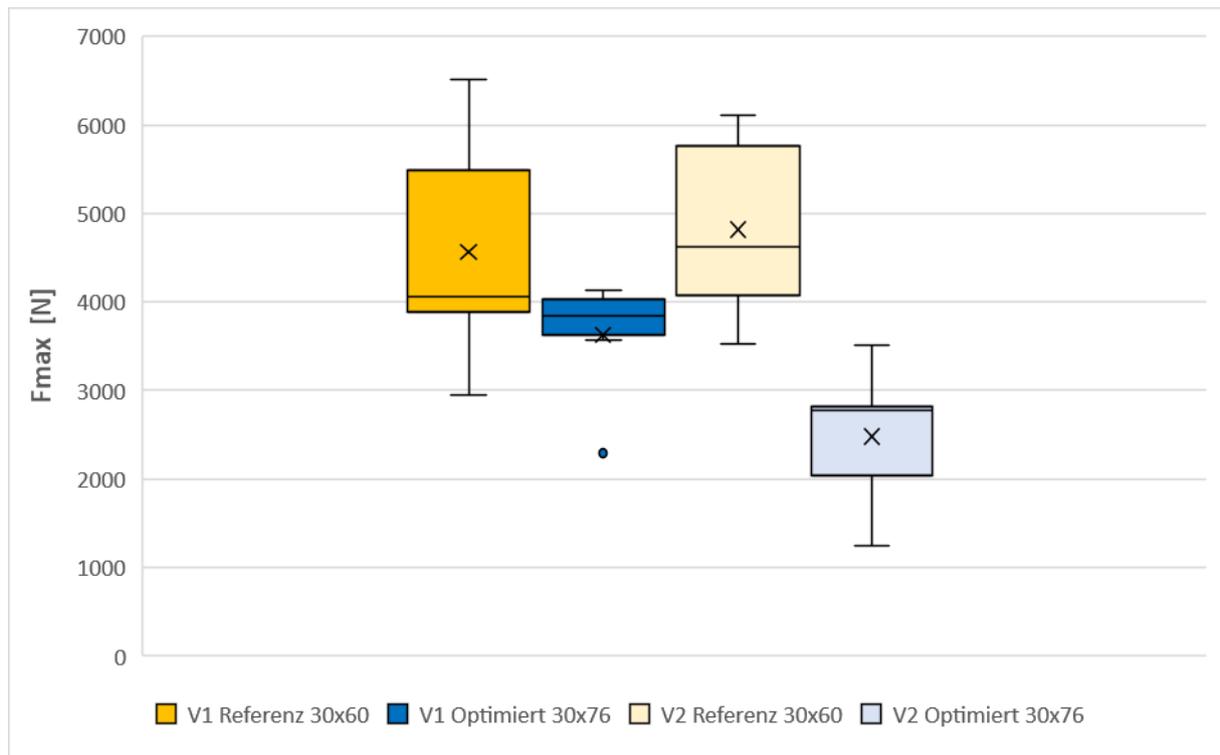


Abbildung 25: Maximale Kraft (F_{\max}) bei Bruch der Referenzproben ($n = 6$) und der formoptimierten Proben ($n = 6$) der ersten Versuchsreihe und der Referenzproben ($n = 5$) und der formoptimierten Proben ($n = 5$) der zweiten Versuchsreihe

Die Maximalkraft der Biegeprüfung ist in Abbildung 25 abgebildet. Es ist zu erkennen, dass in der ersten Versuchsreihe der Mittelwert der Referenzproben 4563 N in einem Bereich zwischen 2955 N und 6528 N beträgt. Der Mittelwert der dazugehörigen formoptimierten Proben beträgt 3625 N in einem Bereich zwischen 2293 N und 4128 N. Die Probe B2.2 wurde mit 2293 N als Ausreißer identifiziert. Weiters weisen die optimierten Proben eine deutlich kleinere Streuung als die Referenzproben auf. Für die zweite Versuchsreihe beträgt der Mittelwert der Referenzproben 4821 N in einem Streubereich von 3526 N bis 6114 N. Der Mittelwert der optimierten Proben der zweiten Versuchsreihe beträgt 2478 N in einem Bereich von 1245 N bis 3511 N. Der Streubereich liegt für die Referenzproben und für die formoptimierten Proben auf einem ähnlichen Niveau.

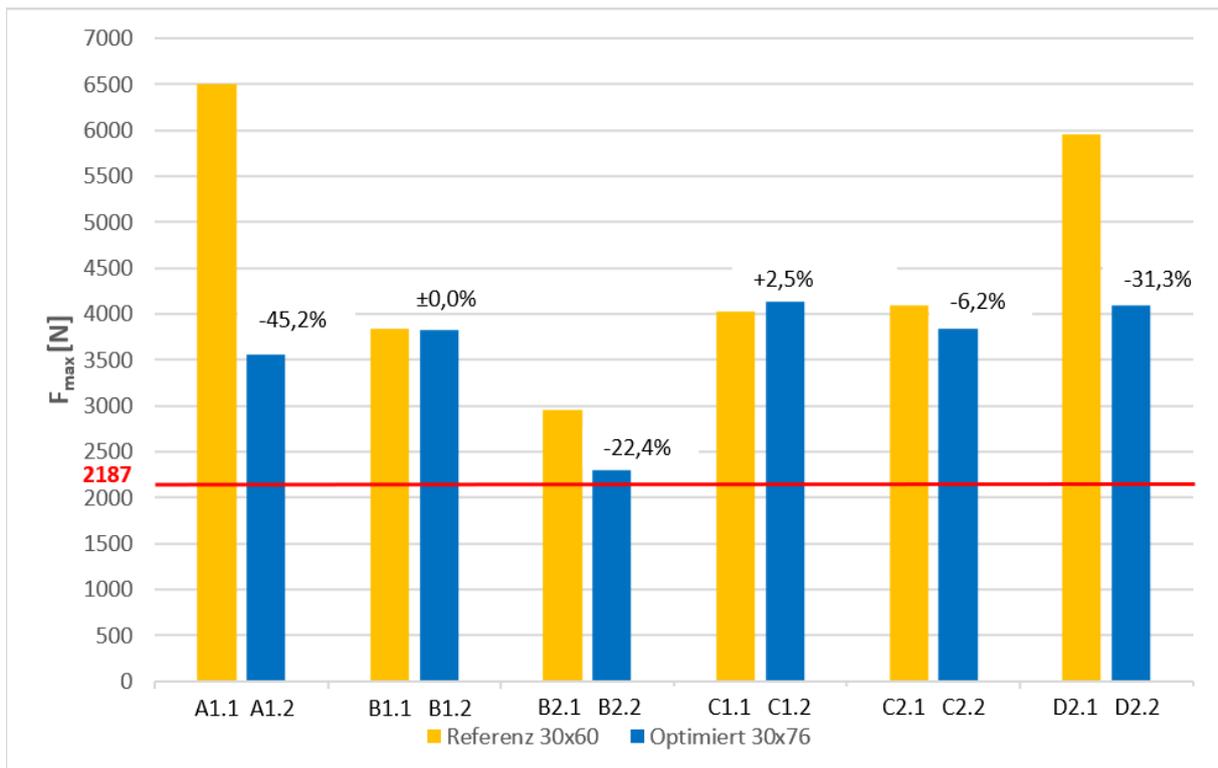


Abbildung 26: Gegenüberstellung der maximalen Kraft (F_{\max}) bei Bruch der einzelnen Referenzproben und formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe, wobei die rote Linie die zu übertreffende Restriktion von 2187 N darstellt

Für die Werte der maximalen Kraft wurde die Restriktion gestellt, dass der Träger 2187 N oder eine Biegespannung von 24 N/mm² bezogen auf den Referenzquerschnitt aushalten muss. Werden hierfür die Werte der maximalen Kraft nach Abbildung 26 verglichen, ist zu erkennen, dass die Werte aller Proben über dem geforderten Wert liegen.

Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Werte der ersten Versuchsreihe ist weiter zu erkennen, dass die formoptimierten Proben mit den Bezeichnungen A1.2, B2.2, C2.2 und D2.2 um 45,2 %, 22,4 %, 6,2 % und 31,3 % weniger ausgehalten haben als die dazugehörigen Referenzproben. Bei Probe B1 halten die optimierte Probe und die Referenzprobe dieselbe maximale Kraft vor dem Bruch aus. Die formoptimierte Probe C1.2 hält um 2,5 % mehr Kraft aus als die dazugehörige Referenzprobe.

Der t-Test zeigt für die Werte der maximalen Kraft der ersten Versuchsreihe, dass kein statistisch signifikanter Unterschied durch die Optimierung vorhanden ist. Damit wurde die Nullhypothese angenommen. Folglich liegt durch die Reduzierung der Geometrie keine statistisch signifikante Reduzierung der maximalen Kraft vor.

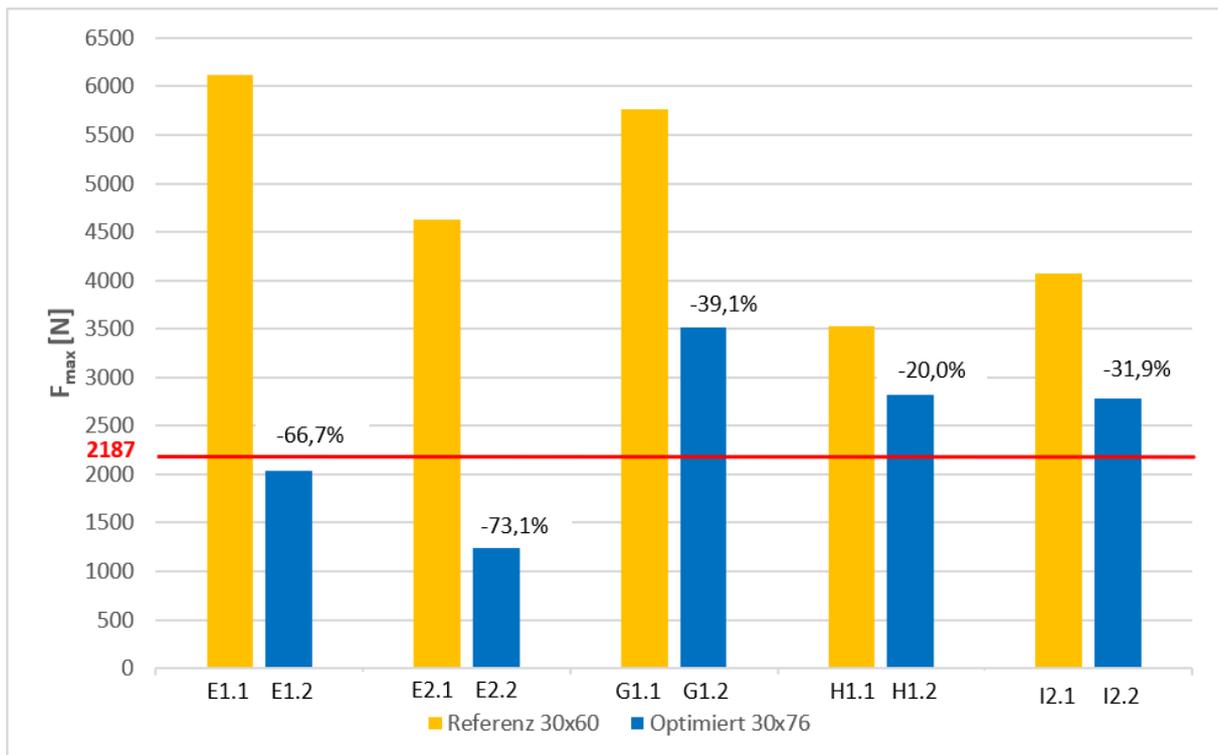


Abbildung 27: Gegenüberstellung der maximalen Kraft (F_{\max}) bei Bruch der einzelnen Referenzproben und formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe, wobei die rote Linie die zu übertreffende Restriktion von 2187 N darstellt

Die Gegenüberstellung von F_{\max} der einzelnen Proben der zweiten Versuchsreihe ist in Abbildung 27 zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass sämtliche Werte der formoptimierten Proben unter den Werten der Referenzproben liegen. Die optimierten Proben E1.2 und E2.2 liegen um 66,7 % bzw. 73,1 % unter den Werten der dazugehörigen Referenzproben. Auch die Restriktion von 2187 N wurde für die beiden Proben nicht erfüllt. Die Proben G1.2, H1.2 und I2.2 liegen um 39,1 %, 20 % und 31,9 % unter den Werten der Referenzproben. Diese drei optimierten Proben erfüllen jedoch die Restriktion der maximalen Kraft.

Mit dem t-Test wurden die Werte der maximalen Kraft der zweiten Versuchsreihe auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang hin überprüft. Hier wurde ein signifikanter negativer Effekt durch die Optimierung nachgewiesen. Die Nullhypothese wurde abgelehnt und H1 wurde angenommen. Folglich liefern die formoptimierten Proben eine niedrigere Performance hinsichtlich maximaler Kraft.

3.2.3 Verformung bei 2187 N

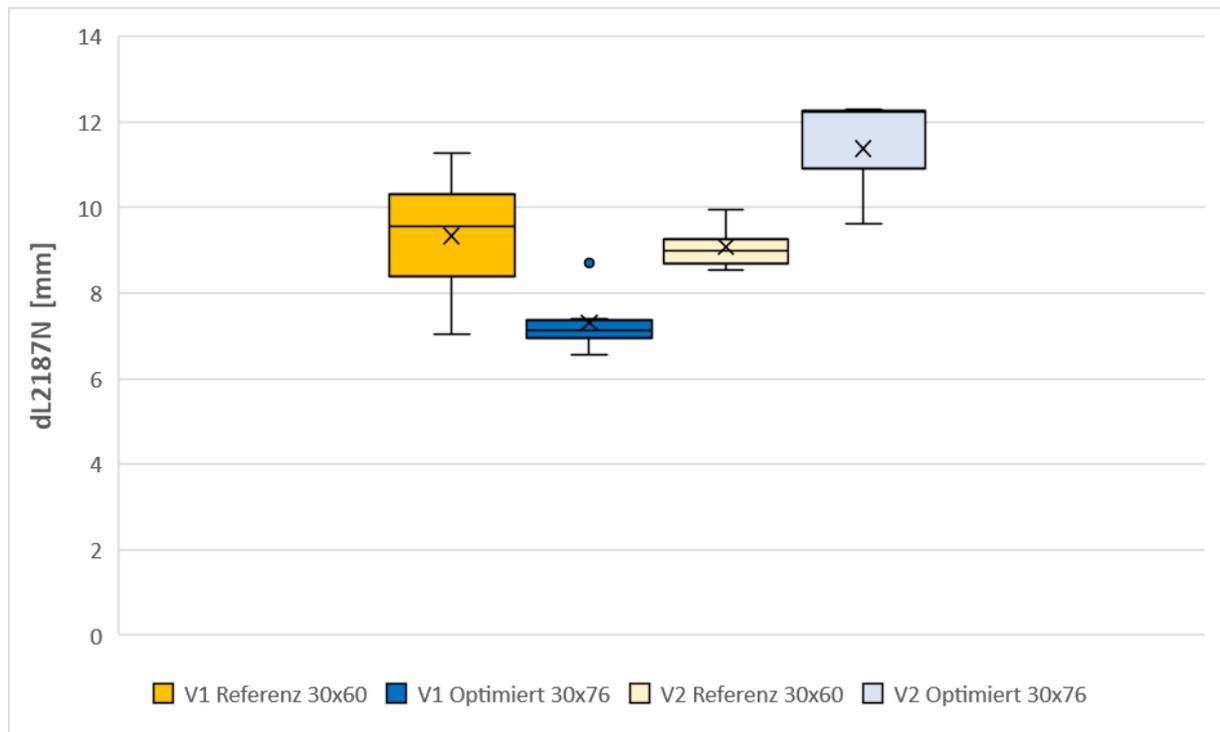


Abbildung 28: Verformung bei 2187 N (dL_{2187N}) der Referenzproben ($n = 6$) und der formoptimierten Proben ($n = 6$) der ersten Versuchsreihe sowie der Referenzproben ($n = 5$) und der formoptimierten Proben ($n = 3$) der zweiten Versuchsreihe

Die Werte der Verformung bei 2187 N können Abbildung 28 entnommen werden. Dabei ist für die erste Versuchsreihe zu erkennen, dass die mittlere Verformung der Referenzproben 9,3 mm beträgt und in einem Bereich von 7 mm bis 11,3 mm liegt. Die mittlere Verformung der formoptimierten Proben beträgt 7,3 mm in einem Bereich von 6,9 mm bis 8,7 mm. Der Wert 8,7 mm steht für die Probe B2.2 und wurde als Ausreißer identifiziert. Es bleibt wieder festzuhalten, dass die Werte der formoptimierten Proben eine weitaus geringere Streubreite aufweisen. Die Verformung für die zweite Versuchsreihe beträgt für die Referenzproben im Mittelwert 9,08 mm und für die formoptimierten Proben 11,38 mm. Für die Referenzproben konnten allerdings nur drei Werte herangezogen werden. Weiters streuen bei der zweiten Versuchsreihe die Werte der Referenzproben weniger als die der formoptimierten Proben.

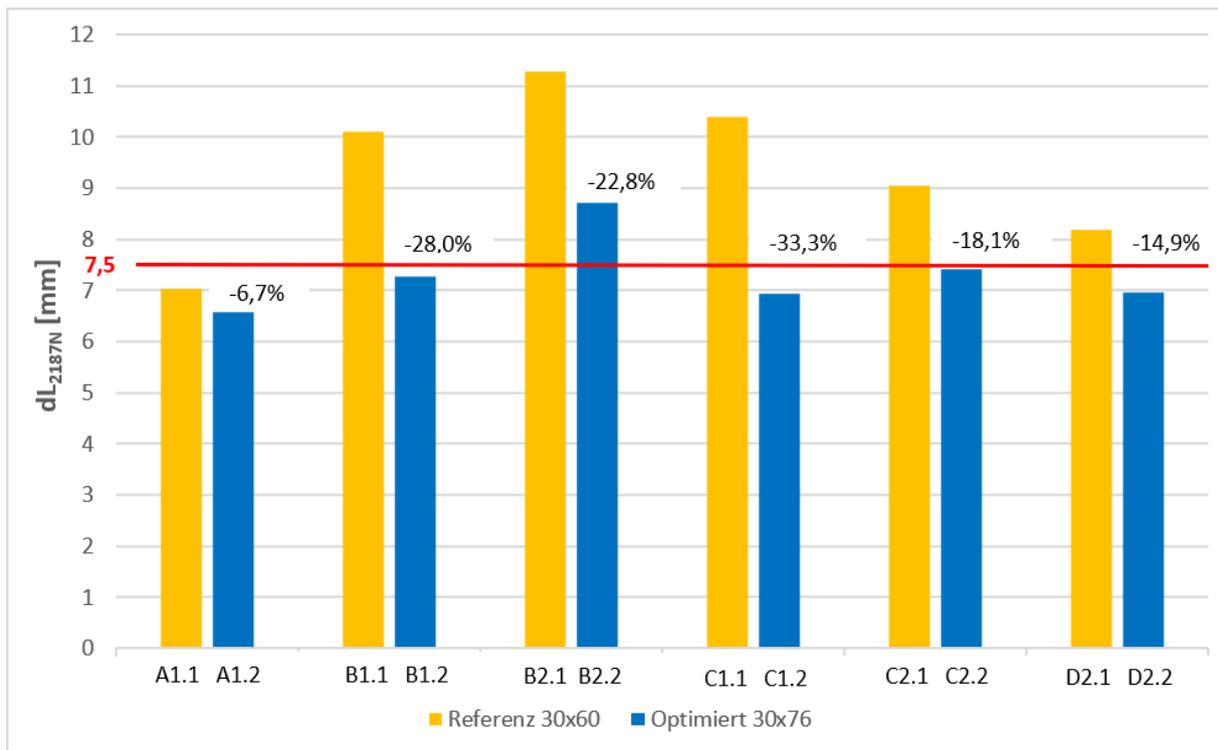


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Verformung bei 2187 N (dL_{2187N}) der einzelnen Referenzproben und formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe, wobei die rote Linie die zu unterschreitende Restriktion des Durchbiegungslimits nach ÖNORM B 1995-1-1 (2019) von 7,5 mm darstellt

Werden die einzelnen Proben der ersten Versuchsreihe nach Abbildung 29 miteinander verglichen, ist zu erkennen, dass sämtliche formoptimierte Proben eine geringere Durchbiegung als die jeweils dazugehörigen Referenzproben aufweisen. Die Proben A1.2, B1.2, B2.2, C1.2, C2.2 und D2.2 weisen eine um 6,7 %, 28 %, 22,8 %, 33 %, 18,1 % und 14,9 % geringere Verformung als die Referenzproben auf. Das Durchbiegungslimit von 7,5 mm bei 2187 N konnte für alle formoptimierten Proben erfüllt werden, außer für B2.2, die aber als Ausreißer ausgewiesen wurde.

Auf Basis des t-Tests ist zu erkennen, dass durch den t-Wert die Nullhypothese abgelehnt und H_1 angenommen wurde. Somit ist ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den formoptimierten Proben und den Referenzproben gegeben. Es kann ein positiver Effekt durch die reduzierte Geometrie angenommen werden.

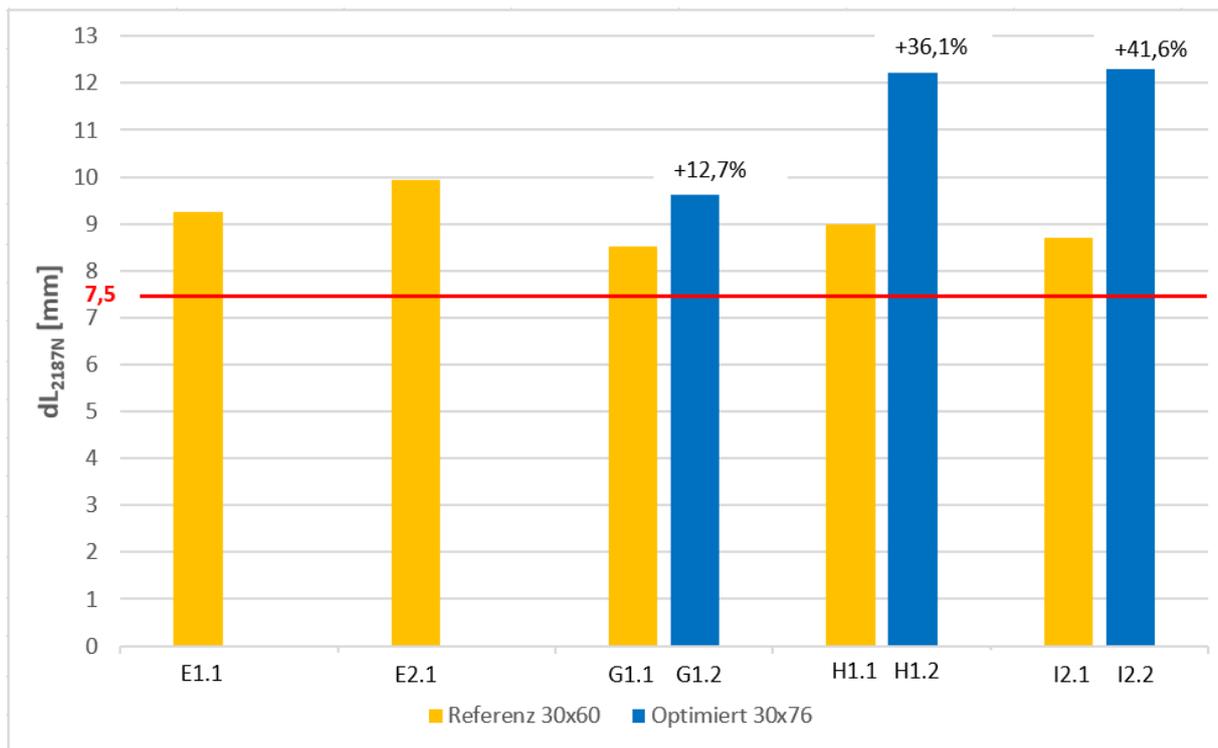


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Verformung bei 2187 N (dL_{2187N}) der einzelnen Referenzproben und formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe, wobei die rote Linie die zu unterschreitende Restriktion des Durchbiegungslimits nach ÖNORM B 1995-1-1 (2019) von 7,5 mm darstellt

Der Gegenüberstellung der einzelnen Verformungswerte der zweiten Versuchsreihe nach Abbildung 30 kann entnommen werden, dass die ersten beiden optimierten Proben E1.2 und E2.2 bereits vor der erforderlichen Kraft von 2187 N brachen. Die restlichen formoptimierten Proben G1.2, H1.2 und I2.2 weisen eine um 12,7 %, 36,1 % und 41,6 % höhere Verformung als die jeweils dazugehörigen Referenzproben auf. Es ist festzuhalten, dass sich sämtliche optimierte Proben bei 2187 N stärker als die Referenzproben verformten. Die zu Beginn formulierte Restriktion von 7,5 mm konnte von keiner formoptimierten Probe erfüllt werden.

Weiters ist dem t-Test zu entnehmen, dass ein statistisch signifikanter Effekt durch die Optimierung gegeben ist. Die Nullhypothese wird abgelehnt und H1 angenommen. Ein negativer Effekt durch die Optimierung ist gegeben.

3.2.4 Globaler Biege-Elastizitätsmodul

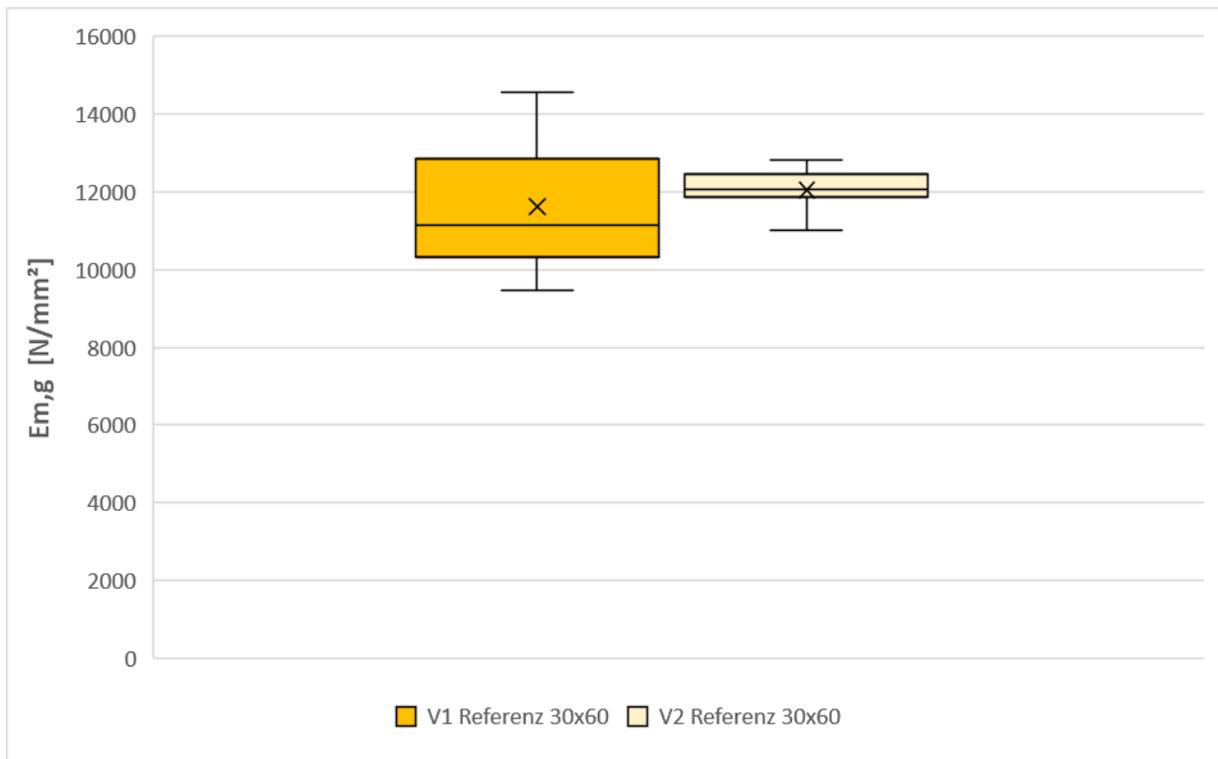


Abbildung 31: Globaler Elastizitätsmodul ($E_{m,g}$) der Referenzproben ($n = 6$) der ersten Versuchsreihe und der Referenzproben ($n = 5$) der zweiten Versuchsreihe

In Abbildung 31 sind die globalen Elastizitätsmodule der ersten und zweiten Versuchsreihe abgebildet. Die Referenzproben der ersten Versuchsreihe ergaben einen Mittelwert von 11625 N/mm^2 in einem Bereich von 9456 N/mm^2 bis 14551 N/mm^2 . Die Referenzproben der zweiten Versuchsreihe haben einen Mittelwert von 12047 N/mm^2 in einem Bereich von 11014 N/mm^2 bis 12836 N/mm^2 .

3.2.5 Bruchbilder und Kraft-Weg-Diagramme



Abbildung 32: Bruchbilder der Referenzprobe B1.1 und der formoptimierten Probe B1.2 der ersten Versuchsreihe

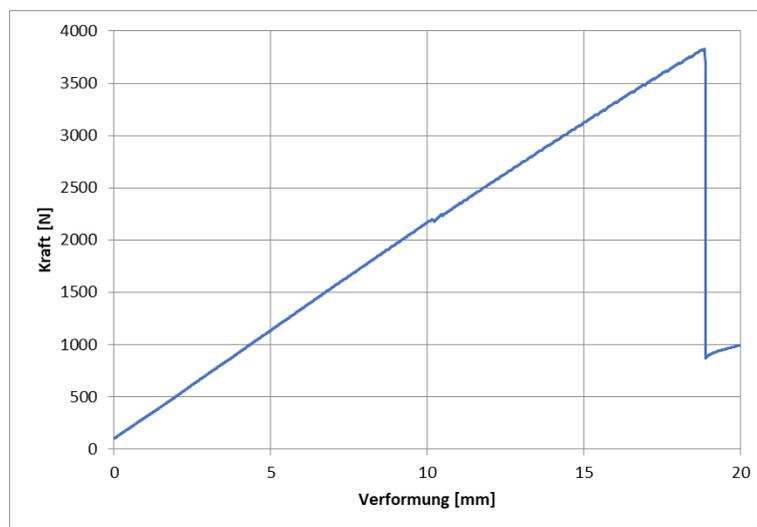


Abbildung 33: Kraft-Weg-Diagramm der Biegeprüfung der Referenzprobe B1.1

Werden die Bruchbilder der Referenzproben der ersten und zweiten Versuchsreihe betrachtet, wie beispielhaft in Abbildung 32 dargestellt, ist zu erkennen, dass alle Proben durch augenscheinliches Versagen in der Zugzone gebrochen sind. Das Versagen ist auf Äste und der damit verbundenen lokalen Faserabweichung zurückzuführen. Ein dementsprechender Spröbruch ist bei den Referenzproben erkennbar, wie beispielhaft in Abbildung 33 dargestellt.



Abbildung 34: Bruchverhalten der Referenzprobe B2.1 mit den beiden Teilbrüchen an der rechten Stelle und im weiteren Prüfverlauf an der linken Stelle

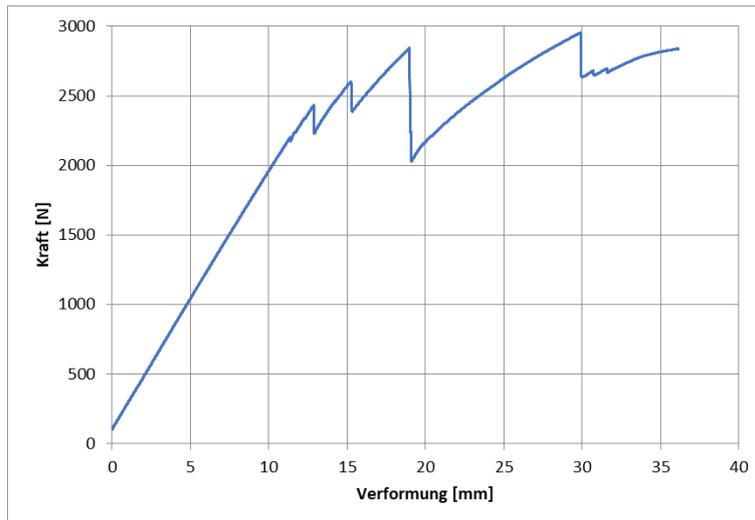


Abbildung 35: Kraft-Weg-Diagramm der Biegeprüfung der Referenzprobe B2.1

Ein anderes Bruchverhalten zeigte die Referenzprobe B2.1, denn hier wies die Zugzone mehrere Äste auf. Bei etwa 2400 N verließ die Probe, wie in Abbildung 35 zu sehen, den elastischen Bereich und es trat der erste Teilbruch bei einem Ast mit der verbundenen Faserabweichung ein. Es handelte sich um den in Abbildung 34 erkennbaren Ast an der rechten Stelle. Daraus folgend trat ein weiterer Teilbruch bei dem Ast an der linken Stelle nach Abbildung 34 ein. Die Probe erreichte ihren Höchstwert der Kraft bei 2955 N nach den beiden Teilbrüchen. Im Anschluss brach die Probe an der rechten Stelle nach Abbildung 34.

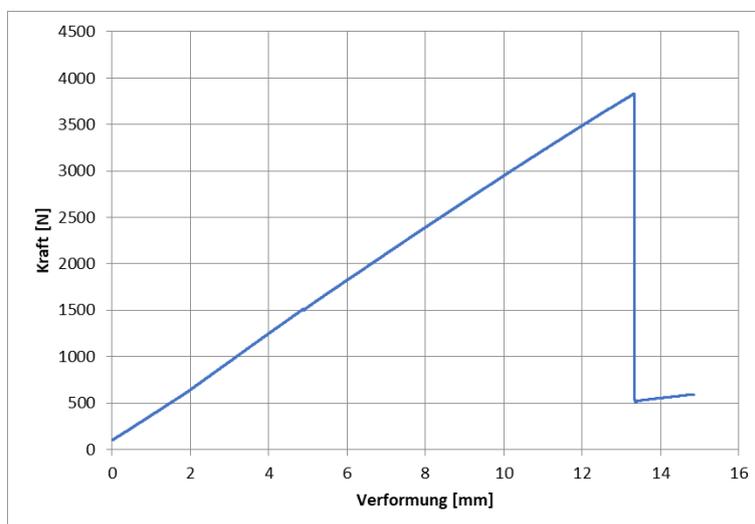


Abbildung 36: Kraft-Weg-Diagramm der Biegeprüfung der formoptimierten Probe B1.2

Die formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe brachen, wie beispielhaft nach Abbildung 32, mit Ausnahme der Probe B2.2 aufgrund von Schubversagen in der Nähe der Querschnittsänderung. Abbildung 32 ist weiter zu entnehmen, dass das Schubversagen durch eine Faserabweichung mit oder ohne Vorhandensein von Ästen eintrat. Weiters trat der Bruch bei den Proben bevorzugt in der Nähe des Auflagers ein. Den Kraft-Weg-Diagrammen zufolge handelt es sich um spröde Brüche, wie beispielhaft in Abbildung 36 erkennbar.



Abbildung 37: Bruchverhalten der formoptimierten Probe B2.2 inklusive eines Ausschnittes der Trägerunterkante mit dem Ast und der verbundenen Faserabweichung

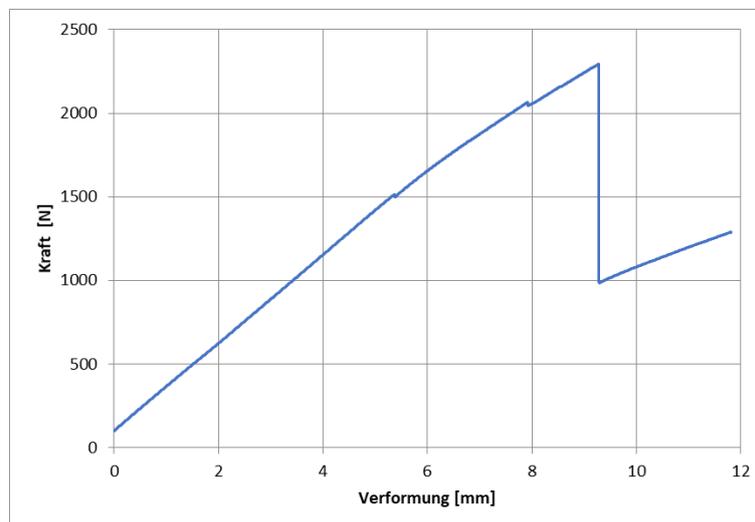


Abbildung 38: Kraft-Weg-Diagramm der Biegeprüfung der formoptimierten Probe B2.2

Ein anderes Bruchverhalten zeigte die formoptimierte Probe B2.2 der ersten Versuchsreihe, denn hier trat der Bruch durch einen Ast mit 80–90° Faserabweichung ein, wie Abbildung 37 zu entnehmen ist. Weiters sind in dem dazugehörigen Kraft-Weg-Diagramm nach Abbildung 38 zwei kleine Peaks nach unten enthalten, bis die Probe schließlich in der Zugzone spröde brach.



Abbildung 39: Bruchverhalten der formoptimierten Probe G1.2 mit einhergehenden Stabilitätsproblemen

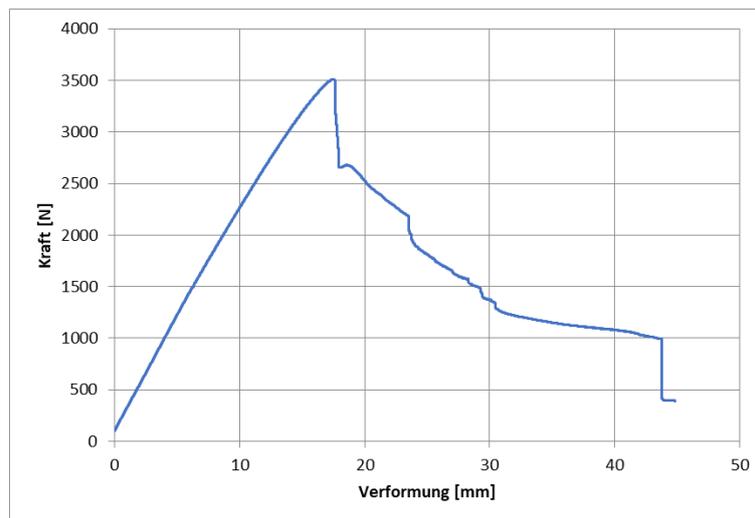


Abbildung 40: Kraft-Weg-Diagramm der Biegeprüfung der formoptimierten Probe G1.2

Die formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe, wie beispielhaft in Abbildung 39 dargestellt, wiesen ein gänzlich anderes Bruchverhalten als die erste Versuchsreihe auf. Durch die hohe Volumenreduktion der Proben und die einhergehende erhöhte Schlankheit der Träger traten Stabilitätsprobleme auf, obwohl die Auflagerung an der vollen Querschnittsbreite von 30 mm stattfand. Die Proben versagten durch eine Kombination aus Biegedrillknicken und Ausbeulen, wie in Abbildung 39 zu sehen ist. Ein dementsprechendes plastisches Verformungsbild ist dem beispielhaften Kraft-Weg-Diagramm nach Abbildung 40 zu entnehmen.



Abbildung 32: Bruchbilder der Referenzprobe E1.1 und der formoptimierten Probe E1.2 der zweiten Versuchsreihe

Die formoptimierte Probe E1.2 wies ähnlich wie die dazugehörige Referenzprobe Reaktionsholz in der Zugzone auf (siehe Abbildung 32). Jedoch brach die formoptimierte Probe frühzeitiger durch Zugversagen.

3.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation

3.3.1 Dehnungsverhalten der Probe B1 (erste Versuchsreihe und ganzer Träger)

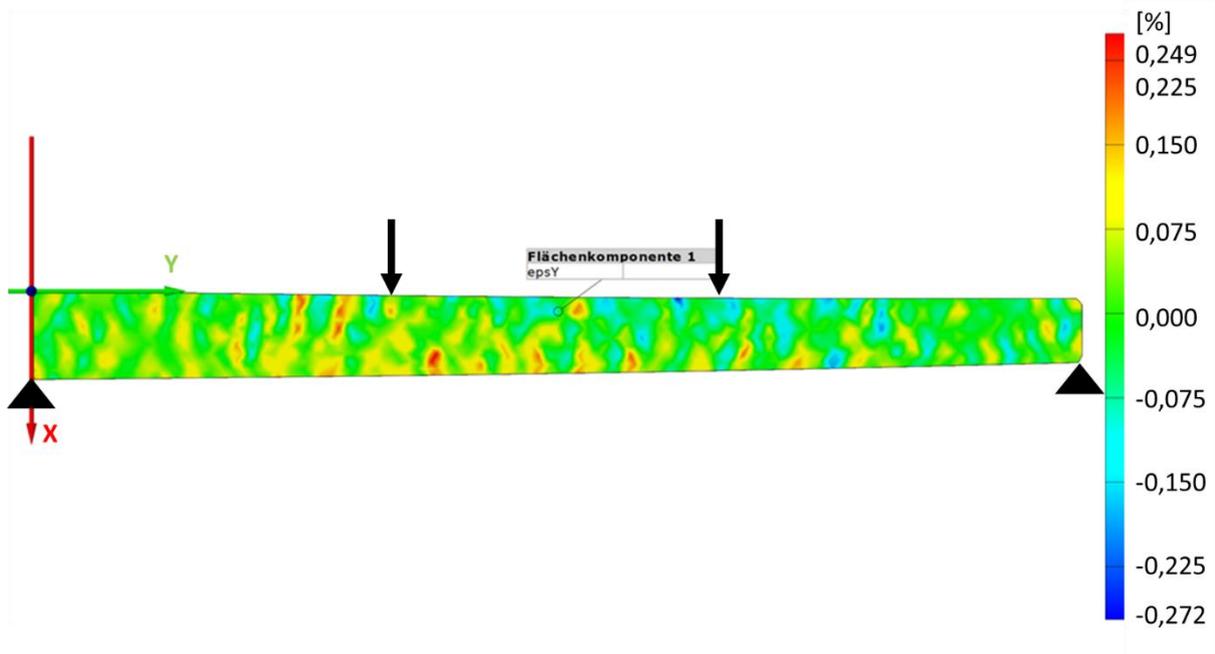


Abbildung 33: Dehnungsverhalten bei 1500 N der Probe B1.2 mit Vollquerschnitt in Y-Richtung

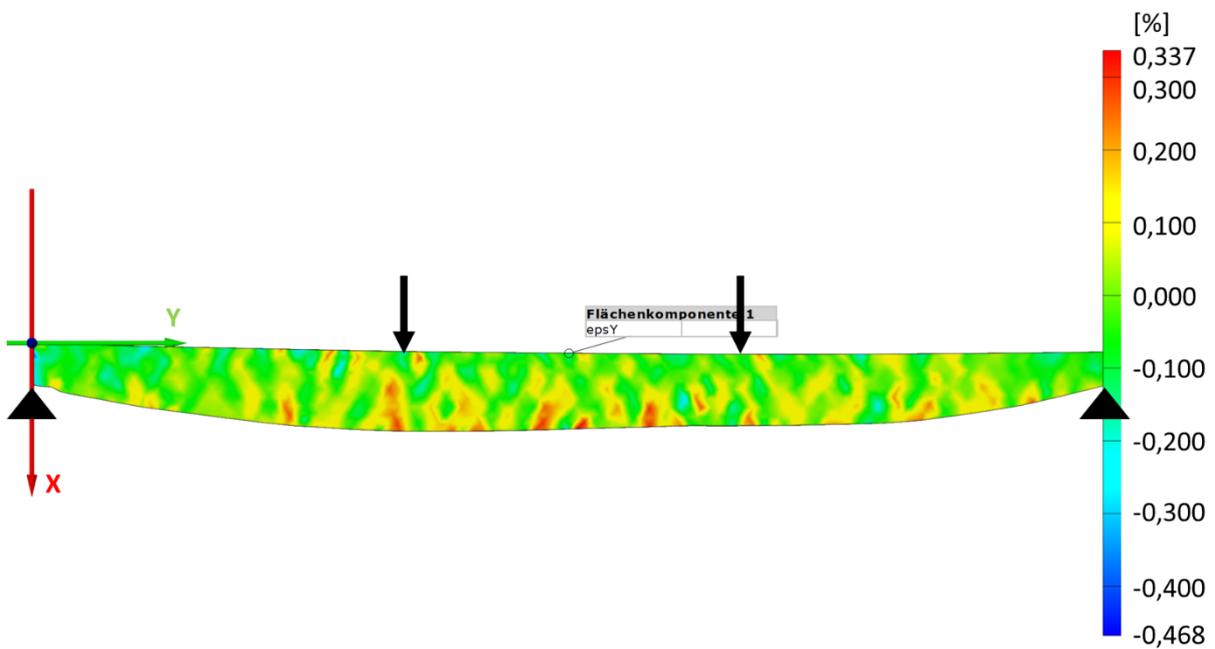


Abbildung 34: Dehnungsverhalten bei 1500 N der formoptimierten Probe B1.2 in Y-Richtung

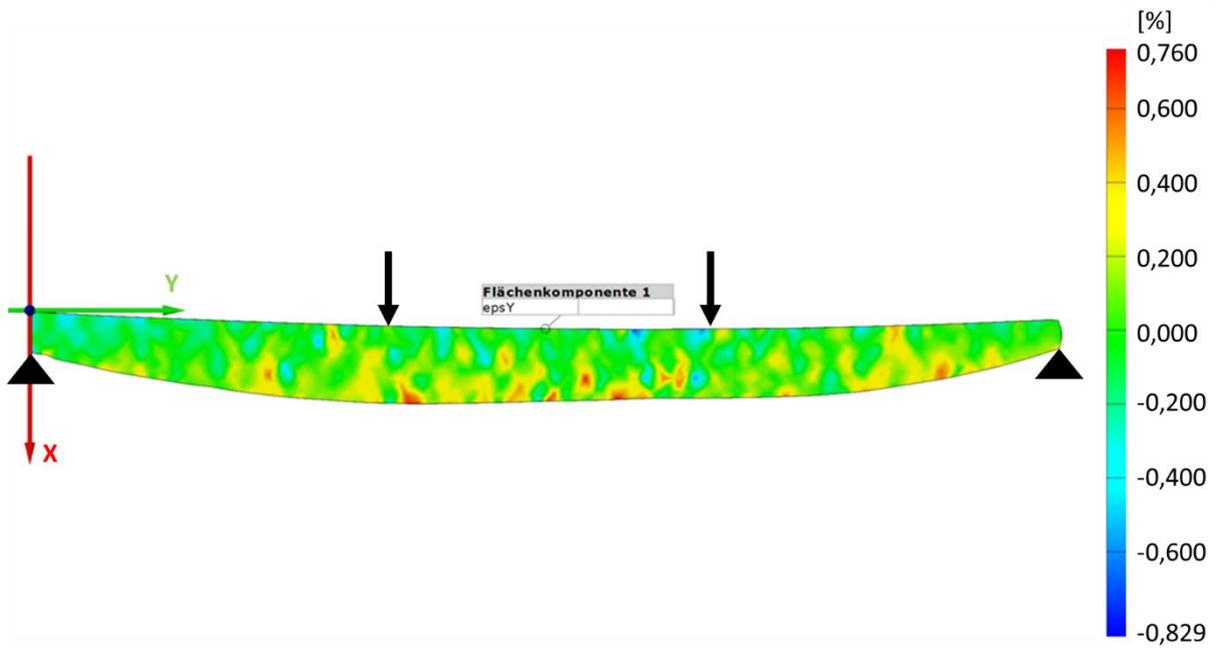


Abbildung 35: Dehnungsverhalten unmittelbar vor dem Bruch der formoptimierten Probe B1.2 in Y-Richtung

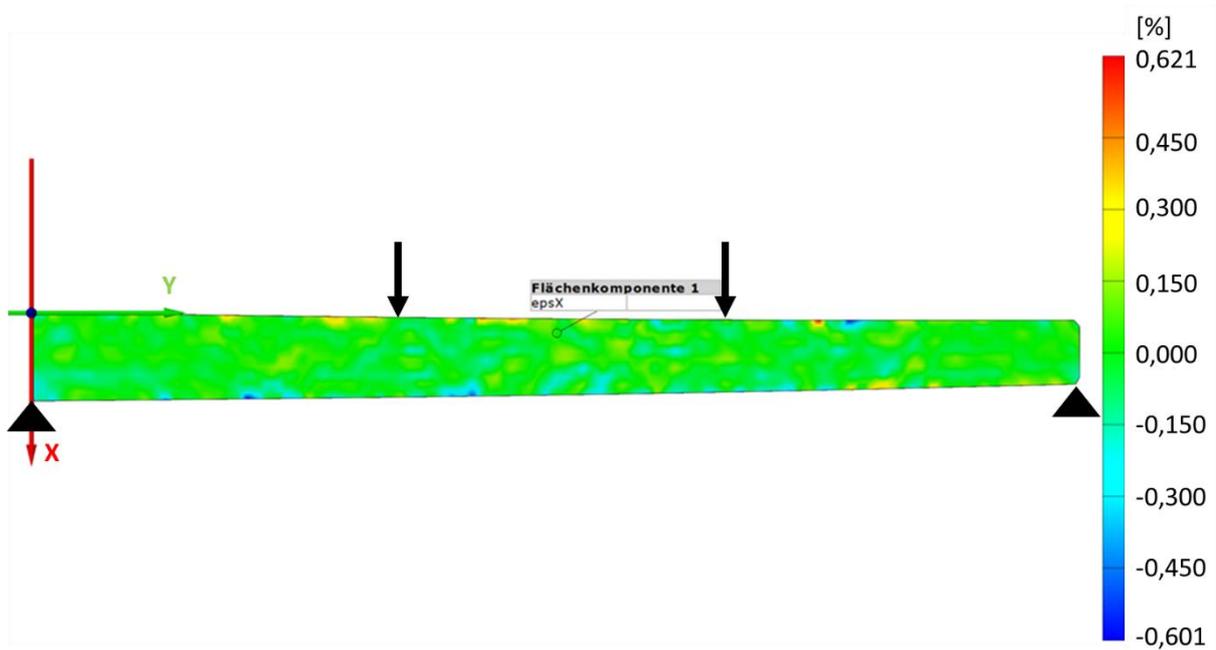


Abbildung 36: Dehnungsverhalten bei 1500 N der Probe B1.2 mit Vollquerschnitt in X-Richtung

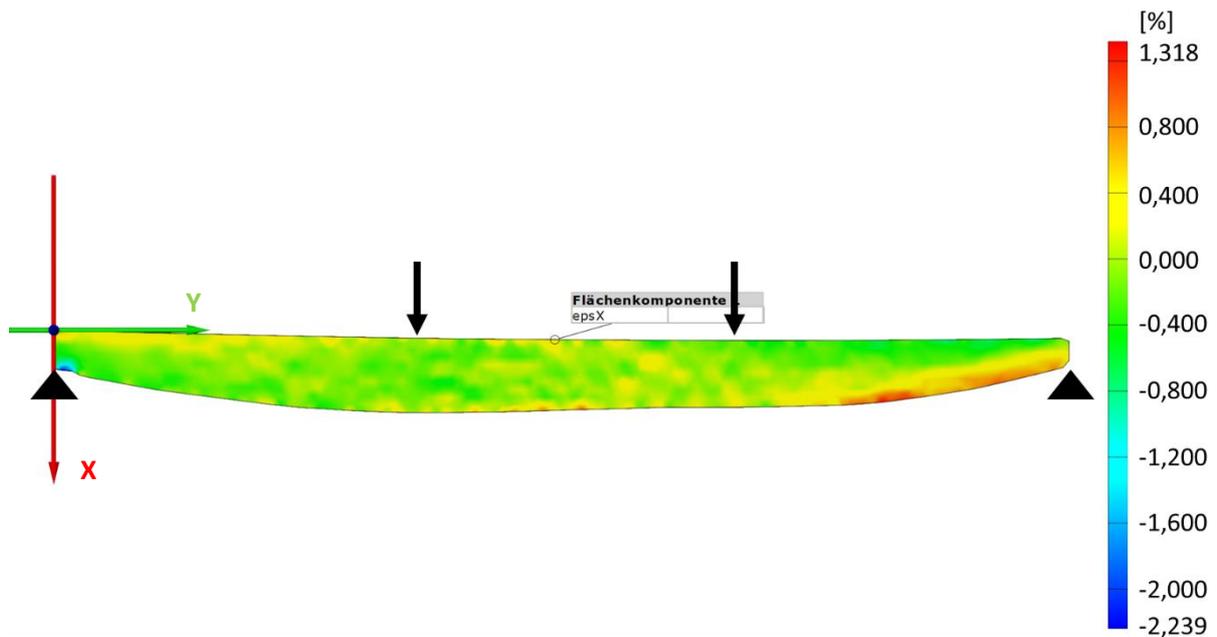


Abbildung 37: Dehnungsverhalten bei 1500 N der formoptimierten Probe B1.2 in X-Richtung

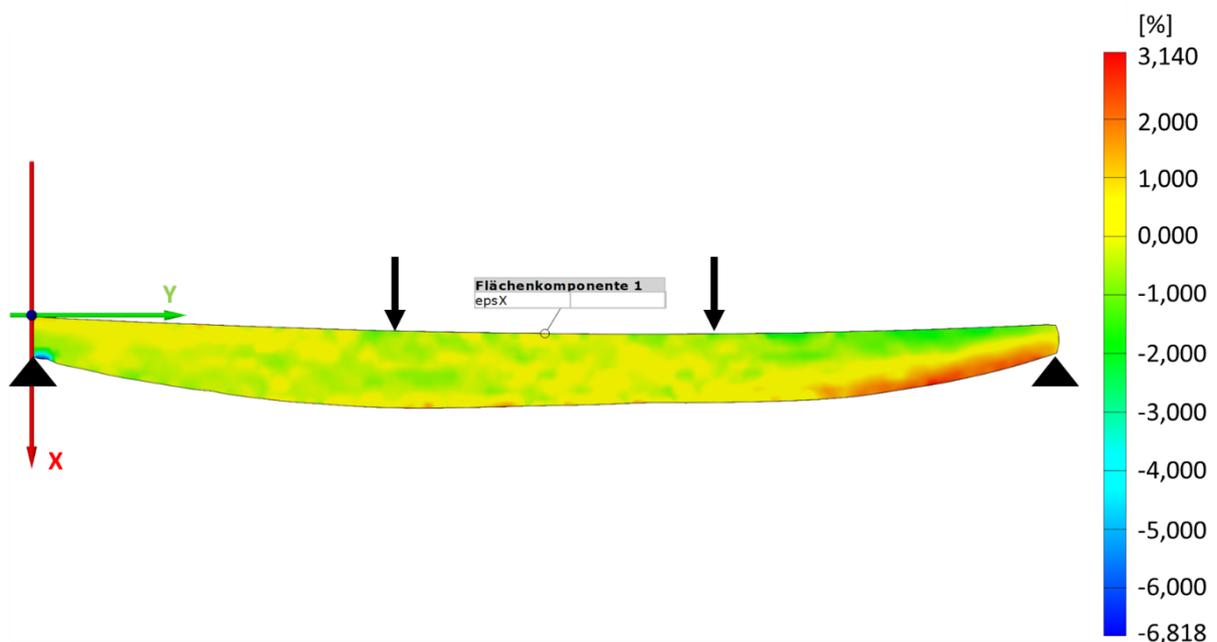


Abbildung 38: Dehnungsverhalten unmittelbar vor dem Bruch der formoptimierten Probe B1.2 in X-Richtung

Bei den Proben der ersten Versuchsreihe, wie beispielhaft mit Probe B1.2 in den Abbildungen 33–38 dargestellt, ist für die formoptimierten Proben ein ähnliches Dehnungsverhalten aufgrund von Normalspannungen zu erkennen. Dabei treten in Y-Richtung an der Trägeroberseite Druckdehnungen und an der Trägerunterseite Zugdehnungen auf, die mit steigendem Biegemoment in Richtung Trägermitte ihren Maximalwert erreichen. In X-Richtung sind für beide Proben kurz vor dem Bruch hohe Druckverformungen im linken Auflager zu erkennen. Entsprechend ist die Probe vom linken Auflager ausgehend im Bereich der höchsten Querkraft durch Schubversagen gebrochen.

3.3.2 Dehnungsverhalten der Probe G1 (zweite Versuchsreihe und halber Träger)

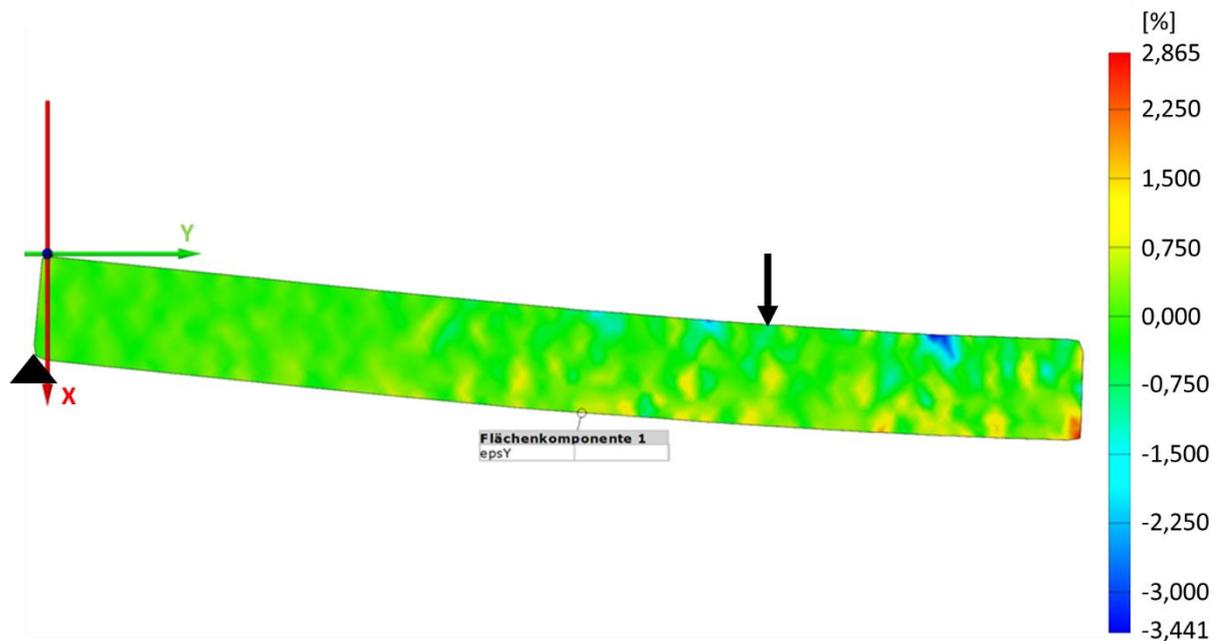


Abbildung 39: Dehnungsverhalten unmittelbar vor dem Bruch der Referenzprobe G1.1 in Y-Richtung

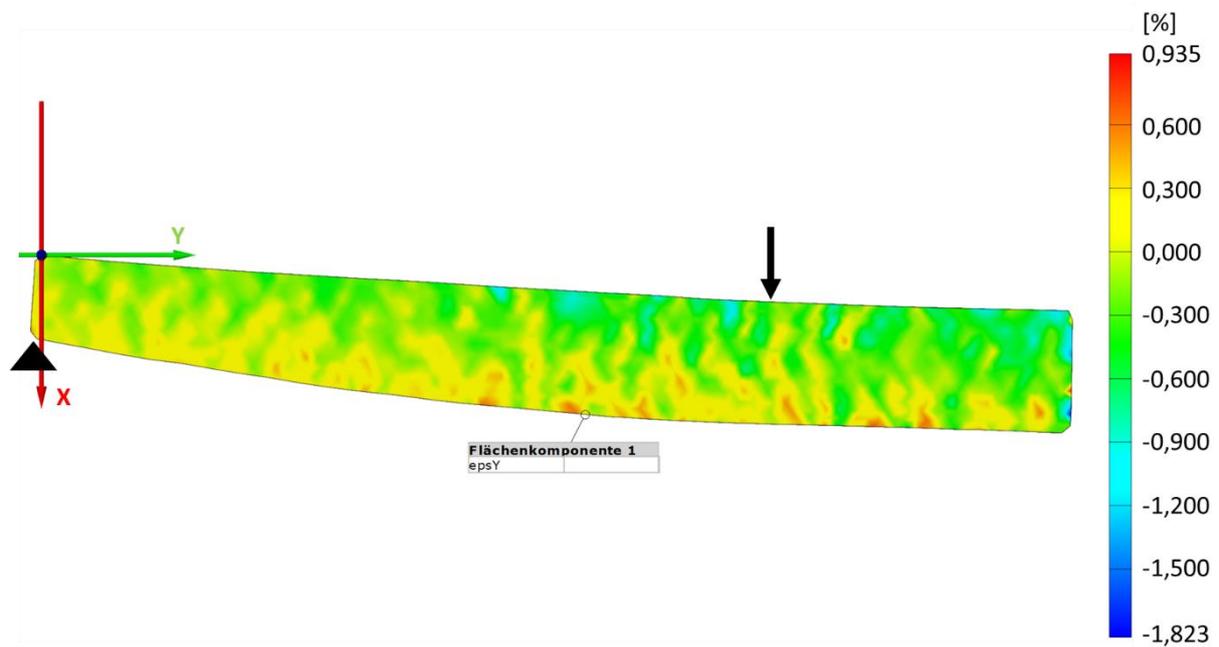


Abbildung 40: Dehnungsverhalten bei maximaler Kraft der formoptimierten Probe G1.2 in Y-Richtung

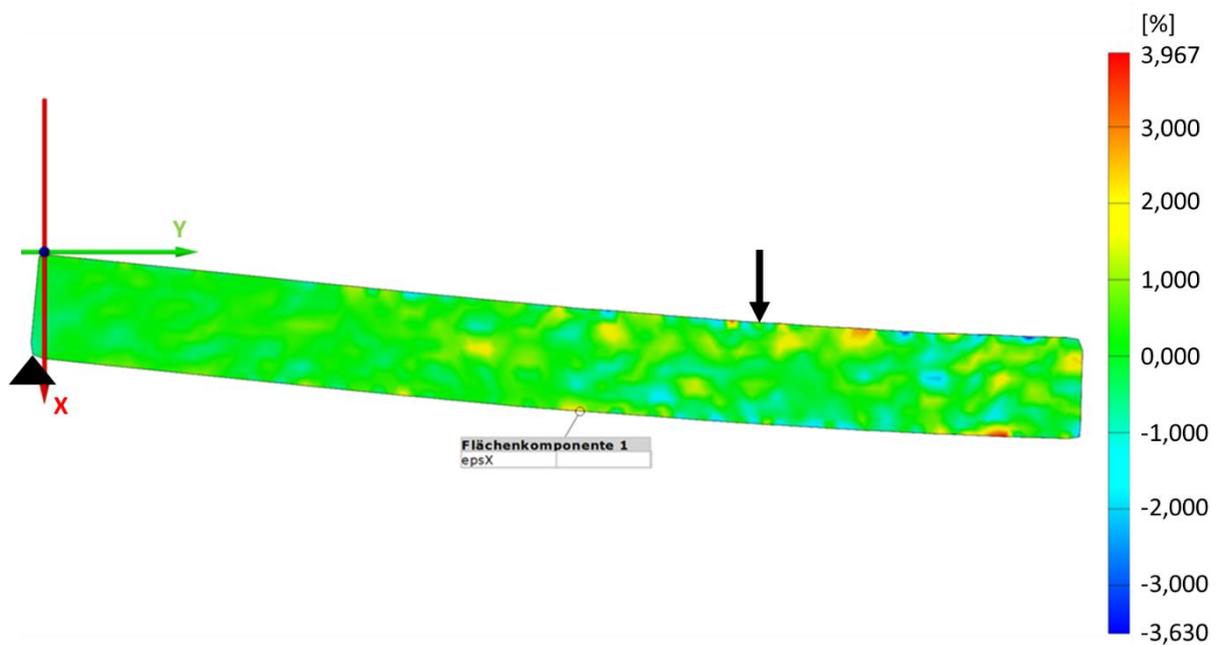


Abbildung 41: Dehnungsverhalten unmittelbar vor dem Bruch der Referenzprobe G1.1 in X-Richtung

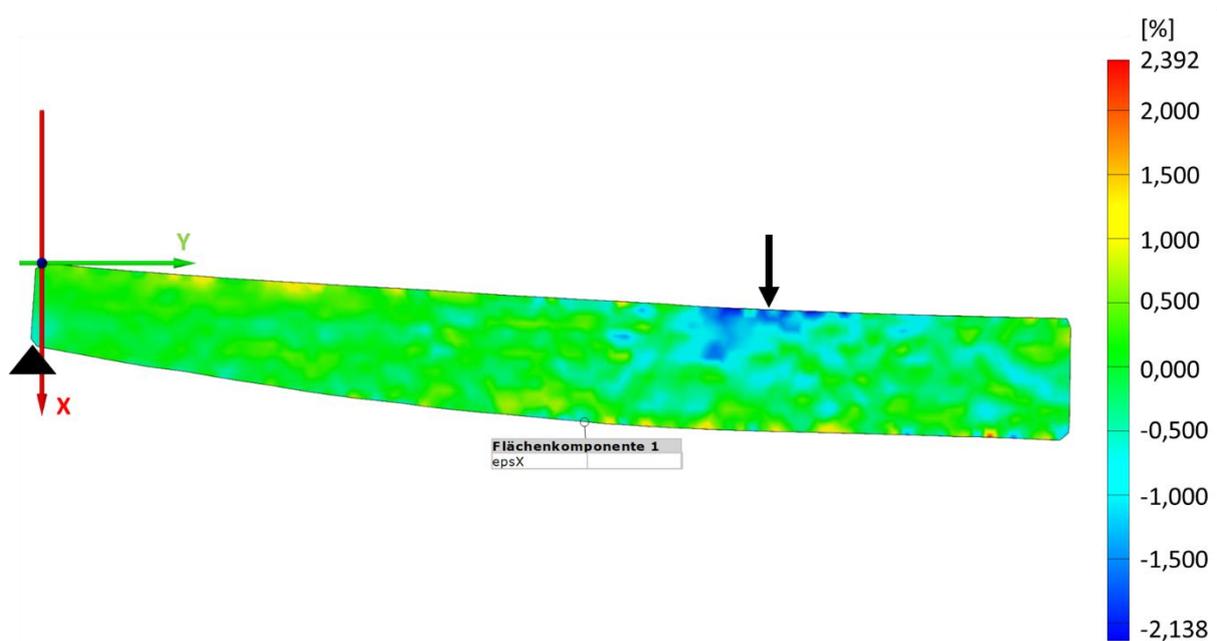


Abbildung 42: Dehnungsverhalten bei maximaler Kraft der formoptimierten Probe G1.2 in X-Richtung

Bei der Probe G1 treten nach den Abbildungen 39 bis 42 in Y-Richtung für die Referenzprobe höhere Dehnungen aufgrund von Normalspannungen auf als für die formoptimierte Probe. Die hohen Verformungswerte ($-3,441\%$ bis $2,865\%$) treten punktuell auf. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch in X-Richtung der Probe. Bei der formoptimierten Probe in Abbildung 42 stellt der Bereich mit der erhöhten Druckdehnung den Punkt der Krafteinleitung dar. In dieser Darstellung tritt der höchste Wert der Zugdehnung ebenfalls punktuell auf.

3.3.3 Rauschen der Dehnungswerte

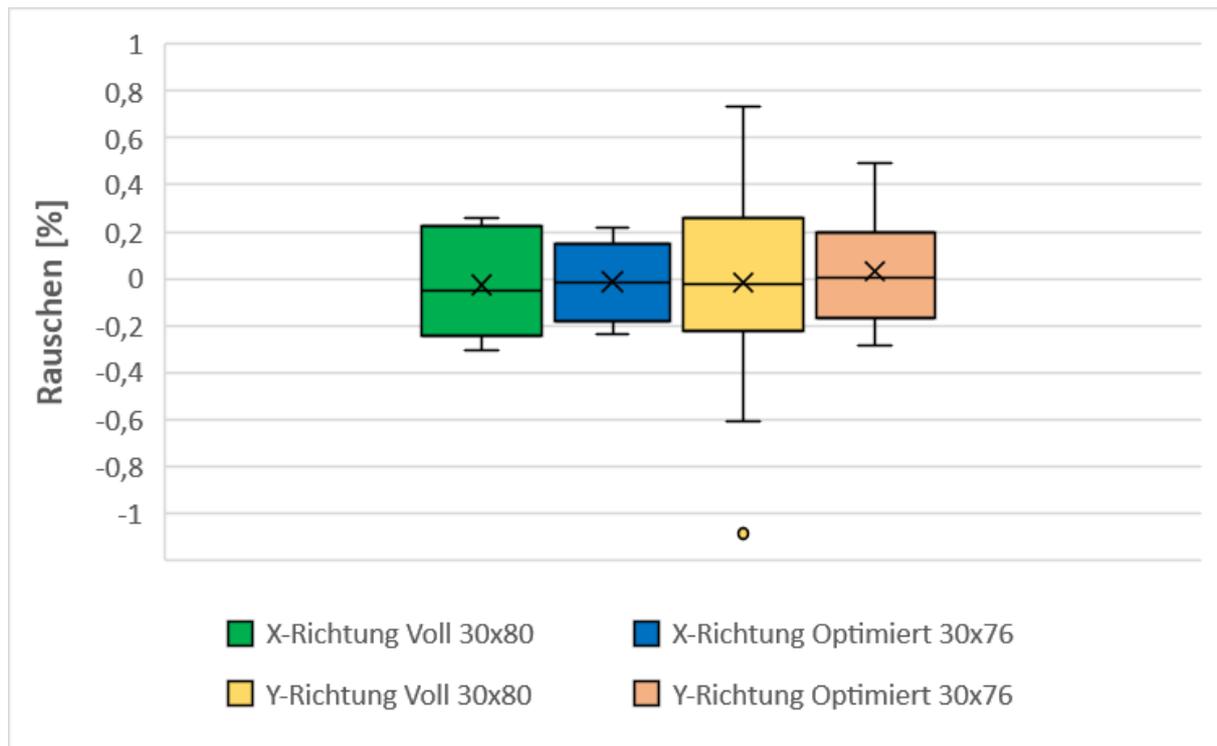


Abbildung 43: Rauschen der Dehnungswerte in X-Richtung (n = 16) und Y-Richtung (n = 16)

In Abbildung 43 sind die Werte des Rauschens zusammengefasst. In X-Richtung reicht das Rauschen für die Vollquerschnittproben von **-0,307 % bis 0,258 %** bei einem Mittelwert von $-0,026 \%$ und in Y-Richtung von **-0,607 % bis 0,733 %** bei einem Mittelwert von $-0,013 \%$. Für die formoptimierten Proben liegt das Rauschen in X-Richtung zwischen **-0,234 % und 0,214 %** bei einem Mittelwert von $-0,019 \%$ und in Y-Richtung zwischen **-0,284 % und 0,493 %** bei einem Mittelwert von $0,031 \%$. Bei den Vollquerschnittproben in Y-Richtung gibt es für die Probe D2.2 nach unten einen Ausreißer mit $-1,088 \%$.

Die durchschnittlichen Dehnungswerte bei 1500 N betragen für den Vollquerschnitt in X-Richtung **-1,25 % bis 0,663 %** und in Y-Richtung **-0,38 % bis 0,377 %**. Für die formoptimierten Proben bei 1500 N betragen die Werte in X-Richtung **-1,356 % bis 1,761 %**, in Y-Richtung **-0,574 % bis 1,419 %** und kurz vor dem Bruch $-3,511 \%$ bis $4,149 \%$ bzw. $-1,357 \%$ bis $2,88 \%$.

Es ist festzuhalten, dass für die Vollquerschnittproben in X-Richtung bereits 32 % und in Y-Richtung über 100 % der Dehnungswerte erreicht sind, obwohl grundsätzlich keine Dehnung vorhanden sein sollte. Für die formoptimierten Proben ergibt sich ein ähnliches Bild mit 15 % in X-Richtung und 42 % in Y-Richtung.

3.3.4 Ergebnisse der Verformungsmessmethoden

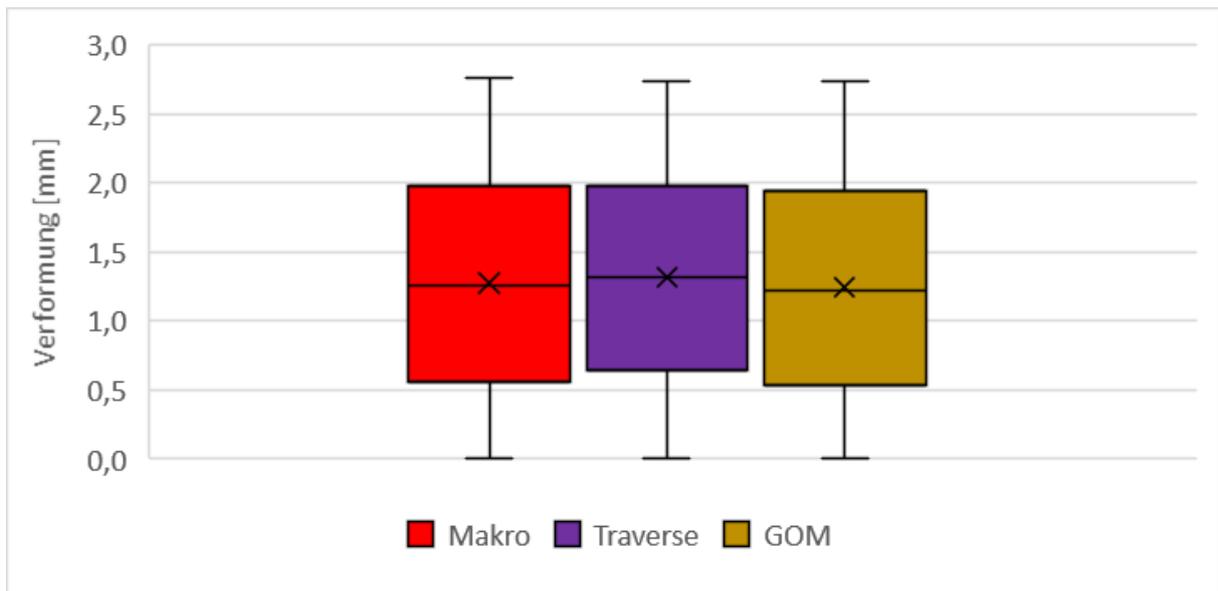


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Verformungsmessmethoden bei den Proben mit Vollquerschnitt zwischen 100 N und 1500 N (n = 521)

Der Mittelwert der Proben beträgt nach Abbildung 44 für den makromechanischen Extensometer 1,275 mm, wobei hier der Hersteller eine Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ angibt. Der Mittelwert der Traverse beträgt 1,314 mm (+3 %) und für die Software GOM Correlate beträgt er 1,244 mm (-2,4 %).

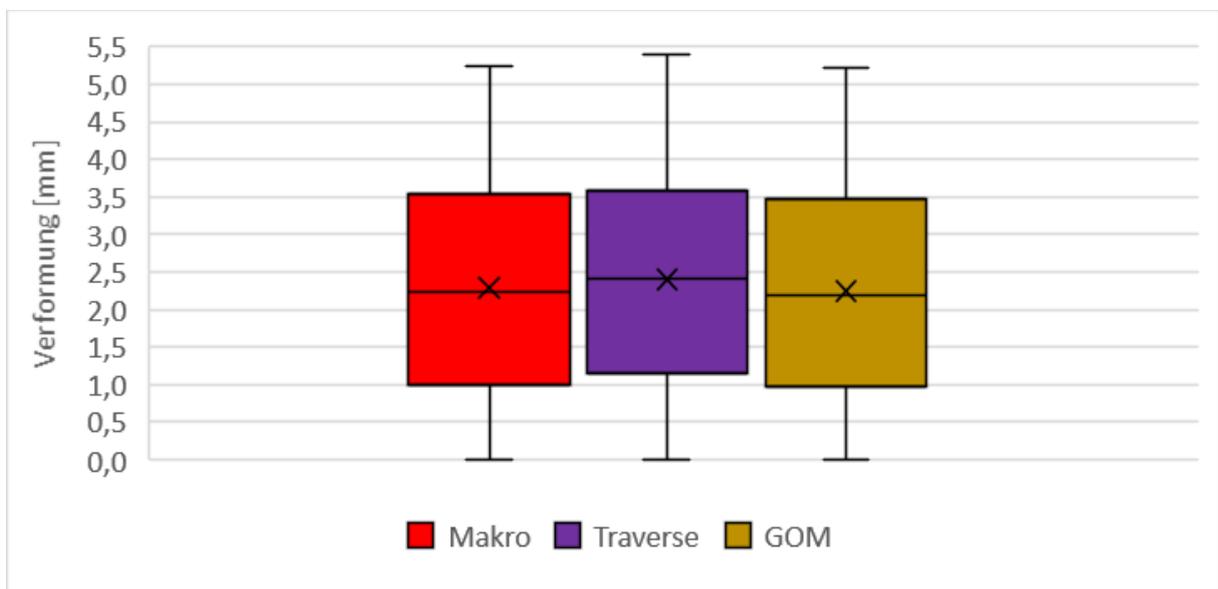


Abbildung 45: Gegenüberstellung der Verformungsmessmethoden der optimierten Proben zwischen 100 N und 1500 N (n = 564)

In Abbildung 45 ist ein ähnliches Verhalten der optimierten Proben wie bei den Vollquerschnittproben nach Abbildung 44 zu erkennen. Der Mittelwert des makromechanischen Extensometers beträgt 2,285 mm, der der Traverse liegt bei 2,399 mm (+5 %) und der der Software GOM Correlate liegt mit 2,241 mm (-1,9 %) etwas unter dem Wert des makromechanischen Extensometers.

3.3.5 Ergebnisse der Verformungsmessmethoden bei 1500 N

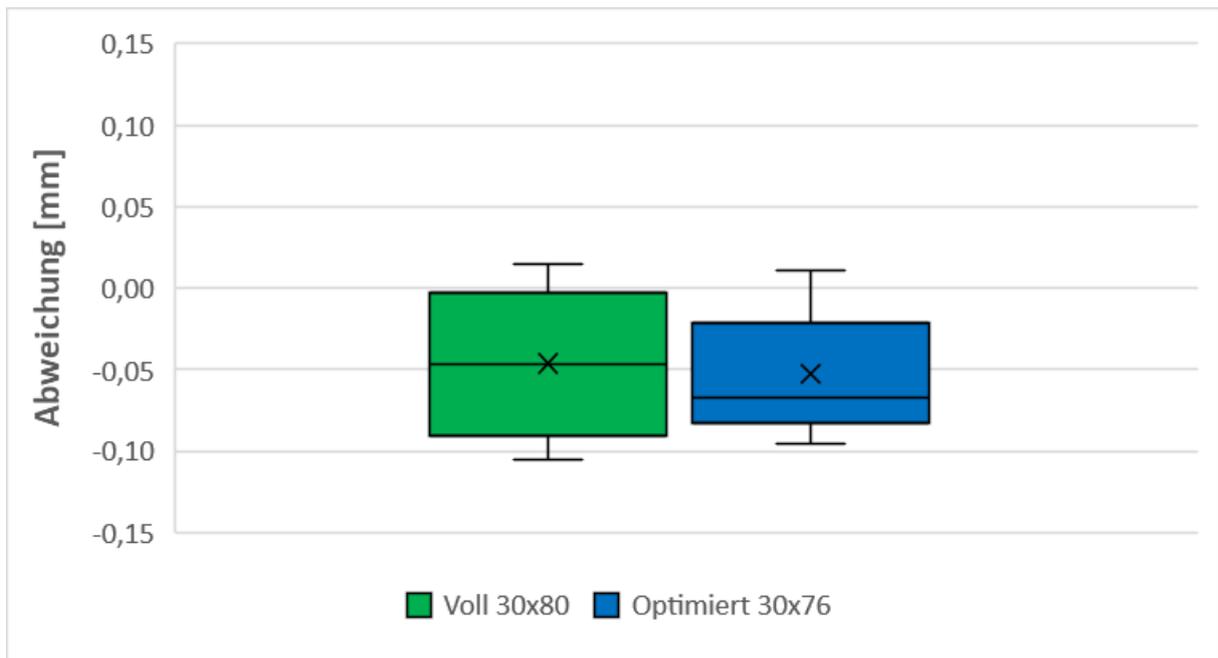


Abbildung 46: Vergleich der Verformungsmessmethoden [mm] zwischen dem makromechanischen Extensometer und der digitalen Bildkorrelation bei 1500 N (n = 8)

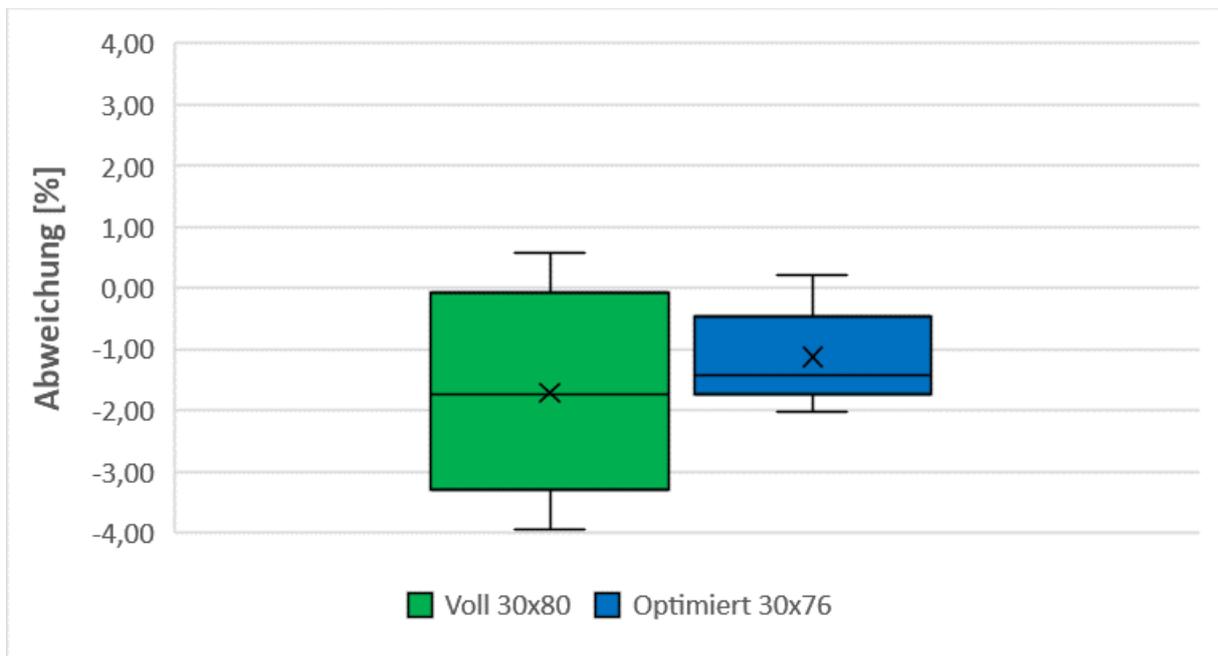


Abbildung 47: Vergleich der Verformungsmessmethoden [%] zwischen dem makromechanischen Extensometer und der digitalen Bildkorrelation bei 1500 N (n = 8)

In den Abbildungen 46 und 47 ist zu erkennen, dass die digitale Bildkorrelation bzw. die Software GOM Correlate für die Vollquerschnittproben im Mittelwert um 0,046 mm bzw. 1,72 % unter dem Wert des makromechanischen Extensometers liegt. Der Mittelwert der formoptimierten Proben liegt mit 0,053 mm bzw. 1,13 % erneut unter dem Wert des makromechanischen Extensometers.

4. Diskussion

4.1 Prüfkörper

4.1.1 Geometrie der formoptimierten Träger

Für den formoptimierten Prüfkörper wurde ein Design mit variabler Höhe und Breite gewählt, um eine maximale Materialersparnis zu erreichen. Dafür wurde eine potentielle Höhenzunahme von 16 mm bzw. 21 % bei einer gleichbleibenden Breite zum Referenzquerschnitt aufgrund der Prüfrestrictionen nach der ÖNORM EN 408 (2012) vorgesehen. Wäre diese Höhenzunahme nicht gegeben, könnte der formoptimierte Träger nur eine schlechtere mechanische Performance als ein Vollquerschnitt erreichen, da eine Abnahme des Volumens immer eine schlechtere mechanische Performance bedeutet, sofern die Geometrie nicht verändert wird (Mayencourt 2021a).

In der Geometrie nach Abbildung 1 ist zu erkennen, dass die Höhe des Trägerquerschnittes über die Länge annähernd konstant bleibt. Das Modell versucht dabei, eine Variation der Höhe zu vermeiden, um die Schubspannungen an der Trägerunterseite minimal zu halten. Zusätzlich wird der Effekt durch die an der Trägerunterseite am höchsten auftretende Biegespannungen verstärkt. Daher strebt das Modell an, die Gesamthöhe des Trägers zu vergrößern und den Querschnitt I-Träger-förmig zu gestalten, wodurch das Widerstandsmoment des Querschnittes erhöht wird und die Schubspannungen an der Trägerunterseite minimiert werden (Mayencourt & Mueller 2020).

Wird die Querschnittsform der Abbildung 1 mit dem I-Träger nach Deutsche Institut für Bautechnik (2016) verglichen, ist zu erkennen, dass die Form im Zentrum des Auflagerbereichs, am Ort der maximal auftretenden Schubspannungen, eine Verstärkung vorsieht und aus dem I-Querschnitt ein annähernder O-Querschnitt wird. Die maximale Schubspannung tritt nach Dankert & Dankert (2013) in der neutralen Faser und an der Stelle mit der höchsten Querkraft auf. Daher ist es förderlich, den I-Träger-Querschnitt an dieser Stelle umzukehren und als O-Querschnitt anzuordnen. In Richtung Trägermitte verjüngt sich der Querschnitt und wird I-förmig, um die aus der Biegebeanspruchung resultierenden Zug- und Druckkräfte aufnehmen zu können. Folglich ist es sinnvoll, den Querschnitt in Richtung Mitte I-förmig zu gestalten, wie bereits von Dankert & Dankert (2013) beschrieben.

In der Geometrie nach Abbildung 18 ist zu erkennen, dass der Träger in Richtung Mitte stärker als der oben beschriebene Träger in der Höhe variiert. Dadurch ist mit einer erhöhten Schubspannung zu rechnen. Dieses Vorgehen des Modells gründet vermutlich in den unterschiedlich verwendeten Schubfestigkeiten von 1,8 N/mm² nach Mayencourt & Mueller (2020) zu 3,5 N/mm² nach ÖNORM EN 408 (2012) und den unterschiedlichen Werten des Schubmodules von 3500 N/mm² zu 540 N/mm². Weiters nimmt die Höhe im Bereich der beiden einwirkenden Kräfte den maximalen Wert von 76 mm an, weil sie sich zur dritten Potenz auf das Trägheitsmoment und zur zweiten Potenz auf das Widerstandsmoment der Probe auswirkt. Das Modell versucht auf diese Weise, das Durchbiegungslimit von $l/200$ oder 7,5 mm und die Restriktion der Festigkeit zu erfüllen.

Die Geometrie nach Abbildung 18 weist im Vergleich zu Abbildung 1 bzw. zu der Geometrie nach Deutsche Institut für Bautechnik (2016) im Auflagerbereich den am stärksten ausgeprägten I-Träger-Querschnitt auf. Dieser ist auf Modellebene aufgrund der hohen Schubauslastung und der höheren Schubfestigkeit durchaus sinnvoll, wenn dadurch versucht wird, lediglich die Durchbiegungsrestriktion zu erfüllen. An dieser Stelle würde es jedoch auch Sinn ergeben, den I-Querschnitt umzukehren und als O-Querschnitt auszuführen wie in Abbildung 1. Grund dafür sind die Schubspannungen, die hier ihren Maximalwert erreichen. Abbildung 19 zeigt eine ähnlich angeordnete Geometrie wie Abbildung 1, um die entsprechenden Schub- und Biegespannungen ideal aufnehmen zu können, denn hier wurde im Vergleich zu dem in Abbildung 18 gezeigten Träger die Schubauslastung verringert. Jedoch ist für die Versuchsreihen die Möglichkeit eines Bugs in der Modellierung nicht ausgeschlossen.

Die optimierte Form ändert sich zwischen dem vollen Rechtecksquerschnitt und der Formoptimierung im Auflagerbereich abrupt, da sich das Modell ausschließlich auf die freie Biegelänge fokussierte. Dieser Übergang kann zu Spannungsspitzen führen und der Bruch kann dementsprechend an dieser Stelle eingeleitet werden. In Abbildung 48 ist ein solcher Bruch exemplarisch zu sehen. Weiters wurden hier in der DIC erhöhte Druckdehnungen nach den Abbildungen 37 und 38 festgestellt. Hinzu kommt, dass der hybride Berechnungsansatz auf Basis der $l/200$ (7,5 mm) nach Mayencourt (2021b) an dieser Art der Formoptimierung noch als wenig erforscht gilt und eine Abweichung daher wahrscheinlich ist.



Abbildung 48: Ausbildung des Auflagerbereiches und damit einhergehende Problematik, dass aufgrund des abrupten Übergangs Spannungsspitzen entstehen können (hier gezeigt an der formoptimierten Probe D2.2)

Weiters besitzt der Werkstoff Holz eine nur sehr geringe Querdruckfestigkeit, wie an den charakteristischen Werten in Tabelle 2 zu erkennen ist. Wird zusätzlich der Querschnitt der Auflagerfläche durch die Formoptimierung verringert (siehe Abbildung 1), ist mit einer erhöhten Bruchgefahr aufgrund von Querdruckversagen im Auflagerbereich zu rechnen. Daher wurden zum einen die volle Trägerbreite im Auflagerbereich beibehalten und zum anderen Auflagerrollen mit 5 cm Breite für die Prüfkörper in dieser Arbeit verwendet. In den durchgeführten Versuchen trat kein Querdruckversagen im Auflagerbereich ein, womit diese vorsorgende Maßnahme gut funktioniert hat. Hinzu kommt, dass das Modell die Auflagersituation nicht berücksichtigt.

Die Geometrie des Trägers ist auf den Lastfall der 4-Punkt-Biegung der ÖNORM EN 408 (2012) optimiert, jedoch nicht für eine andere Anordnung der einwirkenden Kräfte. In weiteren Forschungsarbeiten nach Mayencourt (2021b) wird versucht, die optimale Form des Trägers für Lastfall-Kombinationen zu generieren, um einen formoptimalen Träger für eine generelle Biegebelastung zu erhalten.

Im Bereich des Holzbaus konnten sich bereits einige Entwurfssoftwares etablieren, die mit geformten Holzbauteilen arbeiten können. Dazu ist Holz aus praktischer Sicht ein Werkstoff, der leicht zu bearbeiten ist. Jedoch weist Holz eine hohe Anisotropie seiner Festigkeitswerte auf, die speziell bei der vorliegenden Querschnittsänderung über die Trägerlängsachse relevant wird, denn das Modell kann die Anisotropie des Werkstoffes Holz derzeit noch nicht abbilden. Niemz & Sonderegger (2017) beschreiben, dass die Festigkeitswerte parallel zu Faser am höchsten und senkrecht zur Faser am niedrigsten sind. Bereits eine Abweichung von der parallelen Achse um 15° bedeutet eine Abnahme der Biegefestigkeit auf etwa 60 %. Hinzu kommt, dass die optimierten Träger gegenüber einem herkömmlichen Rechtecksquerschnitt erhöht quer zur Faser beansprucht werden. Auch das Schubverhalten ist aufgrund der variablen Form schwieriger zu kontrollieren. (Mayencourt & Mueller 2020).

Im Modell wurde die maximale Ausnutzung (90–100 %) der zulässigen Spannungen angenommen. Daher besteht durch die erlaubte Festigkeit (5 % Fraktilwert) wenig Spielraum für eine weitere Variabilität der Materialeigenschaften. Dies bedeutet, dass Inhomogenitäten wie z. B. Äste mit der verbundenen Faserabweichung kaum berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund gestaltet es sich besonders schwierig, den exakten und individuellen Festigkeitswert des jeweiligen Trägers zu bestimmen, der aber für ein exaktes Optimierungsmodell benötigt wird.

Folglich müsste für jeden Träger der individuelle Festigkeitswert (lokal variierend) bekannt sein und berücksichtigt werden, um sein ideales Design zu finden. Für den Versuch wurde handelsübliches Brettschichtholz verwendet, um möglichst realitätsnahe Bedingungen zu simulieren, weil der Einfluss von lokalen Faktoren wie Ästen bzw. Faserabweichung oder Reaktionsholz als relevant erachtet wurde.

Bei dem verwendeten Brettschichtholz werden vom Hersteller die Lamellen mit einem visuellen Scanner sortiert, der für jede Festigkeitsklasse unter anderem einen maximalen Astdurchmesser nach ÖNORM EN 14081-1 (2019) erlaubt. Für den vorliegenden Versuch wurden die Proben aus einem Querschnitt von 10 × 16 cm herausgepalten. Dies bedeutet, dass der höchste zulässige Astdurchmesser für den Lamellenquerschnitt von 10 × 4 cm der Festigkeitsklasse nach den Herstellerangaben entspricht. Für die herausgespaltenen Proben trifft dies nicht mehr zu (siehe Abbildung 2B), da hier der Astdurchmesser im Verhältnis viel größer ist.

Die formoptimierte Probe und die Referenzprobe wurden aus den jeweils gleichen zwei Lamellen des Brettschichtholzes herausgeschnitten, um möglichst idente Proben hinsichtlich der Dichte und der Holzmerkmale zu erhalten. Jedoch gelang die idente Prüfkörperanordnung, speziell bezüglich der Äste, nur wenig gut, da diese punktuell und zufällig in den Prüfkörpern auftraten. Niemz & Sonderegger (2017) beschreiben, dass sich Äste deutlich auf die Festigkeit der Träger auswirken und der Bruch meist in der Nähe der Unregelmäßigkeit auftritt. Gründe dafür sind eine lokale starke Faserabweichung und die damit verbundenen Spannungsspitzen.

4.1.2 Abweichung der Geometrie durch die CNC-Bearbeitung

Durch die CNC-Bearbeitung der formoptimierten Träger kam es nach Abbildung 20 zu einer Abweichung der Geometrie aufgrund von Ungenauigkeiten der Maschine. Diese resultierten etwa aus der Auflagerung des Werkstückes jeweils nur am Ende der Probe und einer damit einhergehenden leichten Durchbiegung während der Bearbeitung. Daher würde sich eine vollflächige Aufspannung des Trägers anbieten, um eine möglichst genaue Bearbeitung zu gewährleisten.

Nachdem die Höhenmessungen an allen sechs formoptimierten Proben stattgefunden haben und die mittlere Abweichung sehr gering ist, wird dieser Wert als ausreichend genau empfunden. Die Breitenmessungen wurden an einer halben Probe durchgeführt, die mittels Kreissäge in sieben Stücke geteilt wurde. Durch das Ablängen kam es zu leichten Faserausrissen an den Schnittflächen. Aus diesem Grund besteht eine geringfügige Ungenauigkeit der Messwerte. Werden die Abweichungen ohne Faserausrisse in der Mitte der Probe betrachtet, ist zu erkennen, dass die mittlere Abweichung einen geringeren Wert (-0,3 %) annimmt, der als ausreichend genau empfunden wird.

Für Balkenschichtholz existieren nach ÖNORM EN 14080 (2013) Anforderungen hinsichtlich der maximalen Abweichung der Nennmaße der Höhe (± 1 mm) und der Breite (± 1 mm), die beide in der hier vorliegenden Arbeit erfüllt wurden (Höhe max. $\pm 0,77$ mm und Breite max. $+0,66$ mm und $-0,81$ mm).

4.1.3 Materialeinsparung durch die Formoptimierung und Fertigungstechnologien

Mayencourt & Mueller (2020) zeigen in ihrer Arbeit ein erhebliches Potential an Materialersparnis bei Biegeträgern auf. Die maximale Materialersparnis des Trägers mit variierender Breite und Höhe (siehe Abbildung 1) wird mit 69,6 % beziffert, bei einem ursprünglichen Verhältnis von Höhe zu Breite von 2:1. Die Ersparnis nimmt zu, je größer die Spannweite und je kleiner das Anfangsverhältnis von Höhe zu Breite ist. Für das Design mit variabler Höhe können 9,8 % und bei variabler Breite 13,3 % Material eingespart werden.

Die Hypothese der Arbeit, mit weniger Volumen des Trägers die gleiche Performance wie ein Vollquerschnitt zu erreichen, ließe sich auch umkehren: Welche Performance könnte erreicht werden, wenn das Volumen das gleiche bleibt und lediglich die Form des Trägers angepasst wird? Dadurch würde die Geometrie des Trägers entsprechend verändert werden und die Form würde ähnlich wie in den Abbildungen 1, 18 und 19 aussehen. Ein solcher Träger würde eine höhere mechanische Leistung erzielen als ein Träger mit vollem Rechtecksquerschnitt bei gleichem Volumen.

Wird der Querschnitt in den Abbildungen 1 und 49 genauer betrachtet, ist zu erkennen, dass der optimierte Träger ein Verhältnis von Höhe zu Breite von 5 bis 10 annimmt, um das Widerstandsmoment zu erhöhen und damit gleichzeitig möglichst viel Volumen einzusparen. Im Modell werden die Auflagerbedingungen und die damit verbundenen Instabilitäten nicht berücksichtigt. Daher ist unter realen Bedingungen mit erhöhten Stabilitätsproblemen zu rechnen. Diese ergeben sich aus einer erhöhten Gefahr des Biegedrillknickens bzw. Kippens aufgrund der erhöhten Schlankheit. Die Lücke der Nichtberücksichtigung dieser Stabilitätsprobleme im Modell gilt es in zukünftigen Arbeiten zu schließen.

Es ist demnach anzunehmen, dass eine hohe Materialersparnis Träger hervorbringt, die eine überproportionale Höhe im Vergleich zur Breite aufweisen. Durch dieses Verhältnis muss mit erheblichen Stabilitätsproblemen gerechnet werden und diese würden in der Praxis zu einer signifikanten Gefährdung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragfähigkeit führen. Das Stabilitätsproblem könnte in der praktischen Anwendung gelöst werden, indem der Träger eingespannt wird. Zum einen könnte die Auflagerung als Gabellager ausgebildet werden, zum anderen könnten die Träger als Rippendecke ausgeführt werden, um die Kippgefahr zu reduzieren bzw. müsste das Modell entsprechend weiterentwickelt werden, sodass auch diese Probleme berücksichtigt werden können.

Weiters ist in Abbildung 49 zu erkennen, dass der Querschnitt nach Abbildung 1 in der Mitte I-förmig wird und die verbleibende Stegbreite etwa 10 % des Ausgangsquerschnittes beträgt. Damit ist auch mit einer erhöhten Gefahr des Ausbeulens entlang der Längsachse (Abbildung 49A) und entlang des Querschnittes (Abbildung 49B) zu rechnen.

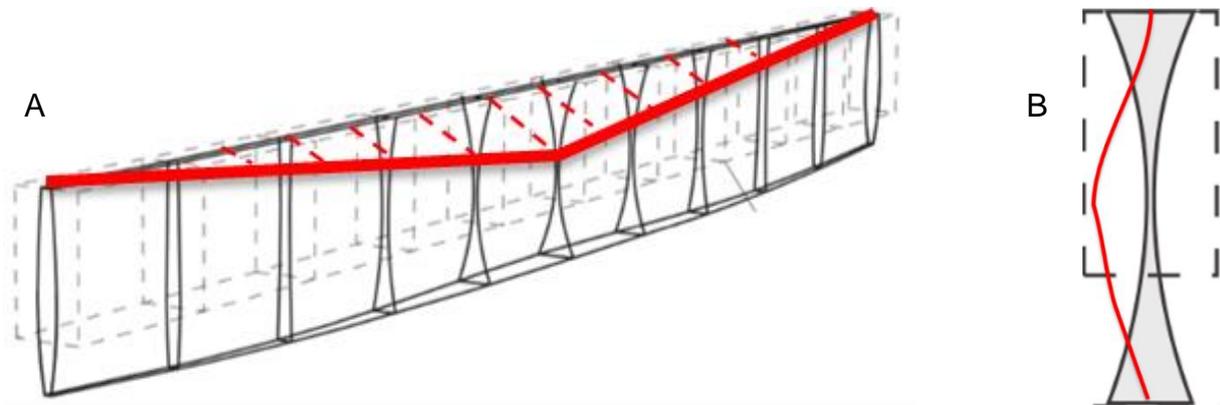


Abbildung 49: Formoptimierter Querschnitt nach Mayencourt & Mueller (2020) mit der Gefahr des Ausbeulens A: in Längsrichtung und B: entlang des Querschnittes

Für die Geometrie der ersten Versuchsreihe, die der Abbildung 18 zu entnehmen ist, beträgt die Materialeinsparung rund 30 %. Die Materialeinsparung, die an den realen Prüfkörpern bestimmt wurde, beträgt nach Abbildung 21 im Mittelwert 28,2 %. Die Abweichung ergibt sich einerseits aus Dichteschwankungen und andererseits aus Ungenauigkeiten in der CNC-Bearbeitung. Weiters beträgt das Verhältnis von Höhe zu Breite über den optimierten Querschnitt 2,5 bis 3. Damit kann die Gefahr der Stabilitätsprobleme weitestgehend verringert werden. Zudem ist zu erkennen, dass die vorgegebene Restriktion der maximalen Höhe von 76 mm mit 77,97 mm von der Optimierungssoftware nicht exakt eingehalten wurde.

Durch die Geometrie der zweiten Versuchsreihe (siehe Abbildung 19) konnte das Volumen auf 52,6 % reduziert werden. Damit wurde eine Materialersparnis von rund 47 % realisiert. Die Materialersparnis, die an den realen Prüfkörpern der zweiten Versuchsreihe in Abbildung 21 evaluiert wurde, beträgt im Mittelwert 49,8 %. Der Geometrie ist zu entnehmen, dass der Träger aufgrund der größeren Materialersparnis ein höheres Verhältnis von Höhe zu Breite (3 bis 5) als der Träger der ersten Versuchsreihe aufweist und sich dem nur modellartig nachgewiesenen Träger in Abbildung 1 annähert. Durch dieses hohe Verhältnis ist mit gesteigerten Stabilitätsproblemen zu rechnen. Ein entsprechender Nachweis ist in praktischen Anwendungen nach ÖNORM B 1995-1-1 (2019) zu führen. Grundsätzlich ist aber anzunehmen, dass ein über die gesamte Länge konstanter I-Querschnitt, wie nach Deutsche Institut für Bautechnik (2016) deutlich, leichter knickt als der hier untersuchte veränderliche Querschnitt. Weiters weist der Träger eine maximale Höhe von 74,1 mm auf. Demnach erfüllt das Modell die Restriktion der Höhe und benötigt den maximalen Wert nicht, um das Kriterium der Tragfähigkeit zu erfüllen.

Durch die Formoptimierung von Trägern und die fortschreitende Fertigungstechnologie wird das Potential der optimierten und komplexen Querschnitte für den Holzbau eröffnet. Auf diese Weise kann theoretisch jedes Element eines Gebäudes formoptimal entworfen und auf seine endgültige Form gefertigt werden. Somit können eine erhebliche Menge an Material sowie Gewicht für eine einfachere Handhabung eingespart werden. Kritisch abzuwägen ist die potentielle Materialeinsparung mit den Fertigungskosten, die aufgrund der komplexen Geometrie höher liegen (Mayencourt & Mueller 2020).

Laut Mayencourt & Mueller (2020) gilt es in der Bauwirtschaft als umstritten, die Formoptimierung als gute Möglichkeit anzusehen, um den Einsatz von Rohmaterial zu reduzieren. Ein Grund dafür ist die subtraktive Fertigung, bei der aus einem vollen Querschnitt der formoptimierte Querschnitt herausgefräst wird. Dies geschieht in den meisten Fällen mittels CNC-Fräse, wie beispielhaft in Abbildung 50B dargestellt. In einem neuartigen CNC-Fertigungsverfahren können jedoch die formoptimierten Träger ideal in ihrer Form nebeneinander gelegt und nach Mayencourt (2021b) mit geringem Verlust an Rohmaterial subtraktiv aus einer größeren Geometrie gefertigt werden.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der additiven Fertigung nach Mayencourt & Mueller (2020), bei der der Träger schichtweise aufgebaut wird und kein oder nur wenig Verlust an Rohmaterial gegeben ist. Diese Art der Fertigung kann klassisch mittels 3D-Druck erfolgen. Der schichtweise Aufbau könnte aber auch mittels Strands, wie bei Oriented Strand Lumber (OSL) nach Abbildung 50A, oder mit Furnierstreifen, wie bei Parallel Strand Lumber (PSL), in einer Formpresse stattfinden, um das volle Potential der Optimierung ausschöpfen zu können.

In Abbildung 50A ist weiter zu erkennen, dass der formoptimierte Träger aus Strands direkt hergestellt werden kann. Damit ist es möglich, beinahe das gesamte Rohmaterial einer tragenden Anwendung zuzuführen. Im Vergleich dazu entstehen bei der CNC-Fertigung 30 % zusätzliches Material, das für eine Verwendung geringerer Wertschöpfung genutzt werden kann, wie z. B. für Plattenwerkstoffe oder für die thermische Verwertung. Folglich ist im Vergleich zum Vollquerschnitt beim Strand-Prozess jeder dritte formoptimierte Träger gratis. Zusätzlich gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der Strand-basierte Träger eine geringere mechanische Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Massivholz aufweist, die es durch eine höhere Dichte und somit höheren Materialeinsatz auszugleichen gilt.

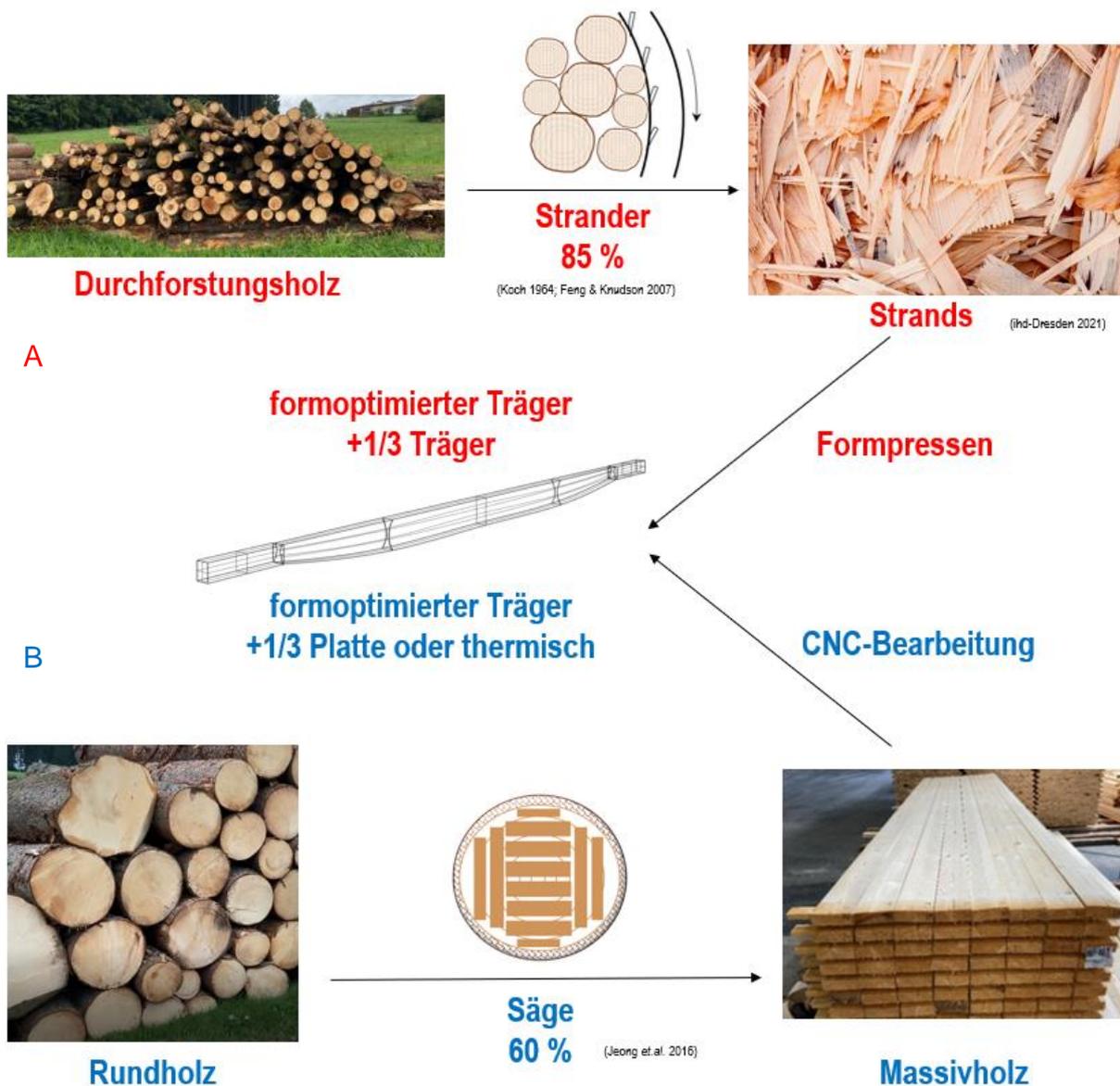


Abbildung 50: Zusammenfassung zweier möglicher Herstellungsprozesse der formoptimierten Träger inklusive der Ausbeute der jeweiligen Herstellungsprozesse in Prozent ohne Berücksichtigung der Trocknungs-, Hobel- und Schleifverluste sowie Feianteile, Sortierausschuss und Pressenverluste.

A: Additive Herstellung auf Basis von Strands nach Koch (1964), Feng & Knudson (2007) und ihd-Dresden (2021)

B: Subtraktive Fertigung mittels CNC-Bearbeitung nach Jeong et al. (2016)

Eine weitere Fertigungsmöglichkeit für das Design mit variabler Höhe und Breite bestünde darin, Furniere beispielsweise aus einem Schälprozess der Geometrie entsprechend zu klippen oder zu lasern und den Träger schichtweise, wie bei Laminated Veneer Lumber (LVL), aufzubauen. Weiters wäre es denkbar für das Design mit variabler Breite, Seitenware mit variabler Breite zu verwenden, die durchaus schmaler und dünner sein könnte. Eine weitere Möglichkeit würde darin bestehen können die Abholzigkeit des Rundholzes auszunutzen und mit einem konischen Einschnitt bzw. auch mit einem Scharfschnitt die entsprechenden konischen Lamellen für einen Träger mit dem Konzept der variablen Breite anzuordnen.

Das hohe Potential an Materialeinsparung und die damit verbundenen ökologischen und finanziellen Vorteile, die vor allem im Zuge einer zukünftigen Rohstoffverknappung relevant sein könnten, sollten die Entwicklung der formoptimierten Träger vorantreiben (Mayencourt & Mueller 2020).

4.1.4 Holzfeuchte und Rohdichte

Die Holzfeuchte liegt nach Abbildung 22 für die optimierten Proben im Mittelwert 0,5 % niedriger als für die Referenzproben. Niemz & Sonderegger (2017) beschreiben, dass für Massivholz im Holzfeuchtebereich zwischen 8 % und 20 % eine Abnahme der Biegefestigkeit um 4 % je Prozent Zunahme der Holzfeuchte vorliegt. Für die Biegefestigkeit in dieser Arbeit bedeutet das eine Unterschätzung der Referenzproben um 0,5 N/mm² gegenüber den optimierten Proben bei einer Festigkeit von 24 N/mm². Jedoch kam es bei der Probennahme zu Unregelmäßigkeiten, denn die Darrproben wurden nicht unmittelbar nach der Biegeprüfung genommen, sondern für die Referenzproben erst 36 Tage nach der Prüfung und für die optimierten Proben 13 Tage nach der Prüfung. Allerdings wurden die Proben im Normklima gelagert und geprüft.

Die Rohdichte wurde an den Referenzproben und an den Vollquerschnittproben erhoben und in Abbildung 23 dargestellt. Dabei wurden die Werte der Vollquerschnittproben und die der formoptimierten Proben gleichgesetzt, da die Maße an dem rechteckigen Querschnitt einfacher mittels Schiebelehre erhoben werden konnten. Weiters kann angenommen werden, dass die Dichte vor und nach der CNC-Bearbeitung nicht wesentlich anders ist. Durchaus kann es aber vorkommen, dass lokale Dichteunterschiede, z. B. durch unterschiedliche Jahrringbreiten, bei der CNC-Bearbeitung entfernt werden. Insgesamt wurden die Werte als ausreichend genau betrachtet.

Der Hersteller gibt die Rohdichte mit 0,450 g/cm³ für eine Holzfeuchte von 12 % ± 2 % an. Somit ist dieser Wert beinahe deckungsgleich mit den gemessenen Werten. Die größte Abweichung der zu vergleichenden Proben liegt zwischen -0,025 g/cm³ und 0,026 g/cm³.

4.2 Mechanische Charakterisierung

4.2.1 Biegefestigkeit in Faserrichtung

Die Referenzproben konnten aufgrund des durchgehenden rechteckigen Querschnittes mit der Formel nach der Prüfnorm und mit den Mittelwerten der Messungen berechnet werden. Schwierigkeiten ergaben sich jedoch für die formoptimierten Proben, da hier an jeder Stelle ein individueller Querschnitt vorliegt. Mayencourt (2021b) nennt hierfür zwei Möglichkeiten. Einerseits kann der Querschnitt an einer beliebigen Stelle zwischen den Krafteinleitungspunkten gewählt werden, weil hier nach dem Modell eine identische Biegespannung vorliegt.

Da Holz aber kein isotroper Werkstoff ist, schlägt Mayencourt (2021b) andererseits vor, den Querschnitt an der unmittelbaren Bruchstelle zu wählen. Mit dem zweitgenannten Ansatz ergeben sich jedoch im Nachhinein Schwierigkeiten bei der Ermittlung der exakten Bruchstelle, denn diese könnte etwa an einer Druckfalte oder auch bei der Risseinleitung der Zugseite liegen. Weiters wäre unter realen Bedingungen der Querschnitt für jeden Träger individuell, wodurch ein Problem der Vergleichbarkeit entstehen würde. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Querschnitt in der Probenmitte anzunehmen. Dabei ergeben sich jedoch Schwierigkeiten bei Versagensfällen, die nicht nach dem klassischen Druck-Zug-Versagen in der Mitte brechen, weil hier die Festigkeit der Prüfkörper unterschätzt wird, da die Proben in der Mitte immer die größte Höhe aufweisen. Aufgrund der variablen Geometrie bilden daher die Maximalkraft und die Durchbiegung die Vergleichsbasis.

Die einzelnen Biegefestigkeitswerte der Referenzproben für die erste und zweite Versuchsreihe liegen alle über der geforderten Festigkeit von 24 N/mm^2 nach der ÖNORM EN 14080 (2013). Der Mittelwert der beiden Versuchsreihen liegt nach Abbildung 24 auf einem ähnlichen Niveau. Die Prüfzeit wurde für die Proben A1.1 und E1.1 deutlich überschritten. Somit wurde die Festigkeit nach Niemz & Sonderegger (2017) unterschätzt, weil diese im Normbereich höher liegt. Die Werte der Referenzproben deuten darauf hin, dass die Träger ein erhebliches Maß an zusätzlicher Tragkraft besitzen. Im Mittelwert bedeutet das 51 N/mm^2 und damit mehr als das Doppelte der geforderten 24 N/mm^2 .

4.2.2 Maximalkraft der Biegeprüfung

Wird die Maximalkraft bei der Biegeprüfung der optimierten Proben und der Referenzproben beider Versuchsreihen nach Abbildung 25 miteinander verglichen, ist zu erkennen, dass die Maximalkraft der Referenzproben bei einer Materialeinsparung von 30 % um 21 % über der Maximalkraft der optimierten Proben liegt, außer bei den Proben C1 und B1. Alle optimierten Proben der ersten Versuchsreihe liegen über den geforderten 2187 N, auch die als Ausreißer identifizierte Probe B2.2. Bei der zweiten Versuchsreihe liegt eine deutliche Abnahme der maximalen Kraft vor. Drei formoptimierte Proben lagen über der Benchmark-Linie und zwei der Proben darunter. Im Mittelwert bedeutet dies, dass die optimierten Proben 49 % unter den Referenzproben liegen, bei einer Reduktion des Volumens von etwa 47 %. Es ist festzuhalten, dass bei einer Halbierung des Volumens auch die maximal ertragbare Kraft deutlich reduziert wird. Grund hierfür sind Instabilitäten und die Möglichkeit eines Bugs in der Modellberechnung. Weiters ist eine höhere Maximalkraft als 2187 N ein Produkt von einerseits überschätzten Festigkeitswerten im Modell und andererseits von Probeninhomogenität, denn die Proben wurden auf 24 N/mm^2 optimiert. Schwierigkeiten beim Vergleich haben sich auch dadurch ergeben, dass vor der Versuchsdurchführung nicht absehbar war, wie starke Kräfte die Referenzproben tatsächlich aushalten werden.

Weiters wurde beobachtet, dass die formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe im Vergleich zu den Referenzproben eine signifikante Verringerung der Variabilität aufweisen. Demnach besteht hier eine gravierende Verbesserung, da es sich nach wie vor um Proben mit Holzmerkmalen handelt. Zum einen liegt das daran, dass das Modell genau auf diese Kraft hin optimiert wurde. Träger, die als Vollquerschnitt eine höhere Festigkeit aufweisen würden, werden somit in ihrer maximalen Leistungsfähigkeit vermindert. Zum anderen erfolgt durch die Reduzierung des Volumens auch eine Reduzierung der Fehlerwahrscheinlichkeit. Es tritt dabei der Größeneffekt ein. Falls in der optimierten Probe ein weiteres Holzmerkmal wie z. B. ein Ast vorhanden ist, wirkt es sich umso gravierender auf die Maximalkraft aus, weil diese sofort brechen würde. Die zweite Versuchsreihe weist eine ähnliche Variabilität zwischen den Referenzproben und den formoptimierten Proben auf. Dies ist drauf zurückzuführen, dass die formoptimierten Proben gekippt und ausgeknickt sind.

Alle Prüfzeiten der formoptimierten Proben lagen am unteren Ende des erlaubten Bereiches oder unterschritten ihn geringfügig. Niemi & Sonderegger (2017) geben für eine Unterschreitung der Prüfzeit eine Überschätzung der Biegefestigkeitswerte an. Somit wären die Werte in der Normprüfzeit geringfügig niedriger.

Die Prüfgeschwindigkeit und die Prüfkongfiguration wurden für die Referenzproben und für die formoptimierten Proben ident gehalten, um vergleichbare Werte zu erhalten. Allein der geforderte Abstand von $6 \cdot h$ zwischen den beiden Kraftereinleitungspunkten wurde für die formoptimierten Proben aufgrund der variablen Höhe von 42 mm bis 76 mm nur bedingt eingehalten. Die Prüfkongfiguration für die formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe wurde entsprechend des längeren optimierten Bereiches angepasst. Das Verhältnis von Stützweite zu Probenhöhe betrug nun 16,2. anstatt 15,2, womit der Schubanteil in der Prüfung verringert wurde.

Bei der Gegenüberstellung der maximalen Kraft der ersten Versuchsreihe nach Abbildung 26 ist zu erkennen, dass die Werte der optimierten Proben A1 und D2 deutlich unter den Werten der Referenzproben liegen. Bei dieser Versuchsreihe wurde nicht darauf geachtet, dass die zusammengehörigen Proben ident belastet wurden (siehe Abbildung 2). Daher kam es zu einer Abweichung bei der Probe A1. Hier wurde für die Referenzprobe die fehlerfreie Seite in der Zugzone angeordnet. Im Gegensatz dazu wurde für die optimierte Probe die fehlerbehaftetere Seite in der Zugzone angeordnet. Die restlichen Proben wurden ident belastet. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde darauf geachtet, die Proben ident zu belasten.

Unterschiede bei der Probe D2 ergaben sich aufgrund des erhöhten Vorkommens von Reaktionsholz bei der Referenzprobe, wie Abbildung 51 zu entnehmen ist. Niemz & Sonderegger (2017) beschreiben Reaktionsholz mit einer höheren Dichte und einer höheren Biegefestigkeit als ein homogenes Holz. Weitere Abweichungen können Kapitel 3.2.5 entnommen werden. Die Proben B1, C1 und C2 lieferten eine vergleichbare Performance ab. Die Probe B2 lag in der optimierten Version 22 % unter der Referenz und wurde als Ausreißer identifiziert.



Abbildung 51: erhöhtes Vorkommen von Reaktionsholz bei der Referenzprobe D2.1 im Gegensatz zu der dazugehörigen optimierten- bzw. Vollquerschnittprobe D2.2

Mithilfe des t-Tests konnten für die erste Versuchsreihe keine Unterschiede durch die Optimierung erkannt werden. Folglich kann die eingangs formulierte Forschungsfrage für diese Versuchsreihe dahingehend beantwortet werden, dass für die optimierten Träger eine ähnliche mechanische Performance vorliegt wie für die Träger mit Standard-Rechtecksquerschnitt. Jedoch wurden für diesen Versuch nur sechs Proben herangezogen. In weiteren Arbeiten könnte ein größerer Probenumfang ein aussagekräftigeres Ergebnis erreichen.

Nach Abbildung 27 ist für die zweite Versuchsreihe erkennbar, dass sämtliche formoptimierte Proben deutlich unter den Werten der Referenz liegen und zwei Proben unterhalb der Restriktion von 2187 N gebrochen sind.

Durch den t-Test für die zweite Versuchsreihe wurde ein signifikanter negativer Effekt durch die Optimierung nachgewiesen, da die maximal erträgliche Kraft der Träger deutlich reduziert wurde. Daher wird für die zweite Versuchsreihe die Hypothese der vergleichbaren mechanischen Performance abgelehnt. Es ist zusätzlich mit erhöhten Stabilitätsproblemen im oberen Kraftbereich zu rechnen. Zudem ist ein noch größerer Einfluss der Holzmerkmale wie Äste und Faserabweichungen auf die Festigkeit vorhanden als in der ersten Versuchsreihe. Außerdem müsste die charakteristische Festigkeit bei 95 % der Prüfkörper über der Benchmark-Linie (2187 N) liegen, was hier nicht zutrifft.

4.2.3 Verformung bei 2187 N

Nach Abbildung 28 verformten sich die optimierten Proben der zweiten Versuchsreihe deutlich mehr als die optimierten Proben der ersten Versuchsreihe und auch als die Referenzproben. Diese erhöhte Durchbiegung ist sowohl auf die Stabilitätsprobleme der Proben zurückzuführen als auch auf den um 50 mm erhöhten Auflagerabstand dieser Prüfreihe in Kombination mit einer minimal niedrigeren Gesamthöhe.

Bei der Gegenüberstellung der Einzelwerte der Proben der ersten Versuchsreihe nach Abbildung 29 ist zu erkennen, dass jede formoptimierte Probe weniger Verformung erfährt als die dazugehörige Referenzprobe. Die eingangs formulierte Restriktion, die eine maximale Verformung von 7,5 mm bei 2187 N vorsieht, kann damit bestätigt werden. Mayencourt & Mueller (2020) berichten von einem erhöhten Widerstandsmoment des optimierten Querschnittes durch die Höhenzunahme. Daher verformen sich die optimierten Proben weniger als die Referenzproben. Dies ist hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit ein weiteres Argument für die formoptimierten Proben.

Der t-Test konnte einen positiven, statistisch signifikanten Effekt durch die Formoptimierung nachweisen. Dadurch ist ein positiver Effekt auf die Gebrauchstauglichkeit der Träger gegeben.

Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Proben der zweiten Versuchsreihe in Abbildung 30 konnte keine formoptimierte Probe die Restriktion von 7,5 mm bei 2187 N erreichen. Zusätzlich brachen zwei Proben bereits vor 2187 N. Weiters verformten sich die optimierten Proben stärker als die Referenzproben. Wie schon von Mayencourt (2021a) erwähnt, ist das Verformungslimit bei höheren Volumsreduktionen (>30 %) nicht umfassend erforscht und somit auch nicht ausreichend genau für die hier vorliegende Versuchsreihe.

Durch den t-Test wurde eine statistisch signifikante Verschlechterung der optimierten Träger nachgewiesen. Dadurch wird für diese Versuchsreihe erneut die Hypothese der ähnlichen mechanischen Performance abgelehnt.

4.2.4 Globaler Biege-Elastizitätsmodul

Der globale Elastizitätsmodul beträgt nach Abbildung 34 für alle Referenzproben im Mittelwert 11 817 N/mm². Brandner et al. (2007) berichten von einem globalen E-Modul von 9870 N/mm² für GL24h. Die Produktnorm ÖNORM EN 14080 (2013) für Brettschichtholz sieht einen Wert von 11 500 N/mm² für GL24h vor. Somit liegt der Wert dieser Prüfung deutlich über dem Wert von Brandner et al. (2007) und auch über dem geforderten Wert der Produktnorm.

Der niedrigste Wert beträgt 9456 N/mm². Damit nähert er sich an den Wert von Brandner et al. (2007) an. Der Höchstwert beträgt 14 551 N/mm². Er liegt um 26 % über dem Wert der Produktnorm.

Beide Werte stammen aus der ersten Versuchsreihe, womit die erhebliche Streuung der Festigkeitswerte von Holz unterstrichen wird.

4.2.5 Bruchbilder und Kraft-Weg-Diagramme

Grundlegend brachen die formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe aufgrund von Schubversagen. Die Probe B2.2, die in den mechanischen Festigkeitswerten mehrfach als Ausreißer identifiziert wurde, konnte jedoch wertvolle Erkenntnisse liefern. Denn bei der Referenzprobe B2.1 war während der Verformung (siehe Abbildung 34) zu jedem Zeitpunkt genug verbleibendes Material vorhanden, um den Höchstwert der Kraft zu erreichen. Selbst nach den beiden Teilbrüchen der Probe traf dies zu. Die formoptimierte Probe B2.2 brach hingegen spröde bereits nach geringer Verformung. Aus dem Vergleich der Probe B2 lässt sich schlussfolgern, dass bei der optimierten Version kein zusätzliches Material vorhanden war, das die auftretenden Kräfte noch hätte aufnehmen können. Daher brach die Probe durch die Faserabweichung früher als der volle Rechtecksquerschnitt.

Niemz & Sonderegger (2017) beschreiben den Zusammenhang von Ästen und der Festigkeit von Holz. Mit einem zunehmenden Astanteil sinkt die Zugfestigkeit von Holz. Meist tritt aufgrund von Spannungsspitzen dort auch der Bruch ein. Dies geschieht durch die frühzeitige Verschiebung der Spannungs-Nulllinie in Richtung Zugzone, weil die Biegespannung die Zugfestigkeit überschreitet. Daher empfehlen die Autoren, keine Bretter mit Fehlern in der Zugzone von Brettschichtholz anzuordnen. Weiters beschreiben Niemz & Sonderegger (2017) den Zusammenhang zwischen Faserabweichung und Biegefestigkeit, wonach bereits eine Abweichung der Faser von 15° eine Reduktion von 30 % bedeutet. Eine Abweichung von 60° bedeutet eine Reduktion von 80 % der Biegefestigkeit.

Alle formoptimierten Proben der zweiten Versuchsreihe wiesen Stabilitätsprobleme auf. Sie brachen durch Biegedrillknicken und Ausbeulen. An dieser Stelle bewahrheiten sich die Annahmen nach Kapitel 4.1.3, wonach eine hohe Volumenreduktion (>30 %) zu Querschnitten führt, die zu schlank werden und dadurch erhöhte Stabilitätsprobleme aufweisen. Zusätzlich wurde bei dieser Versuchsreihe eine noch höhere Empfindlichkeit gegenüber Holzmerkmalen wie z. B. Reaktionsholz nachgewiesen. Damit besteht für diese Träger in praktischen Anwendungen erhöhte Bruchgefahr. Die eingangs formulierte Hypothese der ähnlichen mechanischen Performance wird folglich für diese Versuchsreihe abgelehnt.

4.3 Verformungsverhalten mit digitaler Bildkorrelation

4.3.1 Dehnungsverhalten anhand der digitalen Bildkorrelation

Für die formoptimierten Proben der ersten Versuchsreihe bestätigt sich die in Kapitel 4.3.2 aufgestellte Behauptung. Denn ein Vergleich zwischen den Dehnungsverhalten aufgrund von Normalspannungen der Vollquerschnittproben und der formoptimierten Proben ist durch eine punktuelle Verzerrung der Werte und unter den zusätzlich kleinen Dehnungswerten nicht möglich. Jedoch ist bei den beiden Proben B1.2 und C2.2 mit dem FOV über den ganzen Querschnitt ein ähnliches Muster zu sehen. Des Weiteren sind Fehlstellen durch Dehnungsspitzen an den Proben erkennbar.

Mayencourt (2021b) kategorisiert das Versagen der hier vorliegenden formoptimierten Proben als bevorzugten Schubbruch in der Nähe des Auflagers durch erhöhte Beanspruchung quer zu Faser gegenüber einem klassischen Rechtecksquerschnitt. Der in der Literatur verwendete Wert für die Schubfestigkeit gilt für Standardträger mit rechteckigen Querschnitten und nicht für Querschnitte, die erhöht quer zur Faser beansprucht werden. Daher wäre eine Möglichkeit, die Schubfestigkeit mit einem höheren Sicherheitsfaktor etwas niedriger anzusetzen. Mittels DIC konnte kein Schub ausgewertet werden, weil die verwendete Software dazu nicht in der Lage ist, und somit konnten keine Rückschlüsse daraus gezogen werden.

In der zweiten Versuchsreihe wurden die Referenzproben durch die digitale Bildkorrelation mit den formoptimierten Proben verglichen. Für die beispielhafte Probe G1 wurde der Bildausgabebereich auf die maximale Kraft gelegt, um die Stabilitätsprobleme von der Auswertung auszuschließen. Bei dieser Versuchsreihe traten erneut punktuell hohe Verformungswerte auf, die wieder auf Ungenauigkeiten des verwendeten Prüfaufbaus und der Software hindeuten. Die formoptimierte Probe mit Stabilitätsproblemen erfuhr eine deutlich höhere Dehnung als die Referenzprobe. Dadurch funktioniert die digitale Bildkorrelation ohne Rauschen und die Zug- und Druckbereiche können einwandfrei dargestellt werden.

Mayencourt & Mueller (2020) beschreiben in ihrem analytischen Modell lokale Spannungsspitzen durch Äste und reale Auflagerbedingungen als kaum modellierbar. Weiters wurde das Modell laut Mayencourt (2021b) erst an drei Referenzproben bzw. formoptimierten Proben getestet, um es zu validieren.

Um den Umständen von lokalen Spannungsspitzen durch Äste oder Material-Inhomogenitäten entgegenwirken zu können, bietet sich der Herstellungsprozess mit Strands oder Furnierstreifen an, wie schon in Abschnitt 4.2 beschrieben. Bei Furnierstreifen können die Material-Inhomogenitäten besser auf die einzelnen Lagen verteilt werden und somit Spannungskonzentrationen vermieden werden. Durch die Verwendung von Strands und die damit verbundene Querorientierung der einzelnen Lagen kann die Anisotropie der Festigkeitswerte verringert werden. So ist es möglich, einem Versagen auf Schub entgegenzuwirken.

4.3.2 Genauigkeit der digitalen Bildkorrelation

Die Genauigkeit der vorhandenen Messbedingungen bei der digitalen Bildkorrelation wurde durch drei Schritte evaluiert. Im ersten Schritt wurde das Rauschen in Abbildung 43 bestimmt. Dabei ist für beide Richtungen (X, Y) das Rauschen für die formoptimierten Werte geringer, obwohl hier die betrachteten Oberflächen nicht planar waren, was eine Erhöhung der Werte erwarten ließe. Im zweiten Schritt wurden die Verformungsmessmethoden in den Abbildungen 44 und 45 gegenübergestellt. Für den dritten Schritt wurden die Verformungsmessmethoden bei 1500 N nach den Abbildungen 46 und 47 gegenübergestellt.

Werden die einzelnen Schritte der Bestimmung verglichen, ist zu erkennen, dass im ersten Schritt der Evaluierung erhebliche Ungenauigkeiten durch das Rauschen aufgedeckt wurden. Für die Bestimmung wurden die maximalen und minimalen Werte des jeweiligen Bereiches jeder Probe herangezogen, die die absoluten Höchstwerte der Abweichung in dem Bereich darstellen. Die Mittelwerte des jeweiligen Bereiches für alle Proben liegen nach Abbildung 43 bei $-0,331\%$ bis $0,289\%$. Zudem traten diese Höchstwerte punktuell am Träger auf. Weiters ist der Prüfbereich bei einer ähnlichen Anzahl an Bildern wesentlich länger als der Bereich des Rauschens. In Kombination mit der Durchbiegung egalisiert sich der Fehler dadurch geringfügig, wie den weiteren Schritten zu entnehmen ist.

Im zweiten Schritt wurden durch die digitale Bildkorrelation erheblich genauere Werte für die Verschiebung bzw. Verformung gefunden. Dabei konnte selbst die Traverse im Vergleich zur DIC kein genaueres Ergebnis erzielen. Somit bleibt festzuhalten, dass die DIC für größere Dehnungswerte als geeignete Messmethode eingesetzt werden kann. Die Verformungswerte nehmen in diesem Schritt der Evaluierung im Bereich des Rauschens (0–0,2 mm) auch eine hohe Abweichung (mehrere 100 %) gegenüber den Werten des makromechanischen Extensometers an.

Der letzte Schritt der Evaluierung erzielte ein ähnliches Ergebnis wie der zweite Schritt, nämlich eine leichte Unterschätzung des Wertes bei 1500 N. Das Ergebnis unterstützt die Behauptung, dass die Software bei geringer Verformung in diesem Versuchsaufbau ungenauer arbeitet und bei zunehmender Verformung exakt funktioniert.

Die Abweichungen der digitalen Bildkorrelation entstanden durch den wenig erprobten Prüfaufbau, unter anderem durch die Kombination von Kamera, Licht, Specklemuster und den Umgebungsvibrationen, aufgrund derer die Oberfläche instabil wurde. Weiters wurde der Prüfbereich für die DIC-Software nach dem subjektiv wahrgenommenen Ertönen des Mausklicks und dem anschließenden verzögerten Start der Maschine festgelegt. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass Abweichungen auftreten, diese aber ausreichend kontrollierbar sind, um einen quantitativen Vergleich zwischen den Dehnungsbildern vornehmen zu können.

5. Schlussfolgerung

In der hier vorliegenden Arbeit wurde versucht, das Volumen von Biegeträgern zu reduzieren und trotzdem eine ähnliche mechanische Performance wie ein vergleichbarer Rechtecksquerschnitt zu erhalten. Dafür wurden für zwei Versuchsreihen Prüfkörper aus Brettschichtholz mittels CNC-Fräse gefertigt. Die Materialersparnis betrug für die erste Versuchsreihe rund 30 % und für die zweite Versuchsreihe rund 47 %.

Durch die beiden Versuchsreihen kann darauf geschlossen werden, dass die Formoptimierung Träger hervorbringen lässt, die in Realversuchen eine vergleichbare mechanische Performance wie ein Standard-Rechtecksquerschnitt aufweisen. Durch eine zu hohe Volumenreduzierung (>30 %) generiert das Modell jedoch Träger, die eine hohe Schlankheit besitzen, und somit können Stabilitätsprobleme (Knicken) auftreten. Diese Stabilitätsprobleme sind dadurch zu erklären, dass sie im Modell nicht berücksichtigt wurden. Zusätzlich wurden viele Idealisierungen wie z. B. die Annahme eines isotropen Werkstoffverhaltens vorgenommen.

Weiters wurden durch das isotrope Materialverhalten die Festigkeit quer zur Faser und somit auch die Schubfestigkeit durch das Modell überschätzt, wodurch in der ersten Versuchsreihe ein vorzugsweiser Schubbruch stattfand. Außerdem wurde eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber bestimmten Holzmerkmalen, wie Ästen mit der verbundenen Faserabweichung, festgestellt, da die typischerweise in Brettschichtholz erzielte Homogenisierung durch die kleinen Querschnitte reduziert wurde.

Auf Basis der aktuellen Ergebnisse kann eine Materialersparnis von rund 30 % realisiert werden, da dabei nur geringe Verluste der mechanischen Leistungsfähigkeit auftraten und die Tragfähigkeit durchgehend beibehalten werden bzw. im Fall der Durchbiegung grundsätzlich deutlich verbessert werden konnte. Durch diese Materialeinsparung kann die Entwicklung von formoptimierten Trägern vorangetrieben werden. In künftigen Arbeiten würde sich ein Versuchsaufbau mit größeren Dimensionen der Prüfkörper anbieten, die näher an den praktischen Anwendungen liegen.

Für eine präzise Formoptimierung ist es wichtig, die exakten und lokal aufgelösten Materialeigenschaften zu kennen. Weiters ist die Geometrie lediglich auf einen bestimmten Lastfall optimiert. Folglich würde für praktische Anwendungen ein generalisierter Träger benötigt, der für eine Kombination von Lastfällen einsetzbar ist.

In einem möglichen Herstellungsprozess der formoptimierten Träger bietet sich ein schichtweiser Aufbau auf Basis kleinerer Partikel wie zum Beispiel durch Strands oder Furnierstreifen an, da bei einer subtraktiven Fertigung auf Basis von Schnittholz das eingesparte Material nicht strukturell genutzt werden kann. Weiters bringt die Fertigung auf Basis von Furnieren oder Strands eine zusätzliche Homogenisierung der Festigkeitswerte mit sich. Dies würde den Nachteilen des Modells (isotropes und homogenes Materialverhalten) entgegenwirken.

6. Literaturverzeichnis

Banerjee S, Bhattacharyya D (2011) Optimal design of sandwich panels made of wood veneer hollow cores. *Composites Science and Technology* 71: 425–432.

Bliem P, Frömel-Frybort S, van Herwijnen H, Mauritz R, Müller U, Teischinger A, Konnerth J (2020) Holzwerkstoff basierend auf Partikeln hergestellt mittels einer neuartigen, nicht schneidenden Zerteilungstechnologie. Herstellung, Eigenschaften und mögliche Anwendungsgebiete. *holztechnologie* 6: 30–38.

Brandner R, Gehri E, Bogensperger T, Schickhofer G (2007) Determination of modulus of shear and elasticity of glued laminated timber and related examinations. International Council for Research and Innovation in Building and Construction - Working Commission W18 - Timber Structures Meeting Forty: 40-12-2_1-40-12-2_20.

Brennecke W (1980) Dachtragwerke. In: Brennecke W, Folkerts H, Haferland F, Hart F (Hrsg.) *Dachatlas. Geneigte Dächer* 57–96. Institut für internationale Architektur-Information, München.

Correlated Solutions, Inc. (2021) VIC Speckle Pattern Application Kit. The VIC Speckle Pattern Specifications. <https://www.correlatedsolutions.com/speckle-kit/> (30.06.2021).

Dankert J, Dankert H (2013) *Technische Mechanik. Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik.* 7 Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Dendrolight Latvija Ltd (2011) DendroLight 3 – Layer Panel. <http://dendrolight.lv/lv/wpcontent/themes/dendrolight/pdf/DendroLight%203Layer%20Panel%20ENG.pdf> (10.04.2021).

Deutsches Institut für Bautechnik (2016) Holzschalungsträger DOKA-Träger I tec 20. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-773: 1–15.

Deutsches Institut für Bautechnik (2019) Kielsteg. Europäische Technische Bewertung ETA-18/1014: 1–34.

Dong Y, Pan B (2017) A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics* 57: 1161–1181.

Feng M, Knudson R (2007) Effect of log rehydratation on quality of OSB strand manufactured from beetle- killed lodgepole pine. *Forest Product Journal*: 35–57.

Ghanbari-Ghazijahani T, Russo T, Valipour R (2020) Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials. *Composite Structures* 233: 111579.

GOM Metrology (2016) GOM Training Webinar - 2D digitale Bildkorrelation mit GOM Correlate. https://www.youtube.com/watch?v=Hx_g25zFkSk (02.08.2021).

Hess H (1957) Holzgurträger. CH320678A. Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum Schweiz.

Hess H (1966) Holzgurträger mit wellenförmigem Steg. CH406585A. Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum Schweiz.

Hetzer O (1906) Verfahren zur Herstellung eines verstärkten Holzbalkens. AT23744B. Österreichisches Patentamt.

ihd-Dresden (2021) Partikelherstellung und - analyse. Strands. <https://www.ihd-dresden.de/de/fachgebiete/werkstoffe/#c2850> (20.05.2021).

International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (Eds.) (2018) A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. International Digital Image Correlation Society.

Jeong G, Lee J, Yeo H, Lee S (2016) Predicting lamina yield from logs of different diameters for cross laminated timber production. Journal Korean Wood Science Technology 44: 809–820.

Kämpf G (1951) Holzgurträger. AT169423B. Österreichisches Patentamt.

Kavermann S, Bhattacharyya D (2019) Experimental investigation of the static behaviour of a corrugated plywood sandwich core. Composite Structures 207: 836–844.

Klinkenberg G (1974) Träger nach der Art eines Vierendeelträgers. DE2318720A1. Deutsche Patentamt.

Koch P (1964) Wood Machining Processes. Ronald Press Co, New York.

Mayencourt P (2021b) mündliche Mitteilung vom 17.08.2021.

Mayencourt P (2021a) mündliche Mitteilung vom 27.05.2021.

Mayencourt P, Mueller C (2020) Hybrid analytical and computational optimization methodology for structural shaping: Material-efficient mass timber beams. Engineering Structures 215: 110532.

Mohammadabadi M, Yadama V, Smith L (2019) An analytical model for wood composite sandwich beams with a biaxial corrugated core under bending. Composite Structures 228: 111316.

Niemz P, Sonderegger W (2017) Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Carl Hanser Verlag, München.

ÖNORM B 1995-1-1 (2019) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Konsolidierte Version mit nationalen Festlegungen, nationalen Erläuterungen und nationalen Ergänzungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1. Austrian Standards Institute, Wien: 72.

ÖNORM EN 13183 (2004) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren (EN 13183-1:2002 + AC:2003). Austrian Standards Institute, Wien: 1–6.

ÖNORM EN 14080 (2013) Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. Austrian Standards Institute, Wien.

ÖNORM EN 14081-1 (2019) Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Austrian Standards Institute, Wien: 1–40.

ÖNORM EN 408 (2012) Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Austrian Standards Institute, Wien.

Pyrus Panels GmbH (2019) Pyrus Panels- Lisocore Folder. https://pyrus-panels.com/wordpress/wp-content/uploads/Pyrus-Penals_lisocore_Folder_2021-02-10_D__LowRes.pdf (11.04.2021).

Schweitzer J (2016) Verfahren zum Herstellen von Wellfurnier. EP 3 037 600 A1. Europäische Patentanmeldung.

Sperrholzwerk Schweitzer GmbH (2020) aerowood- die patentierte Leichtbauplatte aus Holz und Luft. <https://schweitzer-austria.com/de/produkte/aerowood> (11.04.2021).

Triantafillou T (1997) Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials. Journal of Materials in Civil Engineering 9: 65–69.

Voth C, White N, Yadama V, Cofer W (2015) Design and Evaluation of Thin-Walled Hollow-Core Wood-Strand Sandwich Panels. Journal of Renewable Materials 3: 234–243.