

Stefan Rasche, Sina Hage, Jürgen Ruth, Katrin Linne
Jörg Hildebrand, Jean Pierre Bergmann

HiPlast – 3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte für adaptive Faltwerke

F 3145

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0405-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

HiPlast –

3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte für adaptive Faltwerke

Endbericht

Projektlaufzeit: 01.01.2017 – 31.01.2019

Der Bericht umfasst
160 Seiten Text

Autoren:

Stefan Rasche^{1,2}
Sina Hage^{1,2}
Jürgen Ruth¹
Katrin Linne¹
Jörg Hildebrand²
Jean Pierre Bergmann²

¹ Bauhaus-Universität Weimar, Professur Konstruktives Entwerfen und
Tragwerkslehre, Belvederer Allee 1, 99425 Weimar

² Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik,
Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Weimar, 15. März 2019

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert
(AZ: SWD-10.08.18.7-16.51)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Non Technical Summary

3D printed fiber reinforced hinges for adaptive folded plates

Adaptive folded plates are gaining increasing interest as filigree, material-saving und alterable light-weight shell structures for facade and roof constructions. They are motivated by scenographic aspects, adaptive shading or exposure as well as building integrated photovoltaics. They are basically made up of flat panels that are hinged together. A new approach for joining the plate elements by hinges is the use of 3D printing technologies for fiber-reinforced plastic material.

The aim of the research project is the development of a light and efficient load-bearing envelope structure. In particular, the joining technology of the individual panel elements is to be further developed using innovative fibre reinforced 3D printing technologies. The joints take up the functions of spatial foldable hinges. The hinges have to meet very high demands as they have to resist high mechanical loads and to withstand permanently environmental impacts. The complex geometry can be produced efficiently in one manufacturing step using 3D printing technologies. The 3D printed material is investigated by means of laboratory experiments with the purpose to determine material data which can be used in finite element simulation models.

A joining technology for foldable shell structures could be successfully developed. The technology is based on the 3D printing of hinge joints using long-fibre reinforced plastics. Possible fiber materials are carbon, glass or aramid fibres. The panels of the structure can be made of glass, wood, plastic, aluminium or other lightweight materials. The panels are glued to the hinge joints using a suited adhesive bonding technology. The developed demonstrators show the load-bearing capacity of the foldable structure under short-term load. Future research should be devoted to the investigation of the long-term load-bearing capacity under real load and environmental conditions.

Kurzzusammenfassung

3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte für adaptive Faltwerke

Formveränderliche Faltwerke gewinnen zunehmendes Interesse als filigrane, materialsparende und wandelbare Hüllelementstrukturen für Fassaden- und Dachkonstruktionen. Sie sind grundlegend aus ebenen Platten aufgebaut, die gelenkig miteinander verbunden sind. Ein neuer Ansatz für eine geeigneten Füge- und Falttechnik ist der Einsatz innovativer 3D-Drucktechnologien für die Entwicklung faserverstärkter Gelenkpunkte zur Verbindung der Plattenelemente.

Formveränderliche Fassaden- und Dachkonstruktionen sind häufig motiviert durch szenographische als auch bauphysikalisch-energetische Aspekte (Verschattung bzw. Belichtung, gebäudeintegrierte Photovoltaik). Die Integration zusätzlicher Funktionen in zukünftige Hüllelementkonstruktionen für Dach- und Fassadenbereich darf dennoch nicht zu höheren Konstruktionsgewichten bzw. Transportabmessungen führen. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer leichten und effizienten tragfähigen Hüllelementstruktur. Die formveränderlichen Hüllelementstrukturen sind grundlegend aus ebenen Platten aufgebaut, welche durch eine geeignete Füge- und Falttechnik verschiedene Bewegungsvorgänge realisieren und zu einem räumlichen Tragwerk geformt werden können. Speziell die Fügetechnologie der einzelnen Plattenelemente soll unter Anwendung innovativer 3D-Drucktechnologien weiterentwickelt werden. Die Ansprüche an die "Fugen" sind aus Gründen der mechanischen Beanspruchung und der Dauerhaftigkeit aus Umwelteinflüssen als sehr hoch einzuschätzen. In diesen Bereichen erfolgt die wesentliche Kraftübertragung zwischen den Platten. Der Ansatz des Forschungsvorhabens besteht darin, die einzelnen schubsteifen Plattenelemente mit Hilfe von 3D-gedruckten faserverstärkten Gelenkpunkten zu verbinden. Aufgrund der angestrebten Formveränderbarkeit übernehmen die Fügestellen die Funktionen räumlicher Gelenke, deren komplexe Geometrie materialeffizient in einem Fertigungsschritt über geeignete additive Fertigungsverfahren hergestellt werden kann. Um den hohen auftretenden Beanspruchungen Rechnung zu tragen, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens der Einsatz faserverstärkter 3D-Drucksysteme präferiert.

Es konnte eine Fügetechnologie für leichte und formveränderliche Faltwerke aus schubsteifen Plattenelementen entwickelt werden, die auf dem 3D-Druck von Verbindungselementen aus langfaserverstärkten Kunststoff basiert. Es wurde eine Kombination aus dem FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication) mit dem thermoplastischen Kunststoff Polyamid PA 6 und dem CFF-Verfahren (Continuous Filament Fabrication) für die Faserverstärkung mit Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern verwendet. Dafür wurde der kommerzielle 3D-Drucker „Mark Two“ (Fa. Markforged) eingesetzt. Die Plattenelemente werden mit den 3D-gedruckten Gelenkknoten durch geeignete elastische Haftklebstoffe verbunden. Die Gelenkknoten übernehmen die Funktion eines in mehrere Richtungen faltbaren Scharniers, welches Platten aus Glas, Holz, Kunststoff oder Aluminium zu einer tragfähigen faltbaren Struktur verbindet. Die additive Fertigung mit lokaler Faserverstärkung ermöglicht es unterschiedliche Materialanforderungen an Festigkeit und Steifigkeit in einem Bauteil und einem Fertigungsschritt zu vereinen. Die entwickelten Knotenpunkte wurden sowohl numerisch mit der Finite-Elemente-Methode als auch experimentell untersucht. Validierte Materialmodelle wurden anhand geeigneter Versuche mit 3D-gedruckten Zug- und Biegeproben bestimmt. Die experimentell ermittelten Materialkennwerte für den Verbundwerkstoff ermöglichen es, die Gelenkknoten beanspruchungsgerecht zu dimensionieren. Mit Hilfe von Demonstratoren konnte die Anwendbarkeit und Tragfähigkeit unter Kurzzeitbeanspruchung nachgewiesen werden. Zukünftige Forschungsarbeit muss sich der Untersuchung der Langzeitbeanspruchbarkeit unter real wirkenden Last- und Umweltbedingungen widmen.

Schlagworte: 3D-Druck, faserverstärkter Kunststoff, Faltwerk, Origami Architektur, räumliches Scharniergelenk, Finite-Elemente-Analyse, Materialparameteridentifikation

Abstract

3D printed fiber reinforced hinges for adaptive folded plates

Adaptive folded plates are gaining increasing interest as filigree, material-saving und convertible enveloping structures for facade and roof constructions. They are basically made up of flat panels that are hinged together. A new approach for a suitable joining and folding technique is the use of innovative 3D printing technologies for the development of fiber-reinforced hinges for joining the plate elements.

Convertible facade and roof constructions are often motivated by scenographic as well as physical and energetic aspects (shading or exposure, building integrated photovoltaics). The integration of additional features in future enveloping structures for roofs and facades must not lead to higher construction weights or transport dimensions. The aim of the research project is the development of a light and efficient load-bearing envelope structure. The shape-changing shell element structures are basically composed of flat panels, which can perform relative motions and can be formed into a load-bearing structure by means of suitable joining and folding techniques. In particular, the joining technology of the individual panel elements is to be further developed using innovative fibre-reinforced 3D printing technologies. The demands on the "joints", where the forces are transmitted between the panels, are very high for reasons of mechanical stress and durability due to environmental impacts. The approach of the research project is linking the individual stiff panel components with the help of 3D-printed fibre-reinforced joints. Due to the desired shape changeability, the joints take up the functions of spatial foldable joints, whose complex geometry can be produced material-efficiently in one manufacturing step using suitable additive manufacturing technologies. In order to take into account the high stresses that occur, the use of fibre-reinforced 3D printing systems is preferred within the scope of the research project.

A joining technology for variable shaped folded plates assembled of lightweight panel elements has been successfully developed. The technology is based on the 3D printing of joining elements using long-fibre-reinforced plastic. The Markforged Mark Two 3D Printer was used in the project. It combines the fused filament fabrication (FFF) printing process with polyamide PA 6 and the continuous filament fabrication (CFF) printing process with carbon, glass or aramid fibres. The panels are glued to the 3D printed hinges using a suited adhesive bonding technology. The connecting elements take up the function of a hinge node that can be folded in several directions. Panels made of glass, wood, plastic or aluminium can be joined to form a load-bearing foldable structure. The additive manufacturing with local fibre reinforcement makes it possible to combine different material requirements for strength and stiffness in one component and one manufacturing step. The developed hinges were studied numerically with the finite element method as well as experimentally. Validated material models have been determined by suitable tensile and bending experiments with 3D-printed specimens. The experimentally determined material properties of the composite material offer the opportunity to dimension the joints with regard to the load assumptions. Demonstrators were developed to investigate the application and load-bearing capacity of the developed joints. By means of the demonstrators the load-bearing capacity under short-term load could be proved. Future research work must be devoted to the investigation of the long-term load-bearing capacity of the foldable plates under real load and environmental conditions.

Keywords: 3D printing, fibre reinforced plastics, folded plate, Origami architecture, spatial hinge, finite element analysis, material parameter identification

Forschungsvorhaben

3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte für adaptive Falwerke - „HiPlast“

Gefördert vom BBSR
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung



Abschlussbericht

Forschungsstellen:

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre (TWL)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth, Belvederer Allee 1, 99425 Weimar

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik (IFt)
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Mitfinanzierende Stellen:

3D-Schilling GmbH, Sondershausen/OT Oberspier
Mebitec Meerbuscher Informationstechnik GmbH, Meerbusch
PORTEC GmbH, Zella-Mehlis
RSB Rudolstädter Systembau GmbH, Rudolstadt
SKZ – KFE gGmbH, Würzburg
Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK), Rudolstadt

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Stefan Rasche (TWL, IFt)
Sina Hage, M. Sc. (TWL, IFt)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth (TWL)
Dr.-Ing. Katrin Linne (TWL)
Dr.-Ing. Jörg Hildebrand (IFt)
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (IFt)

Laufzeit: 01.01.2017 – 31.01.2019

Datum: 15.03.2019

Das Forschungsvorhaben wurde mit den Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-, und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.51)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	11
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	11
1.2	Projektbeteiligte	11
1.3	Projektgliederung in Phasen.....	12
2	Anwendung von wandelbaren Faltwerken	13
2.1	Faltungsvarianten	13
2.1.1	Origami inspirierte formveränderliche Strukturen	13
2.1.2	Typologien von Faltungen	14
2.2	Anwendungsbeispiele von adaptiven Faltstrukturen im Bauwesen	16
2.3	Anlass und Motivation.....	16
3	Grundlegende Betrachtungen zur Konstruktion des Gelenkpunktes	19
3.1	Faltmechanismus.....	19
3.2	Biegeeweiche Drehgelenke	20
3.3	Faserverstärkung	22
4	Werkstoffauswahl für den 3D-Druck	24
4.1	Faserverstärkungen in der additiven Fertigung	24
4.1.1	Kurzfasern.....	24
4.1.2	Endlosfasern	25
4.2	Verwendetes 3D-Drucksystem „Mark Two“.....	27
4.2.1	Entwurf- und Prozessparameter	28
4.2.2	Matrixwerkstoff Polyamid PA6.....	29
4.2.3	Verstärkungsfasern.....	30
4.2.4	Software „Eiger“	31
4.2.5	Materialkosten für den faserverstärkten 3D-Druck	31
5	Experimentelle Charakterisierung des 3D-gedruckten Werkstoffes	32
5.1	Mikroskopische Analyse Matrixwerkstoff	32
5.2	Wasseraufnahme der 3D-gedruckten Teile.....	33
5.3	Mechanisches Verhalten von PA 6 im Zugversuch.....	34
5.3.1	Probengeometrie.....	34
5.3.2	Versuchsdurchführung	35
5.3.3	Versuchsergebnisse	35
5.3.4	Versagensmodi	37

5.4	Biegeversuche mit Matrixwerkstoff PA 6	38
5.4.1	Entwurfs- und Prozessparameter	38
5.4.2	Versuchsdurchführung.....	38
5.4.3	Versuchsergebnisse	39
5.4.4	Zusammenfassung Materialkennwerte Matrixwerkstoff PA6.....	39
5.5	Mechanisches Verhalten des Verbundes aus PA 6 und Verstärkungsfasern.....	40
5.5.1	Zugversuche	40
5.5.2	Versuchsdurchführung.....	41
5.5.3	Versuchsergebnisse	41
5.5.4	Versagensmodi.....	46
5.5.5	Biegeversuch Verbundwerkstoff.....	47
5.6	Kriechverhalten im Zeitstand-Zugversuch	49
5.6.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	49
5.6.2	Messergebnisse.....	51
5.6.3	Auswertung.....	53
5.7	Zyklischer Zugversuch	57
6	Experimentelle Untersuchungen zur Gelenkermüdung	58
6.1	Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an Gelenkpunkten	58
6.1.1	Vorbetrachtung.....	58
6.1.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	59
6.1.3	Versuchsergebnis	60
6.2	Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an Filmgelenkproben.....	61
6.2.1	Dehnungsbasierte Bemessung des Gelenkquerschnittes	61
6.2.2	3D-Druck der Filmgelenkproben	62
6.2.3	Zugversuche mit Filmgelenkproben.....	64
6.2.4	Mikroskopische Untersuchungen	65
7	Klebstoffauswahl und Festigkeit der Klebeverbindung	67
7.1	Kleben von Polyamid 6.....	67
7.2	Klebstoffauswahl.....	68
7.2.1	Doppelseitige Haftklebebänder	69
7.2.2	Silan-Hybridklebstoffe.....	70
7.3	Bestimmung der Zugscherfestigkeit	71
8	Herstellung der faserverstärkten 3D-gedruckten Gelenkknoten	76
8.1	Optimiertes Knotendesign	76

8.2	Schichtaufbau und 3D-Druck.....	76
8.3	Mikroskopische Analyse	78
8.4	CT-Analyse	80
9	Modellierung und Simulation.....	82
9.1	Viskoelastische Modellierung des zeitabhängigen Verhaltens von PA6.....	84
9.1.1	Rheologische Modelle	84
9.1.2	Anpassung der Modellparameter an zyklische Kurven	86
9.1.3	Anpassung der Modellparameter an Kriechkurven	90
9.2	Wahre Spannungen und Dehnungen bei großen Verformungen	96
9.3	FEM-Modellierung mit ANSYS	96
9.4	Elastisch-plastisches Materialmodell für Matrixwerkstoff Polyamid PA6.....	96
9.4.1	Validierung der Simulationsmodelle für den Matrixwerkstoff PA 6	98
9.4.2	Validierung der Materialmodelle für den Matrixwerkstoff PA 6.....	100
9.5	FEM-Modellierung der Filmgelenkprobe	101
9.6	FEM-Modellierung des Gelenkknotens	104
9.6.1	Parametrisches Geometriemodell und Vernetzung.....	104
9.6.2	Materialmodell	105
9.6.3	Randbedingungen.....	106
9.7	Simulationsergebnisse für „Gelenk 13“	108
9.8	Vergleich Simulationsergebnisse Gelenkknoten mit/ohne Faserverstärkung	111
10	Beanspruchungsgerechte Dimensionierung der Gelenkknoten	114
10.1	Auslegungs- und Dimensionierungskonzept	114
10.2	Parametrisierung	115
10.3	Dimensionierung gegen zul. Dehnung im Filmgelenk	116
10.4	Dimensionierung gegen zul. Spannung im Filmgelenk.....	116
10.5	Dimensionierung gegen zul. Schubspannung in der Klebefläche.....	119
10.6	Bemessung Verbundwerkstoff der Klebelasche.....	119
11	Demonstratoren	121
11.1	Fassadenverkleidung aus wabenartig angeordneten Faltelementen	121
11.2	Dreieckiges faltwerk aus 16 ebenen Platten	123
11.3	Adaptives faltwerk aus drei verbundenen sechseckigen Faltelementen	125
11.4	Belastungsversuche an selbsttragender faltbarer Oktaederstruktur.....	127
12	Weitere Anwendungsmöglichkeiten.....	129

13 Zusammenfassung und Ausblick.....	131
Literaturverzeichnis	135
Abbildungsverzeichnis.....	139
Tabellenverzeichnis.....	149
A Anhang	151
A.1 Bilder zu den Zug- und Kriechversuchen	151
A.2 Druckversuche	152
A.3 Scherzugversuche	153
A.4 Fließkurve Matrixwerkstoff PA 6 im FEM-Materialmodell	154
A.5 Viskoelastisches Verhalten Matrixwerkstoff PA 6 im FEM-Materialmodell	154
A.6 Datenblatt 3M Hybrid Kleb- und Dichtmasse 760	156
A.7 Datenblatt 3M VHB GPH Klebebandserie	158

1 Einleitung und Motivation

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Filigrane, materialsparende und wandelbare Fassaden- und Dachkonstruktionen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Neben möglicher zu realisierender ikonenhafter Architektur und individueller Ästhetik ist die Realisierung gewollter Formänderungsvorgänge von großem Interesse. Die Motivation einer Formänderung ist häufig vor dem Hintergrund möglicher szenographischer als auch bauphysikalischer-energetischer Aspekte, z.B. der Verschattung bzw. Belichtung aber auch der gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV), zu verstehen. Die Integration zusätzlicher Funktionen in zukünftige Hüllelementkonstruktionen für Dach- und Fassadenbereich darf dennoch nicht zu höheren Konstruktionsgewichten bzw. Transportabmessungen führen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer effizienten Hüllelementstruktur. Basierend auf dem am Lehrstuhl von Prof. Ruth entwickelten Patent [DE12] werden geometrische wie auch materielle Lösungen zur Übertragung auf den Maßstab des Bauwesens gesucht. Die im Forschungsvorhaben fokussierten, leichten, filigranen und formveränderlichen Hüllelementstrukturen sind grundlegend aus ebenen Platten aufgebaut, welche durch eine geeignete Füge- und Faltechnik verschiedene Bewegungsvorgänge realisieren können [DE12, HH15]. Hierbei wird der Einsatz von faserverstärkter 3D-Drucksysteme präferiert. Die Anwendbarkeit dieser Fügetechnologie mit unterschiedlichen Materialkombinationen (Glas, Kunststoff, Alu, Stahl) wird untersucht. Für die Bemessung der additiv hergestellten Bauteile ist zunächst eine genaue Charakterisierung der Werkstoffe im Hinblick auf unterschiedliche Prozess- und Entwurfparameter notwendig. Die Möglichkeit der computergesteuerten Fertigung garantiert eine hohe Formenvielfalt und durch Anwendung der Topologie- und Formoptimierung eine effiziente Materialausnutzung. Die entwickelten Knotenpunkte werden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht.

1.2 Projektbeteiligte

Das 24-monatige Forschungsprojekt wird von zwei Forschungsstellen bearbeitet:

- **Forschungsstelle 1 (TWL):** Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Architektur und Urbanistik, Professur Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth, Belvederer Allee 1, 99425 Weimar
- **Forschungsstelle 2 (IFt):** Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Fertigungstechnik, Fachgebietsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Das Projekt wurde wissenschaftlich bearbeitet von:

- Dr.-Ing. Stefan Rasche, Sina Hage, M. Sc. (TWL+ IFt),
- Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth, Dr.-Ing. Katrin Linne (TWL),
- Dr.-Ing. Jörg Hildebrand, Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (IFt)

Das Projekt wurde von folgenden Projektpartnern finanziell unterstützt:

- 3D-Schilling GmbH, Sondershausen/OT Oberspier
- Mebitec Meerbuscher Informationstechnik GmbH, Meerbusch
- PORTEC GmbH, Zella-Mehlis
- RSB Rudolstädter Systembau GmbH, Rudolstadt
- SKZ – KFE gGmbH, Würzburg
- Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK), Rudolstadt

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.

1.3 Projektgliederung in Phasen

Das Projekt gliedert sich in drei Phasen, Zeitplan mit Arbeitspaketen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Projektgliederung in Phasen

Phase I	02.01.2017 – 01.07.2017
	Faltungsvarianten
	Literaturrecherche zur faserverstärkten additiven Fertigung
	Charakterisierung von additiv gefertigten Bauteilen
Phase II	01.07.2017 – 01.04.2018
	Erstellung eines Material- und Designkataloges für 3D gedruckte faserverstärkte Bauteile
	Materialmodell und Parameteridentifikation
	Topologie-, Form- und Materialoptimierung
Phase III	01.04.2018 – 31.01.2019
	Herstellung der faltbaren punktförmigen 3D geruckten Lösungen
	Experimentelle Analysen
	Bau eines Demonstrators
	Spezifikation von weiteren Anwendungsfeldern
	Vorläufiger Endbericht (6 Wochen vor Ende der Bearbeitungszeit)

2 Anwendung von wandelbaren Faltwerken

Mit zunehmender Spannweite von Tragwerkskonstruktionen begrenzt das Eigengewicht deren wirtschaftliche Ausführung [Wer13]. Aus diesem Grund sind Leichtbautechniken, welche das Eigengewicht von Strukturen reduzieren, in der Architektur von großem Interesse. Die Leichtbautechnik umfasst zum einen die Entwicklung von leichteren Baumaterialien (Mikrostrukturierung), die ein optimiertes Verhältnis von Traglast und Eigengewicht aufweisen, und zum anderen die Entwicklung effizienter Tragwerksformen (Makrostrukturierung), welche die auftretenden Belastungen optimal auf die verwendeten Baumaterialien verteilen. Faltungen in einem Tragwerk ermöglichen das Konstruieren mit flächigen, dünnen Materialien über größere Spannweiten, da der statische Hebelarm durch die „Falte“ vergrößert und die Schubsteifigkeit der dünnen Flächenelemente ausgenutzt wird [Wer13]. Insbesondere für den Bau druckbeanspruchter Flächentragwerke eignen sich Faltstrukturen um geringe Flächengewichte zu erreichen.

2.1 Faltungsvarianten

2.1.1 Origami inspirierte formveränderliche Strukturen

Origami, die chinesische Papierfaltkunst, ermöglicht die Entwicklung leichter räumlicher Gebilde und ist aufgrund der Formenvielfalt Inspirationsquelle für Mathematiker, Ingenieure und Architekten. Die Formveränderlichkeit und die mechanischen Eigenschaften der durch Origami erzeugbaren räumlichen Strukturen mündeten schließlich in eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Origami und diversen nützlichen Erfindungen (faltbare Sonnensegel, Stents für Blutgefäße, Faltung für Airbags). [BW06]

Für Architektur und Ingenieurwesen ist das sogenannte Mosaik Origami (Origami tessellations) von besonderem Interesse. Ausgangspunkt sind zweidimensionale geometrische Muster, sogenannte Parkettierungen, die sich ohne Lücken oder Überschneidungen wiederholen. Wird das Papier durch flache steife Platten ersetzt, die durch Gelenke miteinander verbunden sind, so sind formveränderliche räumliche Strukturen möglich, diese Teildisziplin wird Rigid Origami genannt. Das am häufigsten vorkommende Faltmuster nennt sich Miura-ori (Abbildung 1). Dieses besteht aus mehreren gleichen Parallelogrammen. Werden die Parallelogramme als steife Platten ausgebildet und die Falzkanten durch Scharniere ersetzt, so entsteht ein Faltmechanismus mit einem Freiheitsgrad [LIU15]. Oft wird diese Struktur als Aussteifungskern von Sandwichpaneelen verwendet. Damit ist ein hohes Steifigkeit- zu Masseverhältnis erreichbar. Ein Nachteil dieser Struktur ist die komplizierte Herstellung sowie die Empfindlichkeit gegenüber Anpralllasten.

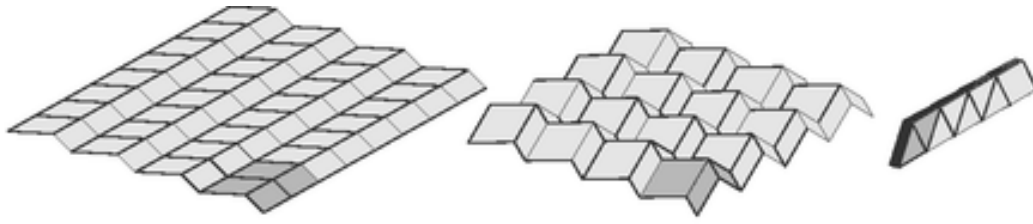


Abbildung 1: Miura-Ori Faltung, Bild aus [SG13]

Eine andere bekannte Form der Faltung besteht aus mehreren gleichen Dreiecken und führt auf Kaleidozyklen [SW92]. Der einfachste formveränderliche Kaleidozyklus ist in Abbildung 2 dargestellt. Er lässt sich aus einem ebenen Faltmuster herstellen, welches aus gleichschenkligen Dreiecken zusammengesetzt ist, bei denen die Grundseite gleich der Höhe ist. Durch die Faltung entlang der Linien entsteht ein dreidimensionaler Ring aus sechs Tetraedern. Durch die Rotation des Ringes durch sein Zentrum, können fünf verschiedene Formen erzeugt werden [FOW05].

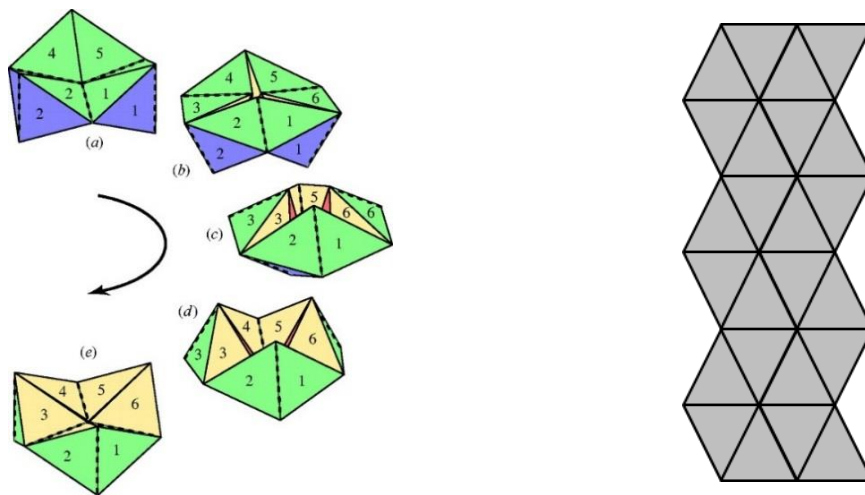


Abbildung 2: Fünf Formen des 6er Kaleidozyklus (Bild aus [FOW05]) und Faltmuster

2.1.2 Typologien von Faltungen

In Bezug auf die Steifigkeit einer Faltung gibt es vier Typologien mit denen sich Faltungsvarianten beschreiben lassen. Diese sind in Tabelle 2 mit den jeweiligen Eigenschaften dargestellt [KNI16]. Für die Formfindung von nicht gleichmäßigen, starren Faltstrukturen entwickelte Tachi [Tac1] die Software „Freeform origami“. Die Software beinhaltet den Grundsatz, dass die Freiheitsgrade einer solchen Faltkonstruktion anhand der Anzahl der Seitenkanten bestimmt werden kann. Die Funktion bleibt unabhängig davon, wie die innenliegende Faltstruktur gebildet wird, d.h. dass mehrere Faltungen mit der gleichen Anzahl von Freiheitsgraden realisiert werden können. Die folgende Gleichung nach Tachi zur Berechnung der Auflagerpunkte gilt für Falttragwerke, bei denen die Befestigungspunkte in der gleichen XY-Ebene liegen [KNI16]:

$$f = N_{E0} - 3 \quad (2.1)$$

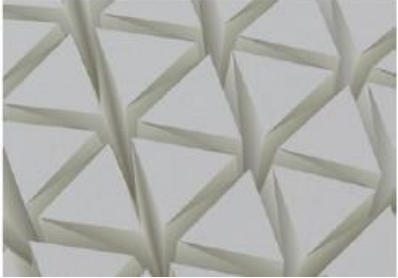
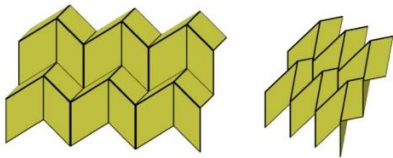
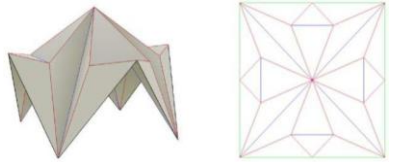
$$f + 6 \leq \text{Auflagerreaktionen (gesamt)} \quad (2.2)$$

$$\frac{N_{E0} + 3}{3} \leq \text{Anzahl der Befestigungspunkte} \quad (2.3)$$

f ... Anzahl der Freiheitsgrade

N_{E0} ... Anzahl der äußeren Kanten (Grenzkanten)

Tabelle 2: Vier Typologien zur Beschreibung von Faltungsvarianten hinsichtlich der Steifigkeit

<i>Nicht starre Faltstruktur</i> - Hohe Formvielfalt, individuelle Faltung der Oberfläche - Faltung ist unstabil	 Abbildung 3: Nicht starre Faltstruktur [Tac13]
<i>Starre und nicht starre Faltstruktur</i> - In einer Ebene starre Faltung, außerhalb der Ebene nicht starre Faltung - Begrenzte Beweglichkeit	 Abbildung 4: Starre und nicht starre Faltstruktur [ELMH15]
<i>Gleichmäßige starre Faltstruktur</i> - Realisierung durch steife Platten und Scharniere in der Falzkante - Steif in der angestrebten Faltgeometrie, bei „eingefrorenen“ Scharnieren	 Abbildung 5: Gleichmäßige starre Faltstruktur [KNI16]
<i>Nicht gleichmäßige, starre Faltstruktur</i> - Realisierung durch steife Platten und Scharniere in der Falzkante - Stabilisierung der Faltstruktur durch feste Auflagerpunkte - Klarer Mittelpunkt in der gesamten Faltstruktur	 Abbildung 6: Nicht gleichmäßige, starre Faltstruktur [KNI16]

2.2 Anwendungsbeispiele von adaptiven Faltstrukturen im Bauwesen

Adaptive Faltstrukturen ermöglichen die dynamisch Wandlung von Räumen und Zuständen von Fassadenkonstruktionen. Das Tragwerk kann so auf individuelle Bedürfnisse angepasst werden. Im Fokus steht dabei zum Beispiel die Platzersparnis oder Steuerung des Tragwerkes auf Umwelteinflüsse.

Variante 1: adaptive Fassaden



Abbildung 7: Adaptive Sonnenschutzfassade – Al Bahr Tower, Abu Dhabi [ALBA]

Ein Beispiel für die Steuerung einer adaptiven Faltfassade ist die Fassadenkonstruktion des Al Bahr Towers in Abu Dhabi (Abbildung 7). Die Sonnenschutzfassade lässt sich um das Hochhaus selbst mit dem Sonnenverlauf rotieren und zum anderen können die einzelnen Plattenelemente der Faltung geöffnet und geschlossen werden [ALBA].

Variante 2: temporäre Bauten



Abbildung 8: Messestand „Faltung³“

Der Messestand „Faltung³“ der Bauhaus-Universität Weimar (Abbildung 8) ist eine schnell auf- und abbaubare und leicht zu transportierende selbsttragende Faltkonstruktion. Diese wird im Abschnitt 2.3 näher erläutert.

2.3 Anlass und Motivation

Die „Faltung³“ [HK13] ist eine Faltkonstruktion die speziell für einen Messestand der Bauhaus-Universität Weimar entwickelt wurde. Die Konstruktion besteht aus mehreren dreieckigen Acrylglasplatten (XT WN670GT, Firma Evonik Industries AG) mit einer Dicke von 3 mm, die über eine vollflächige Verklebung miteinander verbunden sind. Die PVC-Folie (ORAGUARD 270, Firma

ORAFOL Europe GmbH, Stärke 0,15 mm) ist auf beiden Seiten der dreieckigen Platten angebracht und auf einer Seite nach der jeweiligen Faltrichtung angeschnitten. So dient die aufgebrachte Folie als Scharnier und Verbindungsmittel der Plattenelemente. Die einzelnen Dreieckplatten werden zunächst in einer Ebene zu einer Raute zusammengefügt (Abbildung 9). Die Außenkanten dieser Raute werden mit Hilfe eines Laserschnitts mit einer Verzahnung versehen, sodass beim „Aufwickeln“ dieser Faltstruktur die Plattenelemente ineinandergesteckt werden können. Damit lässt sich aus der ebenen zusammengesetzten Platte ein dreidimensionales Falttragwerk erzeugen. Vorteil ist die Platzersparnis beim Transport und die einfache Handhabbarkeit beim Auf- und Abbauen. Auf Grund des geringen Gewichtes eines Modules kann diese durch eine Person aufgestellt werden. Ein Modul dieser Säule besitzt im gefalteten Zustand eine Höhe von 75 cm. Dieses lässt sich durch weitere Faltmodule in der Höhe und Breite erweitern.

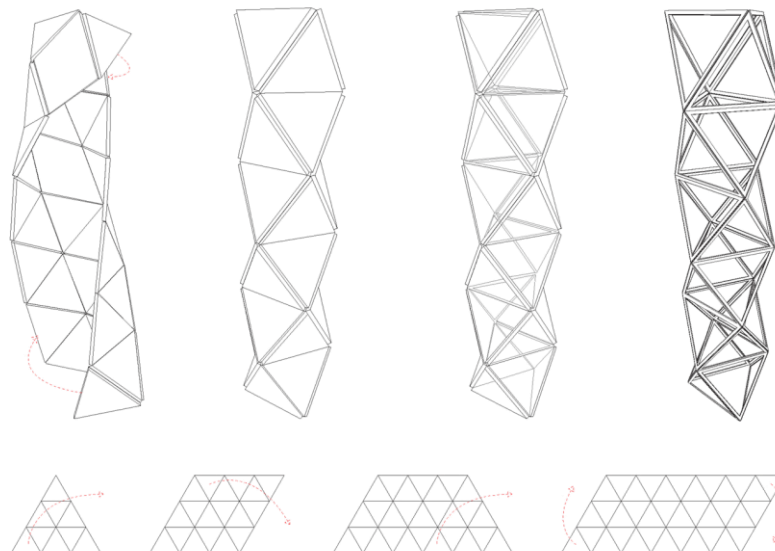


Abbildung 9: „Faltung³“ [HK13] im räumlich gefalteten und im ebenen Zustand

Problematik

Auf Grund des Eigengewichtes der übereinanderstehenden Module und der Erwärmung der Platten durch eine innenliegende Beleuchtung (Abbildung 10), kommt es unter Langzeitbelastungen zum Verlust der Tragfähigkeit. Der Schaden tritt insbesondere in den Eckpunkten der Faltungen auf, wobei sich eine Delamination zwischen den Platten und der Folie zeitabhängig einstellt.

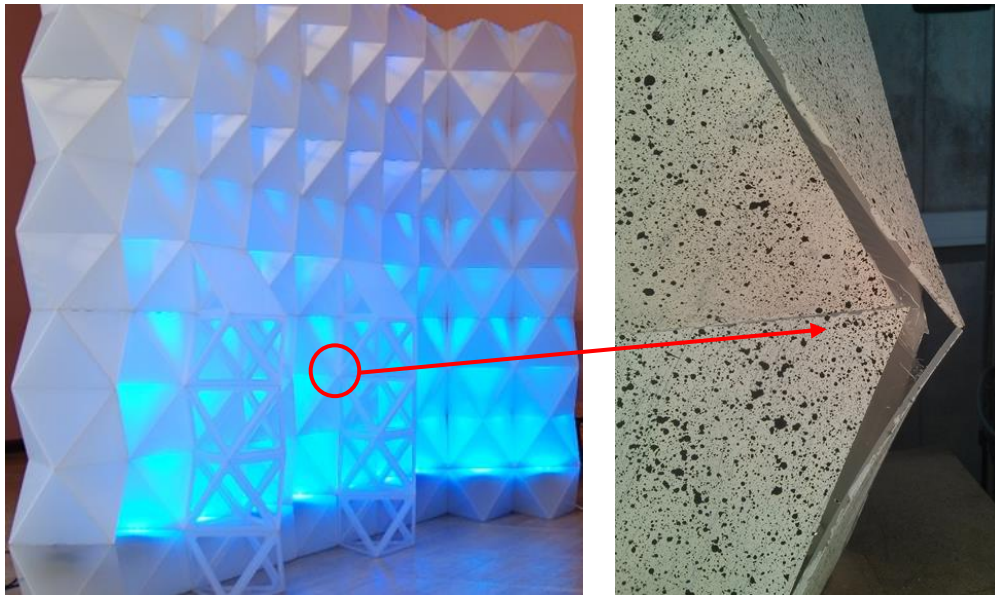


Abbildung 10: „Faltung³“, Schadensbild Delamination in den Eckpunkten

Lösungsansatz

Die Spannungsspitzen in den Eckpunkten der Faltkonstruktion sollen durch steife Gelenkpunkte überbrückt werden. Mittels der additiven Fertigung können schnell und kostengünstig individuelle Gelenkpunkte gefertigt werden, die zu der jeweiligen Belastung und Winkelstellung der Faltung passt. Die direkte Herstellung einer Detaillösung für individuelles innovatives Design eröffnet neue Möglichkeiten in der Architektur. Sowohl unter ästhetischen als auch bauphysikalisch-energetischen Aspekten können neuartige effiziente Konstruktionslösungen entwickelt werden. Einen ersten Entwurf des Gelenkknotens zeigt die Abbildung 11. An diesem sind sechs Plattenelemente aus Acrylglas befestigt.

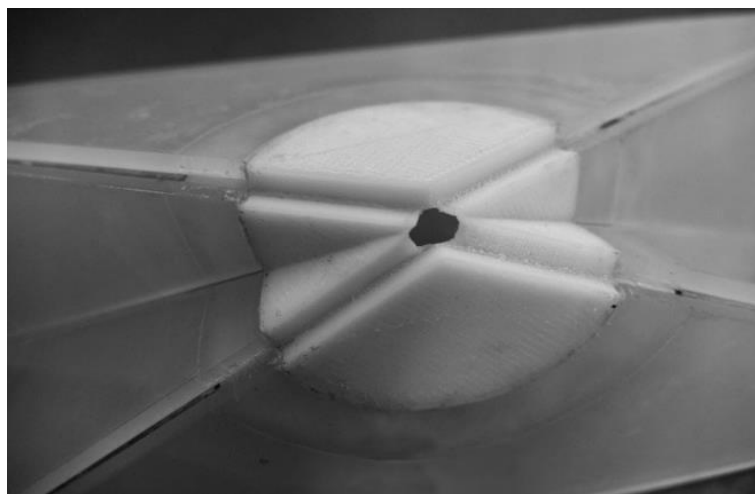


Abbildung 11: 3D-gedruckter Gelenkpunkt verbunden mit Acrylglasplatten

3 Grundlegende Betrachtungen zur Konstruktion des Gelenkpunktes

3.1 Faltmechanismus

Die Faltmöglichkeiten des additiv zu fertigenden Gelenkknotens basieren auf den gleichen Faltmöglichkeiten, die mit dem am Lehrstuhl von Prof. Ruth entwickelten Patent [DE12] zur Herstellung von faltbaren Plattenstrukturen möglich sind. Die Faltgeometrie entspricht der Yoshimura-Faltung [Yos55]. Dabei handelt es sich um einen 6-Falten-Mechanismus [Kün17]. Bei der Draufsicht auf das ebene Faltmuster kreuzen sich jeweils um 60° gedrehten Faltachsen in einem Punkt (siehe Abbildung 9), welcher der Mittelpunkt des Gelenkknotens ist. Der Gelenkknoten besitzt sechs Gelenkachsen, welche jeweils die Funktion von Drehgelenkscharnieren übernehmen. Diese sechs flexiblen Gelenkachsen verbinden die sechs steif auszuführenden Materialbereiche des Knotens. Abbildung 12 zeigt das Bild eines CAD-Modells, in dem die sechs Gelenkachsen farblich markiert wurden. Die vier Achsen 2, 3, 5 und 6 treffen sich auf der Unterseite des Knotens, beim Falten heben sich diese Achsen, der Gelenkspalt öffnet sich auf der Oberseite. Die beiden Achsen 1 und 4 treffen sich auf der Oberseite, beim Falten senken sich diese Achsen, der Gelenkspalt öffnet sich auf der Unterseite.

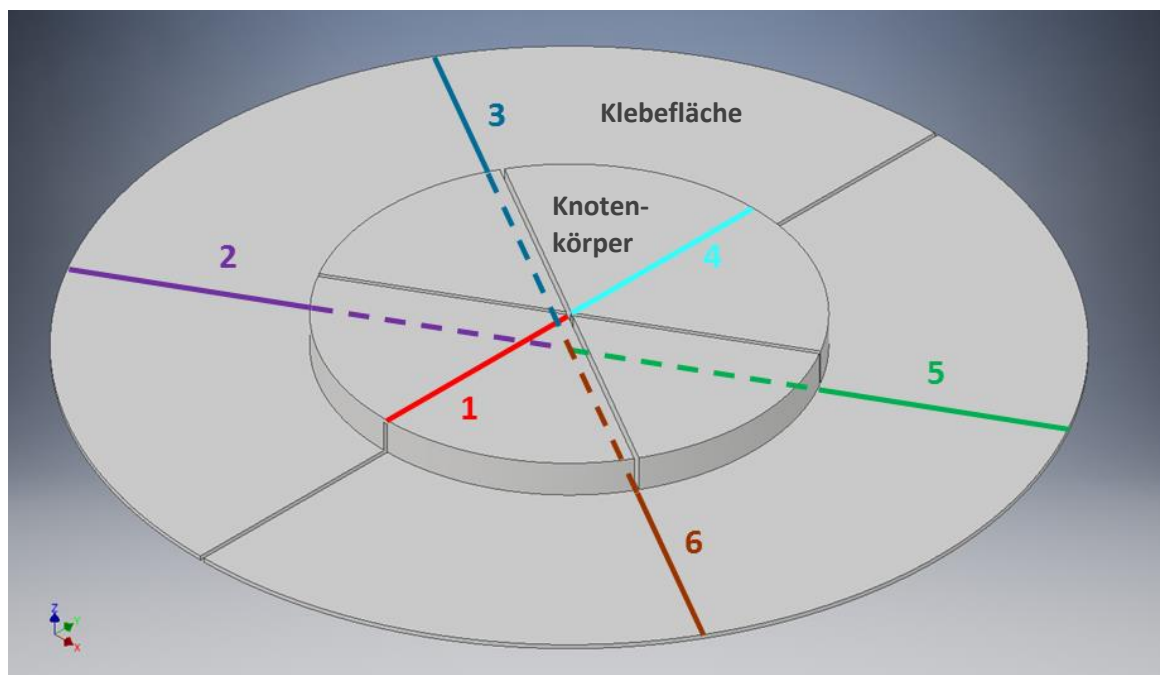


Abbildung 12: CAD-Modell eines Gelenkknotens mit Kennzeichnung der 6 Gelenkachsen. Die biegeweichen Gelenke sollen Biegewinkel von 0° (wie gedruckt) bis 180° (maximale Faltung) realisieren können. Bei räumlicher Faltung senken sich die oberen zwei Gelenkachsen 1 und 4 (Talfaltung) und heben sich die unteren vier Gelenkachsen 2, 3, 5 und 6 (Bergfaltung).

Der Knoten integriert mehrere Funktionen in einem Bauteil. Die sechs steifen tortenstückförmigen Knotenkörper sind jeweils paarweise durch biegeweiche Bereiche miteinander verbunden und jeweils um eine Klebefläche erweitert, welche der Verbindung mit jeweils einem schubsteifen

Plattenelement des Faltwerks dient. Ohne die Möglichkeiten des 3D-Druckes müsste der faltbare Gelenkknoten aufwendig aus mehreren Teilen zusammengebaut werden.

Mit Hilfe der GRÜBLERSchen Formel [Muf17] kann der theoretische Freiheitsgrad F eines räumlichen Mechanismus berechnet werden:

$$F = 6(n - 1 - g) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.1)$$

In dieser Formel bezeichnen n die Anzahl der Körper, g die Anzahl der Gelenke und f_i die Freiheitsgrade der Gelenke. Für unseren Knoten ergibt sich mit $n = 6$, $g = 6$ und $f_i = 1$ der theoretische Freiheitsgrad $F = 0$. Der Knoten dürfte theoretisch gar nicht faltbar sein. Die Auflösung dieses Widerspruchs ist simpel: Symmetrie. Im nicht gefalteten Ausgangszustand sind je zwei der sechs Gelenkachsen (1 und 4, 2 und 5, 3 und 6) koaxial und bilden drei ebene Scharniergelenke, die sich in Knotenmitte kreuzen. Sobald jedoch eine ebene Bewegung entlang einer Scharnierachse erfolgt, verlieren die anderen Gelenkachsen ihre paarweise Koaxialität, deren Drehbewegung wird blockiert. Das bedeutet, der Knoten kann nur abwechselnd entlang einer der drei Scharnierachsen mit Freiheitsgrad 1 zusammengeklappt werden. Die gewünschte räumliche Faltbewegung wird erst durch die zwei zueinander senkrechten Symmetrieebenen des Knotens möglich. Bei räumlicher Faltung verlieren alle drei paarweisen Gelenkachsen ihre Koaxialität, sodass die ebenen Gelenkbewegungen blockiert werden. Gleichzeitig wird der Gelenkknoten zum Mechanismus mit dem Freiheitsgrad 2. Die räumliche Faltbewegung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Bewegung von zwei gegenüberliegenden Flächenelementen gesteuert werden muss, um einen Zwangslauf des Mechanismus zu erreichen. Die Gelenkachsen des Knoten müssen sehr genau ausgerichtet sein, damit keine Blockierung der Faltbewegung auftritt.

Die sechs Scharniergelenke des Knotens sind als biegeeweiche Festkörpergelenke (Filmgelenk) konzipiert. Abweichungen von der mathematisch exakten Gelenkgeometrie können deshalb durch Verformung ausgeglichen werden. Die Faltbewegung geht dann allerdings einher mit einer ungewollten Verspannung des Materials. Die computergesteuerte additive Fertigung bietet hier den wesentlichen Vorteil, dass die Gelenkachsen im CAD-Modell mathematisch exakt ausrichtbar sind und somit Verspannungen vermieden werden können.

3.2 Biegeeweiche Drehgelenke

Die Gelenkpunkte für die formveränderlichen Faltwerke sollen in einem Fertigungsschritt additiv hergestellt werden. Die gelenkigen Verbindungen zwischen den steifen Materialbereichen werden dabei konstruktiv als sogenannte Filmgelenke ausgeführt. Dabei handelt es sich um dünnwandige Festkörpergelenke, die häufig aus thermoplastischen Polymerwerkstoffen hergestellt werden [Ehr04]. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls und der hohen Verformungsfähigkeit

vieler Polymerwerkstoffe, eignen sich Filmgelenke für die Realisierung großer Biegewinkel, sodass sie die Funktion eines Drehgelenkes übernehmen können [Ehr07].

Abbildung 13 zeigt zwei Prinzipskizzen des Querschnitts durch die in den Gelenkpunkt integrierten Filmgelenke mit Abmessungen für die Verbindung mit 3 mm dicken Platten. Die vier unteren Gelenkachsen aus Abbildung 12 entsprechen dem skizzierten Innengelenk, die zwei oberen Gelenkachsen aus Abbildung 12 entsprechen dem skizzierten Außengelenk.

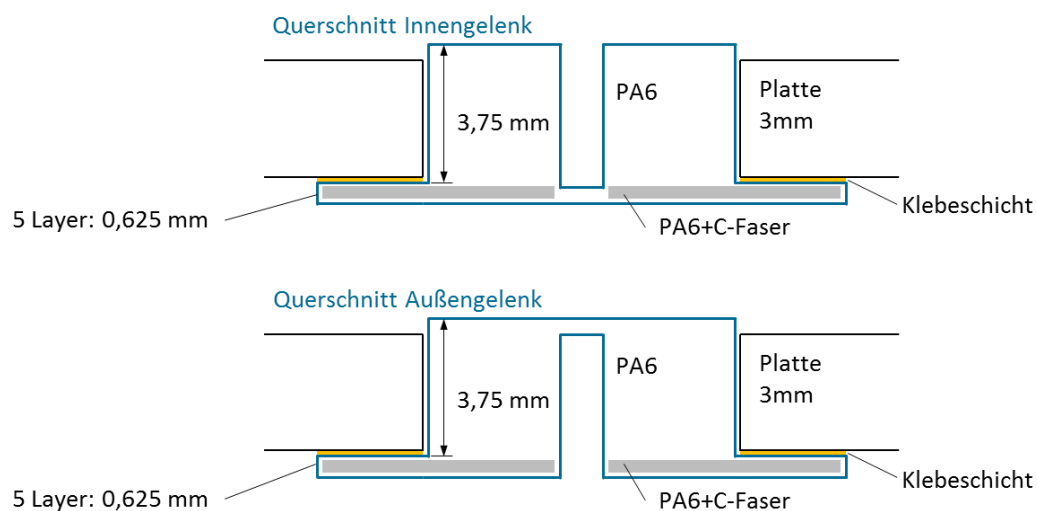


Abbildung 13: Prinzipskizzen des Querschnitts durch die Gelenkachsen des additiv zu fertigenden Knotens

Filmgelenke können mit den aus genormten Werkstoffprüfungen gewonnenen Kennwerten nicht berechnet werden, weil ein Filmgelenk jenseits der Streckgrenze betrieben wird und wesentlich höhere Dehnungen ertragen kann, als rechnerisch mit der Streckgrenze und dem Ausgangsquerschnitt ermittelt würde [Ehr04]. Jedoch ist eine einfache dehnungsbasierte Auslegung möglich, die auf geometrischen Betrachtungen zum Biegeradius basiert, siehe Abbildung 14. Die Randfaserdehnung lässt sich mit Hilfe des Krümmungsradius R , der Länge l der neutralen Faser und der Dicke h des Filmgelenks berechnen. Es gelten die Beziehungen [Ehr04, KBS07]

$$\varepsilon = \frac{h}{2 \cdot R} \quad (3.2)$$

$$l = R \cdot \beta \quad (3.3)$$

Der Biegewinkel β wird im Bogenmaß angegeben. Daraus kann die folgende einfache Berechnungsformel für die Dimensionierung eines Filmgelenkes hergeleitet werden:

$$\varepsilon = \frac{h \cdot \beta}{2 \cdot l} \leq \varepsilon_{zul} \quad (3.4)$$

Die so ermittelte maximale Dehnung im Gelenk sollte die ertragbare zulässige Dehnung ε_{zul} des Materials nicht überschreiten. Die Gültigkeit der Formel (3.4) beschränkt sich auf Filmgelenke, deren Dicke h auf einer gewissen Länge $l > h$ konstant ist und vernachlässigt den Einfluss des

Querschnittsüberganges [KBS07]. Für sehr kurze Filmgelenke und allmähliche Querschnittsübergänge sind aufwändigere Berechnungen notwendig, die mit Hilfe von FEM-Simulationen durchgeführt werden können [KBS07].

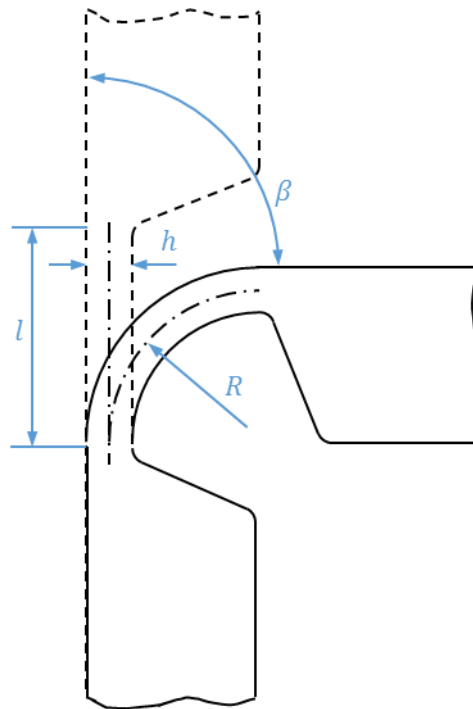


Abbildung 14: Geometrie beim Biegen eines Filmgelenks mit Parametern für die Berechnung

3.3 Faserverstärkung

Im Filmgelenk selbst wäre eine Versteifung durch Fasern nicht sinnvoll, weil dieser Bereich zur Realisierung der Faltbewegung aus einem dehnbaren biegeweichen Kunststoff gefertigt werden soll, der auch große Biegewinkel ohne Schädigung realisieren kann. Andere Materialbereiche des additiv zu fertigenden Gelenkknotens können jedoch von einer Faserverstärkung des Polymerwerkstoffes profitieren. Faserverstärkte Kunststoffe können in Richtung der Verstärkungsfasern eine ähnliche Festigkeit und Steifigkeit wie Metalle bei deutlich geringerem Gewicht erreichen. Die Materialversteifung ist im Bereich der Klebelaschen erstrebenswert, wie es Abbildung 13 zeigt. Die Klebelaschen übernehmen die Aufgabe der Verbindung des Gelenkknotens mit den schubsteifen Plattenelementen und damit auch die Aufgabe der Kraftübertragung. Die von der Klebefuge übertragbare Kraft kann durch eine Vergrößerung der Klebefläche gesteigert werden. Schälbeanspruchungen müssen dabei aber vermieden werden, weil sonst die Kraft konzentriert auf einer Linie wirkt und so die Klebefläche nicht ausgenutzt werden kann. Wenn die Klebelasche nur aus wenigen Polymerschichten additiv gefertigt wird, so verhält sich die Klebelasche wie das Filmgelenk biegeweich und kann demzufolge wie eine Klebefolie von den Plattenelementen abgelöst werden. Mit Hilfe einer gezielt eingebrachten Faserverstärkung soll die Steifigkeit der Klebelasche

erhöht und so die Schälwirkung vermieden werden. Die Voraussetzung für die Verstärkungswirkung ist der höhere Elastizitätsmodul und die höhere Festigkeit der Fasern sowie eine Orientierung der Fasern in Richtung der Hauptbelastung. Typische Verstärkungsfasern für Kunststoffe, welche diese Voraussetzung erfüllen, sind Glasfasern, Kohlenstofffasern oder Aramidfasern.

Nachfolgend werden in Tabelle 3 Grundgleichungen für die Berechnung der elastischen Eigenschaften eines unidirektionalen Faser-Kunststoffmatrix-Verbundes angegeben, die in der einschlägigen Fachliteratur zu finden sind, z.B. [Ehr06], [VDI2014]. Die Berechnung beruht auf der klassischen Laminattheorie, die elastische Kennwerte für den Faserwerkstoff (Index F) und den Matrixwerkstoff (Index M) sowie die Volumenanteile müssen bekannt sein. Die Mischungsregeln in Tabelle 3 ergeben sich aus der Verträglichkeitsbedingung, dass die Dehnung in Matrix und Faser bei Belastung in Faserrichtung identisch ist, $\varepsilon_{1,F} = \varepsilon_{1,M}$ und die übertragene Kraft in Faser und Matrix bei Belastung quer zur Faser gleich groß ist, $\sigma_{2,F} = \sigma_{2,M}$. Der Index 1 beschreibt die Richtung parallel zur Faser, der Index 2 die Richtung quer zur Faser.

Tabelle 3: Gleichungen zur Berechnung von Steifigkeit und Festigkeit eines unidirektionalen Faser-Matrix-Verbundwerkstoffes [Ehr06], [MHMS02]

$\varphi = \frac{V_F}{V_{\text{ges}}} = \frac{V_F}{V_M + V_F}$	Volumenanteil der Fasern
$\psi = \frac{m_F}{m_{\text{ges}}} = \frac{m_F}{m_M + m_F}$	Masseanteil der Fasern
$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}}$	Umrechnung von Masseanteil auf Volumenanteil
$E_1 = \varphi E_{F1} + (1 - \varphi) E_M$	Elastizitätsmodul in Faserrichtung
$E_2 = \frac{E_{F2} E_M}{\varphi E_M + (1 - \varphi) E_{F2}}$	Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung
$\nu_{12} = \varphi \nu_F + (1 - \varphi) \nu_M$	Querkontraktionszahl (Dehnung quer zur Faser) bei Beanspruchung in Faserrichtung
$G_{12} = \frac{G_F G_M}{\varphi G_M + (1 - \varphi) G_F}$	Schubmodul
$\sigma_{1,\text{max}} = \varphi \sigma_{B,F} + (1 - \varphi) \sigma_{B,M}$	Zugfestigkeit in Faserrichtung

4 Werkstoffauswahl für den 3D-Druck

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zu Faserverstärkungen in der additiven Fertigung von Kunststoffbauteilen werden im Nachfolgenden gezeigt. Die Matrix-Faser-Werkstoffe die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zum Einsatz kommen werden erläutert. Weithin wird auf die Entwurfs- und Prozessparameter eingegangen, die bei der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der gewählten Faser-Matrix-Verbunde Einfluss nehmen.

4.1 Faserverstärkungen in der additiven Fertigung

Die Integration von Fasern in additiv gefertigte Kunststoffbauteilen, wie z.B. Kohlenstoff-, Aramid- oder Glasfasern erhöhen die mechanischen Eigenschaften um ein Vielfaches gegenüber nicht verstärkten additiv hergestellten Bauteilen. Für hoch beanspruchte Bauteile ist dies ein großer Vorteil. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass mit der höheren Steifigkeit der Bauteile die Duktilität sinkt. Dadurch kann eine schnellere Materialermüdung verzeichnet werden [BASL16]. Die Faserrichtung spielt in Bezug zur Belastungsrichtung eine große Rolle. Hohe Festigkeiten und Steifigkeiten können durch eine Belastung in Faserrichtung realisiert werden. Matrix-Faser-Verbunde haben demnach faserrichtungsabhängige bzw. anisotrope Materialeigenschaften.

4.1.1 Kurzfasern

Aufgrund der geringeren Verarbeitungskomplexität von Kurzfasern werden diese üblicherweise in Matrix-Faser-Verbundbauteilen verarbeitet, um die mechanischen Eigenschaften des Verbundes zu verbessern. Die mechanischen Eigenschaften sind abhängig von der Faserlänge und von der Faserrichtung. Bei der Verarbeitung von Kurzfasern im additiven Fertigungsprozess kann es zu Faserbrüchen kommen, die zusätzlich die Festigkeiten des Bauteils beeinflussen. Sobald der Faseranteil erhöht wird, steigt die Anzahl der Faserbrüche. Dies ist begründet durch die Interaktionen zwischen den Fasern und der Kunststoffmatrix [COM14].

Schofner et al. [SLRB03] verstärkten eine ABS-Matrix mit Nano-Kohlenstofffasern. Die Verstärkung mit einem Faservolumenanteil von 10% erhöhte die Zugfestigkeit um 39% gegenüber den nicht verstärkten ABS-Kunststoffproben [vgl. SLRB03]. Teknilap et al. [COM14] untersuchten den Unterschied zwischen zwei Herstellungsprozessen, dem Fused Deposition Modeling (FDM) und dem Spritzgussverfahren. In beiden Herstellungsprozessen werden kurze Kohlenstofffasern in eine ABS-Matrix umschlossen. Die Ergebnisse zeigten eine Verkürzung der Fasern (Faserbrüche) während des FDM-Prozesses. In den FDM-Bauteilen stellt sich eine höhere Porosität gegenüber den Spritzgussbauteilen ein[COM14].

Die Problematik des Versagens des Faserverbundes mit Kurzfasern zeigt Abbildung 15. Die theoretisch erreichbare Festigkeit wird nicht nur durch Faserbruch, sondern auch durch das Herausziehen der Faser aus der Matrix begrenzt.

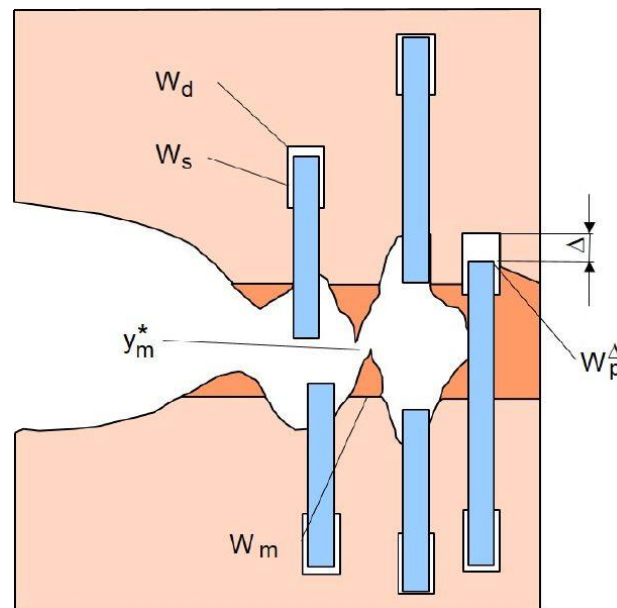


Abbildung 15: Versagensarten von Polymer-Faserverbunden bei duktilem Matrixbruch nach Lauke et. al. [LSP89]. Energiedissipation durch Debonding (W_d), Gleiten (W_s), plastische Deformation der Matrixbrücken (W_m). Pull-Out ($W_p \Delta$) und Matrixbruch. Bildquelle: wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Datei:Bruchmodell1.jpg (Version vom 14. Aug. 2017).

4.1.2 Endlosfasern

Bei der Verstärkung einer Kunststoffmatrix mit Endlosfasern sind zwei verschiedene Verfahren möglich. Ein Verfahren beschreibt die Zufuhr einer „trockenen“ Faser in den Extruder, zusammen mit dem Kunststofffilament [BASL16, Mat16, TLYWL16, PV12]. Hierbei erfolgt die Verbundherstellung im Herstellungsprozess. Ein weiteres Verfahren sieht die Verwendung von bereits faserverstärkten Filamenten vor [PV12].

Verbund während des Druckprozesses

Matsuzaki et al. [Mat16] optimieren den kommerziellen 3D-Drucker „Blade-1“ für den Druck von „trockenen“ Kohlenstofffasern in einer Polylactide (PLA) Matrix. Parallel wird der 3D-Drucker „FlashForge“ für den Druck von Juteendlosfasern modifiziert. Das Schema der beiden Herstellungsprozessoptimierungen ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit mit der Einbettung der Kohlenstofffaser um rund 450% gegenüber reiner PLA Matrixprobe steigt. Die PLA-Matrix im Verbund mit einer Jutefaser weist eine 150% höhere Zugfestigkeit auf (vgl. [Mat16]).

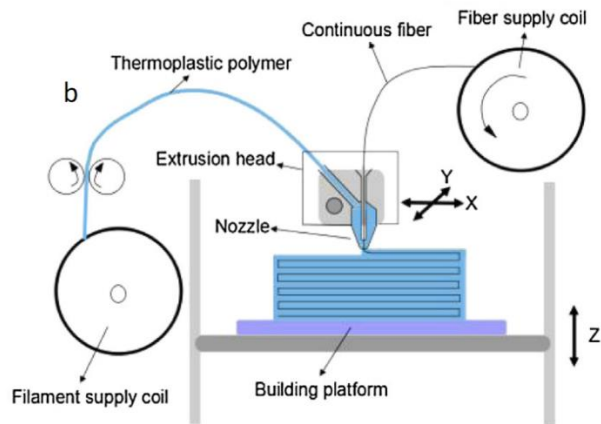


Abbildung 16: Schema – Verbundherstellung vor dem Druckprozess [TLYWL16]

Tian et al. [TLYWL16] untersuchten die Einflüsse der Fertigungsprozessparameter auf die Beschaffenheit von Kohlenstofffaser-PLA-Matrix Bauteilen. Dabei werden nachstehende Prozessparameter untersucht:

- Schmelztemperatur
- Schichtstärke
- Abstand zwischen den Strängen
- Vorschubgeschwindigkeit des Kunststofffilaments und der Druckgeschwindigkeit

Die Temperatur des Extruders nimmt einen hohen Einfluss auf die Verbundwirkung der Kohlenstofffaser mit der PLA-Matrix ein. Eine Temperatur von 240°C im Extruder verbessert die Einbindung der Faser in die Matrix und somit die mechanischen Eigenschaften. Die Oberflächenqualität verringert sich, da die niedrige Schmelzviskosität zu übermäßigem Austritt der PLA-Schmelze führt. Eine höhere Schichtstärke vermindert die Biegefestigkeit. Zudem bedeuten höhere Schichtdicken gleichzeitig eine gröber abgestufte Oberflächenkontur und führen somit zu einer verschlechterten Bauteilhaptik. Ein reduzierter Abstand zwischen den Strängen minimiert die Biegefestigkeit. Zum Beispiel wird eine Biegefestigkeit von 335 MPa bei einem Strangabstand von 0,4 mm und eine Biegefestigkeit von 130 MPa bei einem Abstand von 1,8 mm erreicht (vgl. [TLYWL16]). Weiterhin lässt sich die Biegefestigkeit durch eine schnellere Vorschubgeschwindigkeit bei konstanter Druckgeschwindigkeit erhöhen, da die Verdichtung des Matrixwerkstoffes im Druckkopf steigt [TLYWL16].

Verbund vor dem Druckprozess

Bei der Verbundherstellung vor dem Druckprozess handelt es sich um mit Harz imprägnierte Fasern (Rovings). Die Bezeichnung Roving steht für Strang bzw. Multifilamentgarn [PV12].

Die mit Harz vorimprägnierte Faser ist auch als TowPreg- bzw. PrePreg-Technologie bekannt. Die Verbundherstellung vor dem Druckprozess weist folgende Vorteile auf [Com17]:

- Zeitersparnis während des Druckprozesses
- Gleichmäßiger Verbund durch gleichmäßige und beständige Imprägnierung
- Hohe Genauigkeit und gleichbleibende Qualität

Diese Technologie verwendet die Firma Markforged in dem 3D-Drucker Namens „Mark Two“.

4.2 Verwendetes 3D-Drucksystem „Mark Two“

Der in diesem Forschungsvorhaben verwendete 3D Drucker „Mark Two“ (vgl. Abbildung 17) der Firma Markforged funktioniert mittels zweier parallel geschalteter Verfahren [Mar1, Mar2]. Das FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication) ist zuständig für die Verarbeitung des Matrixwerkstoffes und das CFF-Verfahren (Continuous Filament Fabrication) für den Faserwerkstoff. Der Druckkopf besteht somit aus zwei Extrudern, einen für den Matrixwerkstoff und einen für die Endlosfasern. Diese sind nebeneinander im Druckkopf angeordnet. Die Endlosfaserfilamente sind bereits mit Polyamid 6 imprägniert und werden mit einer Temperatur von 230°C – 255°C im Druckkopf erhitzt. Nach dem kontinuierlichen Verlegen der Faser in einer Schicht wird diese am Extruder automatisch abgeschnitten. Der Matrixwerkstoff Polyamid 6 wird im Extruder auf eine Temperatur von 275°C erhitzt. Im Bauraum bewegt sich der Druckkopf in X- und Y- Richtung. Zudem positioniert sich eine mit Kunstharz beschichtete Bauplattform in Z- Richtung. Der Bauraum hat eine Größe von 320 x 154 132 mm. Der Matrixwerkstoff mit dem dieser Hersteller arbeitet ist Polyamid 6 (PA6). Dieser kann mit Endlosfasern aus Kohlenstoff, Aramid oder Glas verstärkt werden. Um etwas in das Bauteil einbringen zu können (wie z.B. Schraubengewinde), kann der Herstellungsprozess unterbrochen werden [Mar2]. CAD-Dateien werden im STL-Format (Stereolithographie-Dateiformat) in die vom Browser Google Chrome unterstützte Software „Eiger“ eingelesen. Dort werden die Entwurfs- und Prozessparameter für das Druckbauteil gewählt.



Abbildung 17: 3D-Drucker „Mark Two“ von Markforged [Mar2]

4.2.1 Entwurf- und Prozessparameter

Durch die Ausrichtung bzw. Lage des Bauteils im Bauraum lässt sich die Strangausrichtung des Matrixwerkstoffes beeinflussen. Für die Konstruktion eines additiv gefertigten Leichtbaubauteils können drei unterschiedliche Füllstrukturen mit einem prozentualen Füllstrukturgehalt gewählt werden (Abbildung 18).

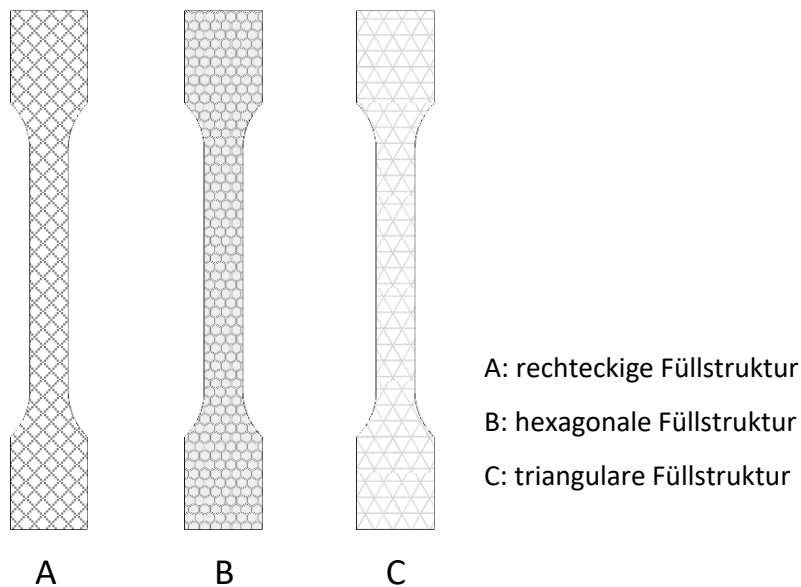


Abbildung 18: mögliche Füllstrukturen Mark Two

Die Füllstruktur wird mit mindestens einer Deckschicht oben („Roof Layer“) und unten („Floor Layer“), vgl. Abbildung 19 links, sowie mit mindestens einem umlaufenden Strang („Wall Layer“, vgl. Abbildung 19 rechts) eingeschlossen. Die Schichthöhe kann zwischen 0,1 mm; 0,125 mm und 0,2 mm für die Fertigung des reinen Matrixwerkstoffes gewählt werden. Für die Verarbeitung der Kohlenstofffaser ist eine Schichthöhe von 0,125 mm vorgegeben und für die der Glas- und Aramidfaser eine Schichthöhe von 0,1 mm.

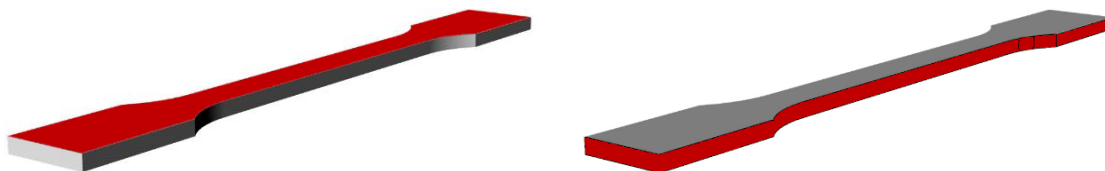


Abbildung 19: Kennzeichnung der Deckschicht (links) und der Mantelschicht (rechts)

Der prozentuale Faseranteil pro Schicht ist in der Software „Eiger“ definierbar. Die einzelnen Schichten können entweder isotrop (mit verschiedenen Winkeleinstellungen pro Schicht) oder konzentrisch mit einer Faser verstärkt werden. Die Abbildung 20 stellt die unterschiedlichen möglichen Faserführungen in einer Zugprobegeometrie dar.

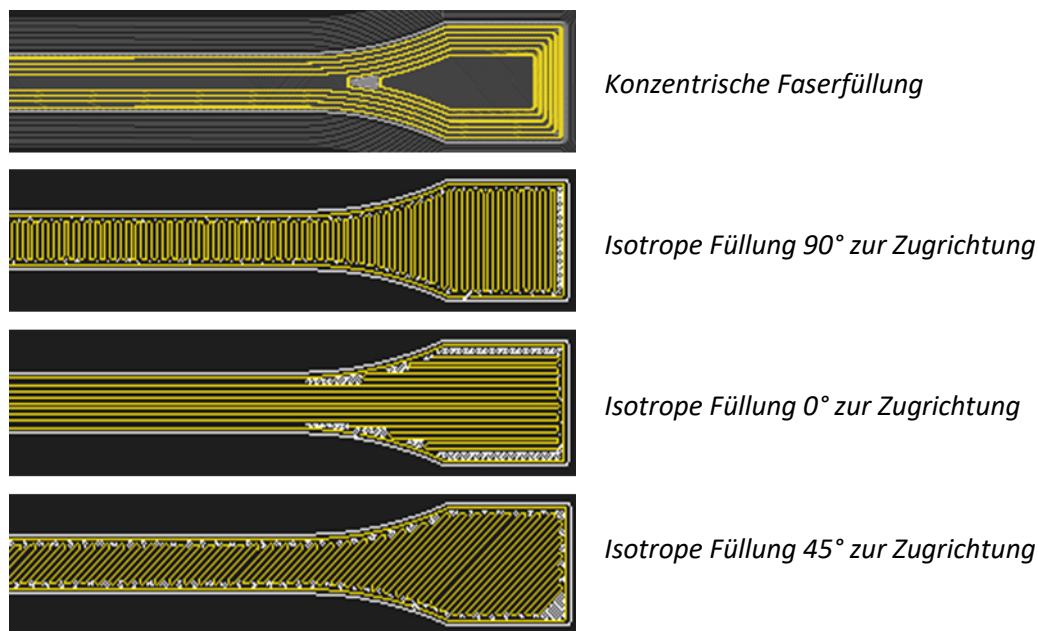


Abbildung 20: Faserorientierung in der Zugprobe

4.2.2 Matrixwerkstoff Polyamid PA6

Der 3D-Drucker „Mark Two“ verwendet als Matrixwerkstoff den teilkristallinen thermoplastischen Kunststoff Polyamid 6 (PA6). Polyamide werden aufgrund der guten Verschleiß- und Dämpfungseigenschaften sowie der hohen Schlagzähigkeit und Kältebeständigkeit bis -40°C häufig im Maschinenbau und in der Feinwerktechnik eingesetzt. Die mechanischen Eigenschaften sind abhängig von der Temperatur und der Geschwindigkeit sowie Höhe der einwirkenden Belastung. Polyamid ist hygroskopisch und neigt daher zur Einlagerung von Wassermolekülen. Diese diffundieren überwiegend in die weniger dicht gepackten amorphen Bereiche und führen neben der Gewichts- auch zu einer Volumenzunahme. Die Feuchtigkeitsaufnahme ist mit einer Quellung verbunden. Die prozentuale Längenänderung ergibt sich ungefähr als $\frac{1}{4}$ der prozentualen Gewichtsänderung [Ehr07]. Steigt der Kristallisationsgrad, verringert sich die Wasseraufnahme des Kunststoffes. Durch die Wasseraufnahme sinkt die Glasübergangstemperatur und die mechanischen Eigenschaften verändern sich, die Festigkeit und Steifigkeit nimmt ab, die Bruchdehnung nimmt zu [Ehr07]. Für die Beschreibung des Wassergehaltes gibt es drei Konditionierungszustände – trocken, luftfeucht und nass. Für trockenes PA 6 liegt die Glasübergangstemperatur bei 78°C , nach einer Wasseraufnahme von 3 % (luftfeucht) nur noch bei 28°C . Polyamide sind bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur spröde und fest [Ehr11].

4.2.3 Verstärkungsfasern

Faserwerkstoff: Kohlenstoff

Die Kohlenstofffaser bietet gegenüber der Aramid- und Glasfaser das beste Festigkeits-Gewichtsverhältnis. Herstellungsbedingt können die Festigkeitswerte der Kohlenstofffaser schwanken, da die Vorspannung sowie die Temperatur während der Carbonisierungsbehandlung und der Graphitisierungsglühung Einfluss auf die Reinheit der Fasern haben. Aufgrund des negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten lässt sich die gesamte Wärmeausdehnung eines Matrix-Faser-Bauteils reduzieren oder gleich Null setzen. Weiterhin ist die Kohlenstofffaser elektrisch und thermisch leitend sowie korrosionsbeständig. Das progressive Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Kohlenstofffaser zeigt, dass bei zunehmender Belastung der E-Modul steigt. Gleichzeitig verhält sich die Materialfestigkeit sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient senkrecht zur Faser differenziert zu der longitudinalen Ausrichtung der Faser [Fib18, Mar2, Ehr11].

Faserwerkstoff: Aramidfaser

Die Aramidfaser (aromatisiertes Polyamid) ist flexibel, hat eine hohe Abriebfestigkeit und gegenüber der Kohlenstoff- und Glasfaser das geringste Gewicht [Ehr11]. Durch Wasserstoffbrückenbindungen sind die Moleküle miteinander verbunden. In den starren Hauptketten sorgen Ringe für hohe Steifigkeit. Das Material verhält sich anisotrop, das bedeutet, dass der E-Modul senkrecht zur Faserrichtung erheblich geringer ist als in Faserrichtung. Die Druckfestigkeit ist wesentlich geringer als die Zugfestigkeit [Ehr11].

Faserwerkstoff: Glasfaser

Die Glasfaser ist der am meisten vorkommende Fasertyp bei Faser-Matrix-Verbunden. Sie weist gute mechanische und chemische Eigenschaften auf und profitiert vom vergleichsweise preisgünstigsten Material. Aufgrund ihrer amorphen Struktur sind Glasfasern im Gegensatz zur Kohlenstoff- und Aramidfasern isotrop. Die Glasfaser ist feuerfest. [Ehr11]

Die folgende Tabelle listet die mechanischen Kenndaten aus dem Datenblatt des 3D-Druckgeräteherstellers auf.

Tabelle 4: Mechanische Kennwerte vom PA6 und Verstärkungsfasern (Auszug Datenblatt vom 11.10.16) [Mar2]

	PA 6	Kohlenstofffaser	Aramidfaser	Glasfaser
Zugfestigkeit (MPa)	31	700	610	590
E-Modul (GPa)	0,94	54	26	20
Bruchdehnung (%)	260	1,5	5,5	5,5
Biegefestigkeit (MPa)	32	470	190	210

4.2.4 Software „Eiger“

Mit der Software „Eiger“ 3D-Druckerherstellers Markforged erfolgt die Aufbereitung des CAD-Modells für den Druckprozess. Nach dem Einlesen des CAD-Modells als STL-Datei erfolgt das Slicen in mehrere Layer, die Definition von Füllgrad und Strangausrichtung der Kunststofffaser, das Hinzufügen von Verstärkungsfasern und die Positionierung und Orientierung des Bauteiles im Druckraum [Mar1]. Der Druckjob kann direkt aus Eiger heraus gestartet werden, wenn der 3D-Drucker „Mark Two“ mit dem Internet verbunden ist, alternativ kann die Druckjobdatei auf einem USB-Stick gespeichert und direkt über die USB-Schnittstelle eines 3D-Druckers eingelesen werden. Die Temperatur- und Geschwindigkeitseinstellungen für den Druckkopf werden von der Software nach Vorgaben des Herstellers berechnet, der Eingriff des Nutzers ist nicht möglich. Die CAD-Modelle in Form der STL-Dateien und die Druckjobs werden in der Cloud gespeichert, sodass jederzeit von einem beliebigen Ort mit Internetzugang auf die personalisierten Druckdateien zugegriffen werden kann. Über eine Versionshistorie können auch alte Versionen eines Druckjobs wiederhergestellt werden.

4.2.5 Materialkosten für den faserverstärkten 3D-Druck

Es werden die reinen Materialkosten für die faserverstärkte additive Fertigung mit dem verwendeten Drucksystem „Mark Two“ der Firma Markforged aufgelistet. Zusätzlich fallen Kosten für die Rüstzeit und Energiekosten an. Die Materialkosten berechnen sich aus dem Einkaufspreis der Spule mit dem Kunststofffilament und den Spulen mit den Faserfilamenten. Daraus werden die in Tabelle 5 angegebenen Materialkosten in € je Kubikzentimeter gedrucktes Volumen berechnet.

Tabelle 5: Aufstellung der Materialkosten für den faserverstärkten 3D-Druck mit dem Gerät „Mark Two“

Material	Preis pro Spule (€)	Volumen pro Spule (cm ³)	Materialkosten (€/cm ³)
PA6	199,90	800	0,25
Kohlefaser	176,91	50	3,54
Aramidfaser	110	50	2,20
Glasfaser	82,5	50	1,65
HTGlasfaser	110	50	2,2

5 Experimentelle Charakterisierung des 3D-gedruckten Werkstoffes

Das mit dem 3D-Drucker „Mark Two“ hergestellte Material wurde mit verschiedenen mechanischen Experimenten an genormten und bauteilnahen Proben sowie mit mikroskopischen Analysen charakterisiert. Die Untersuchungen dienen dem Ziel, das mechanische Verhalten bei verschiedenartigen Belastungen (Zug, Druck, Biegung) zu charakterisieren und daraus Daten für die Bauteilauslegung und die numerische Simulation zu gewinnen, denn die im Datenblatt von Markforged aufgeführten technischen Kennwerte (Tabelle 4) sind dafür nicht ausreichend. Sowohl Proben aus dem reinen Matrixmaterial PA 6 als auch der Verbund aus PA 6 mit verschiedenen Verstärkungsfasern wurde untersucht.

Der grundlegende Versuch zur Materialcharakterisierung ist der einachsige statische Zugversuch (DIN EN ISO 527), dessen Ergebnisse werden hier am ausführlichsten beschrieben. Aufgrund des sehr komplexen zeitabhängigen Materialverhaltens des verwendeten Kunststoffes PA 6 ist der Zugversuch jedoch nicht ausreichend, um das Materialverhalten zu charakterisieren, weshalb weitere mechanische Experimente durchgeführt und ausgewertet wurden:

- Biegeversuche (DIN EN ISO 178)
- Kriechversuche mit Zugproben (DIN EN ISO 899-1)
- Zugversuche mit zyklisch schwellender Belastung ($R=0,1$)
- Druckversuche (DIN EN ISO 604)
- Scherzugversuche mit Doppelscherzugprobe
- Bauteilnahe Zugversuche mit Filmgelenkproben
- Ermüdungsversuche an Gelenkpunkten aus Faser-Matrix-Material

Auf die bauteilnahen Experimente mit Filmgelenkproben und Gelenkpunkten wird im Kapitel 6 eingegangen. Die Druckversuche und Scherzugversuche sind im Anhang beschrieben.

Den mechanischen Experimenten vorausgehend wurden mikroskopische Analysen zur Untersuchung der 3D-Druckqualität durchgeführt. Außerdem wurde die Wasseraufnahme der 3D-gedruckten Teile unmittelbar nach dem Druck gemessen.

5.1 Mikroskopische Analyse Matrixwerkstoff

Der Schichtaufbau des extrudierten Matrixwerkstoffs PA6 wurde mit Hilfe eines Stereomikroskops („ZEISS SteREO, Discovery.V8“) untersucht. Für die untersuchte Materialprobe wurde eine Schichtdicke von 0,1 mm eingestellt, welche anhand der mikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 21) verifiziert werden konnte. Abbildung 22 zeigt zwei Schichten des gedruckten Matrixwerkstoffes bei einer rechteckigen, hundertprozentigen Füllstruktur. Die

übereinanderliegenden Stränge kreuzen sich bei dieser Einstellung im Winkel von 90°. In der mikroskopischen Aufnahme lässt sich erkennen, dass ein Strang ca. 0,4 mm breit ist.

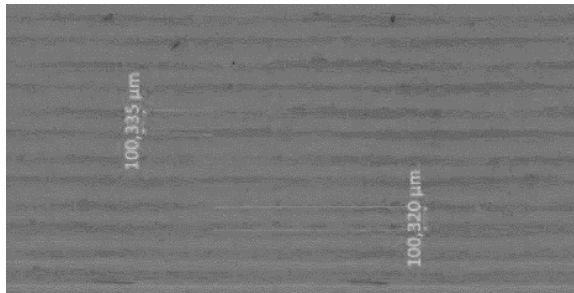


Abbildung 21: Seitenansicht mit Stranghöhe des Matrixwerkstoff PA6

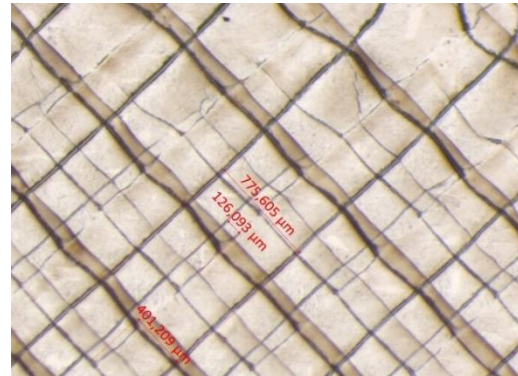


Abbildung 22: Draufsicht auf 2 übereinanderliegende Schichten mit Strangbreite bei Füllgrad 100%

5.2 Wasseraufnahme der 3D-gedruckten Teile

Das Kunststofffilament aus PA6 wird von Markforged im trockenen Zustand geliefert. Die Filamentspule wird in einer Trockenbox gelagert und nimmt Luftfeuchtigkeit erst mit Beginn des Druckvorganges auf. Diese Maßnahme ist notwendig, damit das PA6-Filament beim Erhitzen und Extrudieren durch die Druckdüse keine Gasblasen bildet, was die Druckqualität verschlechtern würde. Das bedeutet, sobald das extrudierte Kunststofffilament abkühlt beginnt die Wasseraufnahme. Diese kann durch die Masseänderung des gedruckten Bauteils gemessen werden. Mit Hilfe einer sehr empfindlichen Feinwaage wurde die Masseänderung von Probestreifen unmittelbar nach dem Druck gemessen. Zwischen Fertigstellung des Druckjobs und Beginn der Messung lagen 16 Minuten. Innerhalb der ersten Stunde betrug die Masseänderung 0,13 %, vgl. Abbildung 23. Die Extrapolation auf 48 h ergibt eine Masseänderung von 3,2%, was dem gesättigten luftfeuchten Zustand entspricht.

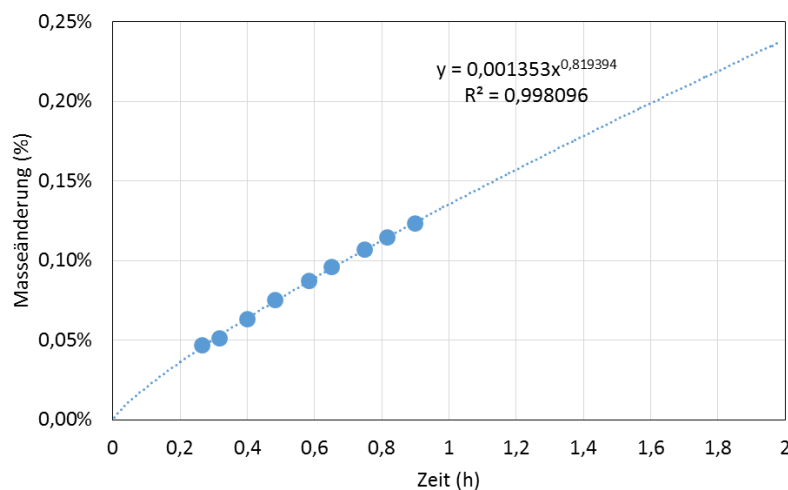


Abbildung 23: Masseänderung von C-faserverstärkten 3D-gedruckten Proben aus Polyamid durch Wasseraufnahme

5.3 Mechanisches Verhalten von PA 6 im Zugversuch

Zugversuche wurde an Proben aus PA 6 mit 100%iger Füllung für unterschiedliche mäanderförmige Strangausrichtungen durchgeführt. In zwei übereinanderliegenden Schichten sind die extrudierten Stränge im Winkel von 90° gekreuzt. Der Einfluss der Strangorientierung in Relation zur Zugrichtung wurde untersucht. Durch Drehen der Zugprobe im Druckraum um jeweils 15° wurden vier unterschiedliche Strangorientierungen erzeugt, siehe Abbildung 24.

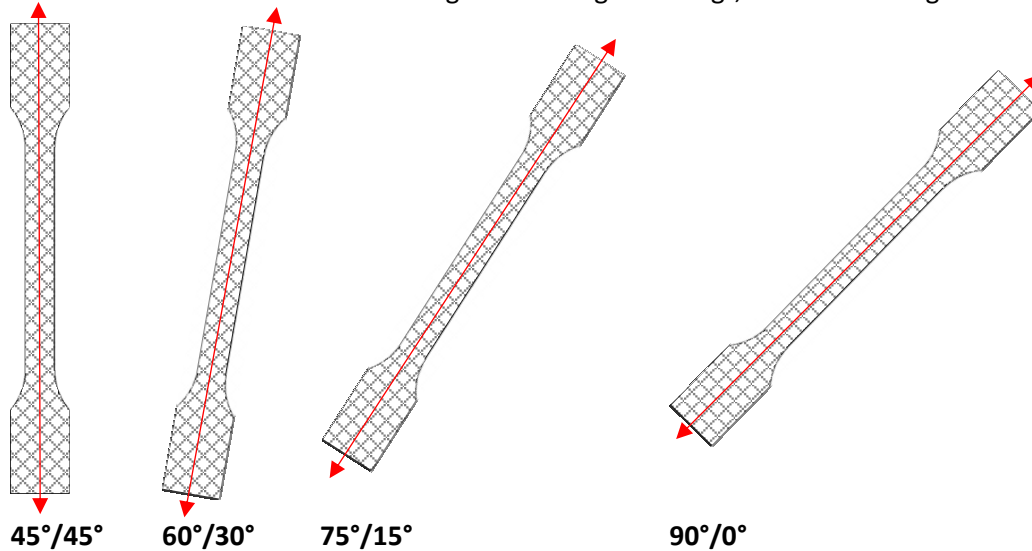


Abbildung 24: Darstellung der unterschiedlichen Strangorientierung des Matrixwerkstoffes PA6

5.3.1 Probengeometrie

Die Zugprobengeometrie wird nach der Richtlinie der ASTM D 638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) Type I hergestellt. Die einzelnen Fertigungsparameter der Zugstäbe zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Entwurfs- und Prozessparameter Zugproben aus PA6

Ausrichtung XY-Richtung	0°, 15°, 30°, 45°
Schichtanzahl	30
Schichtstärke	0,1 mm
Gesamtvolumen	6,61 cm ³
Umrandungskontur	1
Fertigungszeit pro Probe	1:10 h

5.3.2 Versuchsdurchführung

Die Zugproben werden nach der Fertigung für 10 Tage bei Raumtemperatur gelagert um einen Gleichgewichtszustand der Wassereinlagerung zu erreichen. Alle Proben werden in der Universalprüfmaschine „inspekt retrofit 20kN“ der Technischen Universität Ilmenau gezogen. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Traversengeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt.

5.3.3 Versuchsergebnisse

In den Abbildung 25 bis 28 sind die technischen Spannungs-Dehnungsverläufe des Matrixwerkstoffes PA6 zu den unterschiedlichen Strangausrichtungen dargestellt. Der Mittelwert aus fünf Proben zur jeweiligen Strangausrichtung und deren Streubereich (grau markiert) werden gezeigt. Das Ende des linearelastischen Anstiegs liegt bei den jeweiligen Strangausrichtungen zwischen 20 und 25 MPa.

Die Abbildung 29 zeigt eine Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungsverläufe für unterschiedliche Strangausrichtung zur Zugrichtung, die aus jeweils fünf Zugversuchsproben gemittelt wurden. Der aus dem Zugversuch ermittelte Elastizitätsmodul ist in Abbildung 30 dargestellt.

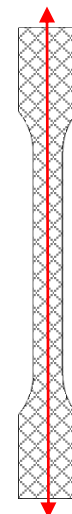
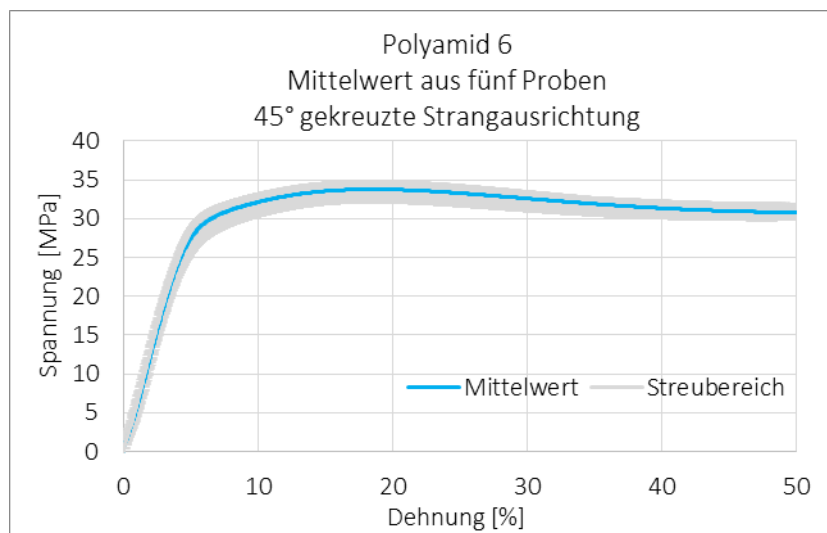


Abbildung 25: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 45°/45°

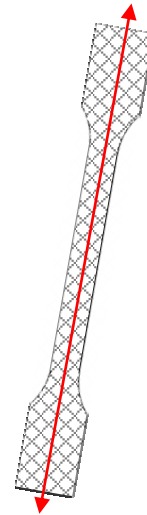
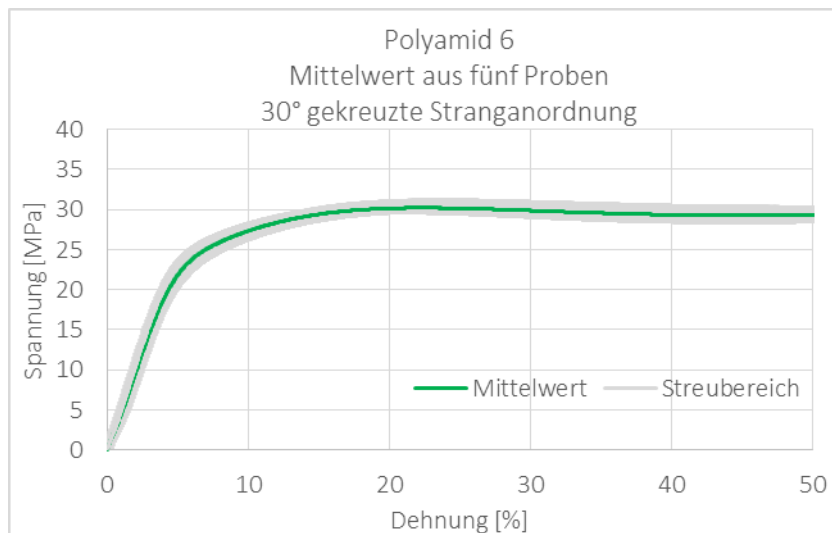


Abbildung 26: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 30°/60°

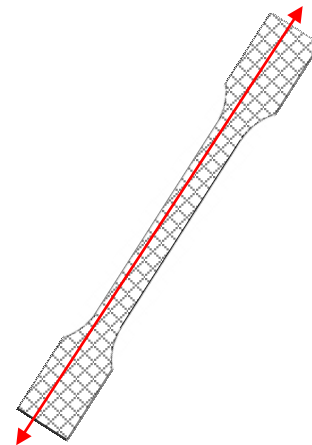
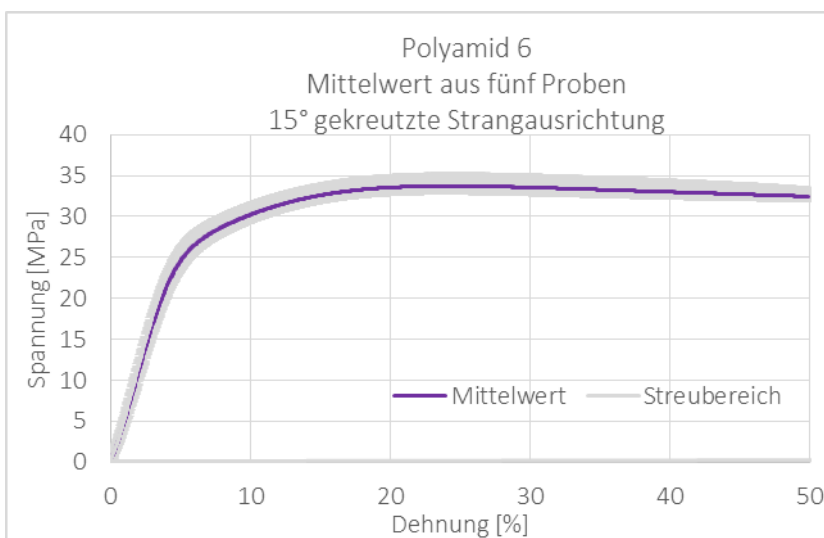


Abbildung 27: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 15°/75°

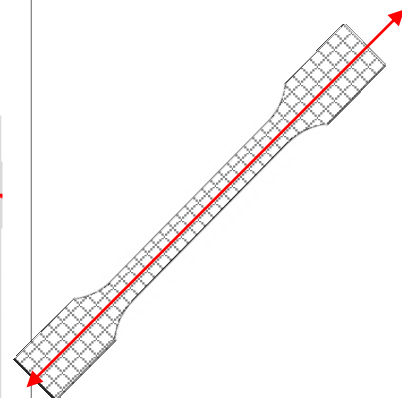
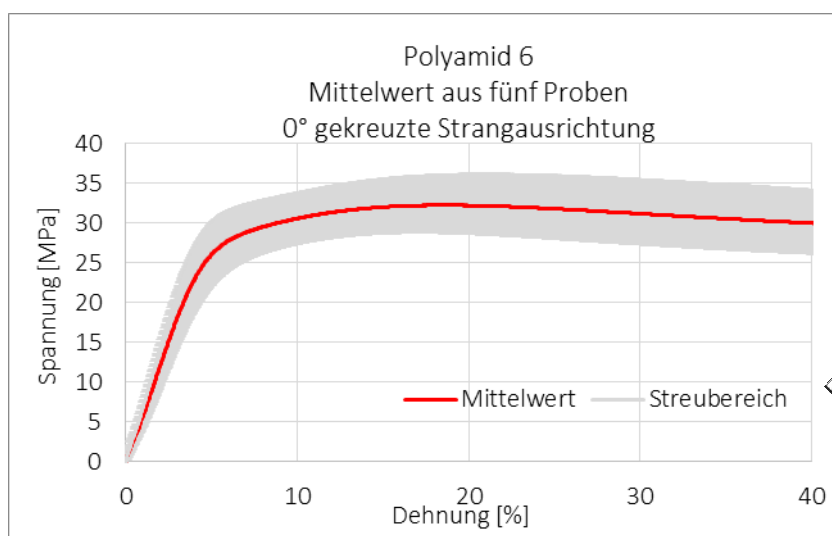


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 0°/90°

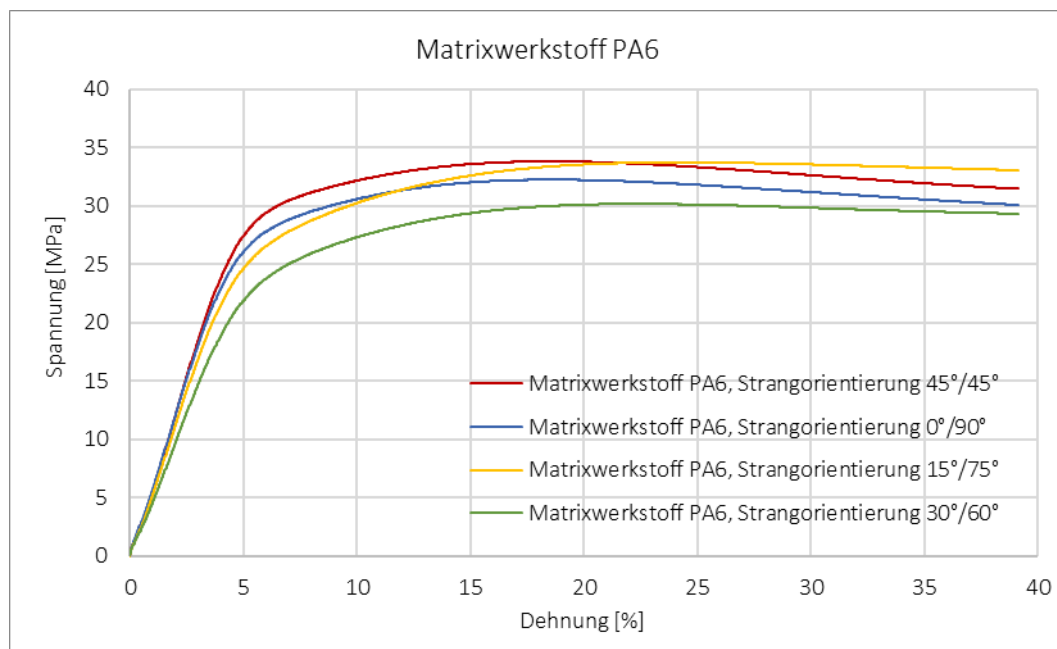


Abbildung 29: Spannungs-Dehnungs-Verlauf für Matrixwerkstoff PA6 mit unterschiedlichen Strangorientierungen

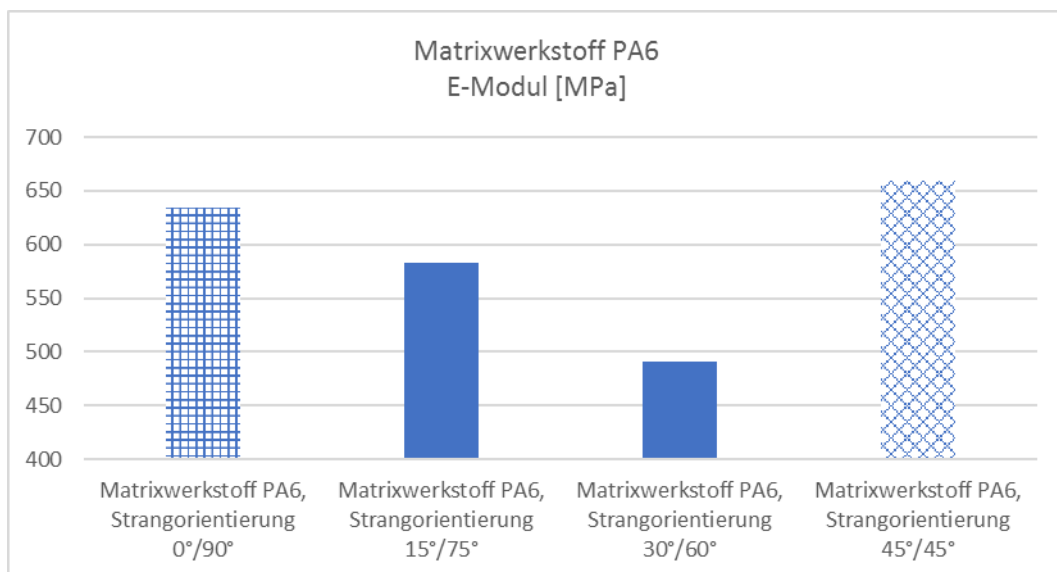


Abbildung 30: E-Modul Matrixwerkstoff Polyamid PA6

5.3.4 Versagensmodi

Bei allen Proben kann ein Mischbruch identifiziert werden, d.h. eine Kombination aus einem Einschnür- bzw. Trennbruch zwischen den Strängen. Die Brüche zeigen, dass sich das Versagen der Zugproben zwischen den Strängen mit dem größten Winkel zur Zugrichtung einstellt.

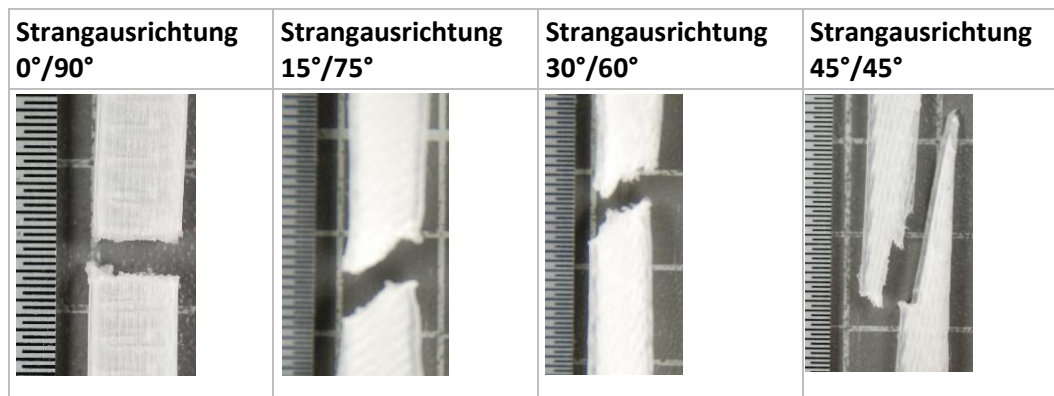


Abbildung 31: Bruchbild Zugprobe (PA 6) - unterschiedliche Strangorientierung

5.4 Biegeversuche mit Matrixwerkstoff PA 6

Für die Validierung der Materialmodelle in der FE-Simulation wurden Biegeversuche durchgeführt. Die Materialmodelle des Matrixwerkstoffes PA 6 basieren in der FE-Simulation auf den Versuchsdaten der Zugversuche. Der mit diesen Materialdaten simulierte Biegeversuch wird in Abschnitt 8.4.2 mit den Messergebnissen an realen mechanischen Biegeversuchen aus diesem Abschnitt verglichen.

5.4.1 Entwurfs- und Prozessparameter

Tabelle 7: Entwurfs- und Prozessparameter für Biegeproben, reiner Matrixwerkstoff, verschiedene Strangorientierung

Probenbezeichnung	BP45 1-5	BP90 1-5	BP15 1-5	BP30 1-5
Strangausrichtung zur Zugrichtung	45°/45°	0°/90°	15°/75°	30°/60°
XY-Ausrichtung im Bauraum	0°	0°	0°	0°
Schichtanzahl	40	40	40	40
Schichtstärke	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamtvolumen	3,37 cm ³	3,37 cm ³	3,37 cm ³	3,37 cm ³
Umrandungskontur	2	2	2	2
Fertigungszeit pro Probe	40 min	40 min	40 min	40 min

5.4.2 Versuchsdurchführung

Die Biegeprüfung ist nach DIN EN ISO 178 „Bestimmung der Biegeeigenschaften“ durchgeführt worden. Dafür sind Proben mit einer Rechteckgeometrie von 80 x 10 x 4 mm³ additiv hergestellt worden. Die Proben wurden nach der Herstellung für 10 Tage bei Raumtemperatur gelagert. Die Biegeprüfung wurde an der Universalprüfmaschine „inspekt retrofit 1455 (20kN)“ durchgeführt. Dabei wurde die Probe mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min belastet. Abbildung 32 zeigt den Versuchsaufbau, Abbildung 33 die beschrifteten Proben.

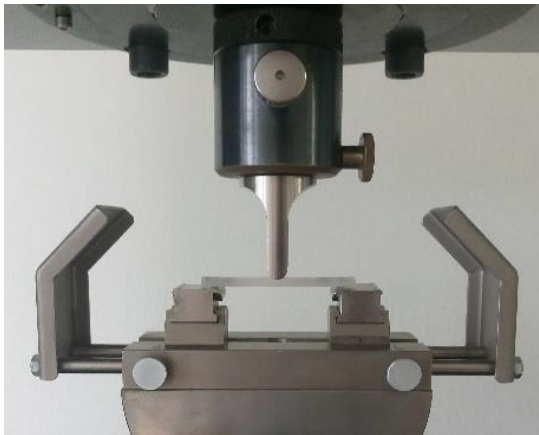


Abbildung 32: Versuchsaufbau Biegeprüfung

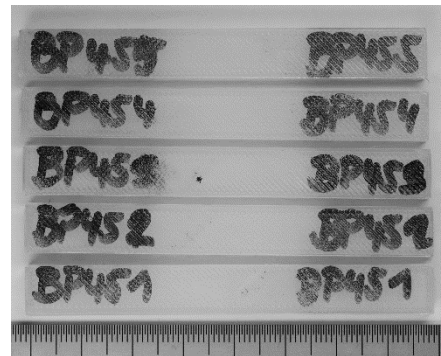


Abbildung 33: Proben Matrixwerkstoff Biegeprüfung

5.4.3 Versuchsergebnisse

Das Diagramm in Abbildung 34 zeigt die Biegespannung des reinen Matrixwerkstoff PA6. Wie in der mechanischen Zugfestigkeitsprüfung sind hier vier unterschiedliche Strangausrichtungen getestet und gegenübergestellt worden. Die Strangorientierung 45°/45° zeigt die höchste Biegefestigkeit.

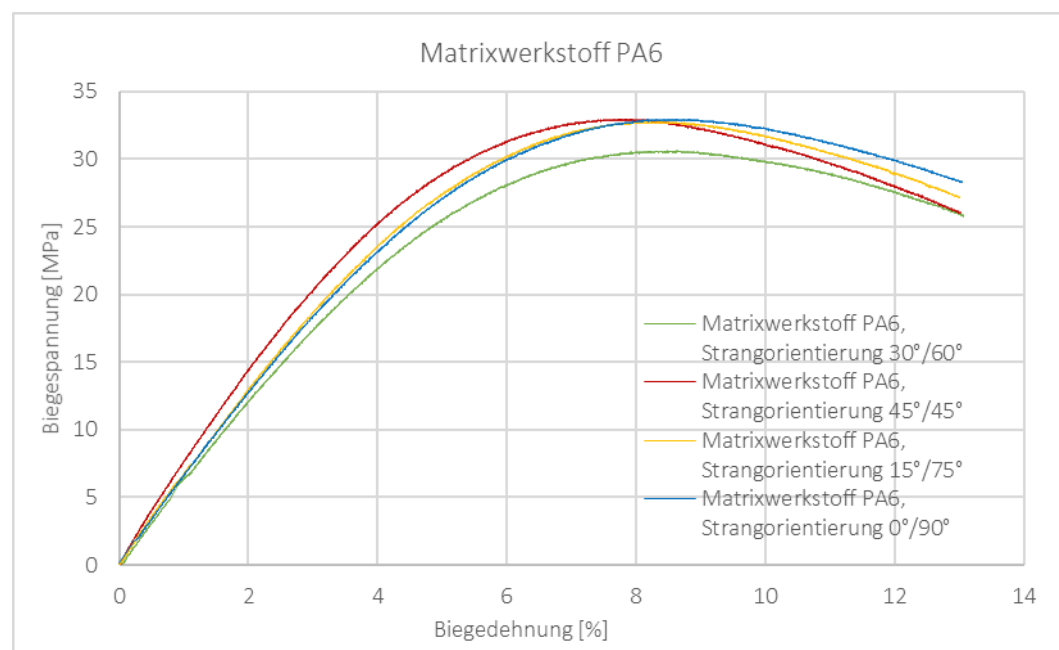


Abbildung 34: Biegespannung, Matrixwerkstoff (PA6), unterschiedliche Strangorientierungen

5.4.4 Zusammenfassung Materialkennwerte Matrixwerkstoff PA6

Die Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse des Matrixwerkstoffes mit unterschiedlichen Strangausrichtungen und die Werte aus dem Datenblatt für das PA6 der Firma Markforged, mit dem die Proben hergestellt wurden. Aus der Gegenüberstellung lässt sich erkennen, dass die Werte des E-Moduls der unterschiedlichen Strangorientierungen zu 30 – 40 % unter dem

angegeben Wert des Datenblattes liegen. Für dieses Phänomen wird folgende Erklärung angenommen: Die Werte des Datenblattes der Firma Markforged zeigt die mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes Polyamid 6 unabhängig von den Einflussfaktoren bzw. Störfaktoren die sich durch den Prozess der additiven Fertigung ergeben. Weiterhin fehlen im Datenblatt Angaben zu Lagerungsbedingungen und Lagerungszeiten der Proben. Unterschiedliche Lagerungsbedingungen und Raumtemperaturen können die mechanischen Eigenschaften des hygroskopischen Polyamids beeinflussen.

Tabelle 8: Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte Matrixwerkstoff PA6

	Kennwerte Datenblatt Markforged	Strangaus- richtung 45°/45°	Strangaus- richtung 0°/90°	Strangaus- richtung 15°/75°	Strangaus- richtung 30°/60°
Zugfestigkeit (MPa)	32	34 ± 2	32 ± 7	34 ± 2,5	30 ± 2
E-Modul (MPa)	940	658,8	634,5	582,6	491,2
Biegefestigkeit (MPa)	32	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2	30,5 ± 2
Biegemodul (MPa)	840	903	650	670	690
Poisson-Zahl	k.A.	0,29 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,35 ± 0,02

5.5 Mechanisches Verhalten des Verbundes aus PA 6 und Verstärkungsfasern

5.5.1 Zugversuche

Für die Herstellung der faserverstärkten Zugproben wurden Platten additiv hergestellt, aus denen die Knochengeometrie der Zugprobe ausgeschnitten worden ist. Hierfür ist eine Platte mit drei und eine Platte für zwei Zugproben erstellt worden.

Aufgrund der höchsten Zugfestigkeit des Matrixwerkstoffes mit der Strangorientierung 45°/45° wurde diese Stranganordnung für alle Zugproben mit einem Faserwerkstoff gewählt. Die Entwurfs- und Prozessparameter sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Entwurfs- und Prozessparameter für faserverstärkte-Zugproben

Fasertyp	Kohlenstoff	Aramid	Glas
Ausrichtung XY-Richtung im Bauraum	0°, 90°	0°, 90°	0°, 90°
Schichtanzahl	20	25	25
Schichtstärke	0,125 mm	0,1 mm	0,1 mm
Schichtanzahl Faser insgesamt	2	2	2
Probenhöhe	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm

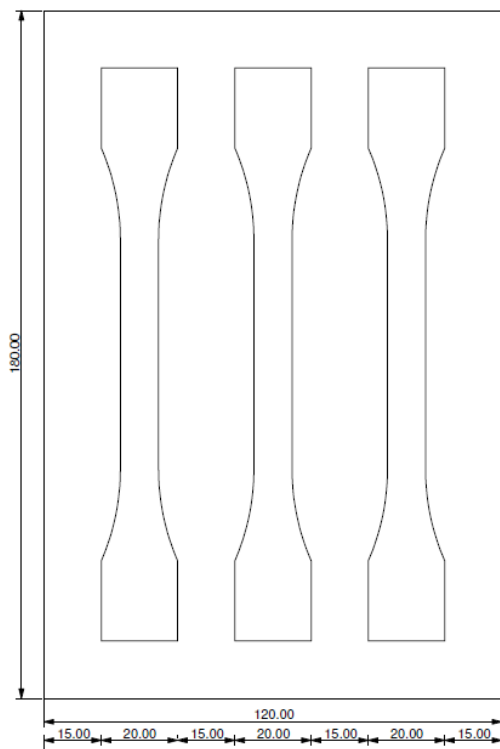


Abbildung 35: Entwurf – Platte für Zugproben



Abbildung 36: additiv hergestellte Platte für Zugproben
mit Aramidfaserverstärkung

5.5.2 Versuchsdurchführung

Die Zugproben wurden nach der Fertigung für min. 10 Tage gelagert. Alle Proben sind in der Zugmaschine „inspekt retrofit 20kN“ der Technischen Universität Ilmenau geprüft worden. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 10 mm/min. Die Zugproben mit der Kohlenstoff- und mit der Glasfaser sind mit der 5-Achs-Simultanfräsmaschine „Spinner U-620“ aus den additiv hergestellten Platten geschnitten worden. Die Proben mit der Aramidfaser wurde aufgrund hoher Beschädigungen in der Fräsmaschine extern wasserstrahlgeschnitten.

5.5.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in den Abbildungen 37 bis 47 dargestellt. Nur wenn die Verstärkungsfaser in Zugrichtung ausgerichtet ist, wird die gewünschte Verbesserung der Steifigkeit und Festigkeit erreicht. Bei Faserausrichtung orthogonal zur Zugrichtung schwächt dies den Querschnitt und die Festigkeit ist sogar etwas geringer als beim reinen Matrixwerkstoff. Bei allen drei Faserverbundmaterialien ist ein anfänglicher nichtlinearer Anstieg im Spannungs-Dehnungs-Verlauf des Zugversuchs zu erkennen. Die Ursache ist in der Einspannung der Probe mit Spannbacken der Zugprüfmaschine zu finden. Die Spannbacken greifen in die äußere Matrixschicht aus PA6 ein, dort treten zunächst Setzungserscheinungen in Form von Schubverzerrungen ein, bevor eine

gleichmäßige elastische Kraftübertragung über die Randschicht erfolgt und die volle Steifigkeit der Faser zum Tragen kommt. Dies ist schematisch in Abbildung 46 dargestellt.

PA 6 verstärkt mit Kohlenstofffaser

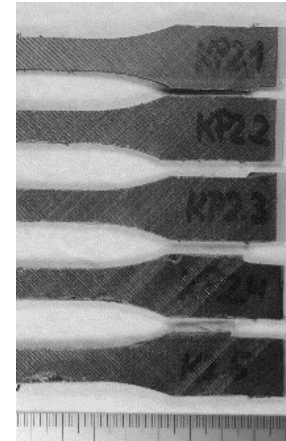
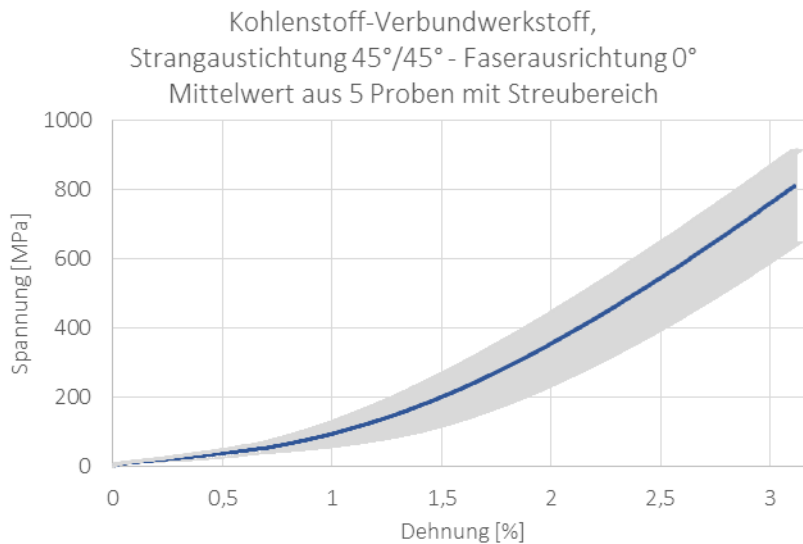


Abbildung 37: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser, Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung

Abbildung 38: Zugproben, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser 0°

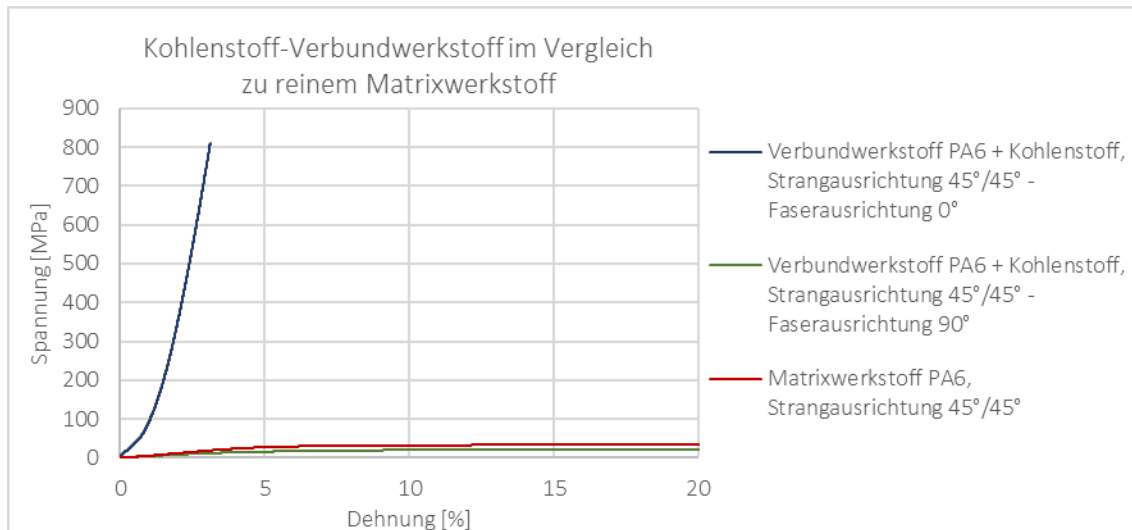


Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung

PA 6 verstärkt mit Aramidfaser

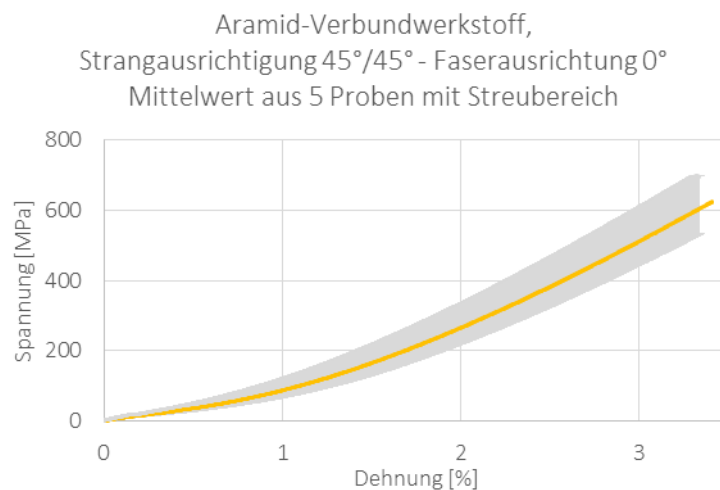


Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Aramidfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung



Abbildung 41: Zugproben, Matrix PA 6 mit Aramidfaser

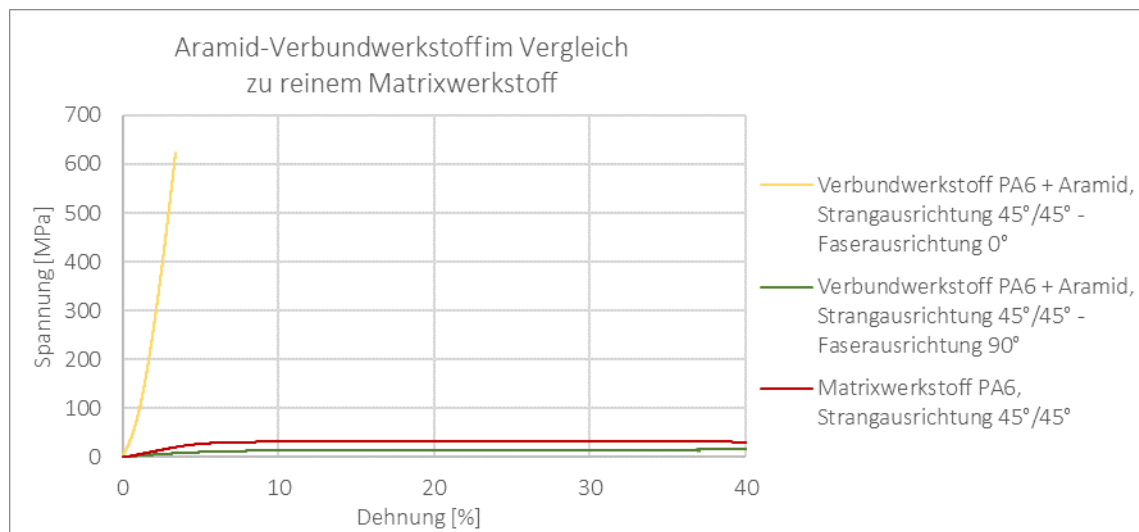


Abbildung 42: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Aramidfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung

PA 6 verstärkt mit Glasfaser

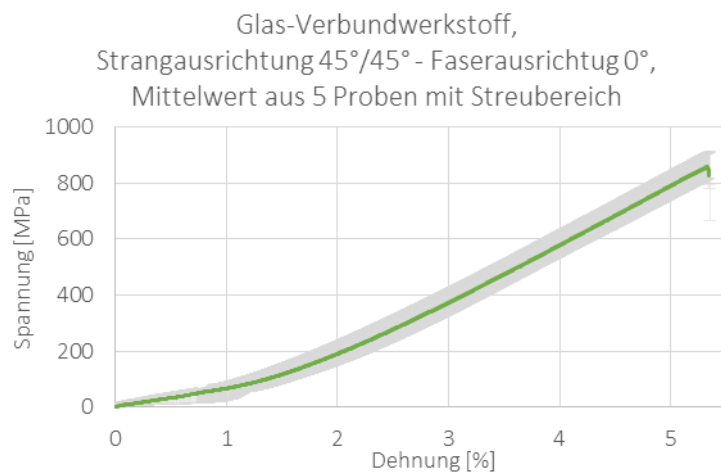


Abbildung 43: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Glasfaser, Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung

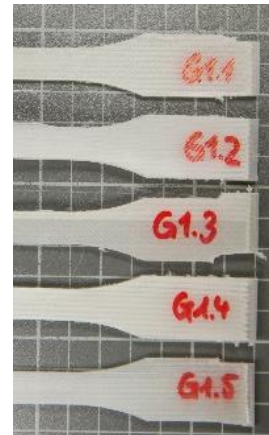


Abbildung 44: Zugproben, Matrix PA 6 mit Glasfaser

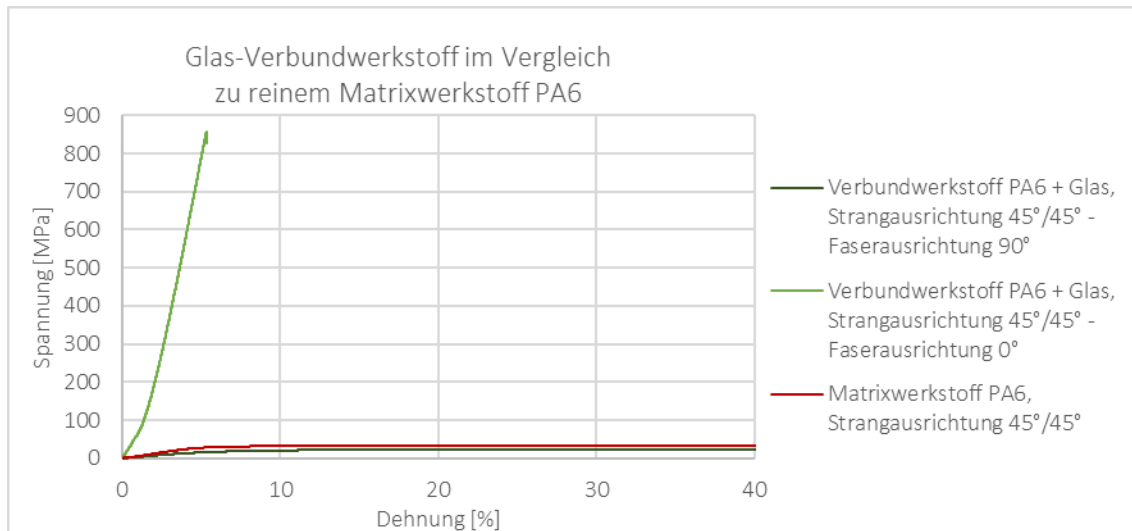


Abbildung 45: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Glasfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung

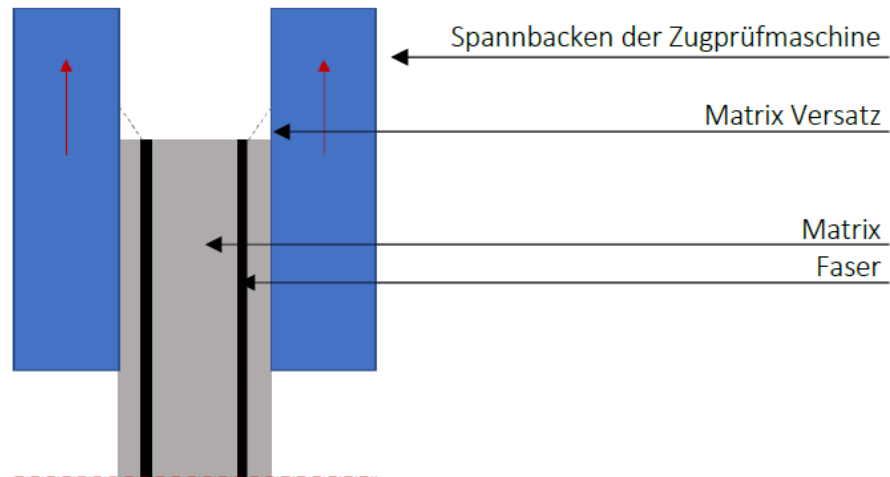


Abbildung 46: Schema nichtlineares Verhalten faserverstärkte Zugproben

Gegenüberstellung der drei Fasertypen Kohlenstoff, Aramid und Glas

In der Abbildung 47 sind die drei Spannungs-Dehnungs-Verläufe der drei Faserwerkstoffe Kohlenstoff, Aramid und Glas gegenübergestellt. In Abbildung 48 sind die E-Moduln der unterschiedlichen Fasertypen aus der mechanischen Prüfung den E-Modul-Werten aus dem Datenblatt der Firma „Markforged“ dargestellt. Tabelle 10 gibt die jeweiligen Zahlenwerte aus dem Versuch im Vergleich zum Datenblatt an. Die Steifigkeitswerte im Versuch sind geringfügig geringer, die Festigkeitswerte geringfügig höher als im Datenblatt.

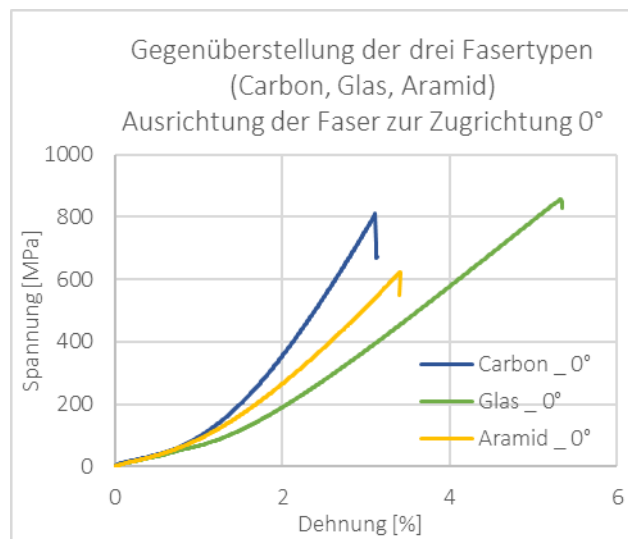


Abbildung 47: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, drei Fasertypen (Kohlenstoff, Aramid, Glas), Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung

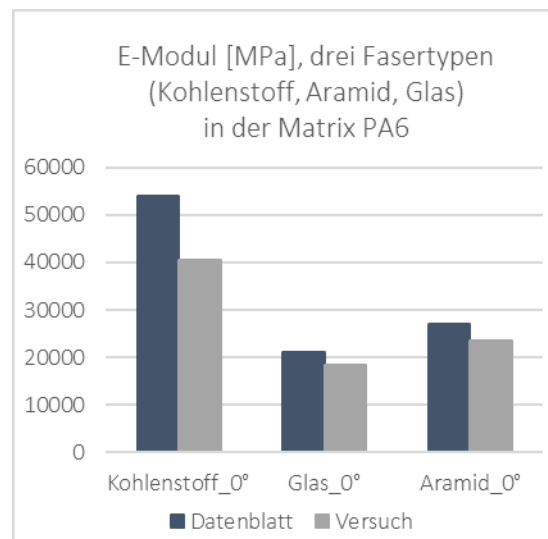


Abbildung 48: E-Modul, drei Fasertypen (Kohlenstoff, Aramid, Glas), Vergleich der Datenblattwerte mit den Versuchswerten

Tabelle 10: Mechanische Eigenschaften der Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoff	PA 6 und Carbonfaser		PA 6 und Aramidfaser		PA 6 und Glasfaser	
	Versuch	Datenblatt	Versuch	Datenblatt	Versuch	Datenblatt
Zugfestigkeit (MPa)	810	700	620	610	850	590
E-Modul (GPa)	40,5	54	23,5	27	18,2	21

5.5.4 Versagensmodi

Die folgenden mikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 49 bis Abbildung 57) der Verbundzugproben mit Belastung in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung zeigen die Versagensmodi. Die Bruchbilder bei der Zugbelastung in Zugrichtung zeigten bei allen drei Fasertypen, dass die Faser zuerst versagt und der Matrixanteil gedehnt wurde (ohne Risse). Eine Zugbelastung quer zur Faserrichtung löst eine Delamination der Faserschichten von der Kernmatrixschicht aus. Dabei verhalten sich die zwei Faserschichten im Verbund gegensätzlich. Die erst gedruckte Faserschicht (die untere Faserschicht) ist auf der rechten Seite der Abbildungstabelle dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die obere Kohlenstofffaserschicht sich kräuselt und nach außen biegt. Die untere Faserschicht bleibt gerade. Auch bei der Aramid- und Glasfaser ist bei der oberen Faserschicht eine Kräuselung festzustellen.

Bruchbilder PA6 verstärkt mit Kohlefaser



Abbildung 49: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

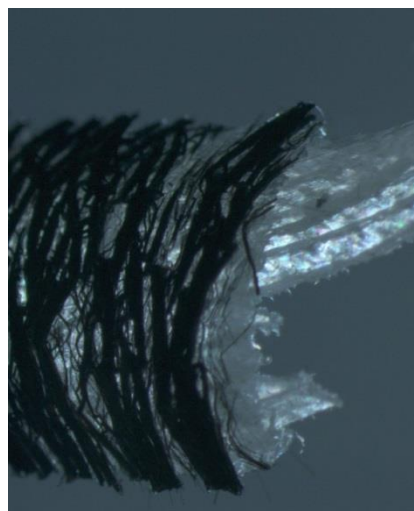


Abbildung 50: Faserrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

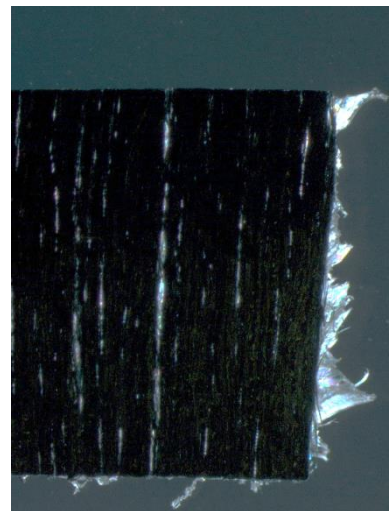


Abbildung 51: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht

Bruchbilder PA 6 verstärkt mit Aramidfaser

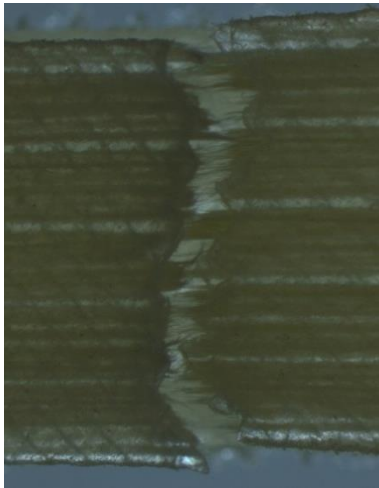


Abbildung 52: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

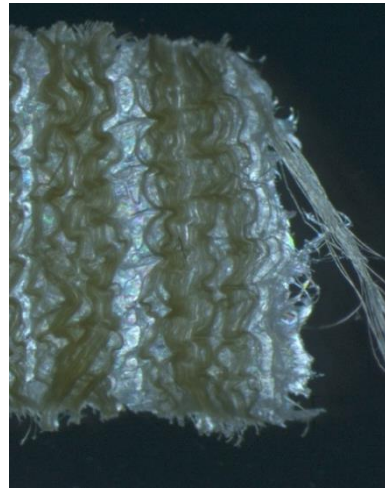


Abbildung 53: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

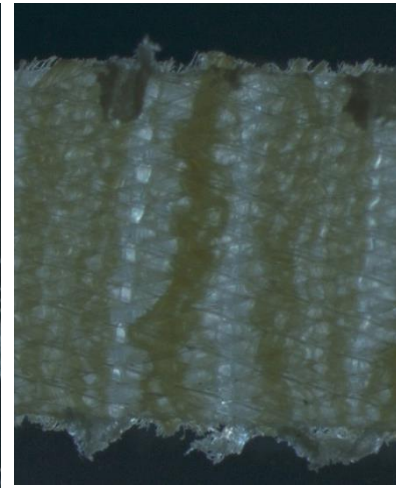


Abbildung 54: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht

Bruchbilder PA 6 verstärkt mit Glasfaser

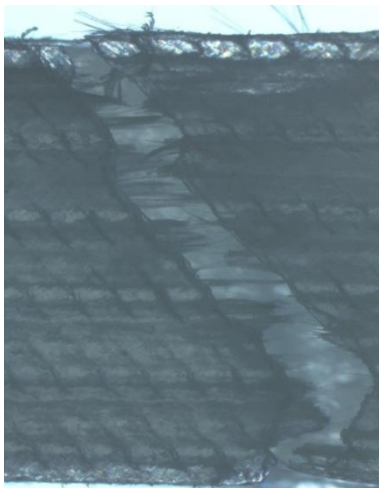


Abbildung 55: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

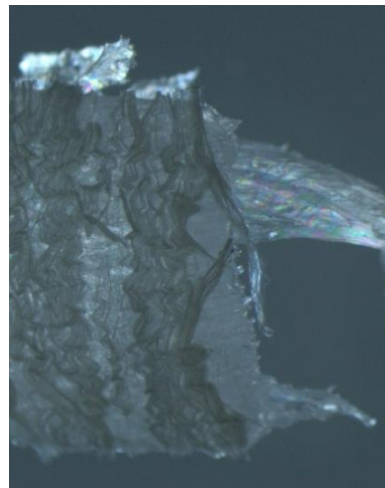


Abbildung 56: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht

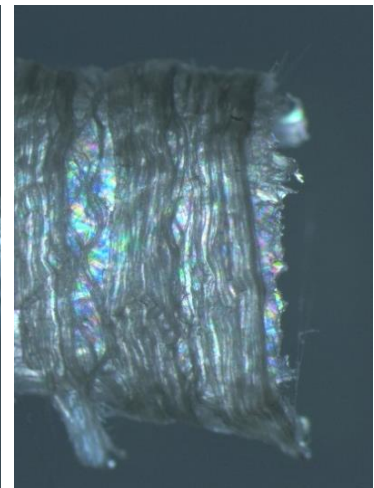


Abbildung 57: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht

5.5.5 Biegeversuch Verbundwerkstoff

Die Entwurfs und Prozessparameter für die additive Fertigung der faserverstärkten Biegeproben sind in Tabelle 11 angegeben. Für die Bestimmung der Biegeeigenschaften der Verbundwerkstoffe sind fünf Proben je Faserwerkstoff mit dem Matrixwerkstoff PA 6 und einer Strangorientierung 45°/45° gedruckt worden. Die Verstärkungsfasern sind in Richtung der Biegezugbelastung ausgerichtet. Die Proben sind mindestens 10 Tagen gelagert worden. Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie bei den Versuchen zur Bestimmung der Biegeeigenschaft des Matrixwerkstoffes PA6 (Abschnitt 5.4). Die Belastung erfolgte mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min.

Tabelle 11: Entwurfs- und Prozessparameter für faserverstärkte Biegeproben

Probenbezeichnung	BPC 1-5	BPA 1-5	BPG 1-5
Strangausrichtung zur Zugrichtung	45°/45°	45°/45°	45°/45°
Ausrichtung im Bauraum	0°	0°	0°
Schichtanzahl	32	40	40
Schichtstärke	0,125	0,1	0,1
Volumenanteil Matrix (PA6)	4,14 cm ³	4,13 cm ³	4,13 cm ³
Fasertyp	Kohlenstoff	Aramid	Glas
Faserschicht gesamt (oben/unten)	2	2	2
Faserausrichtung	0° zur Zugrichtung	0° zur Zugrichtung	0° zur Zugrichtung
Volumenanteil Faser	0,12 cm ³	0,09 cm ³	0,09 cm ³
Umrandungskonturen	2	2	2
Fertigungszeit pro Probe	47 min	57 min	57 min

Das Ergebnis der Biegeversuche zeigt Abbildung 58. Bis zu einer Dehnung von 2 % ist der Verlauf in guter Näherung linear, sodass die lineare Biegetheorie angewendet werden kann. Die Biegesteifigkeiten für die Verstärkung mit Kohlefaser, Aramidfaser und Glasfaser stehen im Verhältnis 6 : 3 : 2. Mit Hilfe der Kohlefaserverstärkung kann die größte Festigkeits- und Steifigkeitssteigerung erzielt werden. In nachfolgenden Versuchen mit anderen Proben und bei den 3D-gedruckten Lösungen für den Gelenkknoten wird daher die Kohlefaserverstärkung eingesetzt.

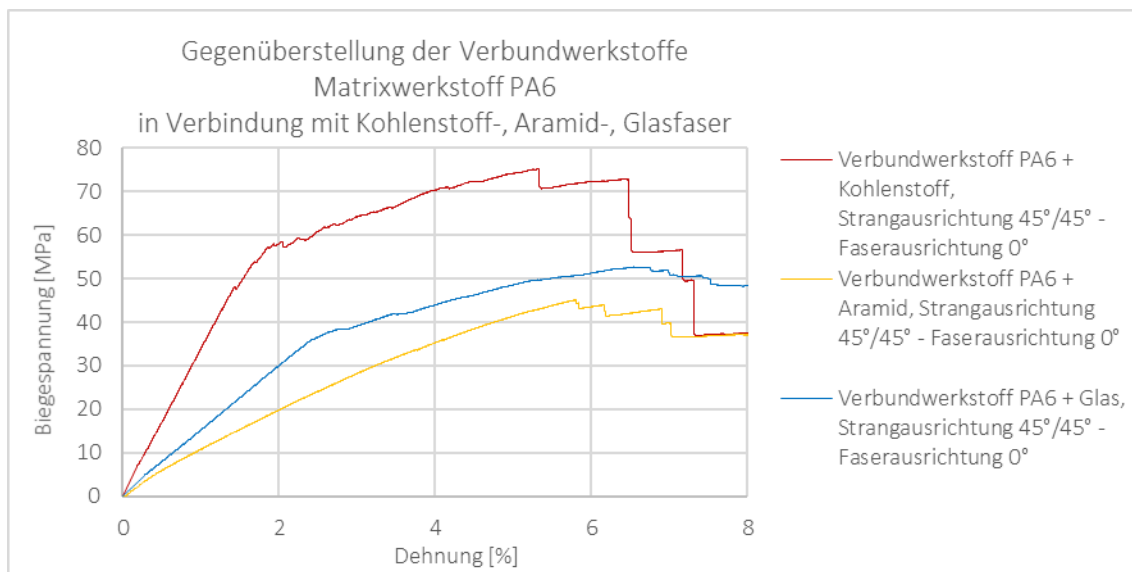


Abbildung 58: Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Biegeversuch mit Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff, Aramid oder Glas.

5.6 Kriechverhalten im Zeitstand-Zugversuch

Um das statische Langzeitverhalten des Matrixwerkstoffes PA 6 unter einachsiger Zugbelastung zu untersuchen, wurde die Zeitstandfestigkeit mit Hilfe von Zugkriechversuchen in Anlehnung an DIN EN ISO 899-1 [DIN899] ermittelt. Zusätzlich wurden auch Kriechversuche an Zugproben mit Kohlefaserverstärkung durchgeführt. Das Ziel von Kriechversuchen besteht in der Ermittlung der zeit- und spannungsabhängigen Dehnung eines Werkstoffes $\varepsilon = f(\sigma, t)$. Der quantitative Zusammenhang wird mittels einer Schar von Kriechkurven mit jeweils konstanter Spannung dargestellt. Aus den Kriechkurven lassen sich bei mindestens drei verschiedenen Spannungsniveaus sogenannte isochrone Spannungs-Dehnungs-Kurven (Kurvenschar mit Zeit als Scharparameter) ableiten, aus denen die Dehnung in Abhängigkeit der Belastungszeit und der Spannung ablesen lässt.

5.6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Weil das Kriechverhalten von PA 6 durch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit stark beeinflusst wird, müssen die Versuche bei möglichst konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden und die Proben zuvor bei gleichen klimatischen Bedingungen konditioniert werden. Feuchteungleichgewichte würden dazu führen, dass zu trockene Probekörper während der Prüfung eine Zusatzdehnung durch Wasserabsorption und dass zu feuchte Probekörper eine Kontraktion durch Wasserdessorption aufweisen (siehe [DIN899]). Die Kriechversuche und die Vorkonditionierung der Proben erfolgten deshalb in einem klimatisierten Raum an der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar.

Die Durchführung der Kriechversuche in einer Universalprüfmaschine wäre im Zeitrahmen des Projektes nicht möglich gewesen, denn dann hätten die Versuche einzeln nacheinander durchgeführt werden müssen. Die Prüfmaschine wäre bei einer Versuchsdauer von 1000 h, 4 Lastniveaus und 5 Proben je Lastniveau insgesamt 20000 h oder über zwei Jahre blockiert. Damit dennoch eine ausreichende Zahl von Kriechversuchen (drei bis fünf je Lastniveau) bei verschiedenen Lastspannungen durchgeführt werden konnte, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit [Sei18] eigens ein Zeitstandprüfstand konzipiert und aufgebaut, mit dem gleichzeitig fünf Proben belastet werden können. Die Belastung erfolgt durch angehängte Gewichte, die Wegmessung durch Wegmesstaster.

Es wurden vier verschiedene Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa) geprüft. Der Probenquerschnitt wurde im Vergleich zur Norm DIN EN ISO 527-2 [DIN527] von 40 mm² auf 10 mm² verkleinert, damit die Masse der Gewichte für die gleichzeitige Durchführung von fünf Kriechversuchen ebenfalls auf ein Viertel verringert werden konnte. Die Masse der Gewichte betrug zwischen 11,2 kg und 22,4 kg.

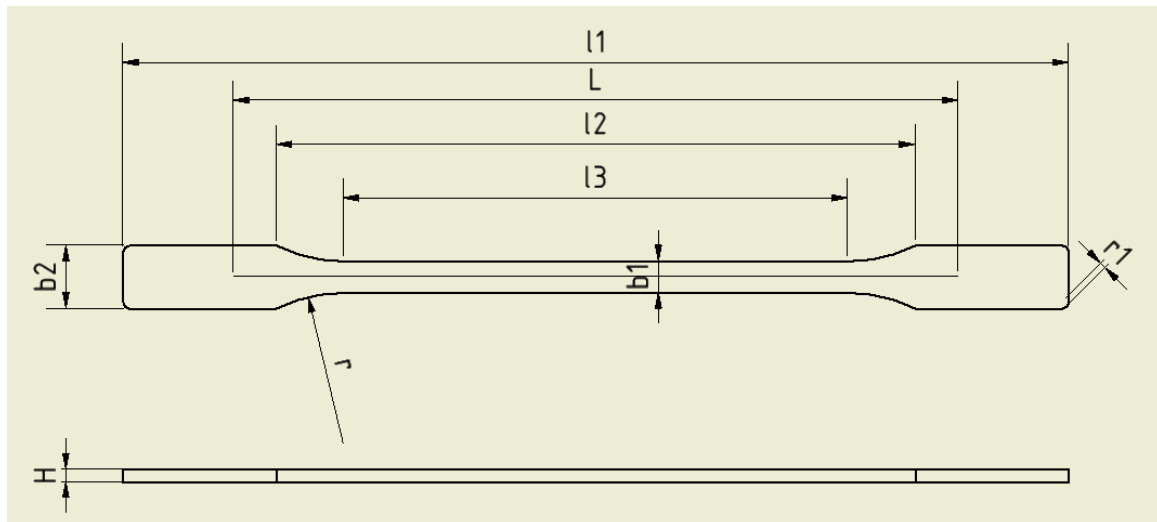


Abbildung 59: Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuche

Tabelle 12: Nennmaße der Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuch

Symbol	Bezeichnung	Abmaß in mm
l1	Gesamtlänge	150
l3	Länge des engen parallelen Teils	80
r	Radius	24
l2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	101,33
b2	Breite an den Enden	10
b1	Breite des engen Teils	5
H	Dicke	2
L	Anfangsabstand zwischen den Einspannklemmen	115
r1	Abrundung an den Ecken	1

Die Proben wurden mindestens 10 Tage vor Versuchsbeginn zur Konditionierung in dem klimatisierten Raum eingelagert in dem anschließend die Kriechversuche durchgeführt wurden. Abweichend vom Normalklima (23 °C, 50 % rel. F.) betrug die Raumtemperatur $19,5 \pm 1,5$ °C und die rel. Luftfeuchtigkeit 55 ± 5 %. Die Versuchspläne für die durchgeführten Kriechversuche sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 13: Versuchsplan für Kriechversuche ohne Faserverstärkung

Zugspannung (MPa)	Probennummer	Versuchsdauer (h)	Datum Versuchsstart
11	T53, T57	1000	26.01.2018
11	T65, T67	960	09.03.2018
13,5	T56, T59, T61	1000	26.01.2018
16	T43, T44, T46, T47, T49	1000	15.12.2017
22	T69, T70, T71	960	09.03.2018

Tabelle 14: Versuchsplan für Kriechversuche mit Faserverstärkung

Zugspannung (MPa)	Probennummer	Versuchsdauer (h)	Datum Versuchsstart	Orientierung C-Faser
13,5	T78, T80	300	26.04.2018	30°/60°
13,5	T90, T91	160	15.05.2018	0°
16	T79, T80, T81	300	26.04.2018	30°/60°
16	T88, T92, T96	160	15.05.2018	0°

5.6.2 Messergebnisse

Die Messergebnisse für die Versuche ohne Faserverstärkung zeigen Abbildung 60 und Abbildung 61. Die größte Lastspannung von 22 MPa liegt bereits über der im Kurzzeitzugversuch ermittelten Elastizitätsgrenze von 21 MPa. Das Material kriecht vorwiegend viskoplastisch, bereits nach einer Stunde wird eine Dehnung von 30% gemessen und sie nimmt anschließend weiter zu. nach 100 Stunden hat die Probe bereits ihre Länge verdoppelt. Obwohl der Werkstoff PA6 im Kurzzeitzugversuch Spannungen deutlich oberhalb der Fließgrenze bis zu 30 MPa ertragen kann und dabei verfestigt ohne zu versagen, müssen Spannungen oberhalb der Fließgrenze bei Langzeitbelastung vermieden werden, weil sonst eine unzulässig große Verformung auftritt. Wird die Lastspannung um etwa ein Viertel auf 16 MPa reduziert, dann wird die Dehnung im Kriechversuch bereits überproportional reduziert. Nach einer Stunde beträgt die Dehnung nur 9% statt 30%, nach 100 Stunden nur 20% statt 100%. Durch die weitere Reduzierung der Lastspannung kann die Kriechgeschwindigkeit weiter vermindert werden, dennoch nimmt auch bei der Lastspannung von 11 MPa (ca. Hälfte der Fließgrenze im Kurzzeitzugversuch) die Dehnung mit der Belastungszeit zu.

Die Messergebnisse für die Versuche mit Faserverstärkung zeigen Abbildung 62 und Abbildung 63. Durch die Verstärkung der 3D-gedruckten Zugproben mit Kohlefasern konnte schließlich eine deutliche Reduzierung der Kriechneigung erreicht werden, allerdings nur, wenn die Verstärkungsfasern in Zugbelastungsrichtung orientiert ist (vgl. Abbildung 62 und Abbildung 63). Bei einer Belastung von 16 MPa betrug nach 100 Stunden die Dehnung im Kriechversuch mit C-Faserverstärkung in Zugrichtung nur 0,7% im Vergleich zu den unverstärkten Proben mit 20%. Zur Absicherung der Ergebnisse für die Bauteilauslegung sollten weitere Experimente mit unterschiedlichen Einstellungen für die Faserverstärkung bei verschiedenen Lastniveaus durchgeführt werden. Aus den bisher durchgeführten Experimenten geht hervor, dass durch die C-Faserverstärkung in Zugrichtung die Kriechneigung auf ein vernachlässigbares Maß reduziert werden kann. Die elastische Dehnung des Matrixmaterials beträgt an der Fließgrenze bereits über 3% und liegt damit deutlich über der nach 100 Stunden gemessenen Kriechdehnung mit

Faserverstärkung von 0,7% bei 16 MPa Zugbelastung. Die lineare Extrapolation der Kriechkurve für 16 MPa (logarithmische Zeitachse) lässt nach 10 Jahren eine Dehnung von nur 1,5% erwarten.

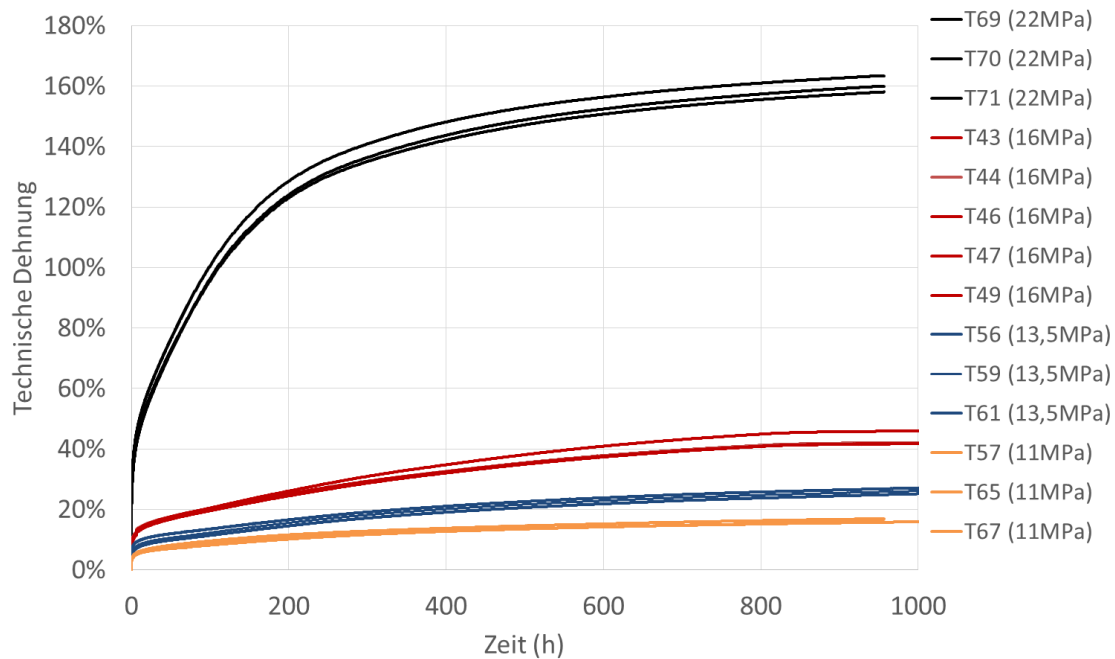


Abbildung 60: Zunahme der technischen Dehnung mit der Zeit im Zeitstand-Zugversuch von 3D-gedrucktem PA 6 bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa)

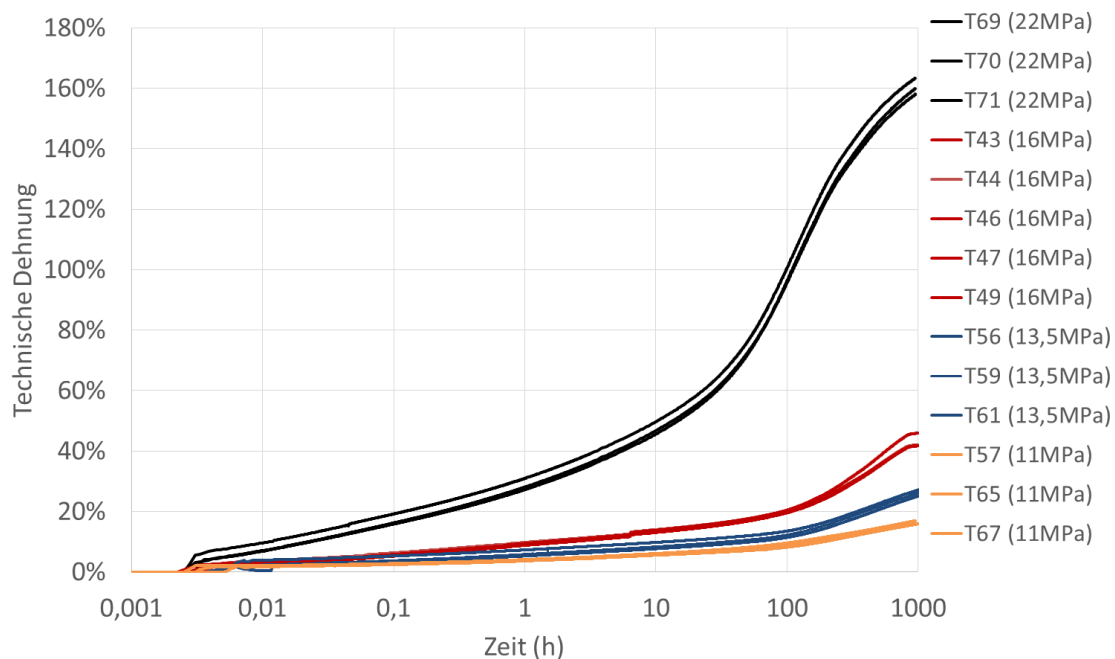


Abbildung 61: Zunahme der technischen Dehnung mit der Zeit im Zeitstand-Zugversuch von 3D-gedrucktem PA 6 bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa) mit logarithmischer Zeitachse

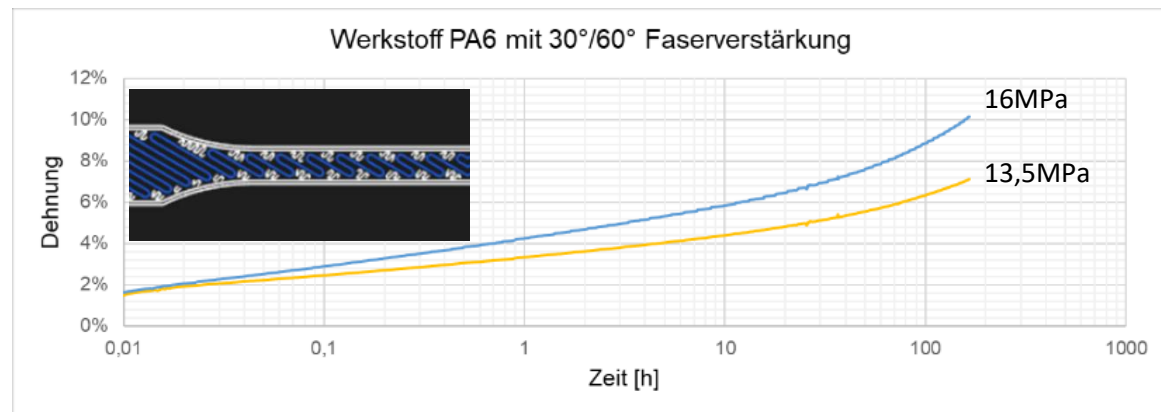


Abbildung 62: Kriechkurve für Proben mit mäanderförmiger 30°/60° Faserverstärkung

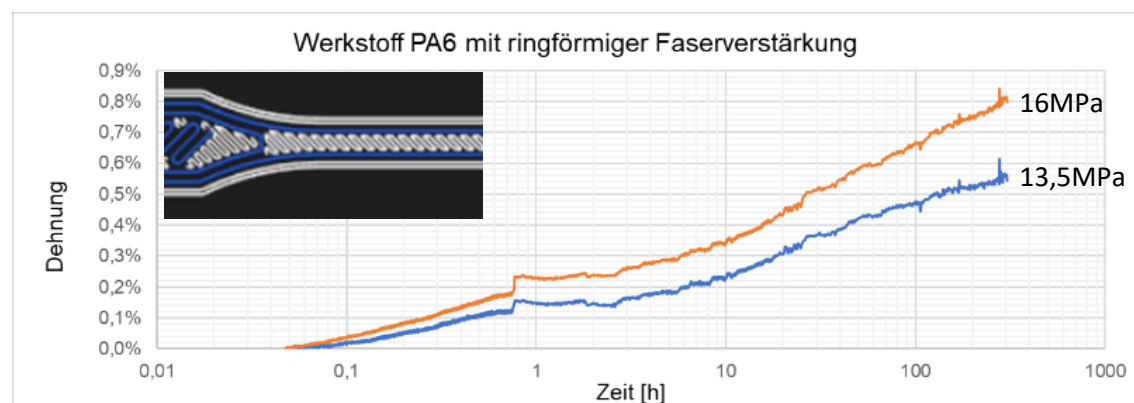


Abbildung 63: Kriechkurve für Proben mit ringförmiger Faserverstärkung

5.6.3 Auswertung

Die zeitabhängige Gesamtdehnung $\varepsilon(t)$ setzt sich aus einem elastischen und einem Kriechanteil zusammen:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_c(t) \quad (5.1)$$

Der elastische Anteil ε_{el} kann aus dem Anfangs-Kurzzeitmodul E_0 rechnerisch bestimmt werden, welcher dem Elastizitätsmodul im Zugversuch entspricht.

Bei Kunststoffen ist es üblich anstelle des Elastizitätsmoduls das zeitabhängige Verhältnis von Spannung und Dehnung, bezeichnet als Kriechmodul E_c , für die Bauteilberechnung zu verwenden:

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad (5.2)$$

Aufgrund der Zunahme der Kriechdehnung nimmt der Kriechmodul mit der Zeit ab. Abbildung 64 zeigt den Verlauf des Kriechmoduls für die vier untersuchten Lastniveaus mit logarithmischer Zeitachse. Die Zeitachse beginnt bei 0,01 Stunden bzw. 36 s.

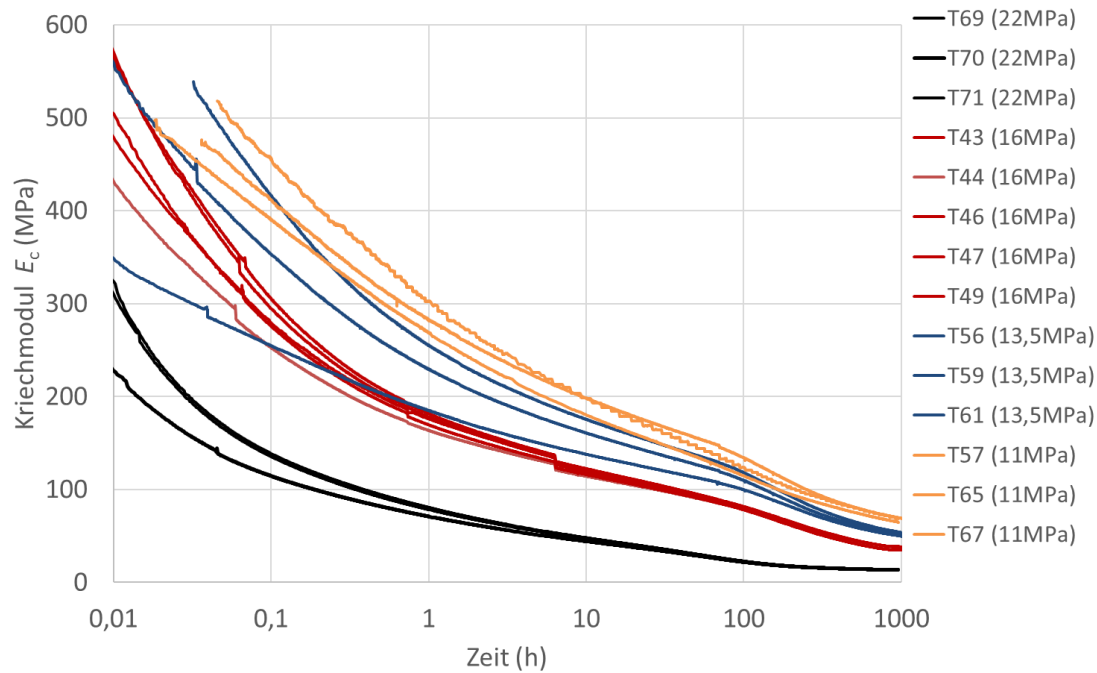


Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf des Kriechmodul von 3D-gedrucktem PA 6 im Zeitstand-Zugversuch bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa)

Um das Kriechverhalten von Kunststoffen mathematisch zu beschreiben und einfach an Messwerte anzupassen wird häufig der Potenzansatz von Findley [Kro95, Ehr02] verwendet:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + m \cdot t^n \quad (5.3)$$

Nach Umstellen der Gleichung und Logarithmieren ergibt sich eine Gerade mit der Gleichung

$$\log(\varepsilon(t) - \varepsilon_{el}) = \log m + n \log t \quad (5.4)$$

Durch lineare Regression kann die Gerade an die Messwerte angepasst und so die Parameter m und n für die jeweils untersuchte Spannung bestimmt werden. Tabelle 15 führt die gefitteten Findley-Parameter für jede einzelne Kriechkurve auf. Die hohen Werte des Bestimmtheitsmaßes belegen die sehr gute Anpassung an die Messwerte. Durch Mittelwertbildung bei jedem Lastniveau unterhalb der Fließgrenze wurden die folgenden Funktionen zur Beschreibung der lastabhängigen Kriechkurven bestimmt:

$$11 \text{ MPa:} \quad \varepsilon(t) = 0,01670 + 0,0182 \cdot t^{0,3089} \quad (5.5)$$

$$13,5 \text{ MPa:} \quad \varepsilon(t) = 0,0205 + 0,0184 \cdot t^{0,3793} \quad (5.6)$$

$$16 \text{ MPa:} \quad \varepsilon(t) = 0,0243 + 0,0299 \cdot t^{0,3852} \quad (5.7)$$

Abbildung 65 zeigt die gemessenen Kriechkurven und die durch lineare Regression angepassten Potenzfunktionen nach Findley. Eine Verallgemeinerung auf beliebige Spannungsniveaus kann erreicht werden, indem die Parameter m und n als Funktion der Spannung ausgedrückt werden,

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + m(\sigma) \cdot t^{n(\sigma)}, \quad (5.8)$$

und für $m(\sigma)$ und $n(\sigma)$ einfach Polynomansätze wie zum Beispiel bei Krollmann [Kro95] verwendet werden.

Tabelle 15: Mittels linearer Regression gefittete Parameter m und n des Findley-Potenzansatzes für Kriechversuche mit 3D-gedrucktem PA 6 (Bestimmtheitsmaß R^2 in letzter Spalte)

Lastspannung	Zeitintervall für Regression	Probe	m	n	R^2
11 MPa	100 h ... 956 h	T57	0,0134	0,3489	0,9946
		T65	0,0193	0,2935	0,9969
		T67	0,0219	0,2843	0,9984
13,5 MPa	100 h ... 1000 h	T56	0,0226	0,3524	0,9975
		T59	0,0179	0,3816	0,9957
		T61	0,0148	0,4039	0,9960
16 MPa	100 h ... 1000 h	T43	0,0304	0,3791	0,9956
		T44	0,0319	0,3730	0,9965
		T46	0,0266	0,4139	0,9961
		T47	0,0322	0,3704	0,9966
		T49	0,0283	0,3897	0,9966
22 MPa	20 h ... 250 h	T69	0,1581	0,3812	0,9973
		T70	0,1699	0,3763	0,9971
		T71	0,1486	0,3950	0,9971
	250 h ... 956 h	T69	0,5927	0,1415	0,9845
		T70	0,6489	0,1332	0,9819
		T71	0,5926	0,1433	0,9843

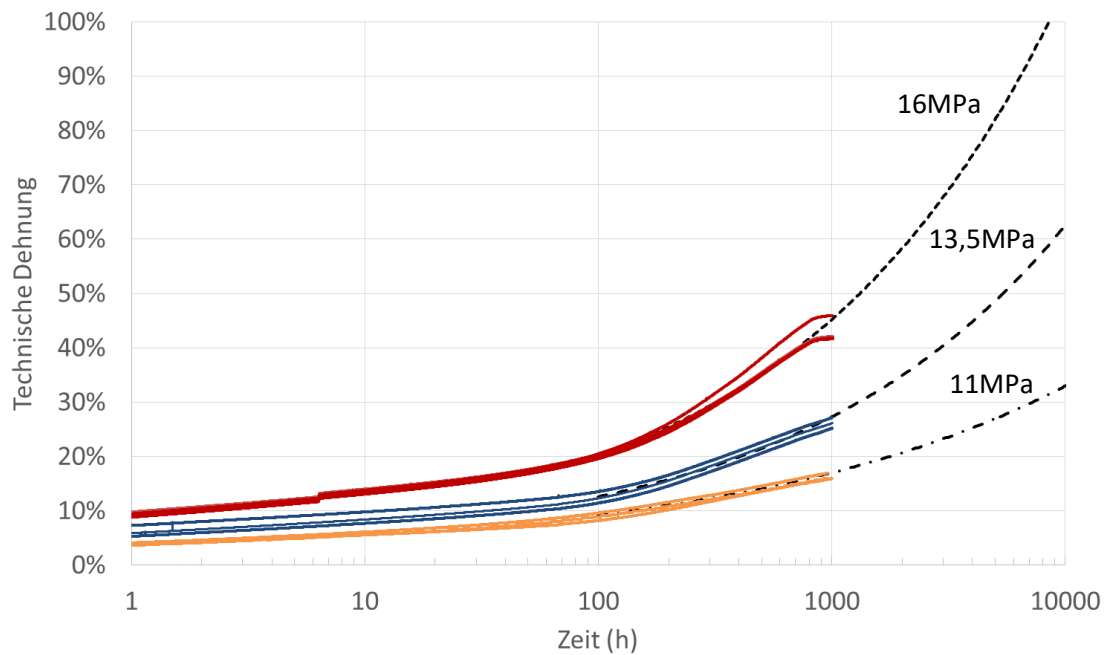


Abbildung 65: Anpassung von Kriechkurven im Bereich von 100 h bis 1000 h an den Findley-Potenzansatz und Extrapolation auf 10000 h

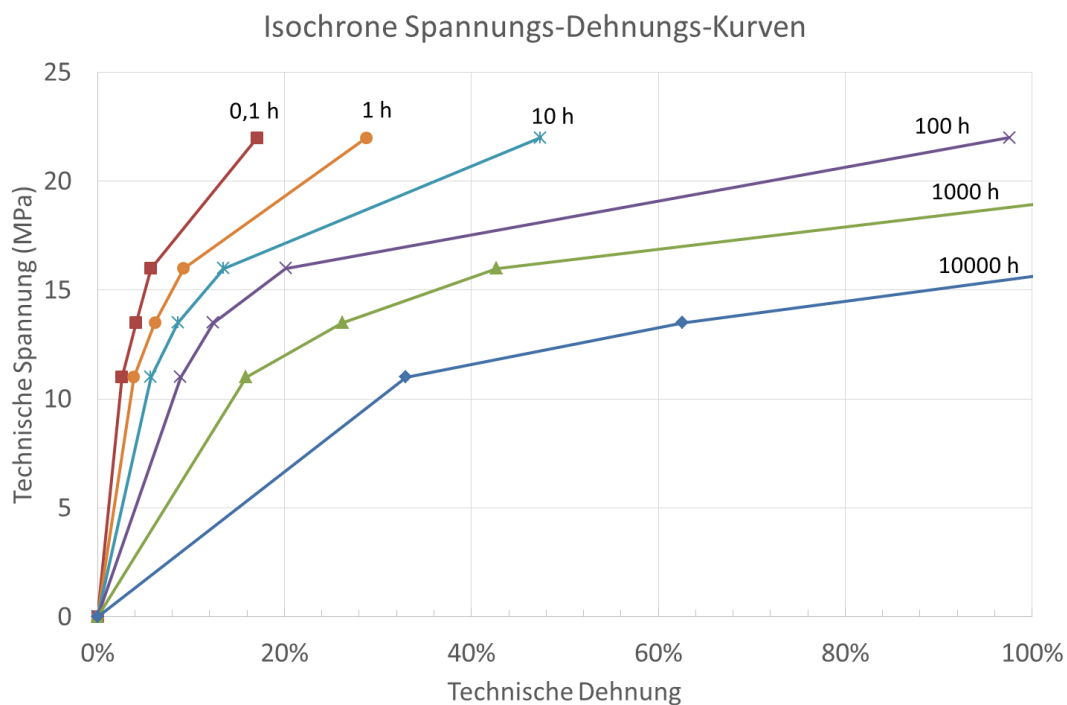


Abbildung 66: Isochrone Spannungs-Dehnungs-Kurven für das Kriechverhalten von 3D-gedrucktem PA 6. Die Kurven bis zu einer Zeit von 1000 h wurde aus den gemessenen Kriechkurven bei 11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa und 22 MPa ermittelt. Die Kurve für 10000 h wurde durch Extrapolation des Findley-Potenzansatz bei 11 MPa, 13,5 MPa und 16 MPa vorhergesagt.

5.7 Zyklischer Zugversuch

Ein zyklischer Zugversuch wurde extern an der MFPA Weimar auf einer Prüfmaschine von Zwick/Roell durchgeführt. Die Probengeometrie stimmt mit der im Kriechversuch verwendeten Probengeometrie überein, der Nennquerschnitt beträgt 10 mm^2 . Die Einspannlänge betrug 110 mm , die Messlänge für den Wegaufnehmer 80 mm . Es wurden 10 Lastzyklen mit einem Spannungsverhältnis $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = 0,1$ kraftgesteuert mit 20 N/s bis zur Maximalkraft $F_{\max} = 200 \text{ N}$ gefahren. Das bedeutet, die Zugspannung schwankt zwischen $\sigma_{\max} = 20 \text{ MPa}$ und $\sigma_{\min} = 2 \text{ MPa}$, wobei ein Zyklus 18 s dauert. Die gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurve zeigt den typischen Verlauf für eine viskoelastische Hysterese mit zusätzlicher Zunahme der Kriechdehnung. Die Hystereseschleife wird mit zunehmender Zeit zu größeren Dehnungswerten verschoben.

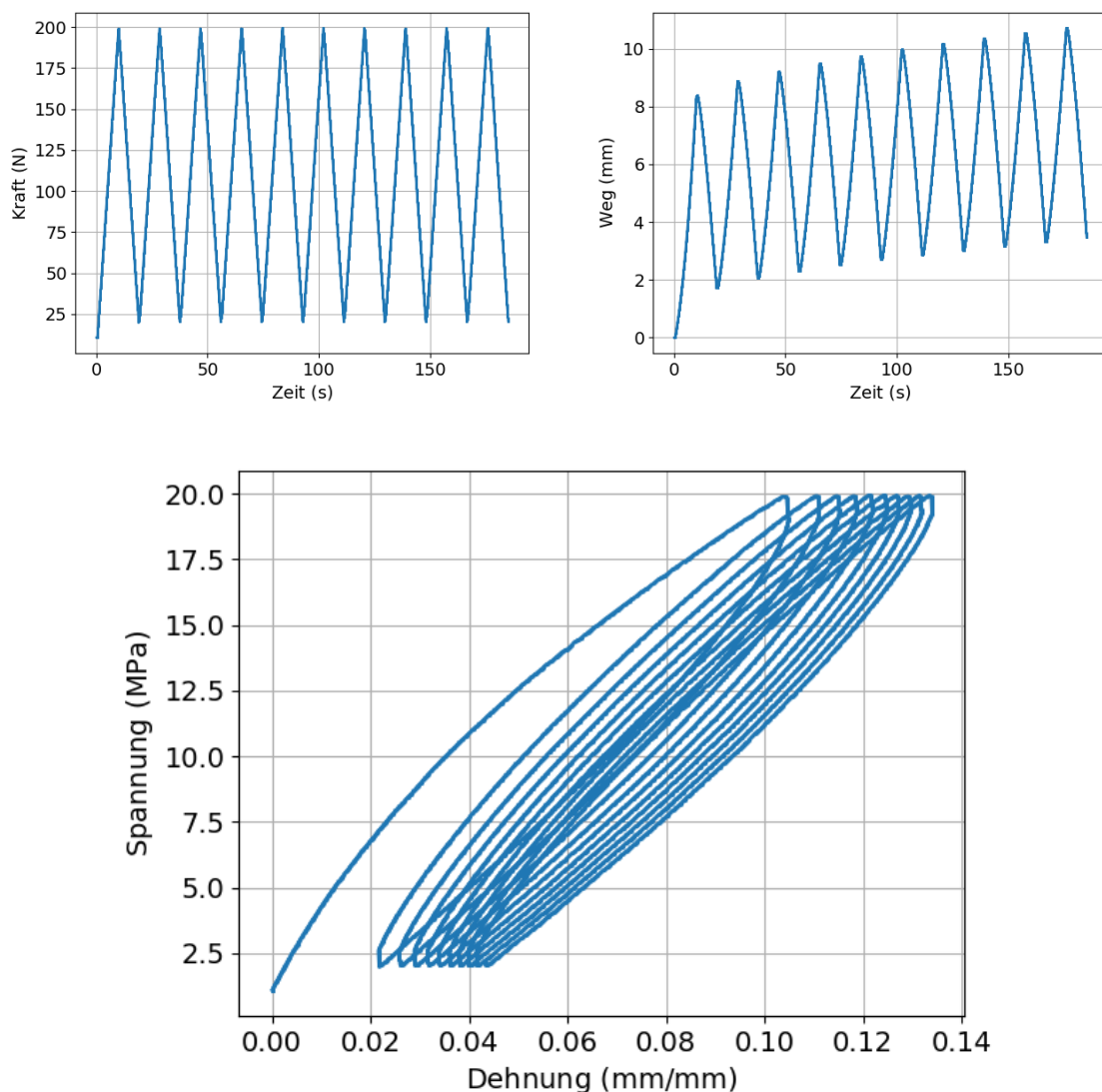


Abbildung 67: Ergebnis der kraftgesteuerten zyklischen Zugprüfung (10 Zyklen) einer additiv gefertigten Zugprobe aus PA 6. Lastzyklus der Prüfmaschine: $F_{\min} = 20 \text{ N}$, $F_{\max} = 200 \text{ N}$, Belastungsgeschwindigkeit 20 N/s .

6 Experimentelle Untersuchungen zur Gelenkermüdung

6.1 Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an Gelenkpunkten

6.1.1 Vorbetrachtung

Der additiv gefertigte Gelenkpunkt kann seine Gestalt durch die Rotation entlang der sechs Filmgelenke ändern. Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens dieser Filmgelenke erfordert eine individuelle Versuchseinrichtung. Die Abbildung 68 zeigt die Aufteilung des Gelenkes für die Ermüdungsprüfung. In der linken Abbildung sind die „Trägerstücke“ des Gelenkes rot markiert, welche in die Vorrichtung zur Ermüdungsprüfung eingespannt werden. Über die Trägerstücke wird die zwangsläufige Faltbewegung gesteuert. Auf der rechten Seite sind die Bereiche rot markiert, die zum einen die Trägerstücke verbinden und gleichzeitig als Scharniere fungieren. Die Einspannung der Trägerstücke in die Versuchseinrichtung zeigt Abbildung 69.

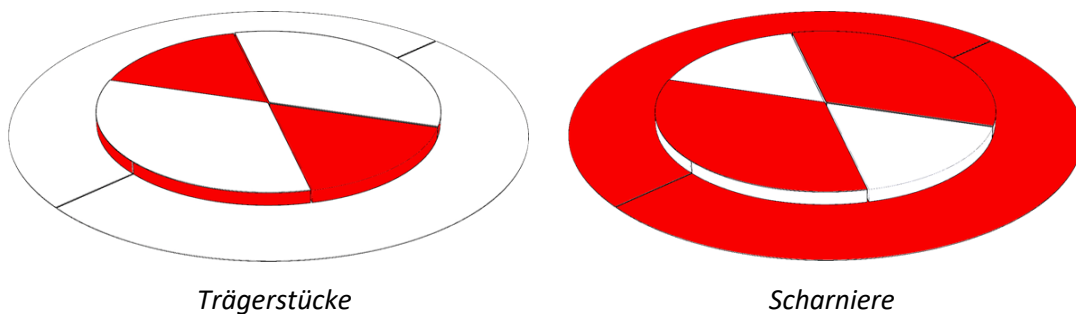


Abbildung 68: Darstellung der Gelenkaufteilung für die Ermüdungsprüfung

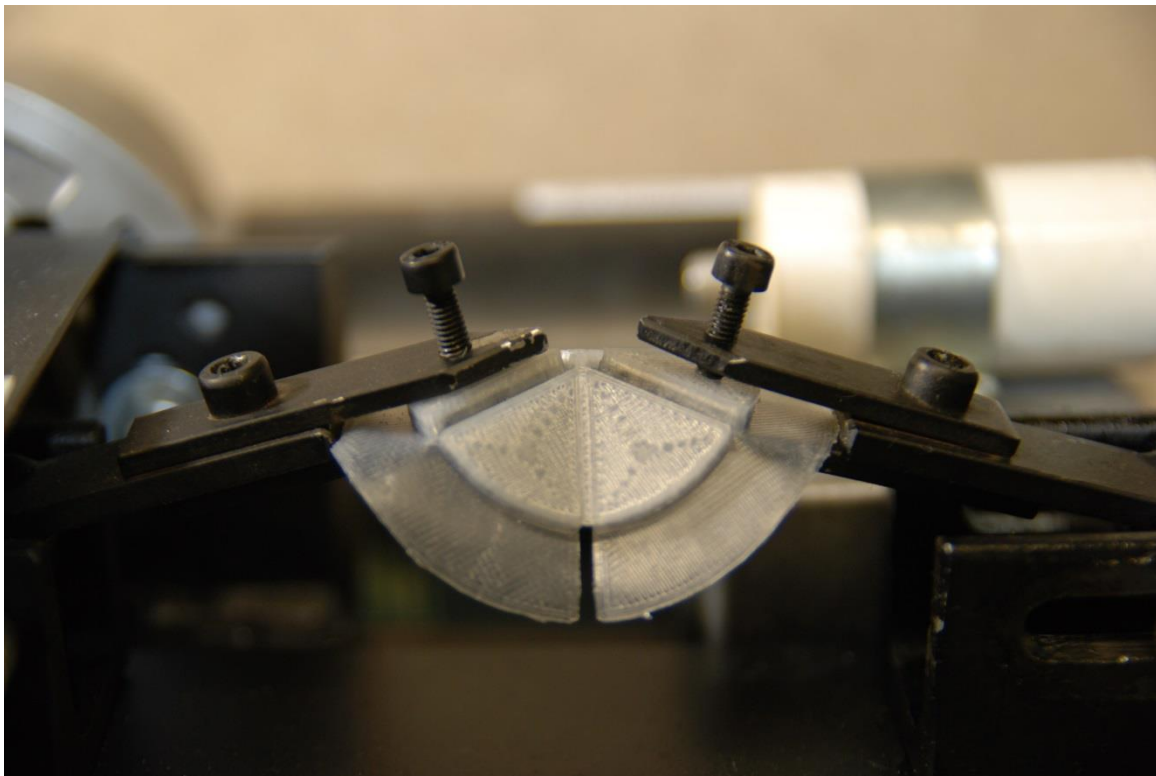


Abbildung 69: Einspannung des Gelenkes an den zwei Trägerstücken

Die unterschiedlichen Einstellungen der Prozessparameter bei der Herstellung des Gelenkes beeinflussen das Ermüdungsverhalten. Es wird von der Hypothese ausgegangen, dass mit den nachfolgenden Einstellungen das Versagen des Gelenkpunktes begünstigt wird, die Bildung eines Anrisses also am schnellsten erfolgt:

a. Trägerstücke sehr steif, alle Schichten werden mit Kohlenstofffaser ausgelegt und konzentrisch angeordnet – maximale Faserringe (Anzahl 5)

Durch die steife Ausbildung der Trägerstücke wird das elastische Verhalten des Gelenkes minimiert, somit kann es zu Rissen zwischen den Strängen oder Delaminationen zwischen den Schichten kommen.

b. Folienstärke (bzw. Dicke des Scharniers) 0,25 mm, entspricht zwei Deckschichten

Dies ist die dünnste auszuführende Folienstärke. Eine Folienstärke mit nur einer Schicht ist nicht möglich. Der Verbund zwischen den Strängen mit dem FFF-Verfahren des „Mark Two“ erfordert mindestens zwei Schichten.

c. Gedreht im Bauraum um 15°, parallele Strangführung im Filmgelenk

Erkenntnisse aus den Untersuchungen des Matrixverbundverhaltens zeigen, dass Risse zunächst zwischen den Strängen erscheinen. Ist die Strangführung parallel zur Falte im Gelenk, wird der Querschnitt geschwächt.

6.1.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau für die Untersuchung des Ermüdungsverhalten der Filmscharniere im Gelenkpunkt wurde gemeinsam mit der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar entwickelt. Der konstruierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 70 dargestellt. Hiermit wird das Gelenk wiederholt in eine Winkelstellung der innen liegenden Kanten von 60° gefaltet. Die Gelenkproben werden an den Trägerstücken mittels zweier Spannhebel fixiert (Abbildung 69). Das Gewicht unterhalb des Antriebsmotors zieht die Spannhebel in die entsprechende Winkelstellung und faltet damit das Gelenk. Die Spannhebel stehen hier in einem Winkel von 30° zur Tischoberfläche, der innere Winkel der Scharniere untereinander beträgt 60°. Der rotierende Antriebsmotor bewegt die Probe mit einer Geschwindigkeit von 59 U/min in die Ausgangslage (0°) zurück. Ein integrierter Schrittzähler ist mit einer Spiegelreflexkamera (Nikon D80) verbunden, die zu jeder Faltbewegung ein Foto aufnimmt. Anhand dieser Fotos können Veränderungen oder Schäden visuell erkannt werden.

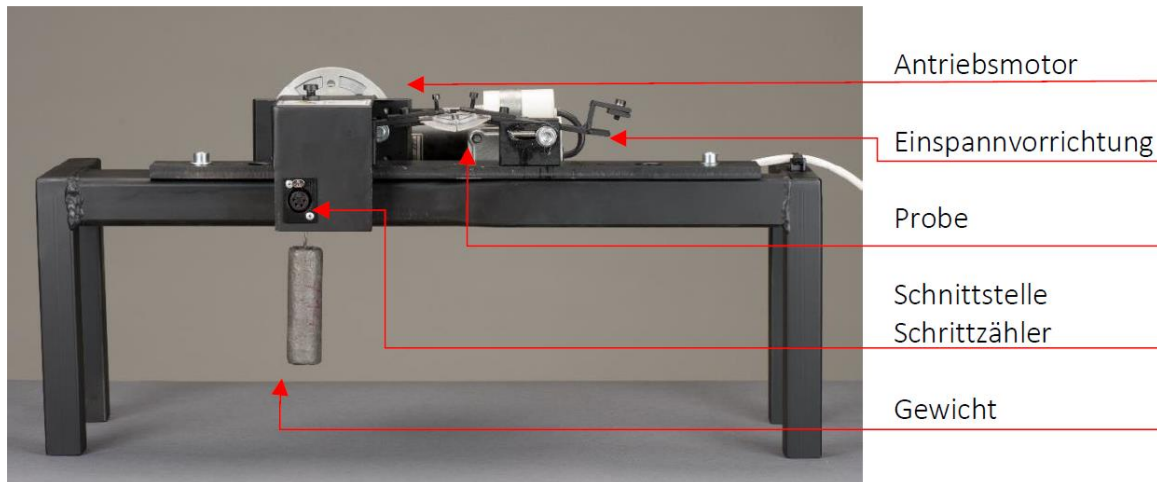


Abbildung 70: Versuchsaufbau – Ermüdungsverhalten

Die Probe wird in der aufgeklappter/gerader Form zwischen den zwei Spannhebeln eingespannt. Die erste Faltung erfolgt in der Versuchseinrichtung. Sobald die Probe eingespannt ist und die Kamera ausgerichtet ist, wird der Antriebsmotor aktiviert. In Intervallschritten von zwei Stunden mit 7080 Faltungen wird der Versuch unterbrochen, um die Bilder auf Schadensmerkmale im Gelenk optisch zu analysieren.

6.1.3 Versuchsergebnis

Aus den Versuchen gehen zwei typische Schadensbilder hervor. Drei von vier Proben zeigten eine Delamination zwischen dem Trägerstück und dem Filmscharnier (Abbildung 71). Mit diesen konnten Lastspiele von 16.000 bis 24.000 Faltungen erreicht werden. Ein weiteres Schadensbild zeigt einen Riss im Bereich des Scharniers in der Faltkante (Abbildung 72).

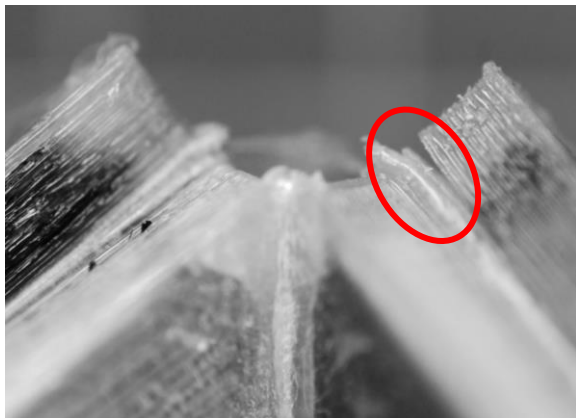


Abbildung 71: Delamination zwischen Träger und Scharnier

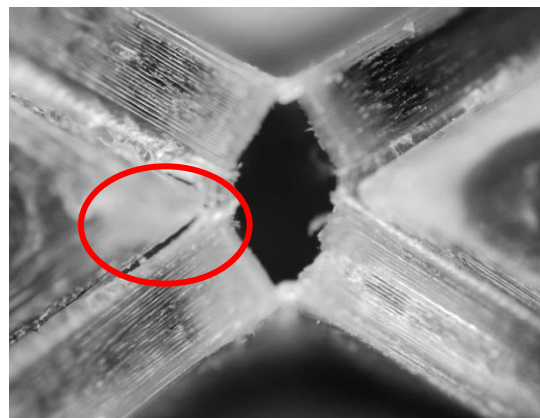


Abbildung 72: Riss zwischen den Strängen im Scharnier

6.2 Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an Filmgelenkproben

Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an den sechsteiligen Gelenkknoten ist aufwendig, es liegen keine Messwerte zu den wirkenden Kräften vor und ein Blick in das Innere in Form von Schliffbildern ist schwierig. Daher wurde beschlossen aus der Geometrie des Gelenkknotens eine einfachere bauteilnahe Probengeometrie zu entwickeln, die repräsentativ für das mechanische Verhalten des Filmgelenkes im Gelenkknoten ist. Die entwickelte Probengeometrie wird als Filmgelenkprobe bezeichnet. Anhand dieser Probengeometrie soll die Materialschädigung infolge wiederholter Biegebelastung (0, 1, 10, 100, 1000 Biegelastwechsel 0° - 180° - 0°) untersucht werden.

6.2.1 Dehnungsbasierte Bemessung des Gelenkquerschnittes

Weil der Gelenkknoten mehrere Faltvorgänge mit einem Biegewinkel bis zu 180° ohne nennenswerte Materialschädigung ertragen soll, wurde die Probengeometrie derart konzipiert, dass die gleiche Art von Biegelastwechseln wie im Gelenkknoten realisiert werden und zugleich die Probe einfach mikroskopisch untersucht werden kann. Die ertragbare Zugbelastung des Filmgelenkes wird dann in Abhängigkeit der Anzahl von Biegelastwechseln untersucht. Die ertragbare Zugspannung kann dann auf das Filmgelenk im Gelenkknoten übertragen werden und somit dessen Zugfestigkeit vorhergesagt werden.

Der Querschnitt des Filmgelenkes wird nach Gleichung (3.4) für einen maximalen Biegewinkel von 180° und eine zulässige Randfaserdehnung von 30% bemessen. Das Filmgelenk soll drei Layer dick sein. Bei einer Schichtdicke von 0,125 mm hat das Filmgelenk eine Dicke von 0,375 mm. Demzufolge beträgt die erforderliche Länge

$$l \geq \frac{h \cdot \beta}{2 \cdot \varepsilon_{zul}} = \frac{0,375 \text{ mm} \cdot \pi}{2 \cdot 0,3} = 1,963 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Für die Filmgelenkproben wurden folgende Nennmaße gewählt (siehe Abbildung 73):

- Länge des Filmgelenks $l = 2 \text{ mm}$
- Höhe des Filmgelenks $h = 0,375 \text{ mm}$ (3 Layer)
- Gesamtlänge $L = 32 \text{ mm}$
- Gesamtbreite $B = 16 \text{ mm}$
- Gesamtdicke $H = 3 \text{ mm}$ (24 Layer)

Demzufolge beträgt die kleinste Querschnittsfläche der auf Biegung bzw. Zug beanspruchten Filmgelenkprobe $B \cdot h = 6 \text{ mm}^2$. Im zweiten Layer des Knotens ist eine Faserverstärkung zur Versteifung vorgesehen, welche sich jedoch nicht über das Gelenk erstrecken soll, denn dieses soll biegeweich bleiben.

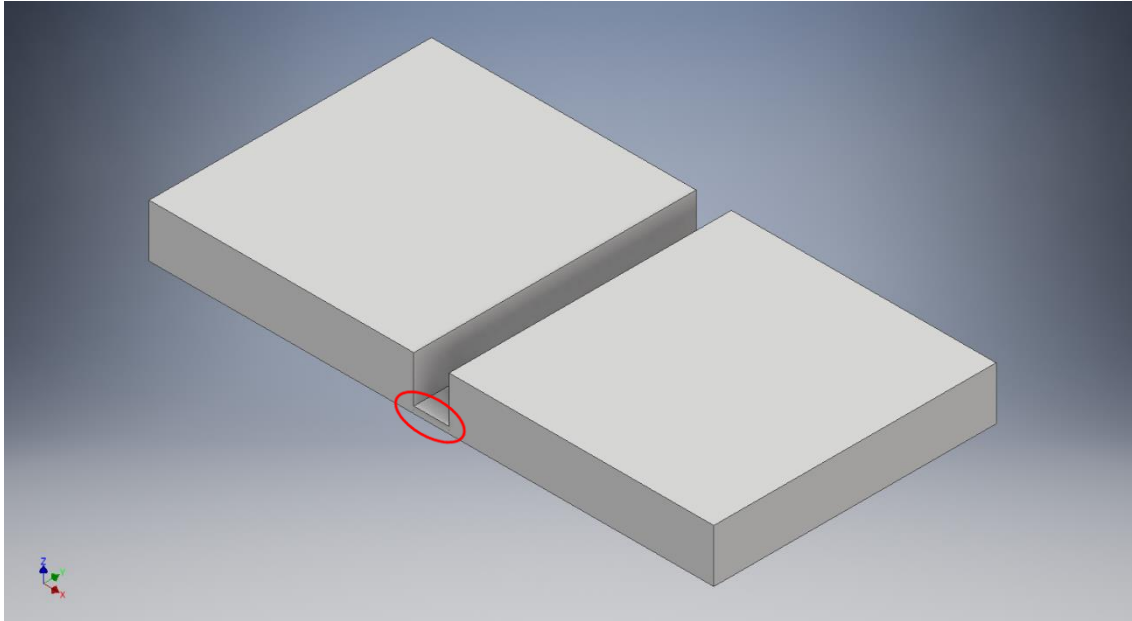


Abbildung 73: CAD-Modell der Filmgelenkprobe. Biegeeweicher Bereich rot markiert.

6.2.2 3D-Druck der Filmgelenkproben

Die Druckersoftware Eiger berechnet den Pfad des Nylon-Stranges und der Verstärkungsfasern selbstständig ohne dass der Nutzer den Pfad direkt vorgeben kann. Lediglich eine indirekte Beeinflussung ist über die Einstellungen unter „Material Settings“ und „Reinforcement Settings“ möglich. Bei allen möglichen Einstellungen für den Druckprozess würde die Verstärkungsfasern in Layer 2 durch das drei Layer hohe Filmgelenk verlaufen, die Faserverstärkung soll jedoch nicht durch das Filmgelenk verlaufen. Die einzige Möglichkeit, eine Barriere für die Verstärkungsfasern zu schaffen, besteht darin, das CAD-Modell derart zu manipulieren, dass am Ort der Barriere ein sehr kleines Volumen ausgeschnitten wird, sodass die erzeugte Oberfläche als Randfläche wirkt. Im CAD-Modell (AutoDesk Inventor) wurden deshalb zwei rechteckige Löcher aus dem Volumen herausgeschnitten, wie es Abbildung 74 zeigt. Mit Hilfe dieses Tricks wird die in Abbildung 75 gezeigte Stranggeometrie in den ersten vier von insgesamt 24 Layern erzeugt. Die gewählte Wandschichtdicke beträgt 4, es wird eine Bodenschicht und eine Deckschicht verwendet und alle Layer dazwischen mit 100% Füllung versehen. Nur in Layer 2 befindet sich eine Faserverstärkung.

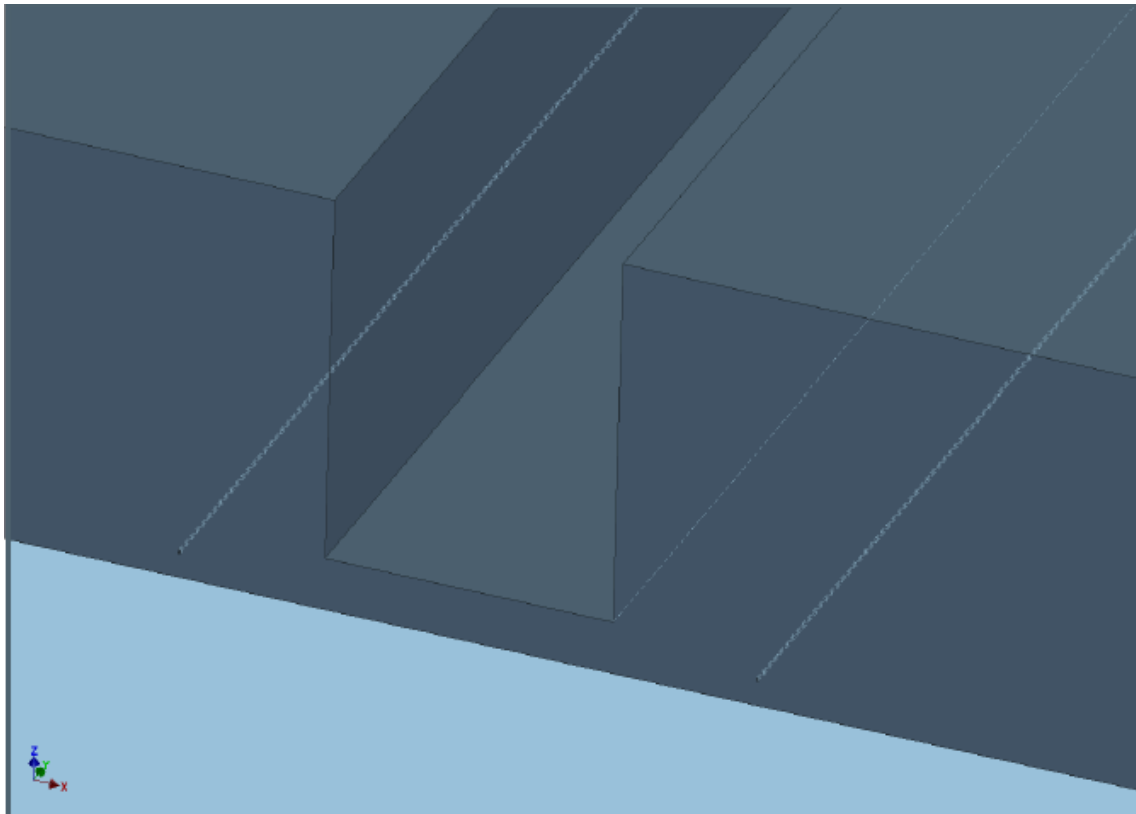


Abbildung 74: CAD-Modell des Filmgelenks. Die winzigen Hohlräume zu beiden Seiten des Filmgelenkes dienen zur Begrenzung der Verstärkungsfasern in der zweiten Schicht der Filmgelenkprobe.

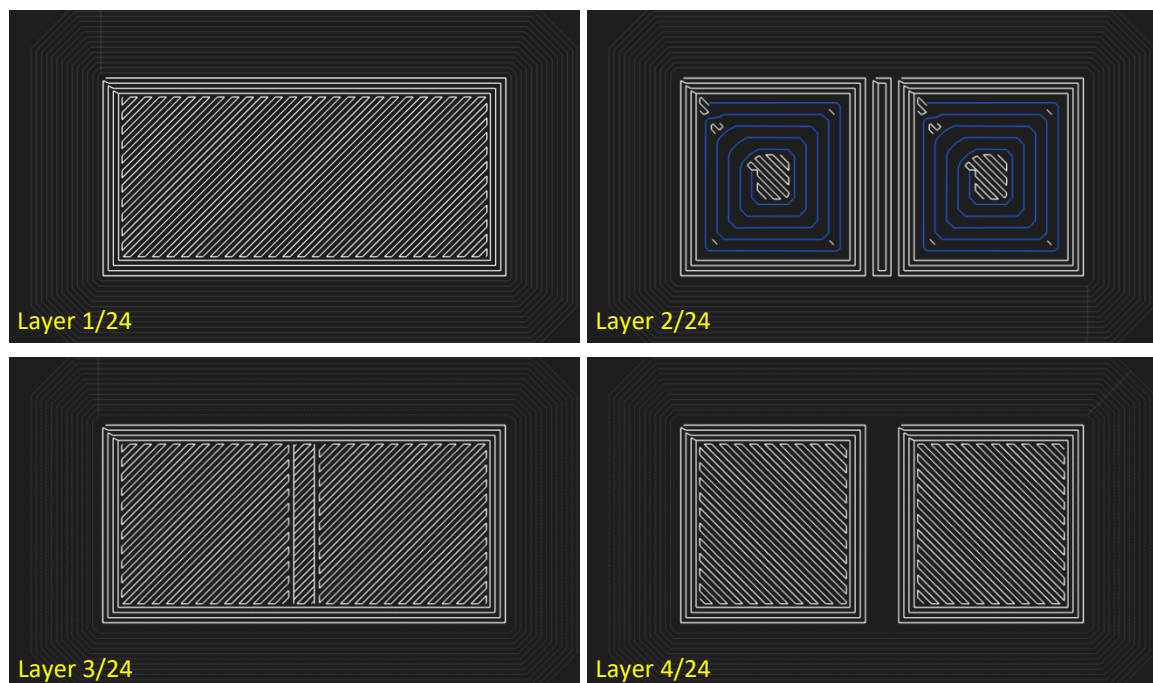


Abbildung 75: Bilder der ersten 4 Layer (von 24) in Software Eiger. Das PA6-Filament ist weiß, die Kohlenstofffaser blau dargestellt. Verwendete Softwareeinstellungen: 4 Wall Layers, 1 Roof & Floor Layers, Solid Fill Pattern mit Fill Density 100%.

6.2.3 Zugversuche mit Filmgelenkproben

Die 3D-gedruckten Filmgelenkproben wurden so aufgeteilt, dass jeweils 4 Proben nach 5 unterschiedlichen Biegelastwechselzahlen geprüft werden konnten. Jeweils 2 zusätzliche Proben wurde für die Mikroskopie eingebettet und Querschliffe angefertigt. Tabelle 16 fasst die durchgeführten Versuche und angefertigten Schliffe zusammen.

Tabelle 16: Versuchsplan für Zugversuche und Schliffe mit Anzahl Biegewechseln (0° - 180° - 0°)

Biegelastwechsel	Zugversuch	Querschliff
0	FG10, FG11, FG12, FG22	FG21, FG39
1	FG14, FG15, FG16, FG24	FG23, FG40
10	FG18, FG19, FG20, FG26	FG25, FG41
100	FG28, FG29, FG30, FG31	FG27, FG42
1000	FG32, FG33, FG34, FG38	FG37, FG43

Die Filmgelenkproben wurden in der Universalprüfmaschine (Zwick 1455, inspekt retrofit 20kN von Hegewald & Peschke) am Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau hinsichtlich der ertragbaren Zugbelastung geprüft. Die Proben werden zwischen den Klemmbacken der Prüfmaschine so eingespannt, dass die Klemmbacken einen Abstand von 3 mm haben und das Filmgelenk sich mittig zwischen den Klemmbacken befindet. Abbildung 76 zeigt ein Foto einer eingespannten Probe. Die Versuche wurden kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5 N/s gefahren. Die Zugfestigkeit wurde aus der Maximalkraft bezogen auf den Ausgangsquerschnitt von 6 mm^2 berechnet. Abbildung 77 zeigt die Änderung der Zugfestigkeit mit der zunehmenden Zahl von Biegelastwechseln.



Abbildung 76: Filmgelenkprobe eingespannt zwischen den Spannbacken der Zugprüfmaschine

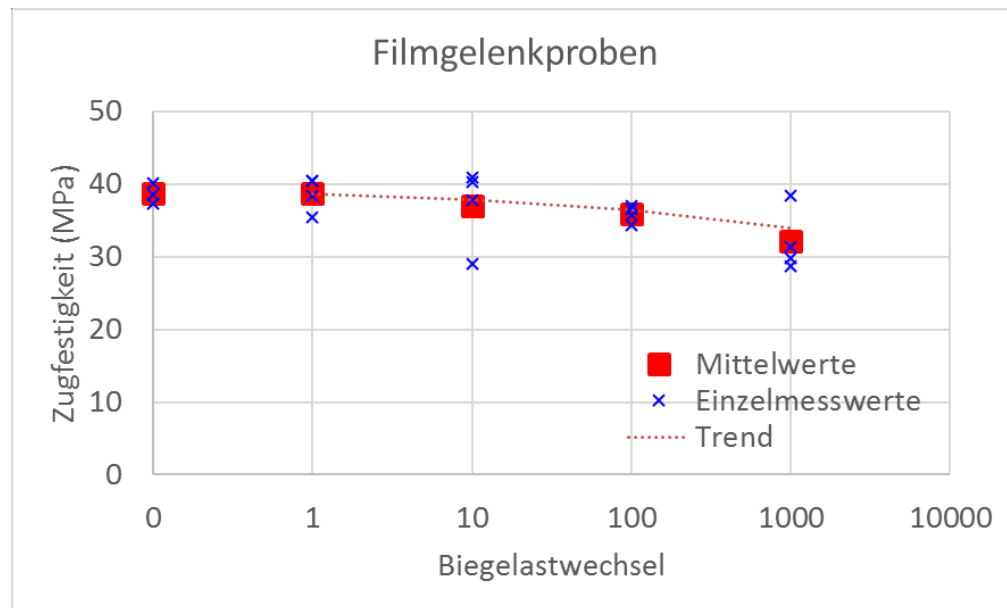


Abbildung 77: Änderung der Zugfestigkeit von Filmgelenkproben mit zunehmender Zahl von Biegelastwechseln.

6.2.4 Mikroskopische Untersuchungen

Der kompakte Querschnitt der Filmgelenkprobe vereinfacht mikroskopische Untersuchungen im Vergleich zu einem Gelenkpunkt mit 6 Filmgelenkachsen. Zum einen kann das Filmgelenk aus verschiedenen Richtungen mit dem Stereomikroskop vermessen werden. Zum andern kann eine Filmgelenkprobe auf einfache Weise mittig geteilt werden um beide Teile einzubetten, Querschliffe anzufertigen und diese unter dem Mikroskop zu betrachten.

Abbildung 78 zeigt exemplarisch die Seitenansicht und den Querschliff einer Filmgelenkprobe. Der Schichtaufbau infolge der additiven Fertigung und damit die Abweichung von der CAD-Geometrie ist sehr gut erkennbar. Die Oberfläche ist wellig mit einer Wellenlänge gleich der Schichthöhe. Im Querschliff sind zusätzlich Hohlräume zwischen den PA6-Fasern nachweisbar, deren größte Querschnittsabmessung im Extremfall der Schichthöhe entspricht.

Abbildung 79 zeigt die Mikroskop-Aufnahme einer Filmgelenkprobe nach dem Zugversuch. Das 2 mm breite Filmgelenk wurde um 200% auf 6 mm gedehnt. Ein Anriss ist erkennbar, welcher quer zur Zugrichtung von außen nach innen wächst.

Zusätzlich zu den mikroskopischen Aufnahmen wurde eine Probe in einem Computertomographiegerät an der TU Ilmenau „durchleuchtet“. Auf dem Röntgenbild sind größere Hohlräume an der Grenzfläche zwischen der mäanderförmigen Füllung und der konzentrischen Randschicht erkennbar. Aufgrund der sehr ähnlichen Röntgendichte ist keine Unterscheidung zwischen dem Kunststoffmaterial und dem Kohlefasermaterial möglich.

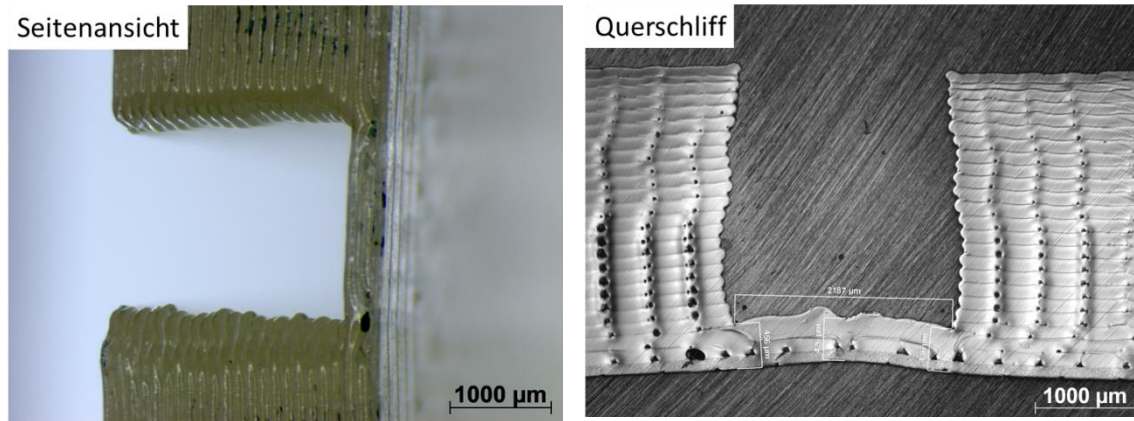


Abbildung 78: Mikroskopbilder einer unbelasteten Filmgelenkprobe, (links) Seitenansicht mit erkennbarem additiven Schichtaufbau, (rechts) Querschliff mit sichtbaren Hohlräumen zwischen den extrudierten PA6-Fasern.

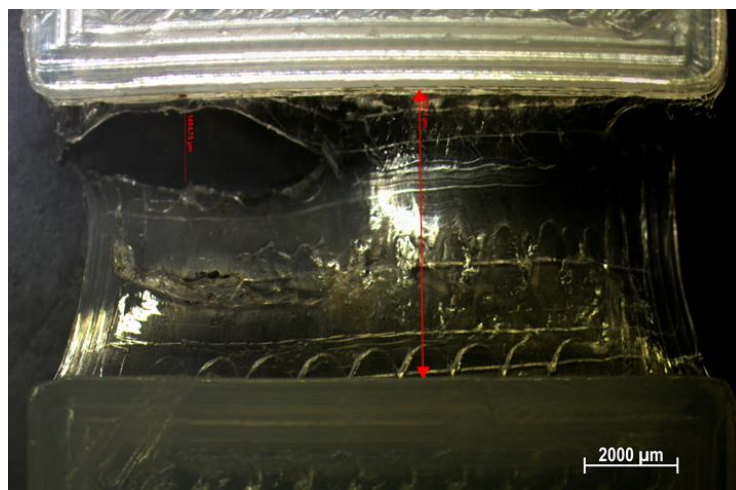


Abbildung 79: Gezogene Filmgelenkprobe, Dehnung des Filmgelenkes von 2 mm auf 6 mm (200% Dehnung) mit sichtbarem Anriss.

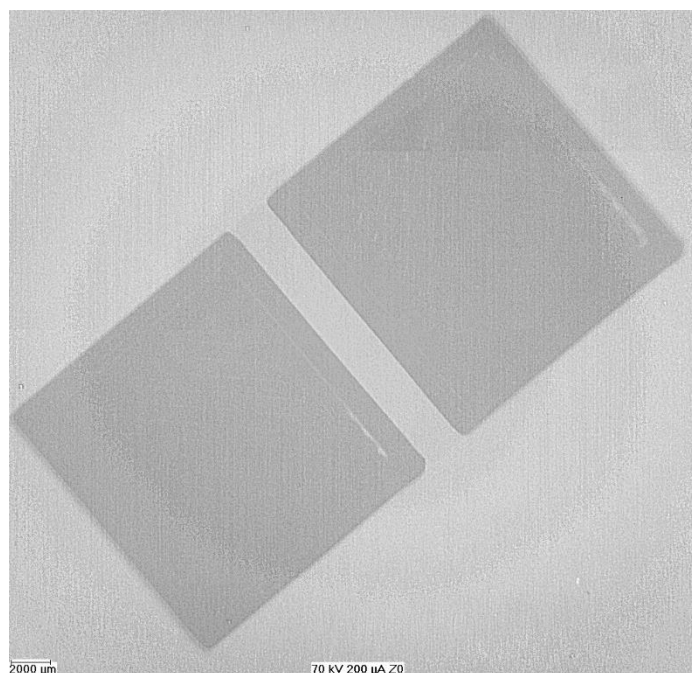


Abbildung 80: Röntgenaufnahme einer Filmgelenkprobe mit C-Faserverstärkung

7 Klebstoffauswahl und Festigkeit der Klebeverbindung

Die Verbindung des additiv gefertigten Gelenkknotens mit den schubsteifen Plattenelementen erfolgt mittels Kleben. Andere Fügetechniken wie Schrauben oder Nieten bringen grundsätzliche Nachteile mit sich. Bei Schraub- und Nietverbindungen werden die Gelenkknoten und die Plattenelemente durch Bohrungen geschwächt, die Krafteinleitung erfolgt sehr konzentriert. Das Fügen durch Schweißen ist ebenfalls ungeeignet, da der thermoplastische Kunststoff PA6 mit andersartigen Werkstoffen verbunden werden soll. Klebeverbindungen dagegen können zwischen sehr unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt werden, wenn ein für die Materialpaarung passendes Klebstoffsystem gewählt wird. Wegen der in der Regel geringeren Klebstofffestigkeit im Vergleich zur Festigkeit der Fügeteile, sind größere Klebeflächen erforderlich, die durch eine Überlappung der Fügeteile erreicht werden kann. Die Gestaltung der Klebefläche, die Steifigkeit der Klebpartner und der Klebeschicht beeinflussen dabei die maximal übertragbare Kraft. Konstruktiv sollten Schäl- und Spaltbelastungen der Klebefuge vermieden werden, weil dann die Beanspruchung konzentriert auf einer Linie wirkt statt gleichmäßig verteilt auf einer Fläche. Die für die Klebefuge ungünstigste Belastungssituation, das Schälen, kann durch die Versteifung der Klebelasche mit Verstärkungsfasern vermieden werden. Erst dann gilt der prinzipielle Grundsatz, dass eine Vergrößerung der Klebefläche auch die übertragbare Kraft vergrößert.

7.1 Kleben von Polyamid 6

Für die Verklebung von PA 6 mit anderen Werkstoffen können prinzipiell verschiedene Klebstoffsysteme angewendet werden, wobei die Klebfähigkeit von PA 6 mit anderen Materialien als schwierig einzuschätzen ist [Krü12]. Grundsätzlich beruht das Fügeverfahren des Klebens auf dem Prinzip der Oberflächenhaftung (Adhäsion) und der Eigenfestigkeit (Kohäsion) des Klebstoffes. Der Klebstoff soll das Gefüge der zu verbindenden Körper dabei nicht wesentlich ändern. Es wird zwischen chemisch härtenden, physikalisch abbindenden und Klebstoffen mit kombinierten Verfestigungsmechanismen sowie Klebebändern unterschieden. Die folgende Tabelle 17 gibt einen Überblick über Klebstoffsysteme, die speziell für PA 6 geeignet sind.

Tabelle 17: Empfehlungen für das Kleben von Polyamid nach Angaben eines Kunststoffherstellers (Kern GmbH [KER18])

Lösemittelklebstoff	
Klebstoff:	Methansäure (allgemein als Ameisensäure bezeichnet)
Anwendung:	PA 6 gegen PA 6
Arbeitsaufwand:	Klebeflächen reinigen, trocknen und ablüften lassen. Die Ameisensäure vor der Verarbeitung mit 5 – 10 % Polyamid-Granulat eindicken. Beide Flächen mit konzentrierter Ameisensäure einstreichen. Sicherheitsvorkehrungen notwendig, weil Methansäure ätzend ist.
2-Komponenten-Klebstoff	
Klebstoff:	modifiziertes Epoxidharz
Anwendung:	PA 6 gegen andere Materialien, bevorzugt große Flächen
Arbeitsaufwand:	Klebeflächen trocknen, anrauen, mit Aceton entstauben und ablüften lassen. Haftgrundierung oder Beizen mit Chromschwefelsäure erhöht die Klebekraft.
1-Komponenten-Klebstoff	
Klebstoff:	Cyanacrylat, Sekundenkleber
Anwendung:	PA 6 gegen andere Materialien, bevorzugt kleine Flächen
Arbeitsaufwand:	Zur Haftverbesserung Oberflächen anrauen. Reinigen und Entfetten der Klebeflächen mit Aceton. Trocknen und ablüften lassen.
1-Komponenten-Klebstoff	
Klebstoff:	modifiziertes Polyurethan
Anwendung:	PA 6 gegen andere Materialien, dauernd elastische Verbindung großer Flächen, gute Dichtwirkung auch bei ungleichmäßigen Fugen.
Arbeitsaufwand:	Flächen anrauen, den Staub mit Aceton entfernen. Primer erhöht die Klebekraft.

7.2 Klebstoffauswahl

Bei der Auswahl eines geeigneten Klebstoffsystems im Bauwesen, sollte berücksichtigt werden, dass die Maßtoleranzen im Millimeterbereich liegen und durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügeteile große thermische Dehnungen in der Klebefuge entstehen können. Unterscheidet man in aushärtende spröde und elastisch verformbare Klebstoffe, so haben die aushärtenden einen entscheidenden Nachteil: Die Kerbwirkung am Überlappungsrand der Klebefuge führt zu Spannungskonzentrationen, die nicht durch Verformung abgebaut werden können. Treten zusätzlich unterschiedliche Wärmedehnungen auf, so kann es durch die thermisch induzierten Spannungen zum Bruch der Klebeverbindung kommen [Ras12]. Bei verformbaren Klebstoffen können die Spannungsspitzen durch Verformung abgebaut werden, gleichzeitig ist deren Steifigkeit deutlich geringer.

Die Auswahl an verschiedenen Klebstoffen und Klebstoffherstellern auf dem Markt ist sehr groß. Bei der Klebstoffauswahl wurden Gespräche mit dem Klebstoffhersteller 3M geführt, welcher eine

sehr große Auswahl an Klebstoffsystemen für den Einsatz im Bauwesen und der Industrie anbietet. Aufgrund der Problematik, dass Polyamid schwierig mit anderen Werkstoffen zu kleben ist und der Gelenkknoten universell mit verschiedenen Werkstoffen verbunden werden soll, wurde eine Vorauswahl in Richtung folgender elastischer Haftklebstoffe getroffen:

- Doppelseitige Haftklebebander
- Silan-Hybridklebstoffe

Der entscheidende Vorteil von Haftklebstoffen gegenüber anderen Klebstoffen ist die einfache Anwendung. Bei den reaktiven Klebstoffen sind Misch- und Dosierprozesse, bei warmhärtenden Klebstoffen ist der Eintrag von Wärme, bei strahlenvernetzenden Klebstoffen ist die Behandlung mit Strahlen (sichtbares und unsichtbares Spektrum), bei lösemittelhaltigen und wässrig dispergierten Klebstoffen ist die Entfernung der Trägerflüssigkeit und bei Hotmelts und wärmeaktivierbaren Klebstofffilmen ist die Zu- und Abführung der Wärme notwendig. Außerdem müssen die meisten Klebeverbindungen kurzzeitig oder über mehrere Stunden fixiert werden. [Krü12]

7.2.1 Doppelseitige Haftklebebander

Doppelseitige Haftklebebander sind vorgefertigte Klebstoffsysteme. Eine ausreichende Anfangsklebkraft wird durch kurzzeitiges Anpressen (wenige Sekunden) nach dem Fügen der Teile erreicht. Ein wichtiger Vorteil ist die sehr gleichmäßige Schichtdicke in der Klebefuge, die unabhängig vom Auftrag und der Verarbeitung des Klebstoffes ist. Durch die Auswahl der Klebebanddicke kann die gewünschte Dicke der Klebeschicht genau eingehalten werden. Haftklebebander haben sich in der Bau- und Automobilindustrie als witterungsbeständiges Material für Abdichtungen bewährt. Doppelseitige Klebebander gehören in Solarmodulen zum Stand der Technik. Von den Haftklebebandern wird eine 25-Jährige Lebensdauer gefordert, d.h. sie müssen der UV-Strahlung, den Temperaturwechselbeanspruchungen und den Feuchtebelastungen standhalten [Krü12]. Die Anwendung von Haftklebstoffen ist eine saubere Verbindungstechnik, da ein aufwändiges Reinigen von Misch-, Dosier- oder Auftragsgeräten sowie die Entsorgung von Material- und Lösemittelresten entfällt. Außerdem sind keine besonderen Schutzmaßnahmen bei der Verarbeitung notwendig.

Das viskoelastische Verhalten der Klebebander bewirkt beim Verbinden von Materialien mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten einen Spannungsausgleich. Spannungsspitzen werden durch Verformung ausgeglichen. Bei steifen und spröden reaktiven Klebstoffen können die Spannungsspitzen trotz nachgewiesener größerer Klebefestigkeiten zum Versagen der Klebeverbindung führen. Die viskoelastischen Eigenschaften bewirken aber auch eine

begrenzte Aufnahme von Scherkräften. Unter statischer Langzeitbelastung können unzulässig hohe tangentielle Relativbewegungen auftreten.

Gemäß Produktangaben des Klebebandherstellers 3M können sich deren viskoelastischen VHM-Klebebänder aus geschlossenzelligem Acrylatklebstoff bis zu 50% ihrer Dicke dehnen ohne zu reißen oder sich abzulösen und in die zu klebende Oberfläche einfließen. Damit sind sie klassischen Schaumstoff-Klebebändern überlegen. Abbildung 81 zeigt das Wirkungsprinzip im Vergleich zu Schaumstoff-Klebebändern.

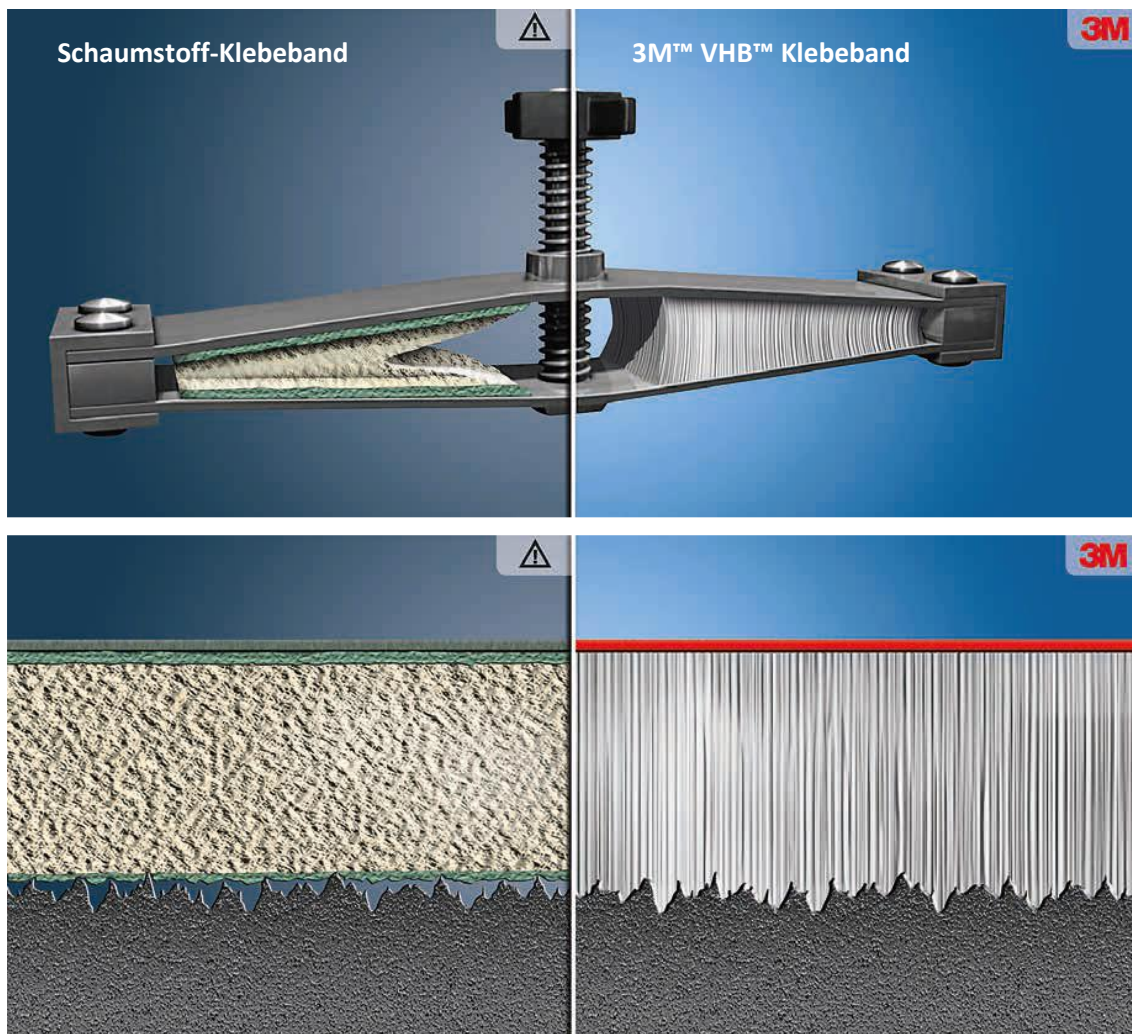


Abbildung 81: Vergleich des Wirkungsprinzips von viskoelastischen Haftklebebänder aus geschlossenzelligem Acrylat-Klebstoff (3M™ VHB™ Klebeband) gegenüber herkömmlichen Schaumstoff-Klebebändern. Bildquelle: <http://multimedia.3m.com/mws/media/9309380/3m-vhb-klebeband-eine-starke-verbinding-brochure.pdf>

7.2.2 Silan-Hybridklebstoffe

Silan-Hybridssysteme weisen auf vielen Untergründen eine primerlose Haftung auf, sodass außer der Reinigung der Oberflächen keine weitere Vorbehandlung notwendig ist. Dem Klebstoff sind bereits Haftvermittlersubstanzen (Silane) beigemischt, was zu einer Art eingebauten Primer führt

[Prö13]. Die hohe UV-Stabilität und hohe Tieftemperaturelastizität sind weitere Vorteile, welche den Klebstoff für Anwendungen im Außenbereich prädestinieren (Keine Haftung zeigen Silan-Hybridklebstoffe auf Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Polyoxymethylen (POM) [Prö13]. Die allgemeinen Stärken und Schwächen von Silan-Hybridklebstoffen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Allgemeines Eigenschaftsprofil von Silan-Hybridklebstoffen nach [Prö13]

Stärken	Schwächen
Gute Witterungs- und UV-Stabilität	Hitzebeständigkeit bei Dauertemperaturen
Sehr breites Haftungsspektrum ohne Primer	Weiterreißfestigkeit
Geringer Schrumpf beim Aushärten (< 5%)	Wasseraufnahme
Geruchsarmut beim Aushärten	Starke Quellung in manchen organischen Flüssigkeiten
Blasenfreie Aushärtung auch bei hoher Luftfeuchte	Durchhärtung in tiefen Schichten langsam
Elektrische Isolationswirkung	Abrasionsempfindlichkeit
Überlackierbarkeit mit Dispersionen	Schmutzaufnahme bei sehr weichen Produkten
Überlackierbarkeit mit lösemittelhaltigen Lacken	Unbeständigkeit gegen Säuren
Vergleichsweise geringe Moduländerung ($\leq 25\%$ zwischen -40 und $+80^{\circ}\text{C}$)	Teilweise kurze Hautbildungszeiten bei gewissen Formulierungen
Sehr hohe Flexibilität auch bei tiefen Temperaturen	Kriechen mancher Formulierungen unter Last

7.3 Bestimmung der Zugscherfestigkeit

Drei verschiedene Klebstoffe wurden ausgewählt um die Festigkeit der Klebeverbindung zwischen dem 3D-gedruckten Werkstoff PA6 bzw. PA6 mit Faserverstärkung und drei verschiedenen Plattenwerkstoffen, Plexiglas, Holz und Aluminium, zu testen:

- **3M 760 Hybrid Kleb- und Dichtmasse:** Einkomponenten-STP-Klebstoff, silanmodifiziertes Polymer, elastisch, UV-beständig, hitzebeständig bis 90°C , für Innen und Außenbereich (Datenblatt im Anhang A.6)
- **3M VHB GPH-060GF:** Doppelseitiges Klebeband für Multimaterial-Verbindungen: 100% geschlossenzelliger Acrylatklebstoff, hitzebeständig bis 150°C , für Innen und Außenbereich (Datenblatt im Anhang A.7)
- **Tacky Spezial (Fa. Efco):** Doppelseitiges Klebeband für Bastelbedarf, keine Produktbeschreibung

Die standardisierte Probenform für die Bestimmung der Verbundfestigkeit im Zugscherversuch aus DIN EN 1465 [DIN1465] wurde abgewandelt. Anstatt einer Klebefläche für die Verbindung der

Fügepartner mit den Abmaßen 12,5 mm x 25 mm, wurde eine symmetrische Probengeometrie mit zwei Klebeflächen entworfen. Diese Probenform, dargestellt in Abbildung 82, ist näher an der Geometrie, Steifigkeit und Belastung der Klebeverbindung im Gelenkknoten, sodass eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse als mit der genormten Probengeometrie erwartet wird. Diese Probenform wird im Weiteren als Doppelscherzugprobe bezeichnet.

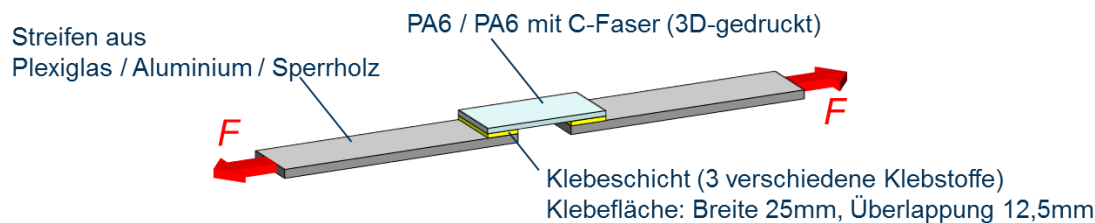


Abbildung 82: Symmetrische Probenform für Bestimmung der Scherzugfestigkeit von Klebeverbindungen zwischen PA 6/ PA 6 + C-Faser und Plattenwerkstoffen. Bezeichnung als Doppelscherzugprobe

Insgesamt wurden in 90 Versuchen $3 \times 3 \times 2 = 18$ verschiedene Materialkombinationen (3 Plattenwerkstoffe, 3 Klebstoffe, additiv gefertigte Streifen aus PA 6 ohne/mit C-Faserverstärkung) mit jeweils fünf Proben getestet. Die Durchführung der Zugscherversuche erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1465 [DIN1465]. Die Laststeigerung erfolgte kraftgesteuert mit 5 N/s, sodass nach ca. 60 s das Probenversagen eintritt. Bei den Messwerten handelt es sich also um die Kurzzeitfestigkeit der Klebeverbindung, bei Langzeitbelastungen sind geringere Festigkeitswerte zu erwarten. Die gemessenen Zugscherfestigkeiten sind in den Box-Whisker Diagrammen in Abbildung 83 bis Abbildung 85 dargestellt. Die höchsten Klebefestigkeiten von etwa einem 1 MPa wurden mit der 3M 760 Hybrid Kleb- und Dichtmasse bei C-faserverstärktem PA 6 erreicht. Der STP-Klebstoff besitzt zugleich die größte Steifigkeit der drei getesteten Klebstoffe. Das einfache doppelseitige Klebeband „Tacky Spezial“ weist unabhängig von der Kombination der Fügepartner eine Festigkeit von etwa 0,6 MPa auf. Das Versagen trat immer nach großer Verformung durch viskoses Fließen in der Klebefuge auf, weshalb das einfache doppelseitige Klebeband nicht für Langzeitbelastungen empfohlen werden kann. Das doppelseitige Industrieklebeband 3M VHB GPH-060GF zeigte im Experiment zwar keine höhere Festigkeit, jedoch eine höhere Anfangssteifigkeit und eine geringere Kriechneigung. Die Steifigkeitsunterschiede bei Verwendung der Klebstoffe spiegeln sich auch im Anstieg der Kraft-Weg-Kurven in Abbildung 88 bis Abbildung 90 wieder.

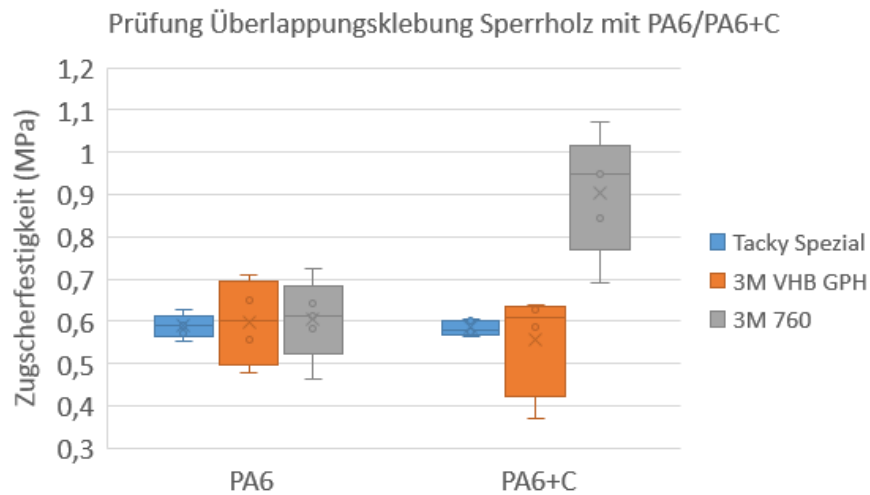


Abbildung 83: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Sperrholz und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe

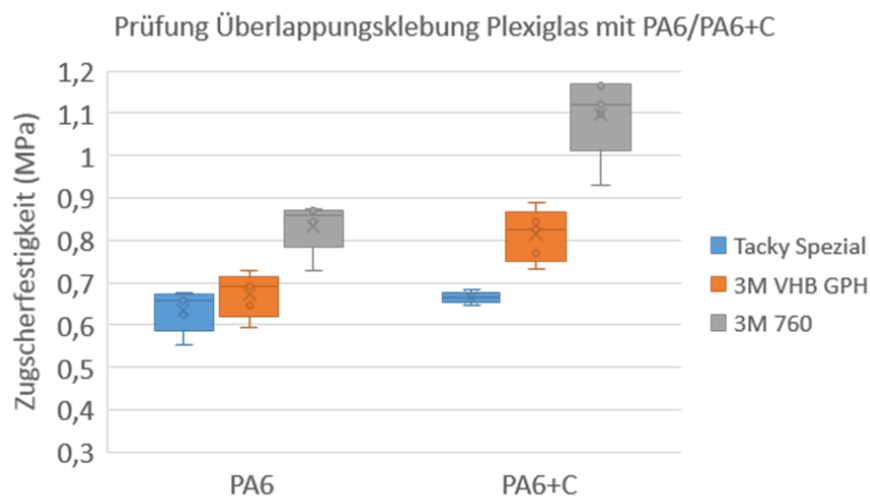


Abbildung 84: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Plexiglas und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe

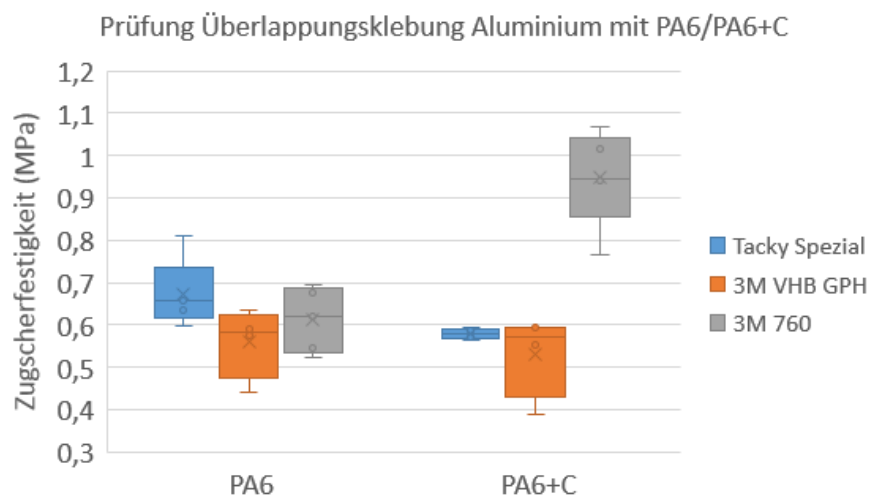


Abbildung 85: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Aluminium und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe

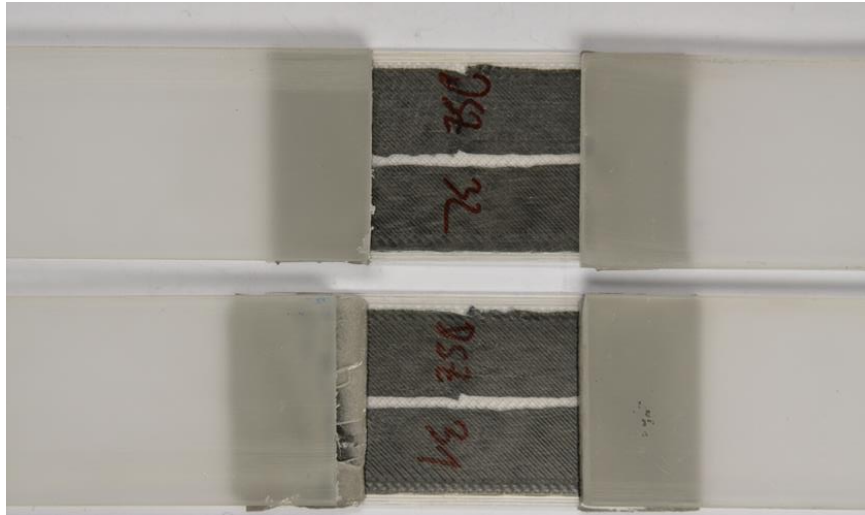


Abbildung 86: Versagen der Klebefuge durch Dekohäsion in der Klebeschicht des doppelseitigen Klebebandes 3M VHB GPH-060GF. Verbund von Plexiglas mit C-Faserverstärktem PA 6

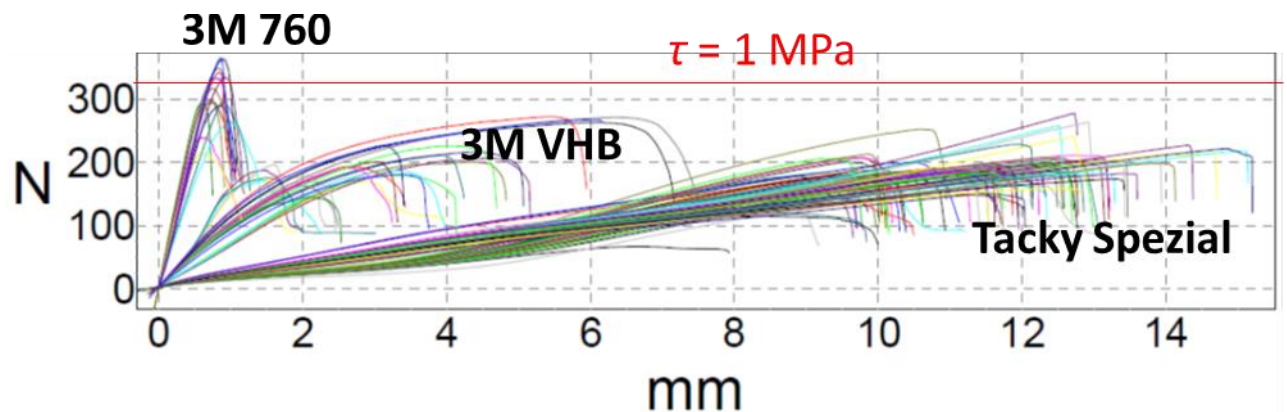


Abbildung 87: Alle gemessenen Kraft-Weg-Kurven bis zum Versagen im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe

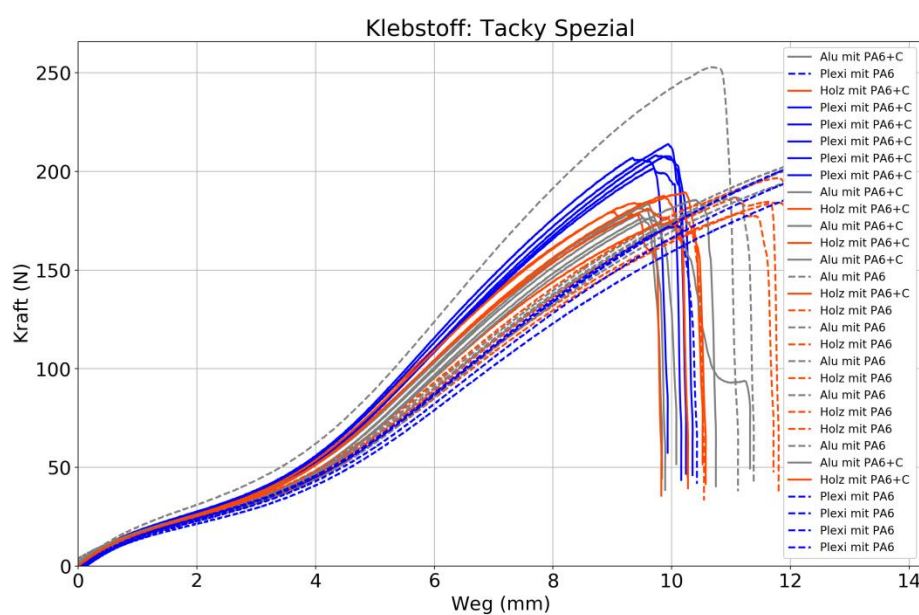


Abbildung 88: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: Tacky Spezial

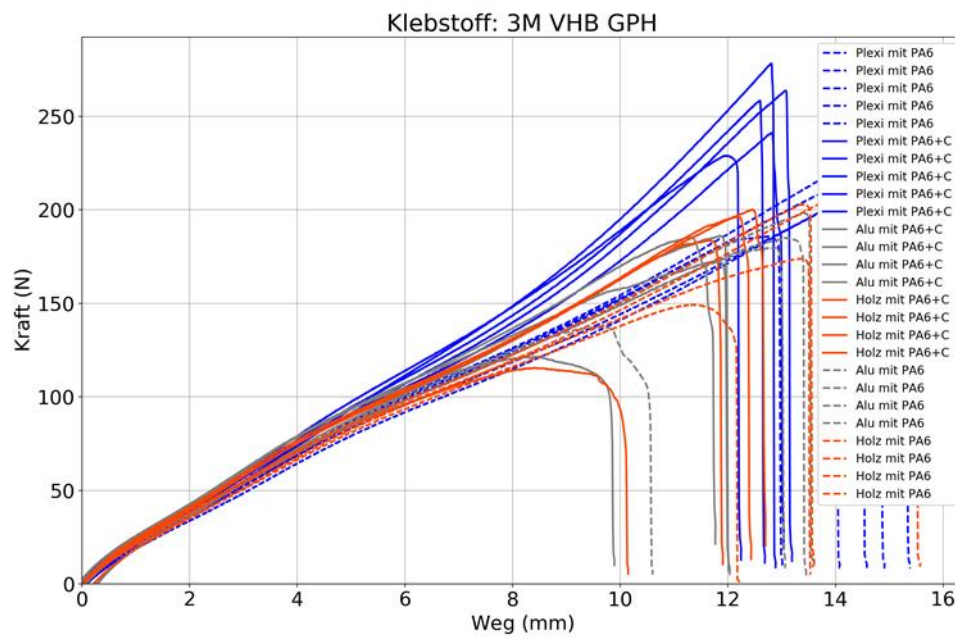


Abbildung 89: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: 3M VHB GPH

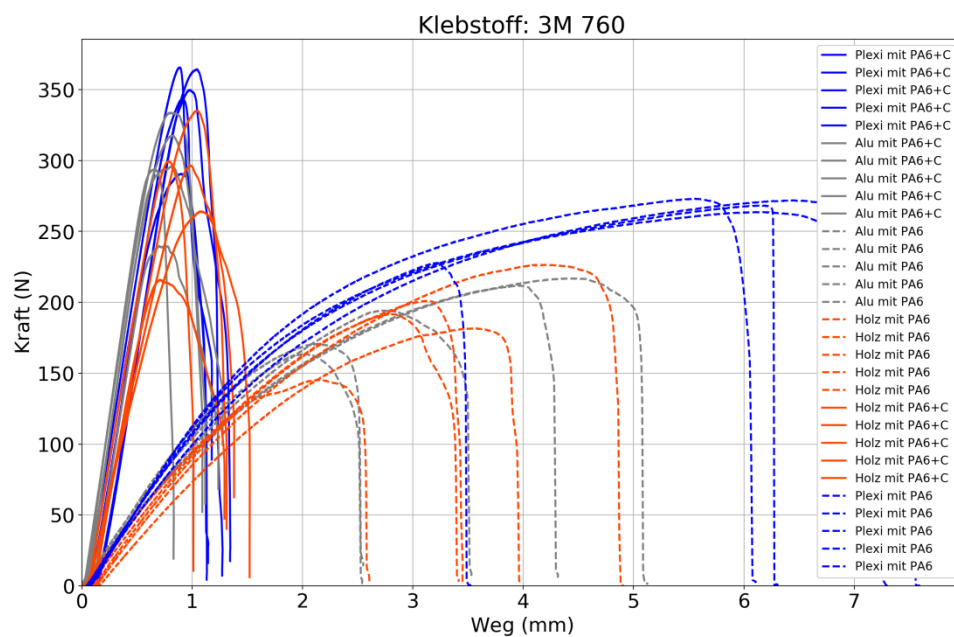


Abbildung 90: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: 3M 760

8 Herstellung der faserverstärkten 3D-gedruckten Gelenkknoten

Im Laufe des Projektzeitraumes wurde 13 verschiedene parametrische Geometrievarianten für einen faserverstärkten Gelenkknoten mit der CAD-Software Autodesk Inventor® erstellt, das jeweilige CAD-Modell in Form einer STL-Datei in die 3D-Druckersoftware „Eiger“ eingelesen, verschiedene Möglichkeiten des Schichtaufbaus mit Faserverstärkung getestet und Probedrucke mit dem 3D-Drucker Markt Two durchgeführt. Das jeweilige CAD-Modell, exportiert als STEP-Datei, dient auch zum Einlesen der Knotengeometrie in die verwendete FEM-Software ANSYS.

Die bisher letzte Variante des Gelenkknotens trägt die Bezeichnung „Gelenk 13“. Diese Designvariante wurde auch für den Bau von Demonstratoren verwendet. Die nachfolgende Beschreibung beschränkt sich auf den optimierten Gelenkpunkt mit der Bezeichnung „Gelenk 13“.

8.1 Optimierte Knotendesign

Die Geometrie des Gelenkpunktes wurde hinsichtlich dreier Gesichtspunkte optimiert:

- Geteilte Klebefläche zur Verhinderung der Schälwirkung beim Falten des Knotens
- Versteifung der sechs Klebelaschen durch C-Faserverstärkung zur Verhinderung von Kriechvorgängen in der Klebelasche sowie Vermeidung der Schälwirkung bei Biegebeanspruchung der Klebelasche
- Verbreiterter Gelenkspalt zur Verringerung der Biegebeanspruchung im Filmgelenk.

Das „Gelenk 13“ wurde für eine kurzzeitige Zugbelastung von 100 N ausgelegt (siehe Abschnitt 9.7 und Kapitel 10) und besitzt folgende Geometrieparameter:

- Außendurchmesser 90 mm
- Durchmesser Knotenkörper 40 mm
- Schichthöhe 0,125 mm
- Spaltbreite Filmgelenk 2 mm
- Höhe Filmgelenk 0,375 mm
- Höhe Klebelasche 0,625 mm
- Gesamthöhe 4,375 mm

8.2 Schichtaufbau und 3D-Druck

Die folgenden Bilder zeigen den Verlauf der Kunststoffstränge (in weiß) und der Faserverstärkung im 3D-Druckmodell. Es wurde eine konzentrische C-Faserverstärkung in Layer 2 und 4 von insgesamt 35 Layern bei einer Schichtstärke von 0,125 mm verwendet. Die Wandstärke beträgt vier umlaufende Stränge, die eine Ausdehnung von 1,6 mm haben.

Bisher wurde das Gelenk 13 insgesamt 34-mal gedruckt. Die Größe im Bauraum beträgt 90mmx90mmx4,4mm. Die Zeit für das Drucken (ohne Vor- und Nacharbeit, reine Druckzeit) beträgt 1h 43min. Pro Gelenk werden 7,32 cm³ PA 6 und 1,07 cm³ C-Faser verwendet. Die reinen Materialkosten für den Druck betragen 5,61€ pro Knoten.

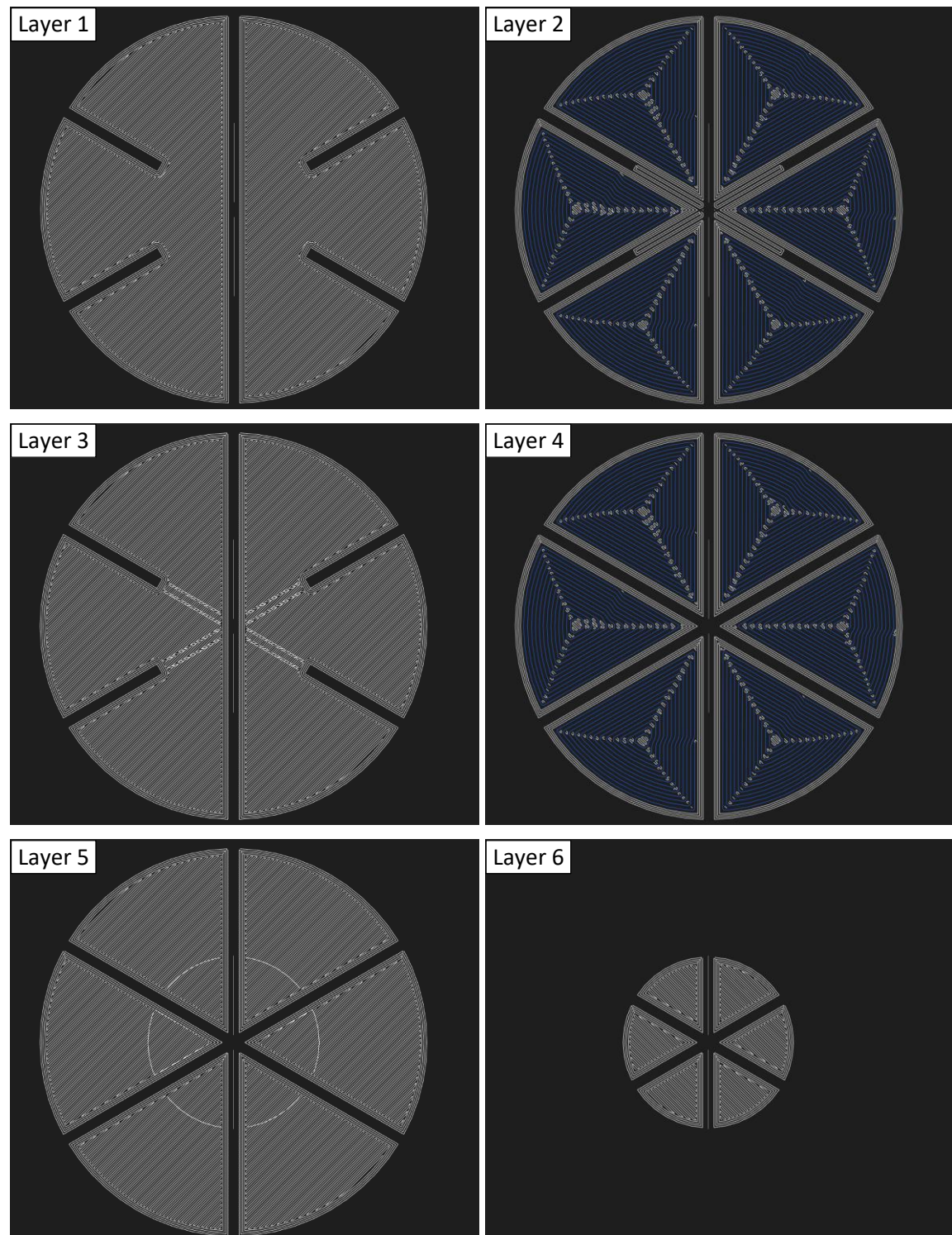


Abbildung 91: Aufbau der untersten 6 Layer von Gelenk 13, Bilder exportiert aus 3D-Druckersoftware Eiger. Die blauen Linien in Layer 2 und 4 zeigen die eingebettete Faser.

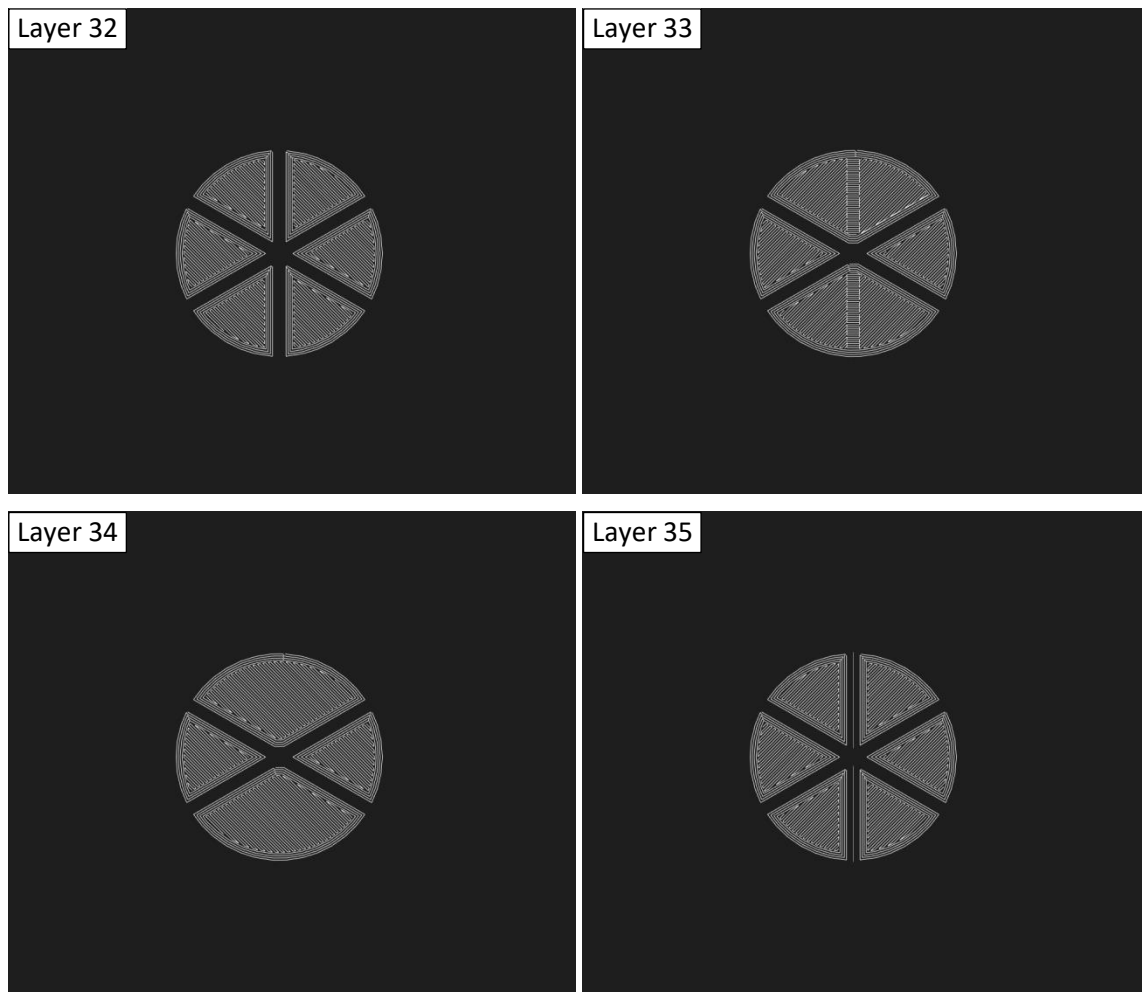


Abbildung 92: Aufbau der obersten 4 Layer von Gelenk 13, Bilder exportiert aus 3D-Druckersoftware Eiger.

8.3 Mikroskopische Analyse

Die Abbildung 93 zeigt als Gesamtansicht die fotografierte Oberseite und die Unterseite eines der 3D-gedruckten Knoten mit der Bezeichnung „Gelenk 13“.

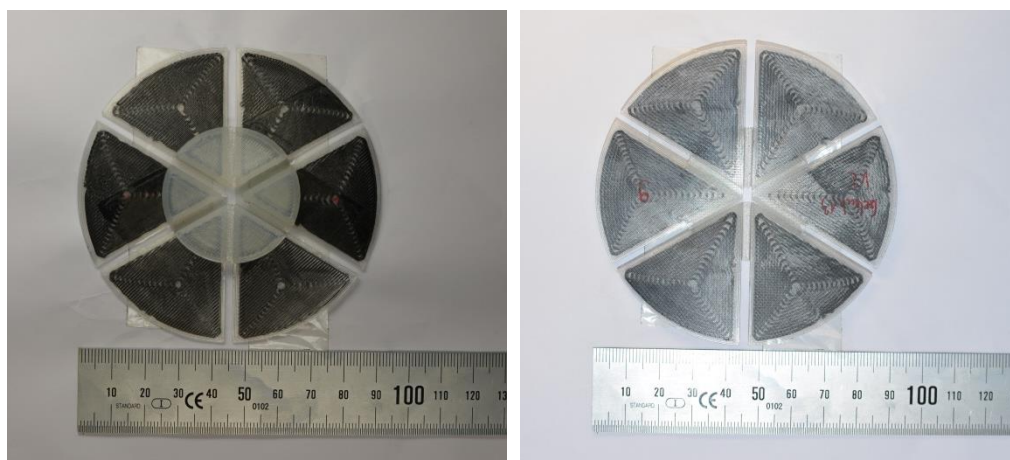


Abbildung 93: Gesamtansicht von Gelenk 13, (links) Oberseite, (rechts) Unterseite

Detailaufnahmen des selben Knotens unter dem Mikroskop zeigen die folgenden sechs Bilder in Abbildung 94 bis Abbildung 96. Sie bezeugen die gute Druckqualität des untersuchten Gelenkknotens. Jedoch schwankte die Druckqualität zwischen den einzelnen Druckjobs. Die Neukalibrierung der Höhe des Druckbettes sowie der Kunststoff- und der Faserdüse schaffte meist eine Verbesserung. Zusätzliche Schwankungen der Druckqualität werden vermutlich durch Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Druckraum hervorgerufen.

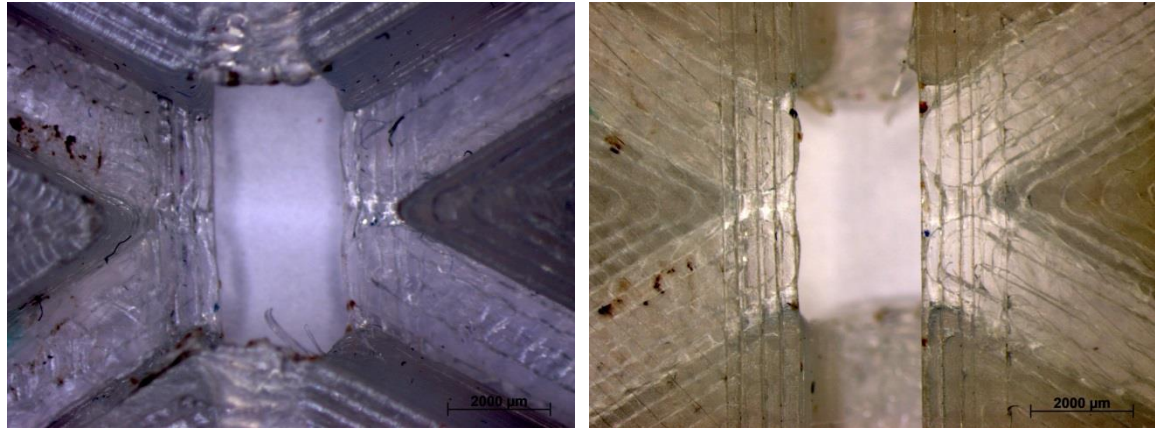


Abbildung 94: Mitte des Gelenkknotens, Ansicht von oben (links) und unten (rechts)

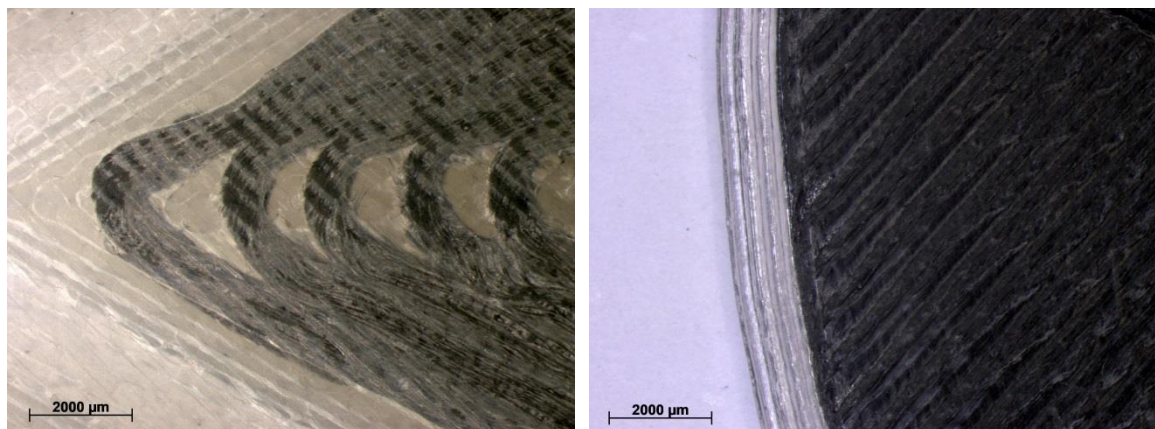


Abbildung 95: Blick auf Spitze eines Kuchenstücks von unten (links) und äußeres Rand der Klebefläche

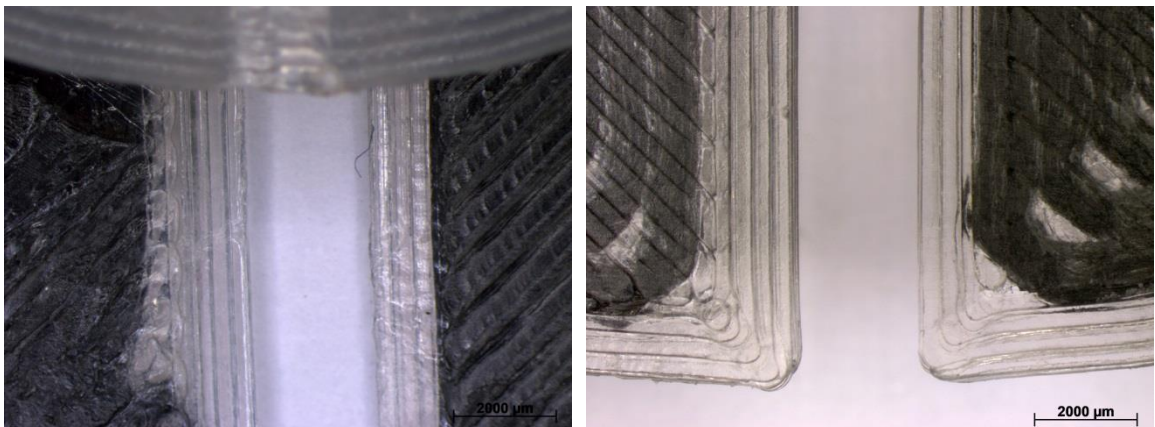


Abbildung 96: Zoom in den Gelenkspalt am Übergang Klebelasche/Knotenkörper (links) und Gelenkspalt am äußeren Rand der Klebefläche

8.4 CT-Analyse

Computertomographie (CT) -Untersuchungen wurden extern bei der Firma *t-exact* durchgeführt. Die nachfolgenden Bilder zeigen das Ergebnis einer Lunkeranalyse. Die Lufteinschlüsse im Bauteil sind farblich hervorgehoben. Umso größer das zusammenhängende Luftvolumen, desto dunkler werden diese dargestellt. Einzelne oder sehr kleine Lufteinschlüsse werden grün dargestellt, großvolumige Lufteinschlüsse werden rot dargestellt. Durch den Zusammenschluss mehrerer kleiner Lufteinschlüsse entstehen die größeren rot eingefärbten Volumenbereiche. Das Volumen der Poren nimmt also von grün (kleine Poren) nach rot (große, zusammenhängende Poren) zu. Zwischen benachbarten Fasern einer Schicht sind lange Hohlräume erkennbar, der Materialzusammenhalt in der Schicht senkrecht zur Faser ist dort gestört. Die Kraftübertragung senkrecht zur C-Faser muss das extrudierte Nylonmaterial übernehmen. Das erklärt, warum im Zugversuch senkrecht zur Faser eine geringere Festigkeit gemessen wurde als bei Zugproben ohne Faserverstärkung.

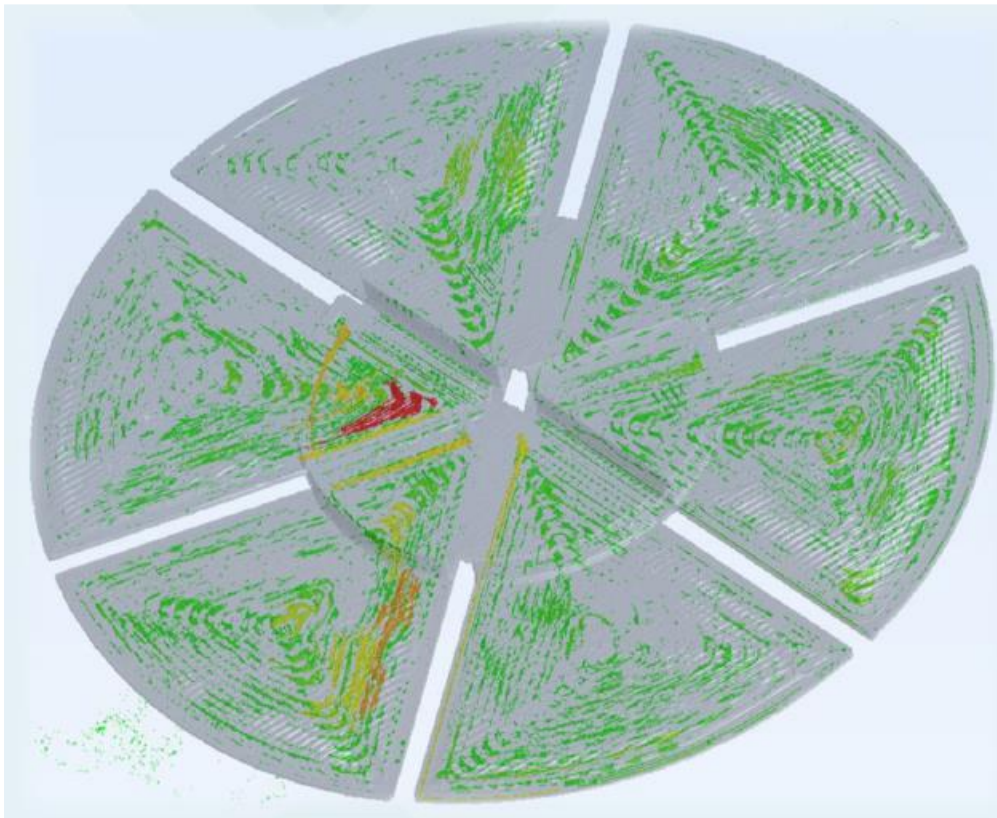


Abbildung 97: Bild des CT- gescannten Gelenkknoten 13 (Nummer 9) mit Lunkeranalyse

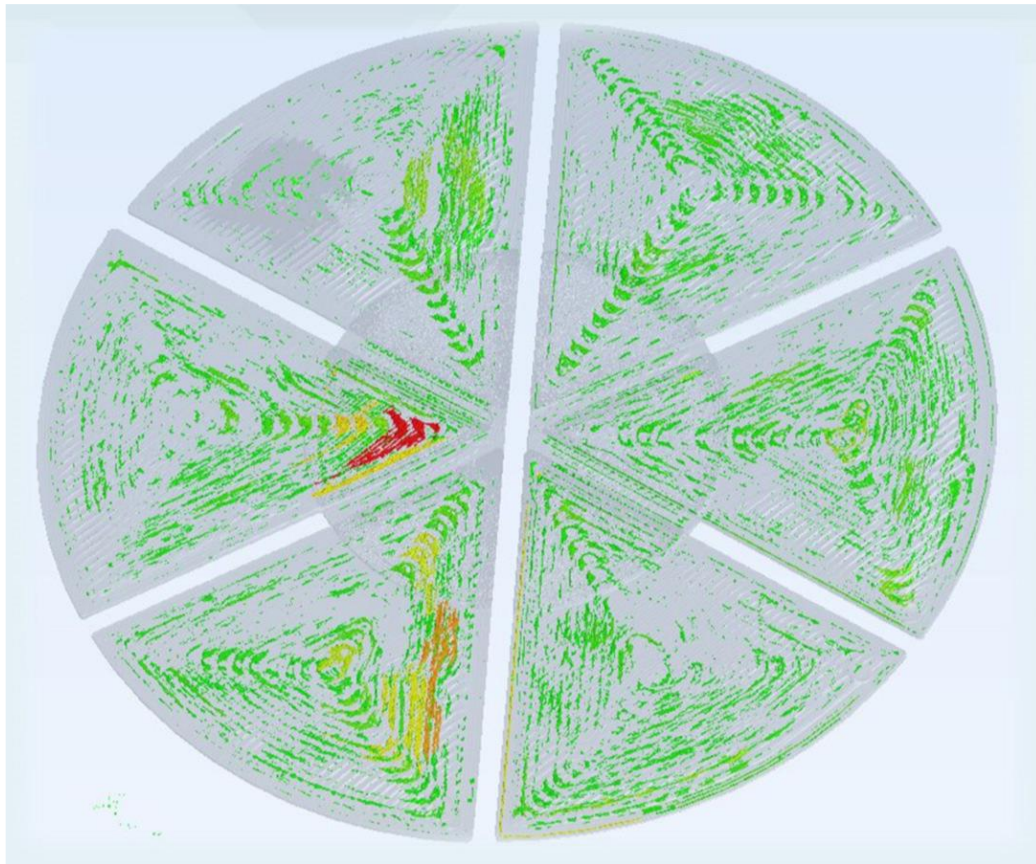


Abbildung 98: CT-Rekonstruktion der untersten 5 Layer (Höhe 0,625 mm) mit C-Faserverstärkung in Layer 2 und 4. Die Poren verlaufen parallel zur Richtung der Verstärkungsfasern.

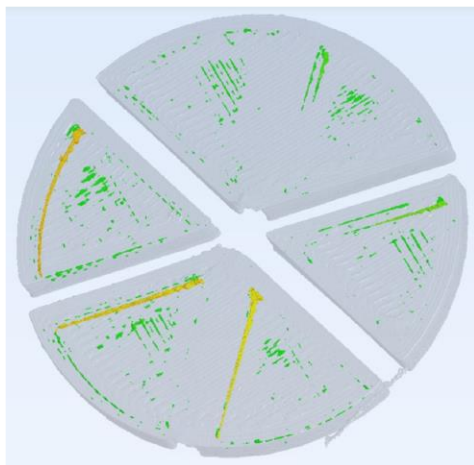


Abbildung 99: CT-Rekonstruktion der obersten 30 Layer (Höhe 3,75 mm) ohne Faserverstärkung. Lange Poren verlaufen parallel zum Bauteilrand zwischen der konzentrischen Randschicht (4 extrudierte Stränge) und der inneren dichten gerichteten Strangfüllung. Im Vergleich zum C-Faserverstärkten Bereich sind weniger und kleinere Poren sichtbar.

9 Modellierung und Simulation

Die numerische Simulation von verschiedenen Faltungs- bzw. Konstruktionsvarianten mit additiv gefertigten Werkstoffen bietet die Möglichkeit, das Verformungs- und Tragverhalten vorherzusagen und zu optimieren. Dadurch können aufwändige Versuche aller Material- und Konstruktionsvarianten vermieden werden. Für die Simulation wird die Finite Element Methode verwendet. Während die Geometrie von Proben oder Bauteilen aus CAD-Modellen sehr einfach in FEM-Software eingelesen werden kann, bereitet die Definition des Materialverhaltens sehr viel größeren Aufwand. Kunststoffe sind im Gegensatz zu anderen Konstruktionswerkstoffen aufgrund ihres ausgeprägten nichtlinearen Werkstoffverhaltens weitaus schwieriger berechenbar [SSK11]. Materialmodelle für Kunststoffe beschreiben den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur. Sie sind abhängig von den jeweiligen werkstoff- und prozessspezifischen Parametern. Die bei Metallen häufig übliche Vorgehensweise linear-elastisches Werkstoffverhalten für die Berechnung anzuwenden, ist bei Kunststoffen nicht mehr ausreichend. Zusätzlich zum nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen im Werkstoff muss auch die Problematik großer Deformationen, das heißt die Änderung der Bauteilquerschnitte und Lastangriffspunkte berücksichtigt werden [SSK11]. Das bedeutet, die Materialkennwerte können nicht einfach wie bei einem Stahlwerkstoff aus einem Datenblatt entnommen werden, sondern hängen von mehreren Einflussfaktoren ab. Für Kunststoffe gibt es im Allgemeinen eine Vielzahl an verschiedenen linearen und nichtlinearen Materialmodellen, deren Parameter aufwändig anhand von geeigneten Experimenten bestimmt werden müssen [SSK11].

In diesem Forschungsvorhaben werden Materialproben und Bauteile aus dem teilkristallinen thermoplastischen Kunststoff PA 6 sowie Verbundwerkstoffe aus PA6 verstärkt mit Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfaser additiv mit Hilfe des 3D-Druckers Mark Two von Markforged hergestellt. Außer den Elastizitätsmoduln und den Zugfestigkeiten aus dem Datenblatt von Markforged liegen keine belastbaren Materialdaten vor. Daher wird das Ziel verfolgt, Materialparameter anhand von Experimenten zu bestimmen und die Prognosefähigkeit der Modelle mit Hilfe numerischer Simulationen von Experimenten mit den identifizierten Modellparametern zu verifizieren. Anschließend können die Materialmodelle für die Bemessung des einzelnen Gelenkes und der Gesamtkonstruktion verwendet werden (Abbildung 100). Aufgrund der zunehmenden Komplexität bezogen auf die anisotropen Eigenschaften (unterschiedlicher Strangausrichtung in der Matrix sowie unterschiedliche Faserausrichtungen) ist es sinnvoll Ersatz-Kennwerte mit den jeweiligen Kennwerten aus den Versuchsergebnissen zu definieren. Das Organigramm Abbildung 101 beschreibt die Implementierung und Validierung eines Materialmodells in der FE-Simulation.

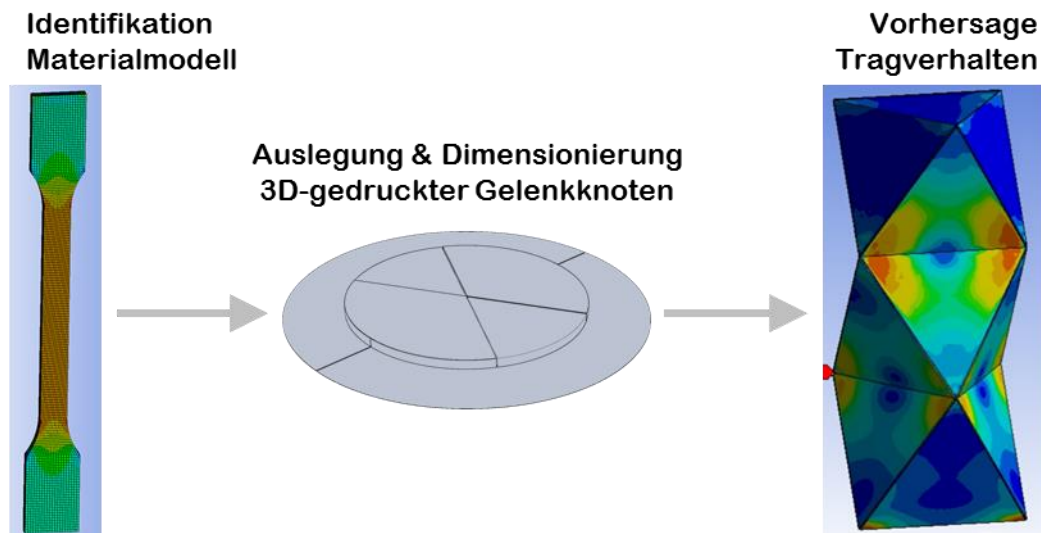


Abbildung 100: Finite Element Analyse – Überführung des Materialmodells

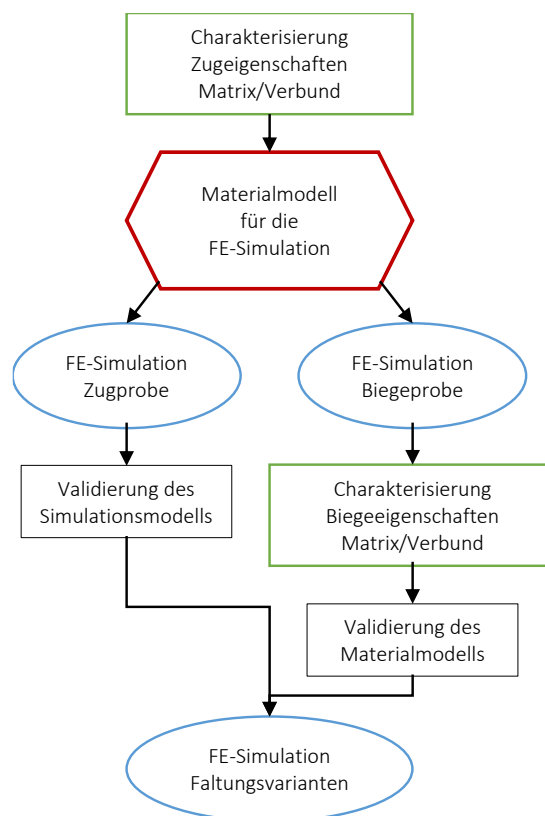


Abbildung 101: Ablauforganigramm der Implementierung und Validierung eines Materialmodells in der FE-Simulation

9.1 Viskoelastische Modellierung des zeitabhängigen Verhaltens von PA6

9.1.1 Rheologische Modelle

Polymerwerkstoffe zeigen gleichzeitig viskoses und elastisches Deformationsverhalten. Der zeit- und geschwindigkeitsabhängige Zusammenhang zwischen der Verformung eines Körpers und der sie verursachenden Spannung kann durch sogenannte rheologische Modelle beschrieben werden. Die drei idealisierten Grundeigenschaften Elastizität, Viskosität und Plastizität werden mit den mechanischen Grundmodellkörpern Feder, Dämpfer und Reibklotz beschrieben. Mehrere dieser Grundmodellkörper können durch Reihen- und Parallelschaltung zusammengesetzt sein um das komplexe reale Materialverhalten zu modellieren. Die folgende Betrachtung beschränkt sich auf rheologische Modelle für viskoelastische Festkörper. Das heißt, es werden nur Feder- und Dämpferelemente zusammengeschaltet und die Dehnungen sind begrenzt und reversibel, sie nähern sich für sehr lange Zeiträume dem Verhalten eines reinen elastischen Elementes an. Detaillierte Ausführungen zu viskoelastischen Modellen sind in einschlägiger Fachliteratur zu finden, zum Beispiel [PGL91, WR00]. Tabelle 19 listet die grundlegenden Modelle für viskoelastische Festkörper mit zunehmender Komplexität auf.

Beim einfachsten Modell, dem Kelvin-Voigt-Körper, sind Feder und Dämpfer parallel geschaltet. Die Eigenschaft der Feder ist durch den Parameter E gekennzeichnet, welcher dem Elastizitätsmodul bei extrem langsamer Belastung (Dämpfungskraft vernachlässigbar) entspricht. Die Eigenschaft des Dämpfers wird durch die dynamische Viskositätskonstante η charakterisiert. Das mechanische Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird durch die Differentialgleichung

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (9.1)$$

beschrieben. Auf einen spontanen Spannungssprung σ_0 reagiert das Modell mit der Dehnungsantwort

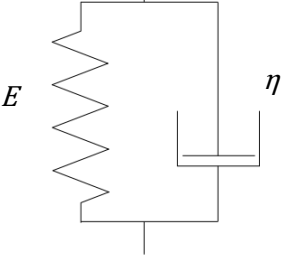
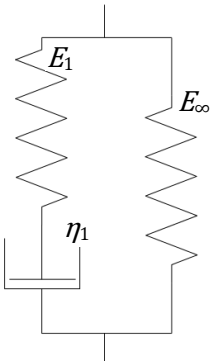
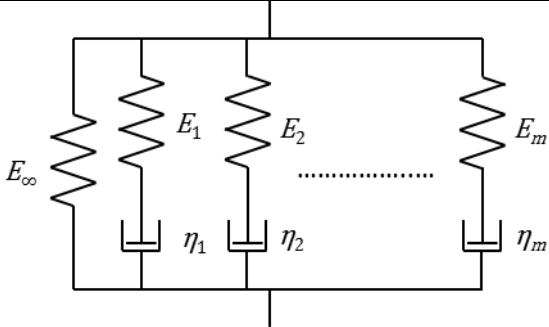
$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \quad (9.2)$$

Das Modell eignet sich prinzipiell um die zunehmende Dehnung beim Kriechen zu beschreiben, jedoch nicht um die Spannungsrelaxation bei konstanter Dehnung zu beschreiben (Spannung bleibt konstant).

Beim Zener-Körper (auch lineares Standardmodell eines Festkörpers) sind eine Feder E_∞ und ein Maxwell-Körper (Feder E_1 und Dämpfer η_1 in Reihe) parallel geschaltet. Im Vergleich zum Kelvin-Voigt-Modell kann es das grundlegende Verhalten viskoelastischer Materialien, Kriechen und Spannungsrelaxation abbilden. Die Differentialgleichung lautet:

$$\sigma + \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma} = E_\infty \cdot \varepsilon + \eta_1 \left(1 + \frac{E_\infty}{E_1} \right) \dot{\varepsilon} \quad (9.3)$$

Tabelle 19: Rheologische Modelle für viskoelastische Festkörper

Modellbezeichnung	Rheologisches Modell	Modellparameter
Kelvin-Voigt-Körper		E η
Zener-Körper		E_{∞} E_1 η_1
Maxwell-Wiechert-Modell (Prony-Reihe)		E_{∞} $E_1, E_2, \dots, E_m$ $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$

Wenn das viskoelastische Materialverhalten komplexer ist, dann ermöglicht das Maxwell-Wiechert-Modell, welches auch unter der Bezeichnung „Prony-Reihe“ [SBB06] bekannt ist, eine bessere Anpassung. Im Vergleich zum Zener-Modell kann mit Hilfe mehrerer parallel geschalteter Maxwell-Elemente (Feder und Dämpfer in Reihe), und damit einer größeren Anzahl von Modellparametern, die Zeitabhängigkeit des viskoelastischen Verhaltens zunehmend besser angepasst werden. Die Gesamtspannung setzt sich aus den Spannungsanteilen der einzelnen parallel geschalteten rheologischen Elemente zusammen:

$$\sigma = E_{\infty} \cdot \varepsilon + \sum_{\alpha=1}^m \sigma_{\alpha}. \quad (9.4)$$

Wenn in einem Relaxationsversuch plötzlich eine konstante Dehnung ε_0 aufgebracht wird, so nimmt die Spannung im Modell wie im realen Experiment infolge des viskosen Anteils mit der Zeit

ab. Der von der Belastungszeit abhängige Elastizitätsmodul wird durch eine Summe von Exponentialfunktionen approximiert [SBB06]:

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E(t) = E_\infty + \sum_{\alpha=1}^m E_\alpha e^{\frac{-t}{\tau_\alpha}}. \quad (9.5)$$

Diese sogenannte Prony-Reihe wird durch die charakteristischen Relaxationszeiten

$$\tau_\alpha = \frac{\eta_\alpha}{E_\alpha} \quad (9.6)$$

gekennzeichnet. Der Elastizitätsmodul zu Beginn einer plötzlichen Belastung wird als Ursprungmodul bezeichnet, er wird aus der Summe der einzelnen Federsteifigkeiten berechnet:

$$E_0 = E(t = 0) = E_\infty + \sum_{\alpha=1}^m E_\alpha. \quad (9.7)$$

Bei veränderlicher Spannung und Dehnung kann keine geschlossene Lösung mehr angegeben werden. Jedoch gelten für die zeitliche Änderung der Dehnung in den m einzelnen Maxwell-Elementen die Differentialgleichungen ($\alpha = 1 \dots m$)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_\alpha}{E_\alpha} + \frac{\sigma_\alpha}{\eta_\alpha}. \quad (9.8)$$

9.1.2 Anpassung der Modellparameter an zyklische Kurven

Die Differentialgleichungen (9.1), (9.3) und (9.8) beschreiben den zeit- und geschwindigkeitsabhängigen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung für das Kelvin-Voigt-, Zener- und Maxwell-Wiechert-Modell. Die Berechnung des parameterabhängigen Spannungs-Dehnungsverlaufs für die einzelnen Modelle kann durch numerische Integration erfolgen. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird die Abweichung zwischen dem gemessenen Kurvenverlauf im Experiment und der simulierten Modellantwort minimiert, d.h. der Parametersatz gefittet, welcher die beste Anpassung des Modells an das Experiment liefert.

Die numerische Integration der Differentialgleichungen (9.1) und (9.3) kann mit dem expliziten Euler-Verfahren (Vorwärtsdifferenzenquotient) erfolgen. Dieses führt auf folgende Berechnungsvorschriften für die inkrementelle Berechnung der Dehnungsantwort $\varepsilon(t)$ auf einen vorgegebenen Spannungsverlauf $\sigma(t)$:

Kelvin-Voigt-Körper:
$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \frac{1}{\eta} (\sigma_i - E\varepsilon_i) \cdot \Delta t \quad (9.9)$$

Zener-Körper:
$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{E_\infty + E_1} + \frac{(\sigma_i - E_\infty \varepsilon_i)}{\eta_1} \frac{E_1}{E_\infty + E_1} \cdot \Delta t \quad (9.10)$$

Die Genauigkeit der numerischen Integration kann durch die Verkleinerung der Zeitschrittweite Δt verbessert werden.

Anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem zyklischen Zugversuch (Abschnitt 5.7) wurden die Parameter $\mathbf{p} = (E, \eta)$ des Kelvin-Voigt-Modells und $\mathbf{p} = (E_\infty, E_1, \eta_1)$ des Zener-Modells mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und eines Pattern-Search-Algorithmus [LTT00, Tor97] angepasst. Die zu optimierende Zielfunktion für die $i = 1 \dots N$ Stützpunkte der Spannungs-Dehnungs-Kurve zu den Zeitpunkten t_i lautet:

$$\Phi(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i(\mathbf{p}) - \varepsilon_i^{\text{exp}})^2} \rightarrow \min \quad (9.11)$$

Dabei wird die Abweichung zwischen der experimentell ermittelten Kurve mit den diskreten Punkten $(\varepsilon_i^{\text{exp}}, \sigma_i^{\text{exp}})$ und der mit dem Modell berechneten Kurve $(\varepsilon_i(\mathbf{p}), \sigma_i^{\text{exp}})$ minimiert.

Die Tabelle 20 zeigt das Ergebnis der Parameteroptimierung für die beiden Modelle, wenn nur der erste Zyklus, die ersten beiden Zyklen und alle 10 Zyklen verwendet werden. Während für einen Zyklus beide Modelle sehr ähnliche Modellantworten liefern, unterscheiden sich die Modellantworten bei zwei Zyklen bereits sehr deutlich. Das Kelvin-Voigt-Modell liefert eine geschlossene Hysterese, die Form der Hystereseschleife weicht deutlich von der Form im Experiment ab. Offensichtlich liefert das 3-parametriges Zener-Modell eine bessere Anpassung an die Form der viskoelastischen Hysterese. Mit zunehmender Anzahl von Belastungszyklen wird die Anpassung jedoch schlechter. Mit dem 3-parametriges Zener-Modell kann nicht gleichzeitig das Kurzzeitretardationsverhalten (Hysterese bei vorgegebenem Spannungszyklus) und das Langzeitretardationsverhalten (Verschiebung der Hystereseschleife zu größeren Dehnungswerten mit zunehmender Zeit) beschrieben werden. Das Langzeitretardationsverhalten wird normalerweise in Kriechversuchen bestimmt (Abschnitt 5.6).

Das Maxwell-Wiechert-Modell ermöglicht aufgrund mehrerer parallel geschalteter Maxwell-Elemente eine bessere Anpassung an Experimente. Die Differentialgleichungen (9.8) können bei gegebenem zeitlichen Verlauf der Gesamtdehnung numerisch integriert werden. Die Iterationsvorschrift lautet

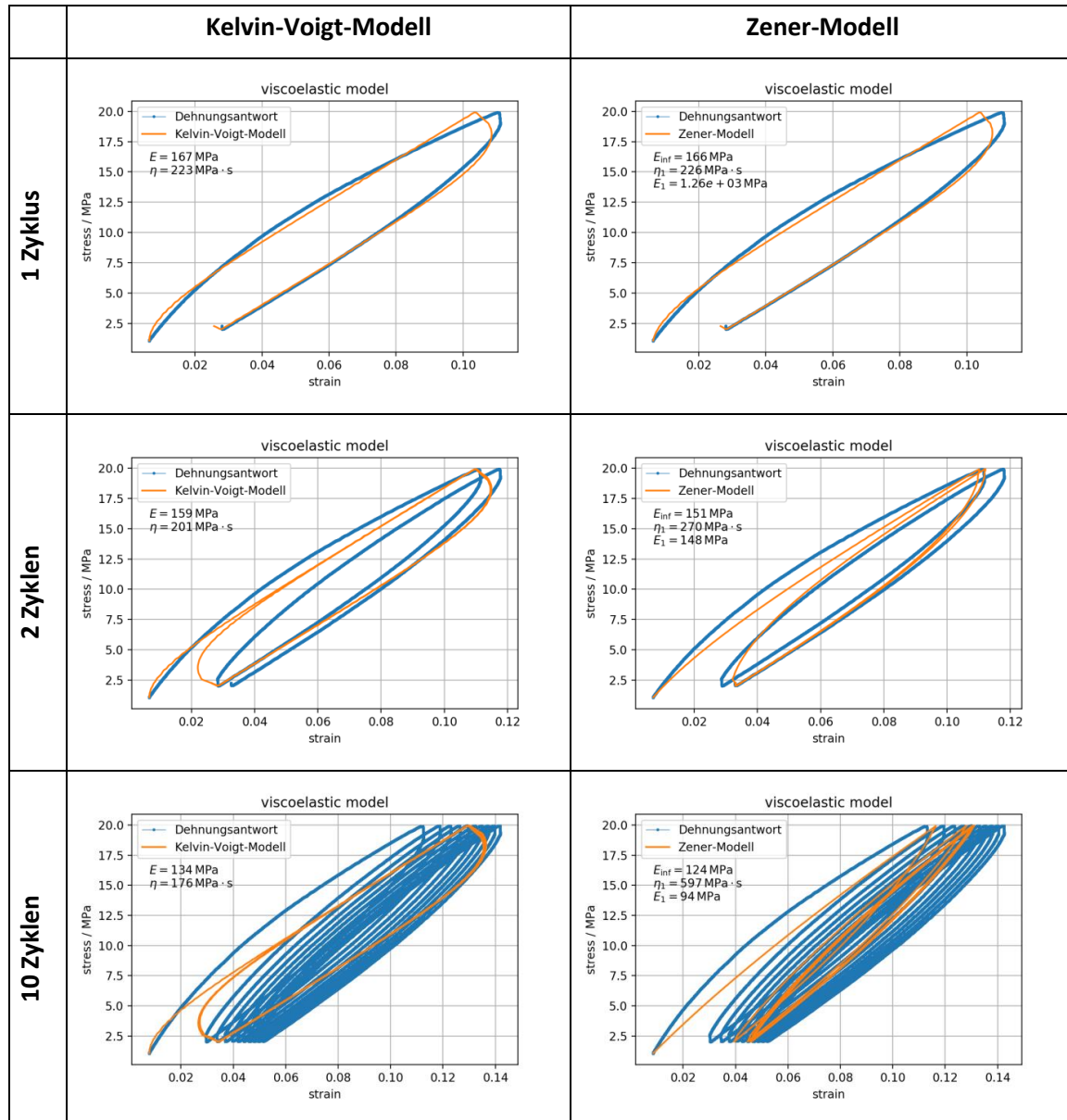
$$\sigma_{\alpha,i+1} = \sigma_{\alpha,i} + E_\alpha (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) - \frac{E_\alpha}{\eta_\alpha} \sigma_{\alpha,i} \Delta t. \quad (9.12)$$

Mit Hilfe von Gleichung (9.4) wird die Gesamtspannung in jedem Zeitschritt der Integration berechnet. Die zu optimierende Zielfunktion für die $i = 1 \dots N$ Stützpunkte der Spannungs-Dehnungs-Kurve zu den Zeitpunkten t_i lautet diesmal:

$$\Phi(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i(\mathbf{p}) - \sigma_i^{\text{exp}})^2} \rightarrow \min \quad (9.13)$$

Dabei wird die Abweichung zwischen der experimentell ermittelten Kurve mit den diskreten Punkten $(\varepsilon_i^{\text{exp}}, \sigma_i^{\text{exp}})$ und der mit dem Modell berechneten Kurve $(\varepsilon_i^{\text{exp}}, \sigma_i(\mathbf{p}))$ minimiert.

Tabelle 20: Ergebnis der Parameteranpassung der viskoelastischen rheologischen Modelle an die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve



Das Ergebnis der Parameteranpassung zeigt Tabelle 21. Das 5-Parameter-Modell liefert eine deutlich bessere Anpassung als das 3-Parameter-Modell, welches dem Zener-Modell entspricht. Sowohl die Fläche der Hystereseschleifen als auch die Verschiebung zu größeren Dehnungen kann für das Experiment adäquat abgebildet werden. Der zusätzliche Maxwell-Zweig im 7-Parameter-Modell liefert keine wesentliche Verbesserung mehr. Tabelle 22 listet neben dem Langzeit-Modul die Relaxationszeiten für die Parameteranpassung auf.

Tabelle 21: Ergebnis der Parameteranpassung für das viskoelastische Maxwell-Wiechert-Modell mit 3, 5 und 7 Parametern an die gemessene zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve

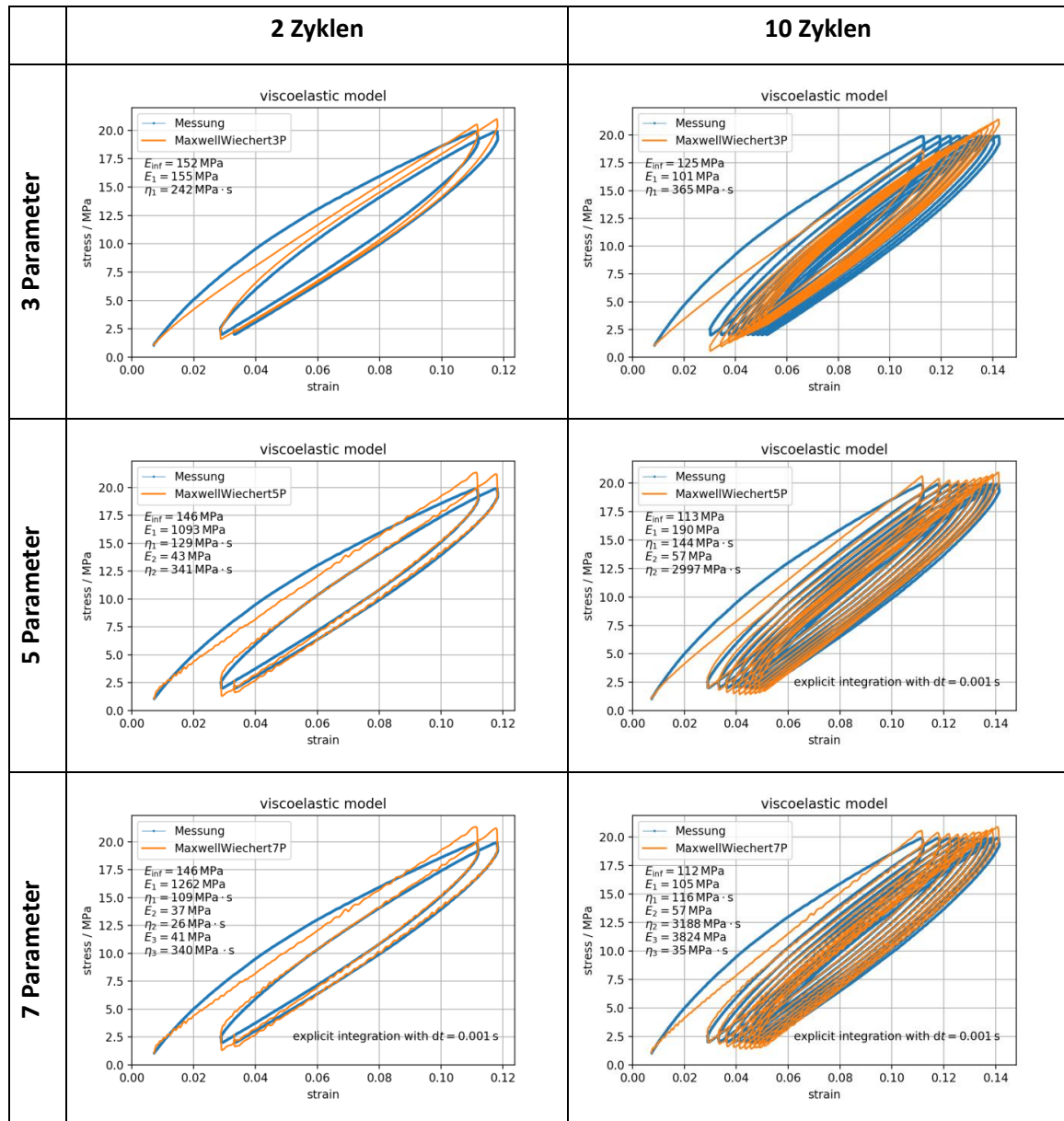


Tabelle 22: Langzeit-Modul und Relaxationszeiten für das Maxwell-Wiechert-Modell mit 3, 5 und 7 Parametern für die Parameteranpassung an die gemessene zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve.

	2 Zyklen	10 Zyklen
3 Parameter	$E_{\infty} = 152 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 1,56 \text{ s}$	$E_{\infty} = 125 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 3,61 \text{ s}$
5 Parameter	$E_{\infty} = 146 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 0,118 \text{ s}$ $\tau_2 = 7,93 \text{ s}$	$E_{\infty} = 113 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 0,758 \text{ s}$ $\tau_2 = 52,6 \text{ s}$
7 Parameter	$E_{\infty} = 146 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 0,0864 \text{ s}$ $\tau_2 = 0,703 \text{ s}$ $\tau_3 = 8,29 \text{ s}$	$E_{\infty} = 112 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 1,105 \text{ s}$ $\tau_2 = 55,92 \text{ s}$ $\tau_3 = 0,00915 \text{ s}$

9.1.3 Anpassung der Modellparameter an Kriechkurven

Die Prony-Reihe für das Maxwell-Wiechert-Modell aus Gl. (9.5) kann analog zum Relaxationsversuch mit konstanter Dehnung auch für den Retardationsversuch (= Kriechversuch) mit konstanter Spannung aufgestellt werden [SSK11]. Der von der Belastungszeit abhängige Kriechmodul wird durch eine Summe von Exponentialfunktionen mit den Relaxationszeiten $\tau_\alpha = \eta_\alpha / E_\alpha$ approximiert:

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} = E_\infty + \sum_{\alpha=1}^m E_\alpha e^{-\frac{t}{\tau_\alpha}}. \quad (9.14)$$

Weil die Spannung konstant ist, muss kein Differentialgleichungssystem mehr gelöst werden, wie dies bei den zyklischen Versuchen der Fall war. Die Materialparameter des Maxwell-Wiechert-Modells können direkt durch Kalibrierung mit den Messkurven $E_c(t)$ oder $\varepsilon(t)$ angepasst werden. Die zu optimierende Zielfunktion für $i = 1 \dots N$ Stützpunkte der Dehnungs-Zeit-Kurve zu den Zeitpunkten t_i lautet:

$$\Phi(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i(\mathbf{p}) - \varepsilon_i^{\text{exp}})^2} \rightarrow \min \quad (9.15)$$

Dabei wird die Abweichung zwischen der experimentell ermittelten Kurve mit den diskreten Punkten $(t_i, \varepsilon_i^{\text{exp}})$ und der mit dem Modell berechneten Kurve $(t_i, \varepsilon_i(\mathbf{p}))$ minimiert.

Wie im vorigen Abschnitt wurde die Parameteranpassung zunächst mit dem einfachsten Modell mit nur einem Glied der Prony-Reihe und den 3 Parametern E_∞ , E_1 und η_1 durchgeführt und anschließend die Zahl der Glieder der Prony-Reihe um jeweils eins erhöht bis eine ausreichend genaue Anpassung erreicht wurde. Dabei wurde nicht die gesamte Kriechkurve verwendet, sondern jeweils nur ein bestimmtes Zeitintervall. Die Stützstellen t_i wurden durch konstante Abstände auf der logarithmischen Zeitachse erhalten, zwei aufeinanderfolgende Stützstellen unterscheiden sich also um einen konstanten Faktor. Eine Dekade wurde durch 10 Zeitschritte mit dem Faktor $10^{0,1} \cong 1.259$ diskretisiert. Es wurde folgende Zeitintervalle untersucht:

- 100 h ... 1000 h ($N=11$ Stützpunkte)
- 10 h ... 1000 h ($N=21$ Stützpunkte)
- 1 h ... 1000 h ($N=31$ Stützpunkte)
- 0,1 h ... 1000 h ($N=41$ Stützpunkte)

Es wurden die Kriechversuche bei den Lastspannungen 11 MPa, 13,5 MPa und 16 MPa für die Parameteridentifikation der viskoelastischen Modelle verwendet. Die Kriechversuche bei 22 MPa zeigen bereits zu Beginn der Belastung eindeutig plastische Verformungen, sodass kein viskoelastisches, sondern ein viskoplastisches Materialmodell verwendet werden sollte.

In Tabelle 23 bis Tabelle 25 sind ausgewählte Ergebnisse der Parameteridentifikation zusammengestellt. Die Präsentation aller Ergebnisse (Prony-Reihen mit 3, 5, 7 und 9 Parametern für 4 verschiedene Zeitintervalle bei 3 Spannungsniveaus = 48 Varianten) würde den Umfang dieses Berichtes sprengen. Mit der Devise, die Kriechversuche mit möglichst wenigen Parametern zu beschreiben, werden nur die 12 Ergebnisse der Parameteridentifikation präsentiert, für welche eine Erhöhung der Parameteranzahl (Erweiterung der Prony-Reihe um ein weiteres Maxwell-Element) keine wesentlich bessere Anpassung ermöglicht.

Prinzipiell können folgende Erkenntnisse aus der Parameteranpassung abgeleitet werden:

- Im Zeitintervall von 100 h bis 1000 h liefert bereits das einfachste Maxwell-Wiechert-Modell mit 3 Parametern eine gute Anpassung an die Messkurven in diesem Zeitintervall, jedoch dürfen mit dem Modell keine Extrapolationen zu größeren oder kleineren Zeitwerten durchgeführt werden.
- Mit jeder zusätzlichen Zeitdekade, um die das gewählte Zeitintervall vergrößert wird, ist ein zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell erforderlich (d.h. 2 zusätzliche Parameter), damit eine gute Anpassung an die Messwerte möglich wird.
- Die Relaxationszeiten der einzelnen Maxwell-Zweige unterscheiden sich um etwa den Faktor 10, sie beschreiben also jeweils eine Zeitdekade der Kriechkurve.
- Die Kriechkurven können im Zeitintervall von 0,1 Stunden bis 1000 Stunden mit einem Maxwell-Wiechert-Modell mit vier Maxwell-Elementen, also einer Prony-Reihe mit 9 Parametern, sehr gut beschrieben werden.

Tabelle 23: Ergebnisse der Parameterbestimmung für die Prony-Reihe aus Kriechversuchen bei einer Lastspannung von 11 MPa und unterschiedlich großen Zeitintervallen für die Anpassung des Modells an die gemessenen Kurven.

0,1 h ... 1000 h	1 h ... 1000 h	10 h ... 1000 h	100 h ... 1000 h
$E_{\infty} = 57 \text{ MPa}$ $E_1 = 53 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 1,13e8 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 73 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,28e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 91 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 2,02e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_4 = 94 \text{ MPa}$ $\eta_4 = 5,25e5 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 55 \text{ MPa}$ $E_1 = 50 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 1,27e8 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 79 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,61e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 108 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 1,97e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 56 \text{ MPa}$ $E_1 = 57 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 1,20e8 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 82 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,07e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 65 \text{ MPa}$ $E_1 = 78 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 8,06e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$
$E_0 = 368 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 2,14e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 3,13e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 2,23e4 \text{ s}$ $\tau_4 = 5,58e3 \text{ s}$	$E_0 = 292 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 2,53e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 3,32e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 1,82e4 \text{ s}$	$E_0 = 195 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 2,12e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 2,52e5 \text{ s}$	$E_0 = 143 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 1,03e6 \text{ s}$

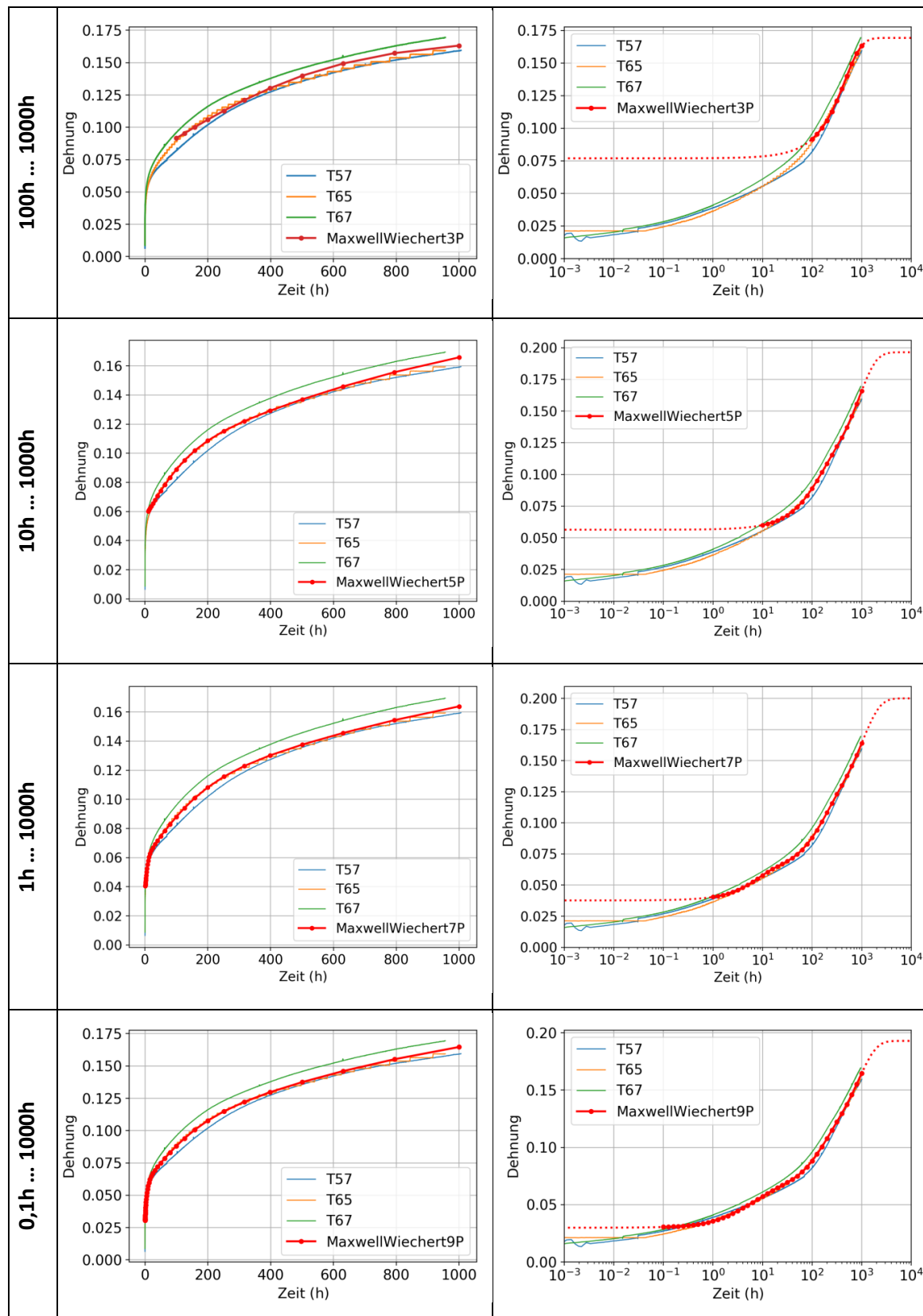


Abbildung 102: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 11 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).

Tabelle 24: Ergebnisse der Parameteridentifikation der Prony-Reihe für Kriechversuche bei Lastspannung 13,5 MPa

0,1 h ... 1000 h	1 h ... 1000 h	10 h ... 1000 h	100 h ... 1000 h
$E_{\infty} = 44 \text{ MPa}$ $E_1 = 50 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 9,13e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 61 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,31e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 69 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 1,18e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_4 = 137 \text{ MPa}$ $\eta_4 = 1,85e5 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 42 \text{ MPa}$ $E_1 = 47 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 1,02e8 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 66 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,62e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 77 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 1,18e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 43 \text{ MPa}$ $E_1 = 50 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 9,76e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 65 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 2,33e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 50 \text{ MPa}$ $E_1 = 82 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 7,59e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$
$E_0 = 361 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 1,84e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 3,76e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 1,70e4 \text{ s}$ $\tau_4 = 1,35e3 \text{ s}$	$E_0 = 232 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 2,17e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 3,96e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 1,54e4 \text{ s}$	$E_0 = 158 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 1,95e6 \text{ s}$ $\tau_2 = 3,57e5 \text{ s}$	$E_0 = 132 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 9,26e5 \text{ s}$

Tabelle 25: Ergebnisse der Parameteridentifikation der Prony-Reihe für Kriechversuche bei Lastspannung 16 MPa

0,1 h ... 1000 h	1 h ... 1000 h	10 h ... 1000 h	100 h ... 1000 h
$E_{\infty} = 36 \text{ MPa}$ $E_1 = 55 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 5,52e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 28 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 6,59e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 62 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 1,05e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_4 = 128 \text{ MPa}$ $\eta_4 = 1,37e5 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 36 \text{ MPa}$ $E_1 = 55 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 4,59e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 29 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 6,51e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_3 = 64 \text{ MPa}$ $\eta_3 = 1,01e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 36 \text{ MPa}$ $E_1 = 60 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 5,55e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ $E_2 = 31 \text{ MPa}$ $\eta_2 = 4,40e6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$	$E_{\infty} = 36 \text{ MPa}$ $E_1 = 63 \text{ MPa}$ $\eta_1 = 5,57e7 \text{ MPa} \cdot \text{s}$
$E_0 = 309 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 9,99e5 \text{ s}$ $\tau_2 = 2,37e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 1,71e4 \text{ s}$ $\tau_4 = 1,07e3 \text{ s}$	$E_0 = 183 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 8,29e5 \text{ s}$ $\tau_2 = 2,28e5 \text{ s}$ $\tau_3 = 1,58e4 \text{ s}$	$E_0 = 126 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 9,31e5 \text{ s}$ $\tau_2 = 1,43e5 \text{ s}$	$E_0 = 99 \text{ MPa}$ $\tau_1 = 8,88e5 \text{ s}$

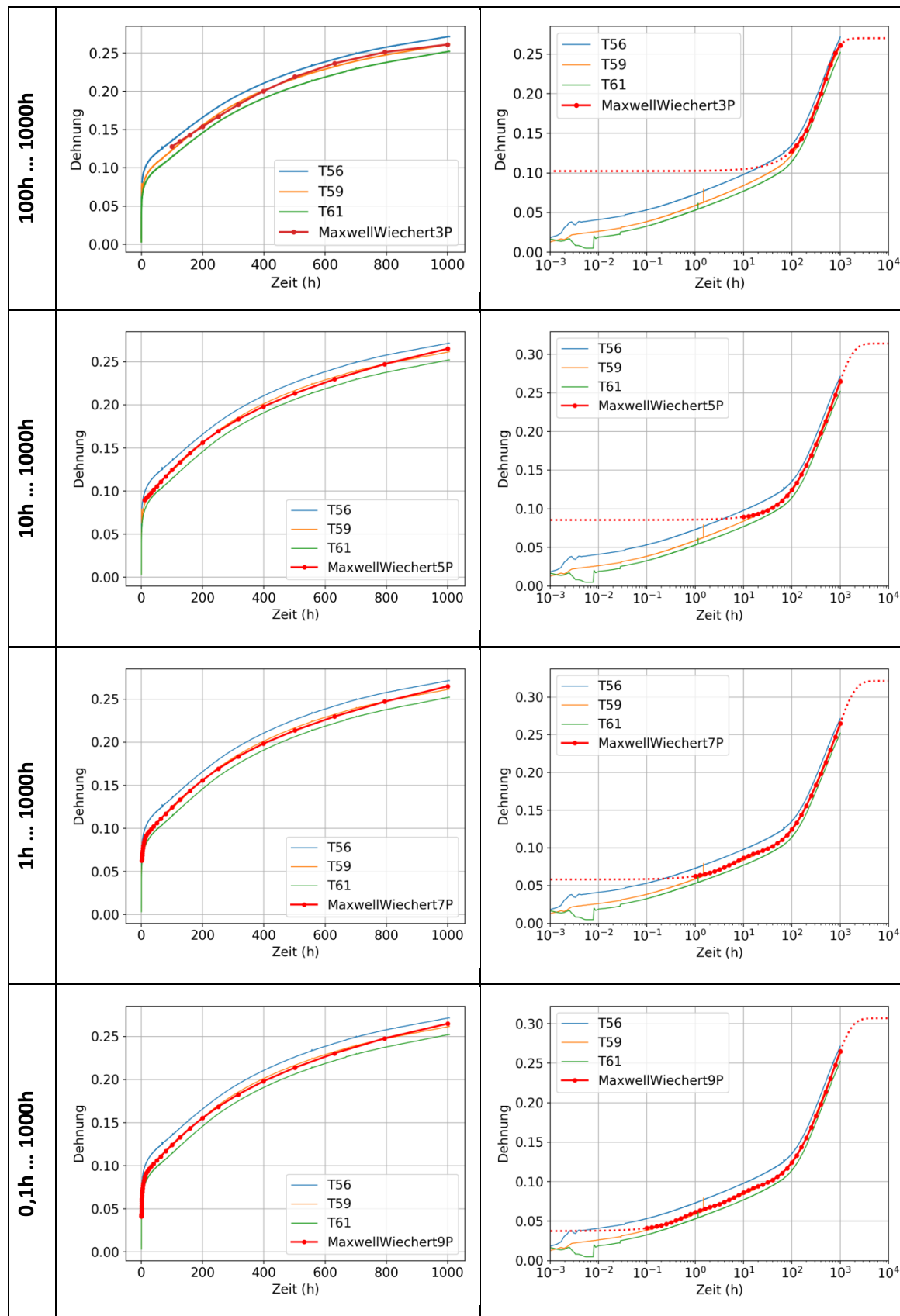


Abbildung 103: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 13,5 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).

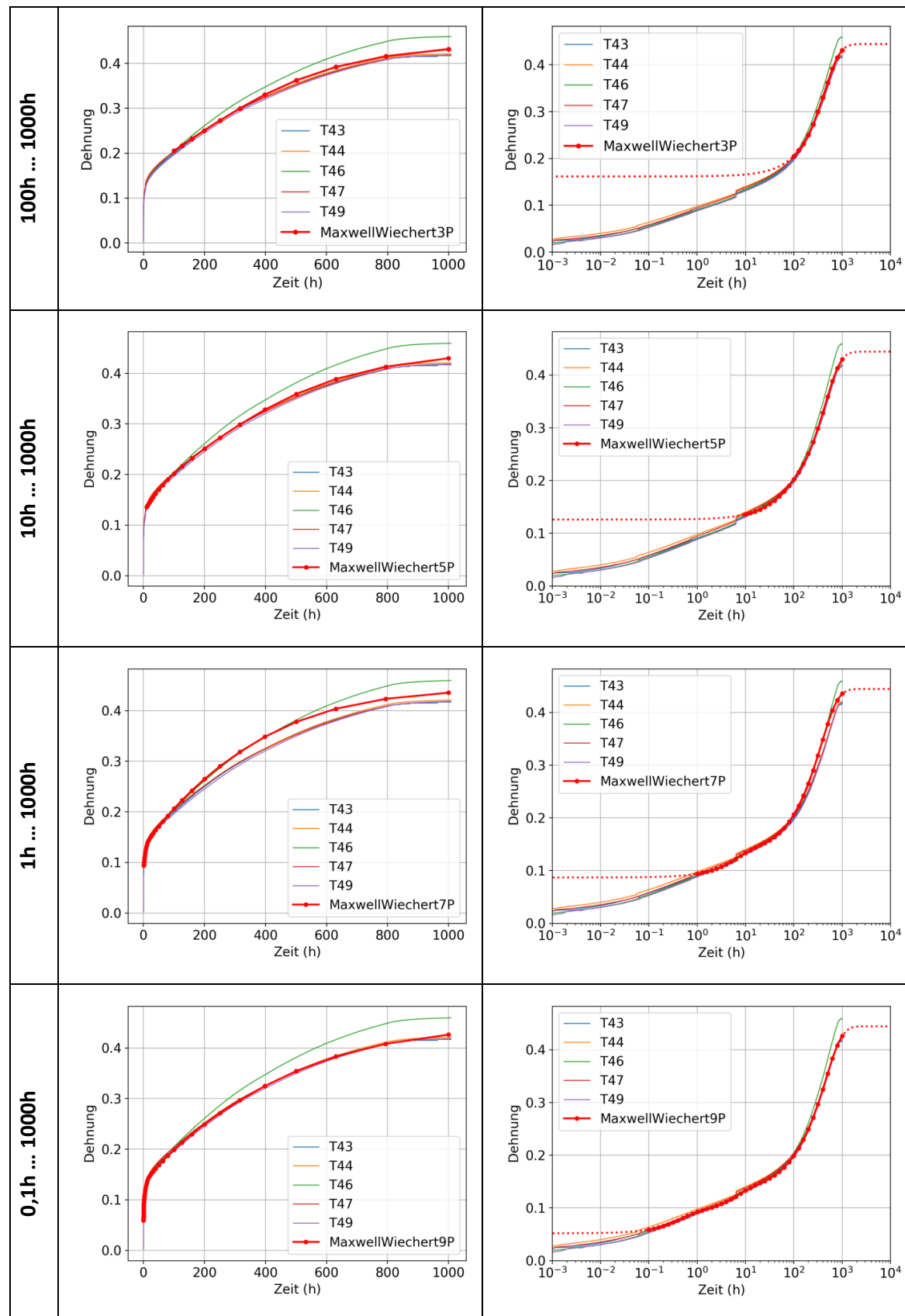


Abbildung 104: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 16 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).

9.2 Wahre Spannungen und Dehnungen bei großen Verformungen

Der Werkstoff PA 6 erträgt sehr große Dehnungen bis zu 300%. Die Beschreibung des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen den Spannungen und Dehnungen oberhalb der Dehngrenze erfolgt dann sinnvollerweise mit der wahren Spannung (Kraft bezogen auf momentanen Querschnitt) und der wahren Dehnung (logarithmische Dehnung). Die aus dem Zugversuch ermittelte technische Spannungs-Dehnungs-Kurve (Kraft bezogen auf Anfangsquerschnitt, Längenänderung bezogen auf Anfangslänge) wird dazu mit folgenden Formeln umgerechnet:

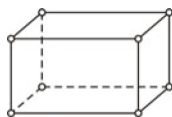
$$\sigma_{wahr} = \sigma_{tech.} (1 + \varepsilon_{tech}) \quad (9.16)$$

$$\varepsilon_{wahr} = \ln(1 + \varepsilon_{tech}) \quad (9.17)$$

9.3 FEM-Modellierung mit ANSYS

Die FEM-Modelle wurden mit der Software Ansys Workbench 18.2 entwickelt. Die Geometrie der Modelle wurde zuvor mit Hilfe der CAD-Software Autodesk Inventor erstellt und in Ansys eingelesen. Die Vernetzung der Geometrie erfolgte mit dem Elementtyp SOLID186. Dabei handelt es sich um ein 3D-Volumenelement mit 20 Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz. Dieser Elementtyp besitzt auf jeder Elementkante einen zusätzlichen Mittelknoten und erlaubt es daher auch gekrümmte Ränder korrekt abzubilden (Abbildung 105). Die Anzahl der Integrationspunkte wurde auf $2 \times 2 \times 2 = 8$ gesetzt. Bei dieser reduzierten Integration können innerhalb eines Elementes ein linear veränderlicher Spannungsverlauf korrekt abgebildet werden. Das heißt mit zwei Elementen über der Dicke können bereits nichtlineare Spannungsverläufe approximiert werden.

Lineares 8-Knoten-Element



Quadratisches 20-Knoten-Element



Abbildung 105: 3D-Volumenelemente für die Verwendung in der FEM. Links 8-Knoten-Element mit linearem Ansatz für die Verschiebungen im Element, rechts 20-Knoten-Element mit quadratischer Ansatz für die Verschiebungen im Element. Die Seitenmittelknoten des quadratischen Elementes erlauben die korrekte Modellierung gekrümmter Ränder

9.4 Elastisch-plastisches Materialmodell für Matrixwerkstoff Polyamid PA6

Für die Simulation des Kurzzeitverhaltens des additiv gefertigten Matrixwerkstoffs Polyamid PA 6 wurde für jede Strangausrichtung ein elastisch-plastisches Materialmodell aus den Zugversuchsdaten aufgestellt. Bis zur Dehngrenze wird ein linear-elastisches Verhalten modelliert,

ab der Dehngrenze ein elastisch-plastische Fließverhalten mit isotroper Verfestigung. Die Gesamtdehnung setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen.

$$\varepsilon_{wahr} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma_{wahr}}{E} + \varepsilon_{pl} \quad (9.18)$$

Aus den Versuchsdaten wurde eine mittlere technische Spannungs-Dehnungs-Kurve berechnet und in eine plastische Fließkurve umgerechnet.

In ANSYS wird die Fließkurve als multilineare Kurve abgebildet. Für die exakte Abbildung und für die Berücksichtigung der plastischen Querschnittsänderung ab der Dehngrenze sind die technischen Spannungen und Dehnungen in die wahren Spannungen und Dehnung umgerechnet worden. Mit diesen wahren Spannungs-Dehnungs-Kurven kann das nichtlineare Materialverhaltens des Werkstoffes Polyamid 6 bei monoton steigender Belastung in Abhängigkeit der Strangausrichtung simuliert werden. Die Fließkurven aus dem Zugversuch gelten streng genommen nur für eine zügige Laststeigerung (Belastungsgeschwindigkeit 50 mm/min oder Dehngeschwindigkeit 100%/min), bei langsamerer Belastungsgeschwindigkeit tritt infolge des viskoelastischen Materialverhaltens von PA 6 eine zusätzliche Kriechdehnung auf, die gesondert berücksichtigt werden muss. Abbildung 106 zeigt die Verfestigungskurven für verschiedene Strangorientierungen im FEM-Modell.

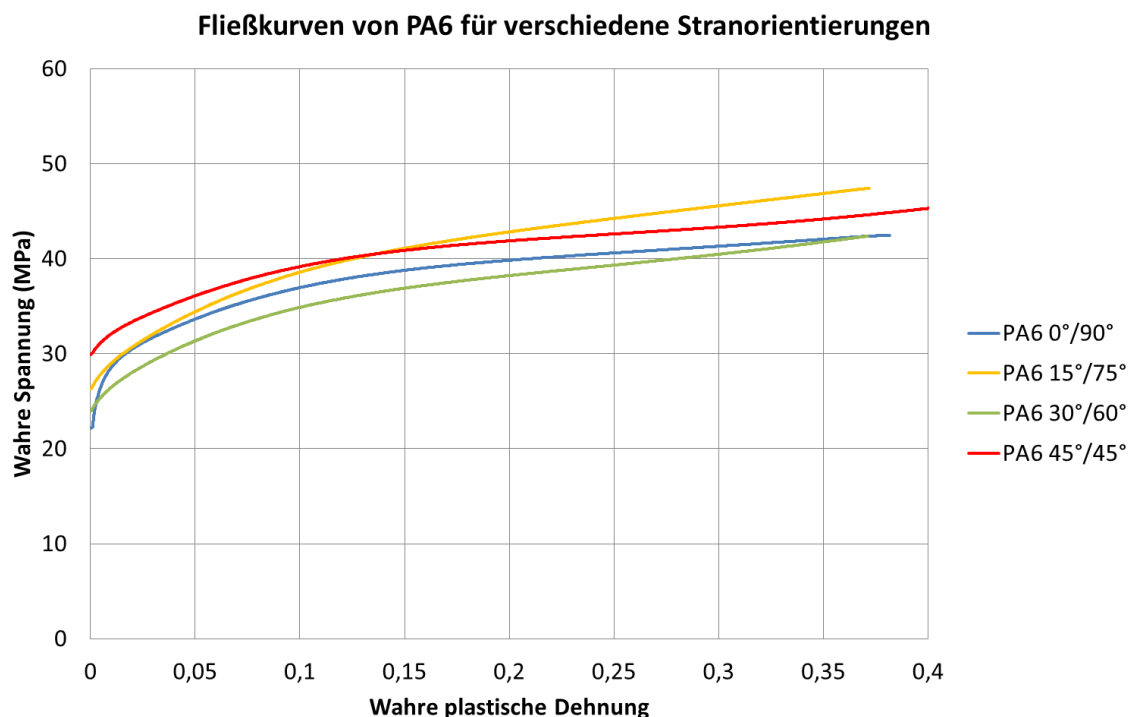


Abbildung 106: Fließkurven von PA 6 für verschiedene Strangorientierungen

9.4.1 Validierung der Simulationsmodelle für den Matrixwerkstoff PA 6

Für die Validierung der in der FEM-Software definierten Materialmodelle bei Kurzzeitbelastung wurde der Zugversuch simuliert (s. Abbildung 107), anschließend wurden die berechneten Spannungs-Dehnungs-Verläufe mit den Versuchsdaten bis zu einer Dehnung von 40% verglichen. Hierbei sind die unterschiedlichen Strangausrichtungen des Matrixwerkstoffes bezüglich der Zugrichtung betrachtet worden. Wie erwartet stimmen die simulierte und die aus dem Zugversuch abgeleitete Spannungs-Dehnungs-Kurve überein.

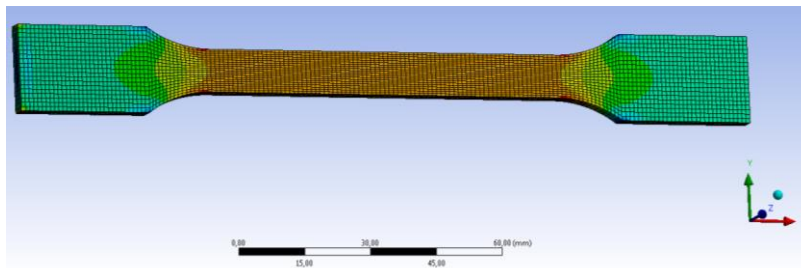


Abbildung 107: FE-Simulation Zugprobe Matrixwerkstoff PA 6

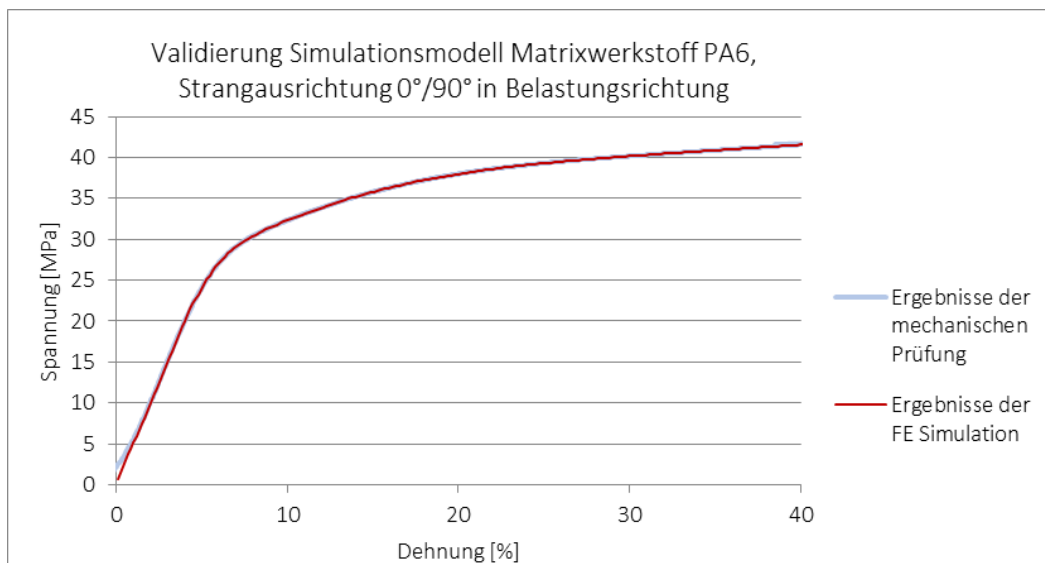


Abbildung 108: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 0°/90° in Belastungsrichtung

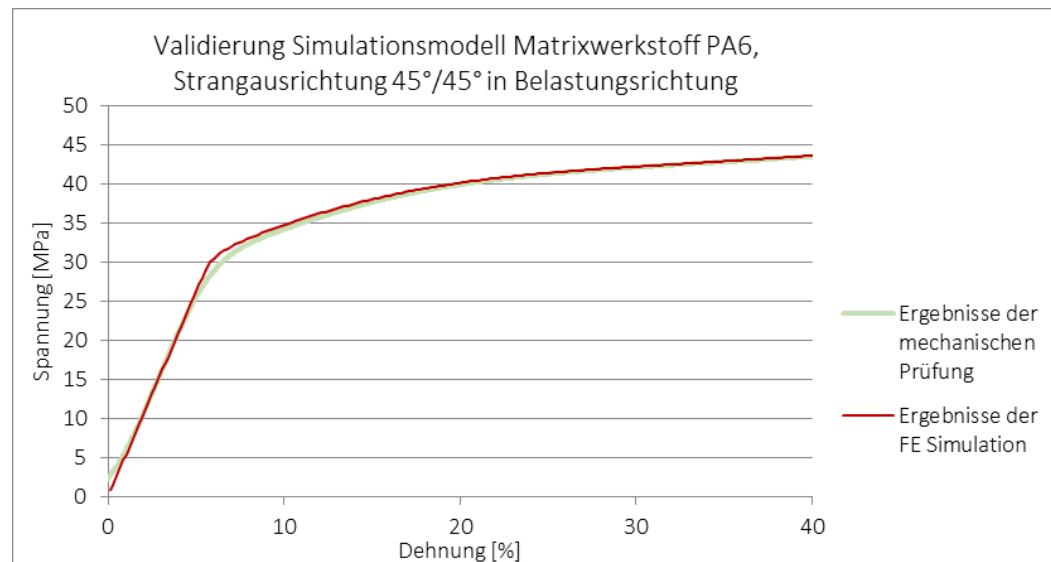


Abbildung 109: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 45°/45° in Belastungsrichtung

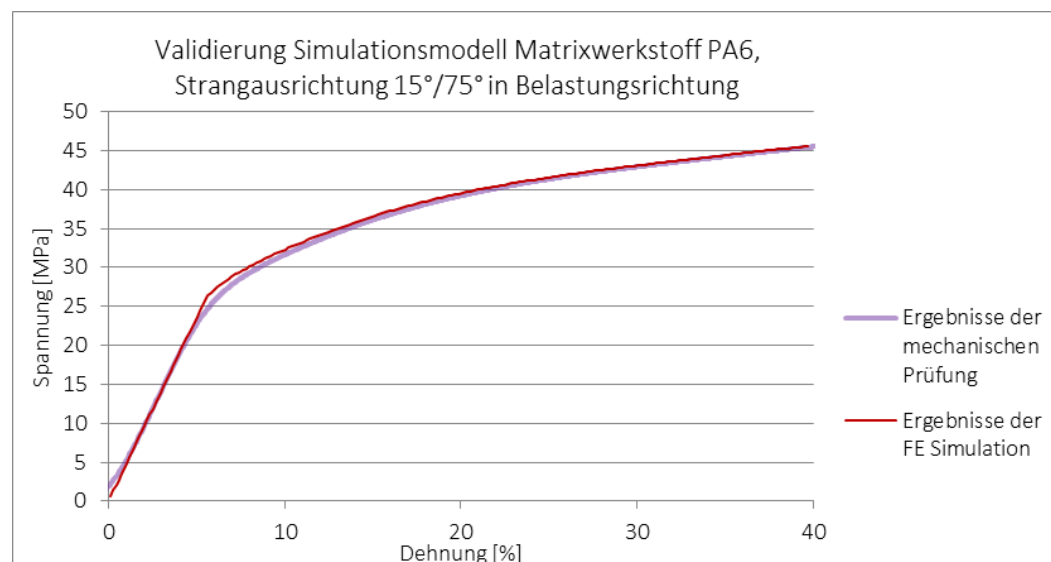


Abbildung 110: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 15°/75° in Belastungsrichtung

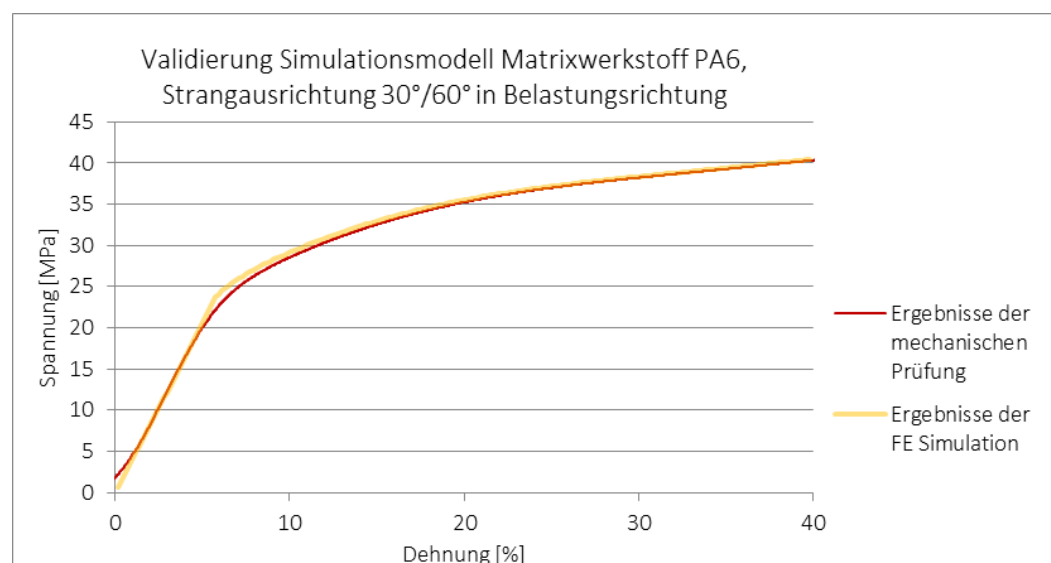


Abbildung 111: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 30°/60° in Belastungsrichtung

9.4.2 Validierung der Materialmodelle für den Matrixwerkstoff PA 6

Die Materialmodelle der FE-Simulation basieren auf den Prüfergebnissen der mechanischen Zugfestigkeitsanalyse. Für die Validierung der Übertragbarkeit dieser Modelle auf andere Beanspruchungen wurden mechanische Biegeprüfungen durchgeführt sowie mittels der Finite-Element-Analyse simuliert. Somit konnten die Materialmodelle wie in Abbildung 114 und Abbildung 115 für den Matrixwerkstoff PA 6 validiert werden. Die mit der Belastungszeit zunehmende Abweichung der Simulation zu größeren Kräften ist auf die Spannungsrelaxation im Experiment zurückzuführen, welche im Materialmodell für Kurzzeitbelastung nicht berücksichtigt ist.

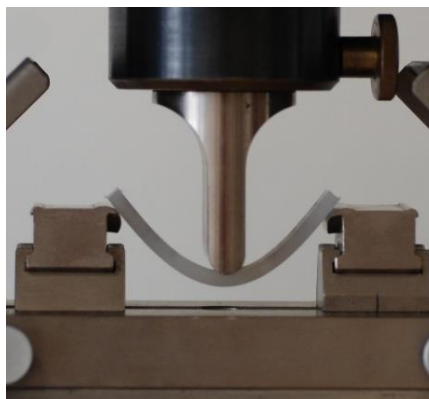


Abbildung 112: 3-Punkt-Biegeprüfung Matrixwerkstoff PA 6

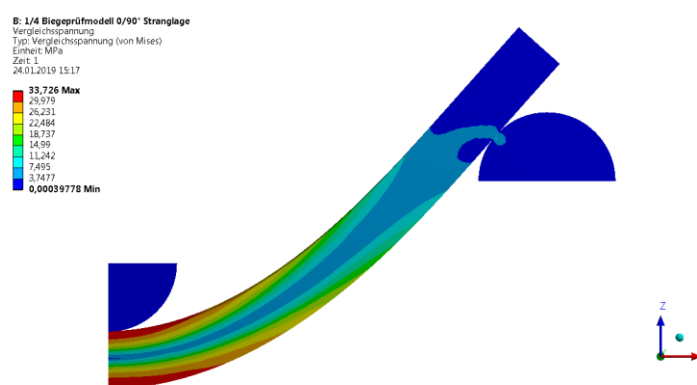


Abbildung 113: FEM-Simulation der 3-Punkt-Biegeprüfung für Matrixwerkstoff PA 6, Vergleichsspannung (von Mises) im Viertelmodell

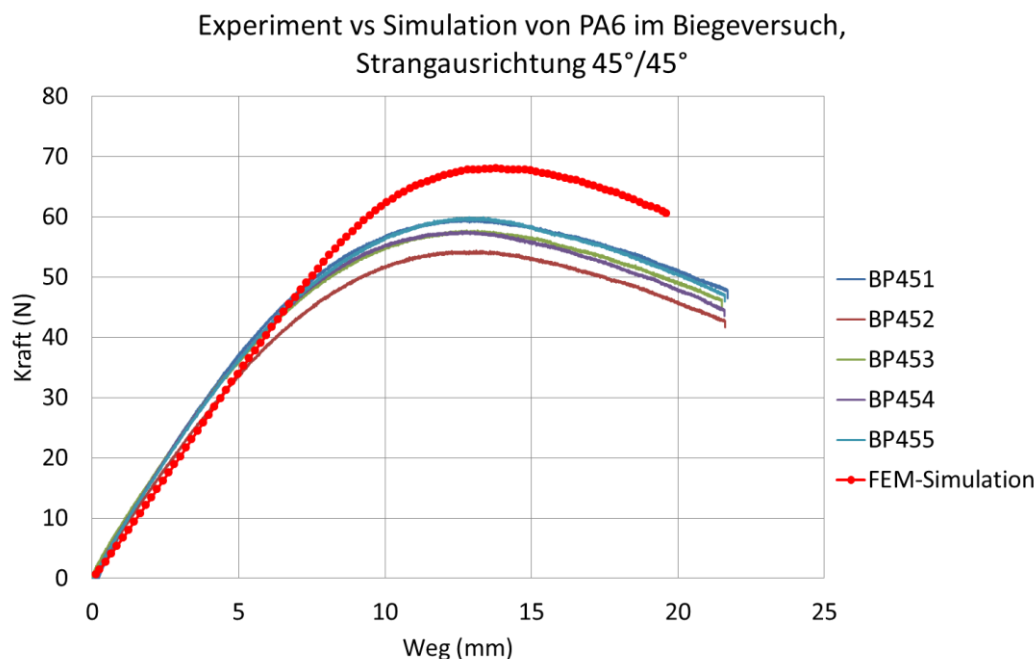


Abbildung 114: Validierung Materialmodell Matrixwerkstoff PA 6, Strangausrichtung 45°/45°

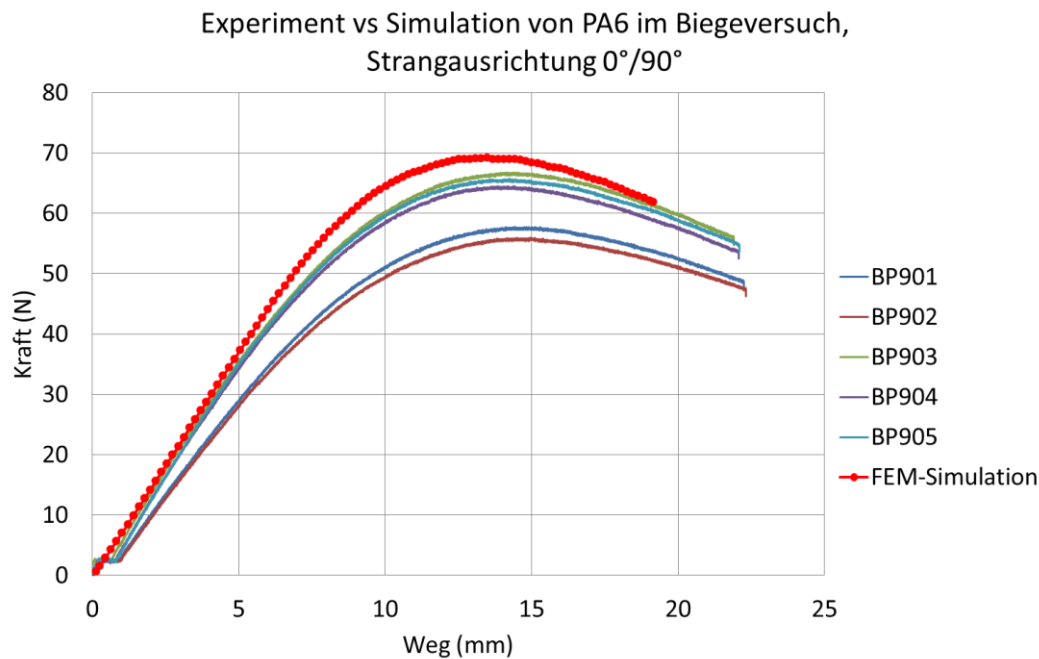


Abbildung 115: Validierung Materialmodell Matrixwerkstoff PA 6, Strangausrichtung 0°/90°

9.5 FEM-Modellierung der Filmgelenkprobe

Für die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Filmgelenkproben wurde zunächst FEM-Simulationen durchgeführt mit dem Ziel die optimale Geometrie des Gelenkquerschnittes zu bestimmen. Die beiden Symmetrieebenen der Probe wurden ausgenutzt um je ein Viertelmodell der verschiedenen Probenvarianten zu entwickeln (Abbildung 116). Die Vernetzung des Modells mit Hexaederelementen vom Elementtyp SOLID186 zeigt Abbildung 117.

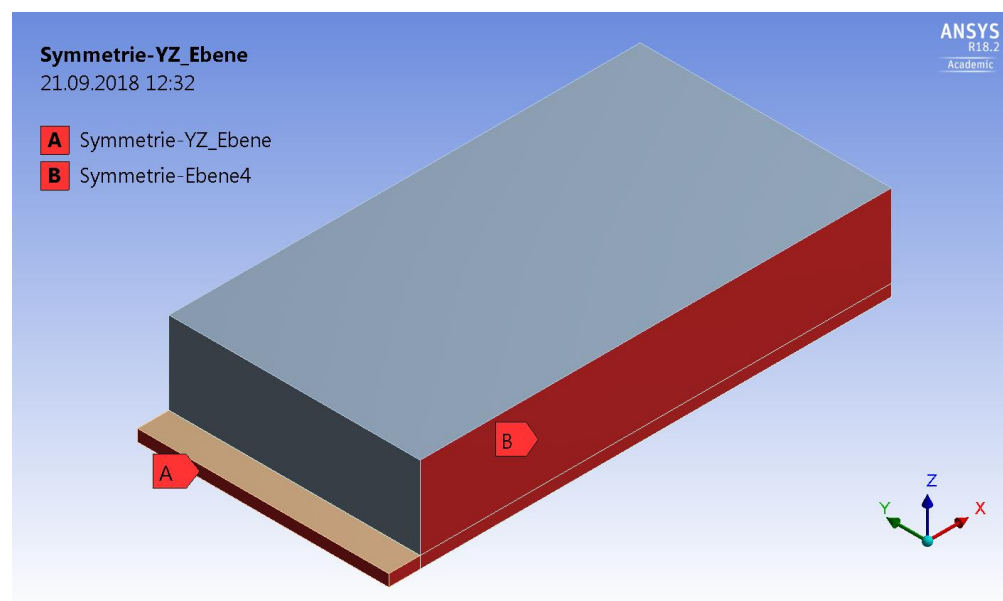


Abbildung 116: Geometriemodell des Filmgelenkes in ANSYS. Durch Ausnutzung von Symmetrien (rote Flächen) wird ein Viertelmodell definiert um den Berechnungsaufwand zu reduzieren.

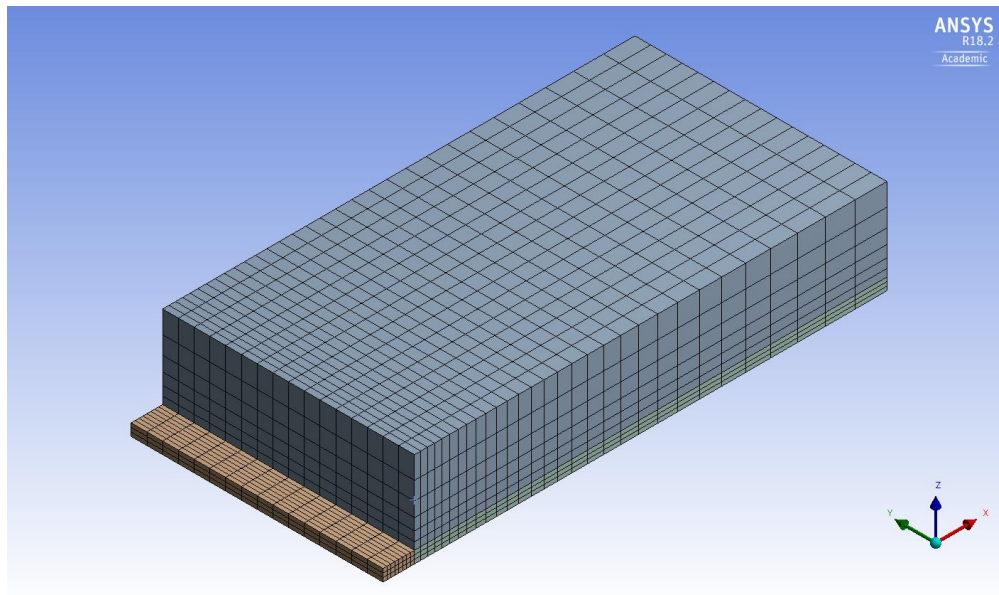


Abbildung 117: Vernetzung des Viertelmodells mit 4704 Hexaederelementen (22081 Knoten) vom Typ Solid186 (quadratischer Verschiebungsansatz, reduzierte Integration)

Abbildung 118 zeigt den Verlauf der elastischen Hauptdehnung im Querschnitt des Filmgelenkes, wenn die Probe zusammengefasst wird, d.h. bei einem Biegewinkel von 180° . Der Filmgelenkquerschnitt hat im unverformten Zustand eine Länge von 2 mm und eine Höhe von 0,375 mm. Die simulierte maximale Dehnung von 30% in der Randfaser stimmt sehr gut überein mit dem Ergebnis von 29,5% aus der Berechnung mit Formel (3.4).

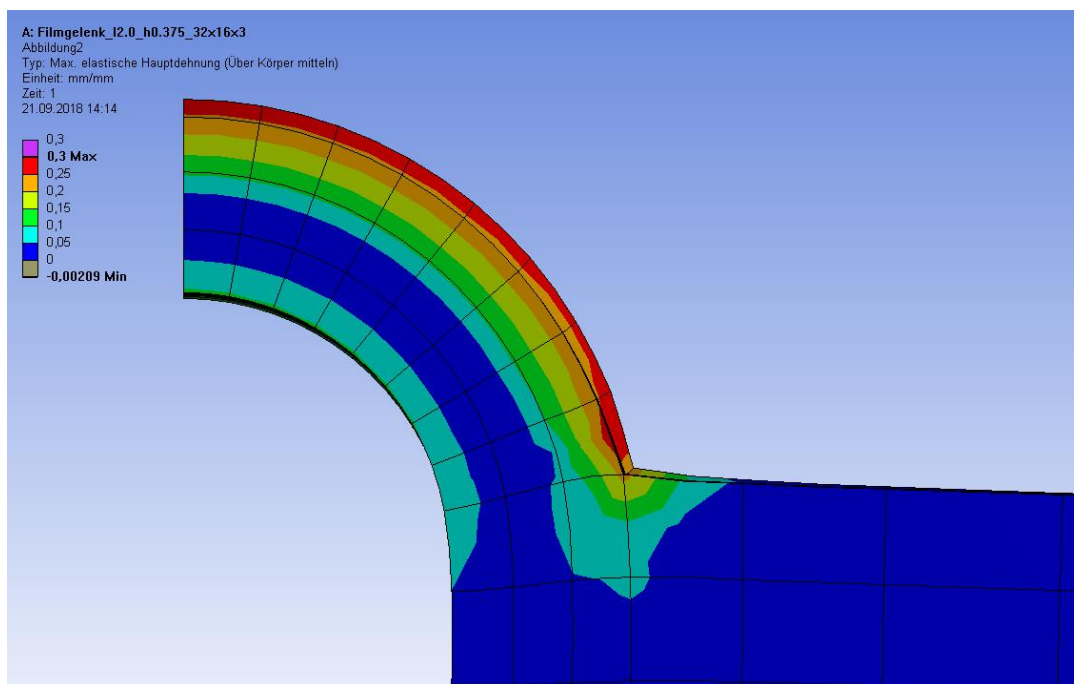


Abbildung 118: Kontourplot der elastischen Hauptdehnung im Querschnitt des Filmgelenkes bei einem Biegewinkel von 180° .

Es wurden 5 Geometrievarianten A bis E betrachtet (Abbildung 119). Tabelle 26 zeigt einen Vergleich zwischen Querschnittsform A und E bei verschiedenen Längen des Filmgelenks bei konstanter Dicke. Umso größer die Länge des Filmgelenks, desto kleiner werden die Dehnungen bzw. Spannungen. Dieser Zusammenhang wird bereits durch Formel (3.4) ausgedrückt, deren Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen übereinstimmen. Die Fase in der Querschnittsvariante E bringt keine Verbesserung zum Querschnitt A mit rechtem Winkel.

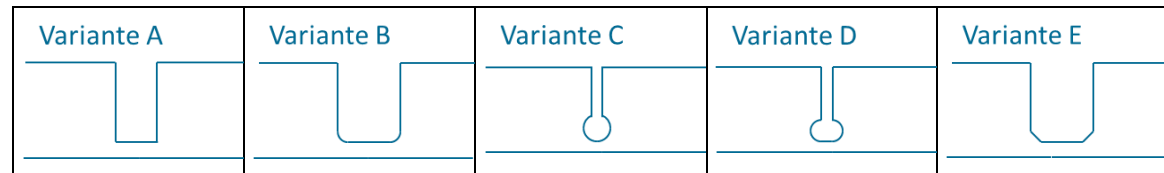
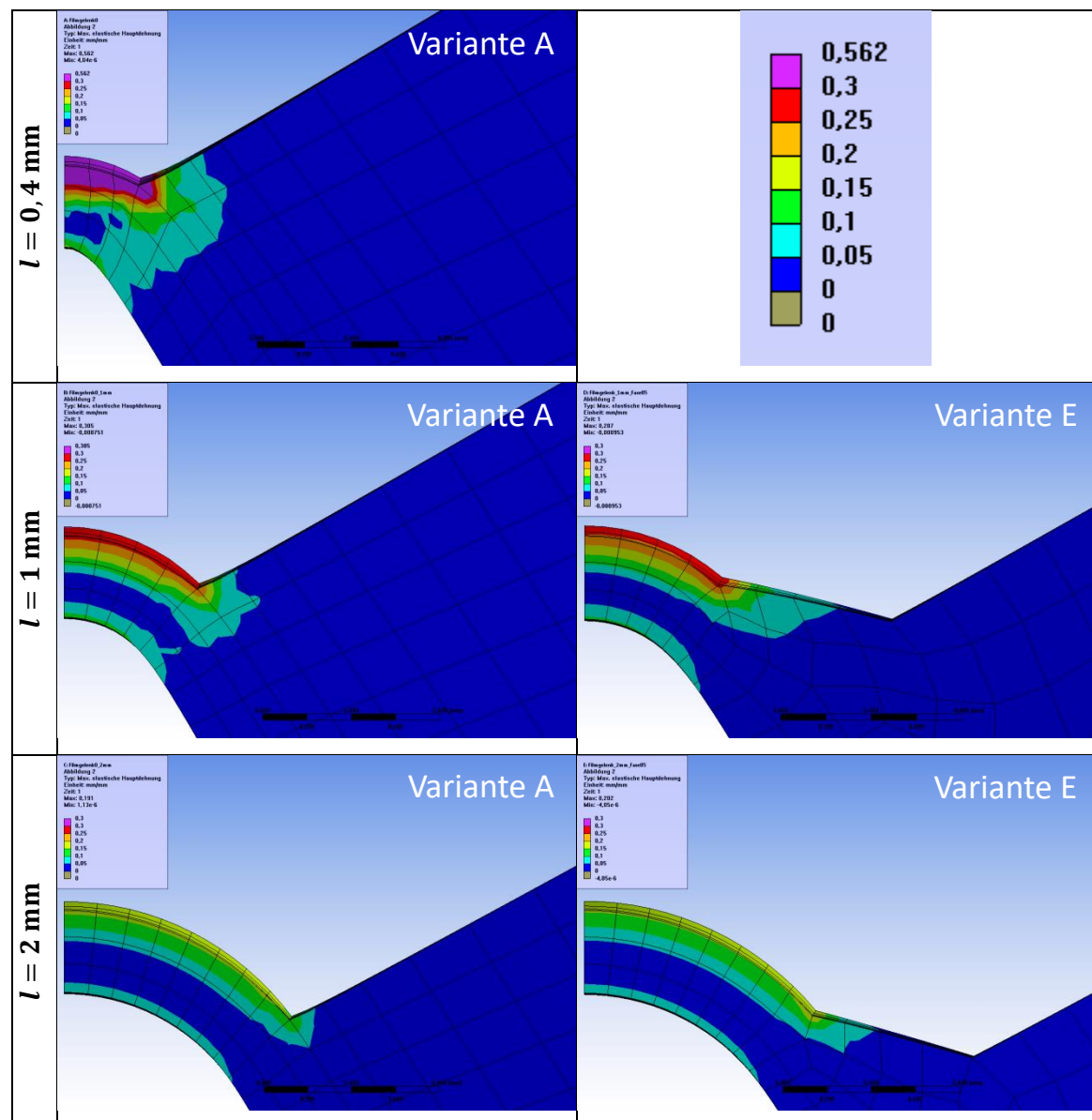


Abbildung 119: Geometrievarianten für die Gestaltung des Gelenkquerschnitts

Tabelle 26: Simulierte elastische Hauptdehnungen im Filmgelenk in Abhängigkeit von der Länge des Filmgelenks und der Querschnittsform



9.6 FEM-Modellierung des Gelenkknotens

Im Laufe des Projektzeitraumes wurde 13 verschiedene parametrische Geometrievarianten für einen faserverstärkten Gelenkknoten mit der CAD-Software Autodesk Inventor® erstellt, der Schichtaufbau mit der Software „Eiger“ untersucht und die CAD-Geometrie in Form einer Step-Datei in ANSYS eingelesen. Die nachfolgende Beschreibung des FEM-Modells beschränkt sich auf den optimierten Gelenkpunkt mit der Bezeichnung „Gelenk 13“. Dabei handelt es sich um die 13. und bisher letzte Geometrievariante, die auch für den Bau der Demonstratoren verwendet wurde (siehe Kapitel 8).

9.6.1 Parametrisches Geometriemodell und Vernetzung

Das parametrische CAD-Modell wird nach dem Einlesen in ANSYS mit Hilfe eines Python-Skriptes „gesliced“. Dazu wird ein Stapel von horizontalen Ebenen erzeugt, deren Abstand gleich der Schichthöhe von 0,125 mm ist. Mit Hilfe der Konstruktionsebenen wird das Bauteilvolumen in mehrere Teilvolumina geteilt, sodass jedem Teilvolumen eine Layer-Schicht im 3D-Druck entspricht. Anschließend werden die beiden vertikalen Symmetrieebenen des Gelenkknotens (x-z-Ebene und y-z-Ebene) genutzt um ein Viertelmodell des Knotens zu erstellen und damit den Berechnungsaufwand zu reduzieren, siehe Abbildung 120 bzw. Abbildung 123 oben. Die Vernetzung des Modells mit Hexaeder-Elementen vom Elementtyp SOLID186 zeigt Abbildung 121.

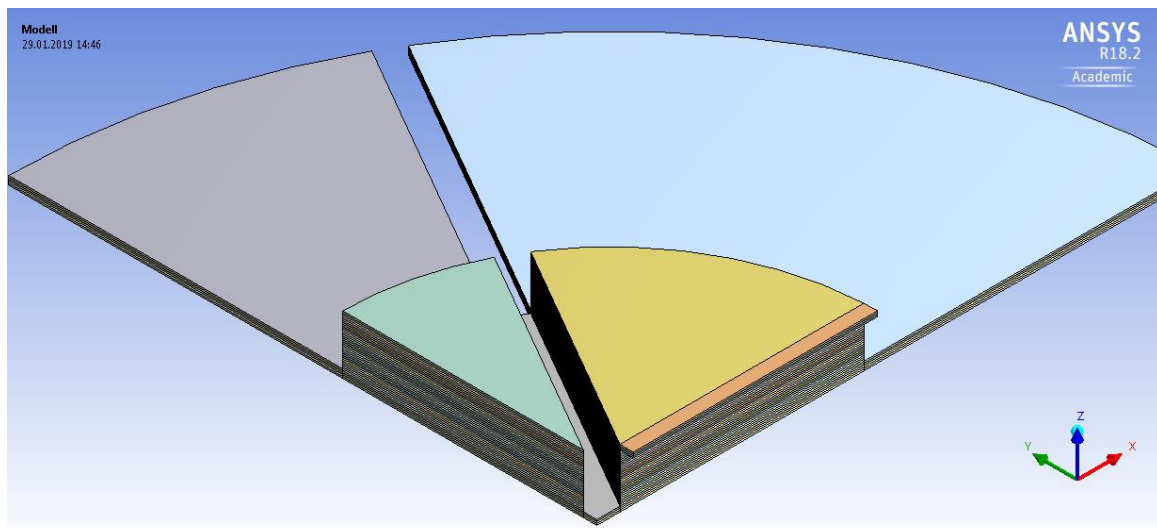


Abbildung 120: Viertelmodell der Geometrie des Gelenkknotens 13 in ANSYS unter Ausnutzung von Symmetrien. „Slicing“ des Volumens in horizontale Schichten, jedem Teilvolumen entspricht ein Layer beim 3D-Druck.

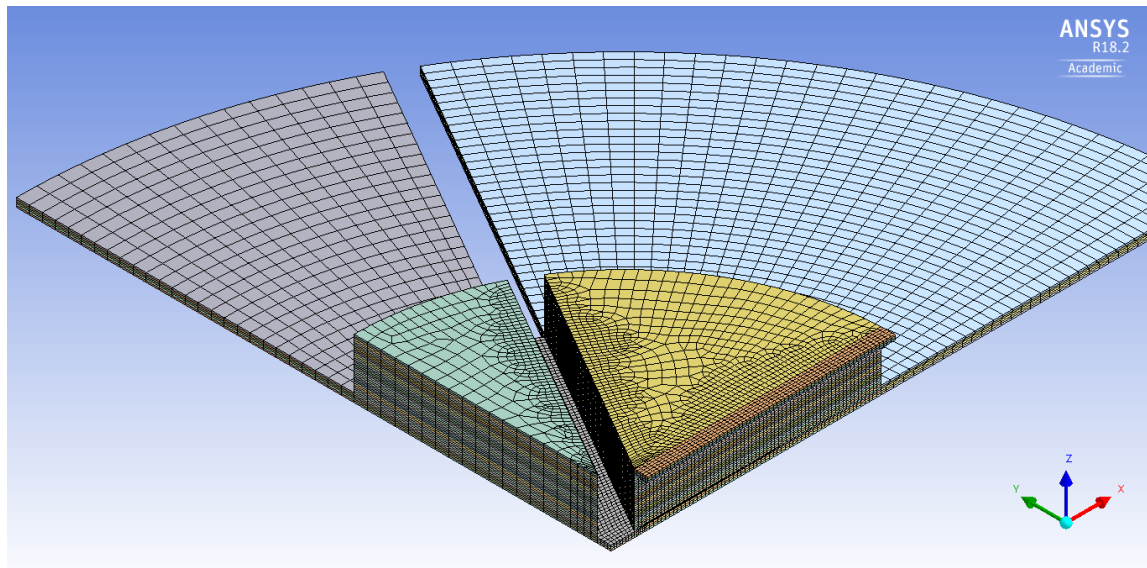


Abbildung 121: Vernetzung des Viertelmodells von Gelenkknoten 13 mit 52754 Hexaederelementen (234696 Knoten) vom Typ Solid186 (quadratischer Verschiebungsansatz, reduzierte Integration)

9.6.2 Materialmodell

Im 3D-gedruckten Gelenk mit den sechs um jeweils 60° gedrehten Filmgelenken gibt es keine bevorzugte Strangorientierung des Matrixwerkstoffes PA 6 bezüglich der Belastungsrichtung (siehe Abbildungen zu Schichtaufbau in Eiger). Aus diesem Grund wurde im Sinne einer konservativen Betrachtung aus den zuvor ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufen im Zugversuch eine untere Grenzkurve für den Werkstoff PA 6 ermittelt, die in Abbildung 122 dargestellt ist. Die Anfangsfließgrenze liegt bei 21 MPa. In der Klebefläche befindet sich in Layer 2 und 4 die C-Faserverstärkung. Diese Materialbereiche wurden elastisch modelliert mit einem Elastizitätsmodul von 54 GPa und einer Querkontraktionszahl von 0,3.

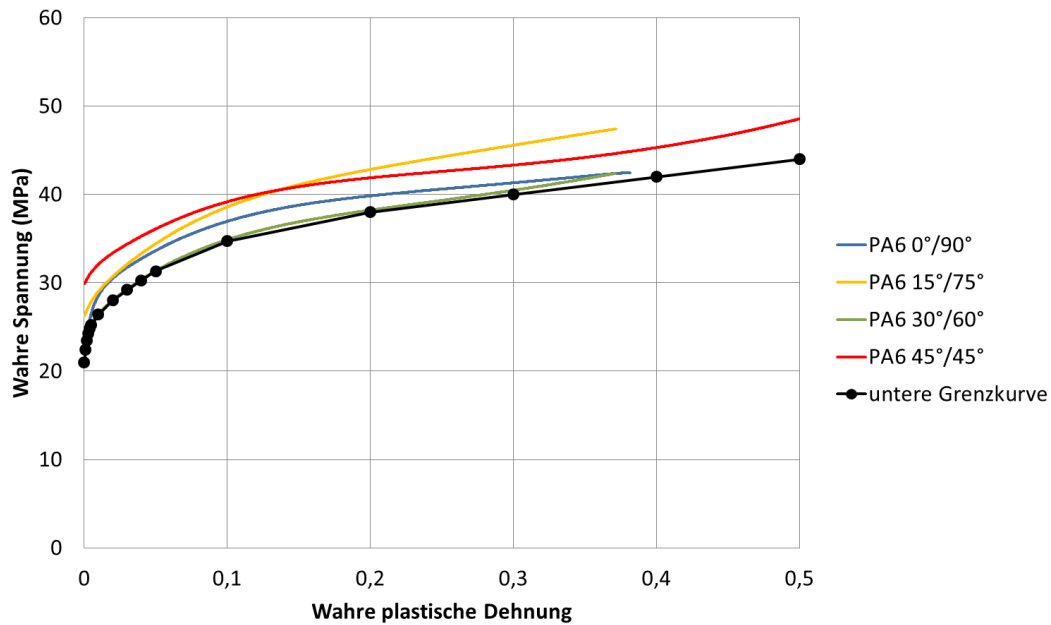


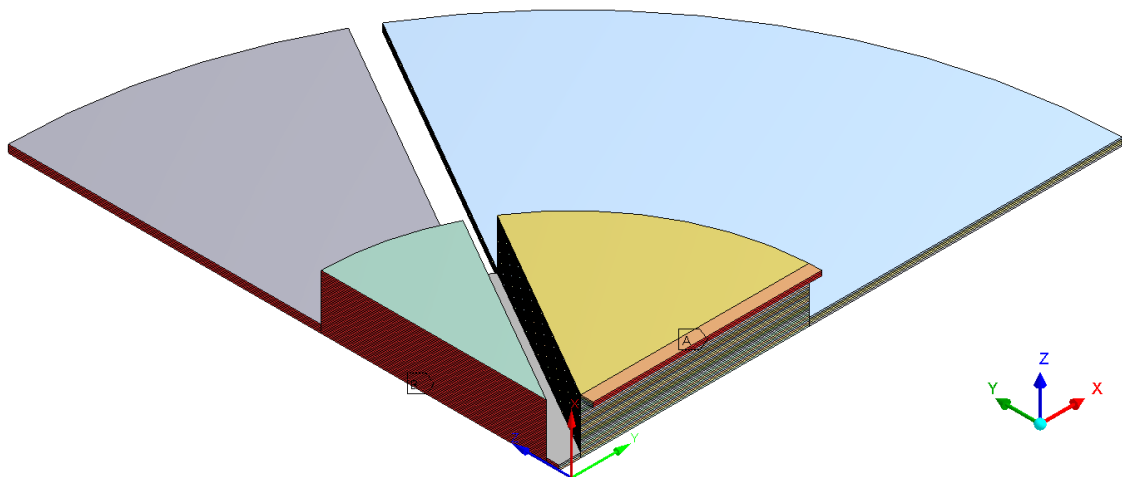
Abbildung 122: Untere Grenzkurve für das Fließverhalten des Matrixwerkstoffes PA 6.

9.6.3 Randbedingungen

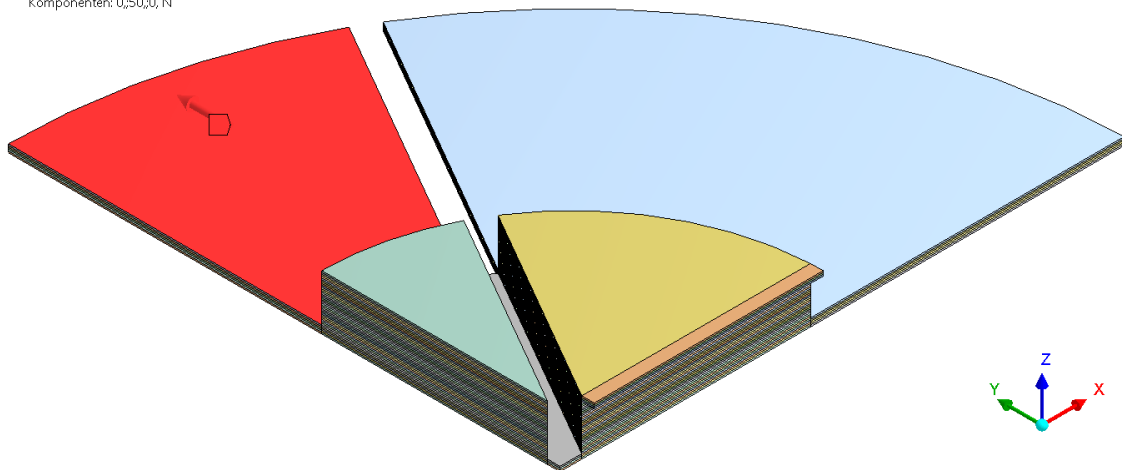
Die Kraft- und Verformungsrandbedingungen im FEM-Modell beeinflussen maßgeblich das Ergebnis der Simulation. Es wird ein typischer Lastfall betrachtet, bei dem der Gelenkknoten eine Zugkraft übertragen soll. Dabei werden die Filmgelenke im Gelenkknoten auf Zug und Schub beansprucht. In Abbildung 123 sind die verwendeten Randbedingungen im Geometriemodell farblich gekennzeichnet. An den Schnittflächen des Viertelmodells (x-z-Ebene und y-z-Ebene) wurde die Symmetrierandbedingungen definiert. Die Krafteinleitung erfolgt auf der halben Klebefläche des Viertelmodells als Scherkraft von 50 N in positive y-Richtung. Diese Kraft im Modell bewirkt, dass der Gelenkknoten eine Zugkraft von 100 N überträgt. Die Wirkung der Klebeverbindung wird durch eine elastische Lagerung mit der Steifigkeit von 1 N/mm pro mm² senkrecht zu den Klebeflächen modelliert.

Symmetrie-Bereich

- A Symmetrie-Bereich
- B Symmetrie-Bereich 2



- Kraft: 50, N
- Komponenten: 0,50,0, N



- A Elastische Lagerung: 1, N/mm³
- B Elastische Lagerung 2: 1, N/mm³

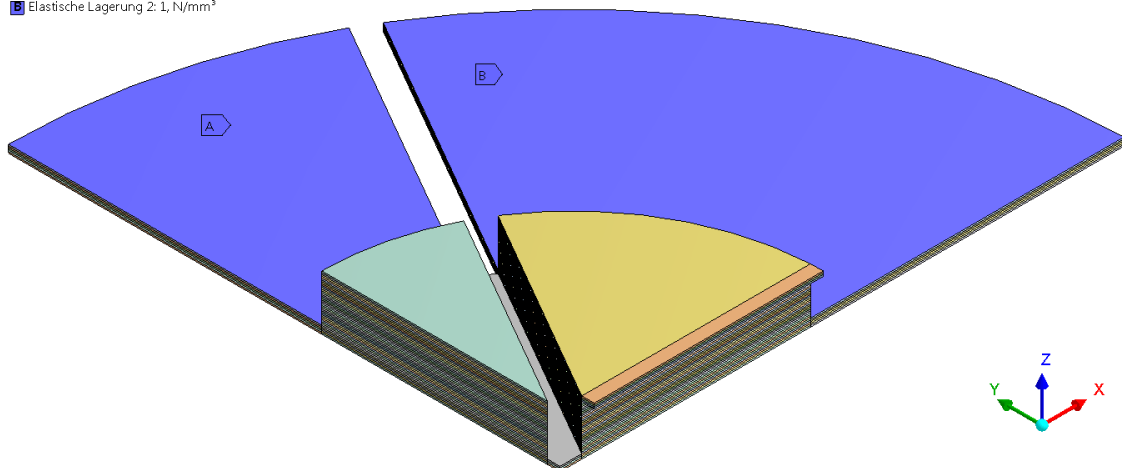


Abbildung 123: Randbedingungen im FEM-Modell von Gelenkknoten 13.
(oben) Symmetrierandbedingungen in x-z-Ebene und y-z-Ebene,
(mittig) Krafterandbedingung (50 N) auf halbe Klebefläche in y-Richtung,
(unten) elastische Lagerung der Klebefläche mit Steifigkeit 1 N/mm pro mm² in z-Richtung

9.7 Simulationsergebnisse für „Gelenk 13“

Die nachfolgenden Konturplots zeigen ausgewählte Simulationsergebnisse für die Gelenkgeometrie mit der Bezeichnung „Gelenk 13“, welche für eine ertragbare Kurzzeitzugbelastung von 100 N dimensioniert wurde.

Die Vergleichsspannung nach von Mises auf der Oberseite (Abbildung 124) und Unterseite (Abbildung 125) des Gelenkknotens zeigt, dass die Materialbereiche der sechs Filmgelenke mit einer Dicke von 0,375 mm (3 Layer) stark beansprucht werden. Die Beanspruchung in den faserverstärkten Materialbereichen wird erst im Querschnitt des Simulationsmodells sichtbar (Abbildung 126). Die beiden C-Faserverstärkten Layer 2 und 4 übernehmen den wesentlichen Teil der Kraftübertragung in der Klebelasche, die insgesamt aus 5 Layern über der Höhe aufgebaut ist. Die größten Zugspannungen von über 200 MPa treten in der oberen Faserschicht (Layer 4) am Übergang von der Klebelasche zum Knotenkörper auf.

Interessanter als ein Blick auf die Spannung ist ein Blick auf die Dehnungen, dargestellt in Tabelle 27. Die Gesamtdehnung wurde aufgeteilt in den elastischen und den plastischen Anteil. Die Dehnung bleibt fast vollständig elastisch, nur ein winzig kleiner Materialbereich (sehr viel kleiner als Breite des Gelenkquerschnitts) am inneren und äußeren Rand der Filmgelenke erfährt bei der simulierten Belastung eine plastische Verformung infolge der dortigen Kerbwirkung. Die lokalen Spannungsspitzen werden dort sofort durch plastische Verformung abgebaut. Die Gesamtquerschnitte aller Filmgelenke bleiben jedoch elastisch. Während lokal sehr begrenzt im Kerbgrund Dehnungen bis 10% auftreten liegt die mittlere Gesamtdehnung im Filmgelenk unter 3% oder anders gesagt, das Filmgelenk wird unter Zugbelastung weniger als 0,06 mm gedehnt. Die Voraussetzung für die Tragfähigkeit dieses Gelenkknotens unter einer kurzzeitigen Zugbelastung von 100 N ist also erfüllt.

Zum Vergleich sollen die Ergebnisse einer vereinfachten Nennspannungsberechnung für diesen Lastfall angegeben werden. Die Nennzugspannung (Zugkraft von 100 N geteilt durch doppelte Querschnittsfläche des Filmgelenks von 13,68 mm²) im Filmgelenk beträgt 7,3 MPa, was rund 35% der Fließspannung von 21 MPa entspricht. Jede der sechs Klebeflächen hat einen Flächeninhalt von 800 mm². Die mittlere Schubspannung in der Klebefläche beträgt daher nur 0,125 MPa, was 25% der geringsten gemessenen Klebefestigkeit von 0,5 MPa entspricht.

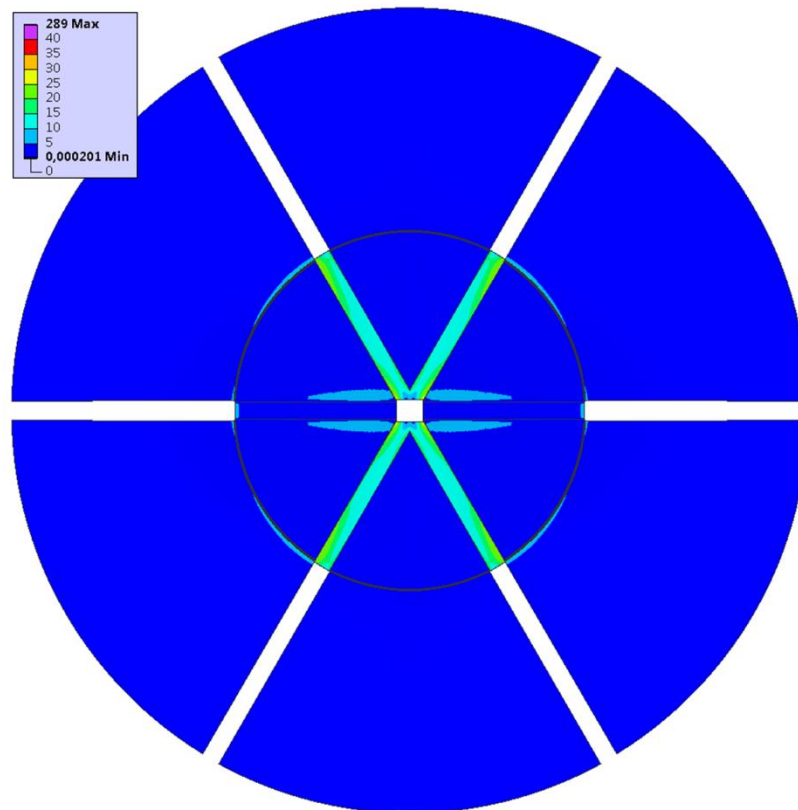


Abbildung 124: Vergleichsspannung nach von Mises auf der Oberseite des Gelenkknotens bei einer vertikalen Zugbelastung von 100 N (Viertelmodell gespiegelt an Symmetrieebenen)

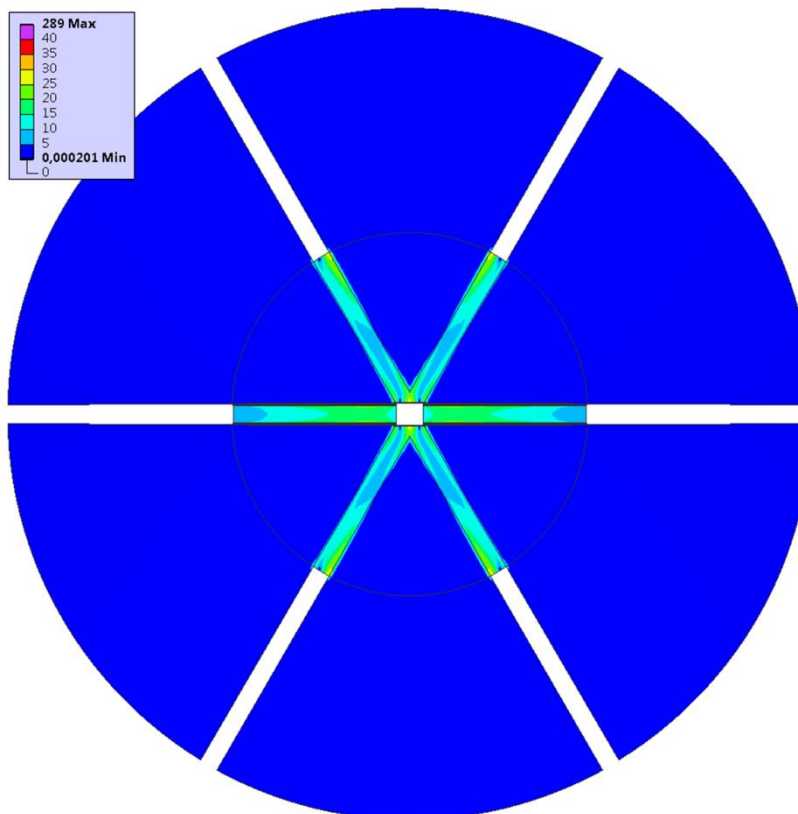


Abbildung 125: Vergleichsspannung nach von Mises auf der Unterseite des Gelenkknotens bei einer vertikalen Zugbelastung von 100 N (Viertelmodell gespiegelt an Symmetrieebenen)

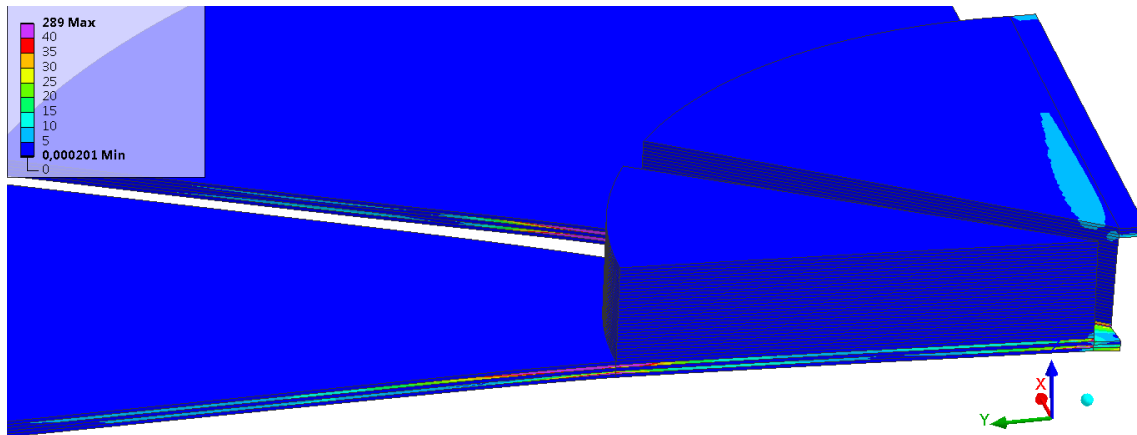
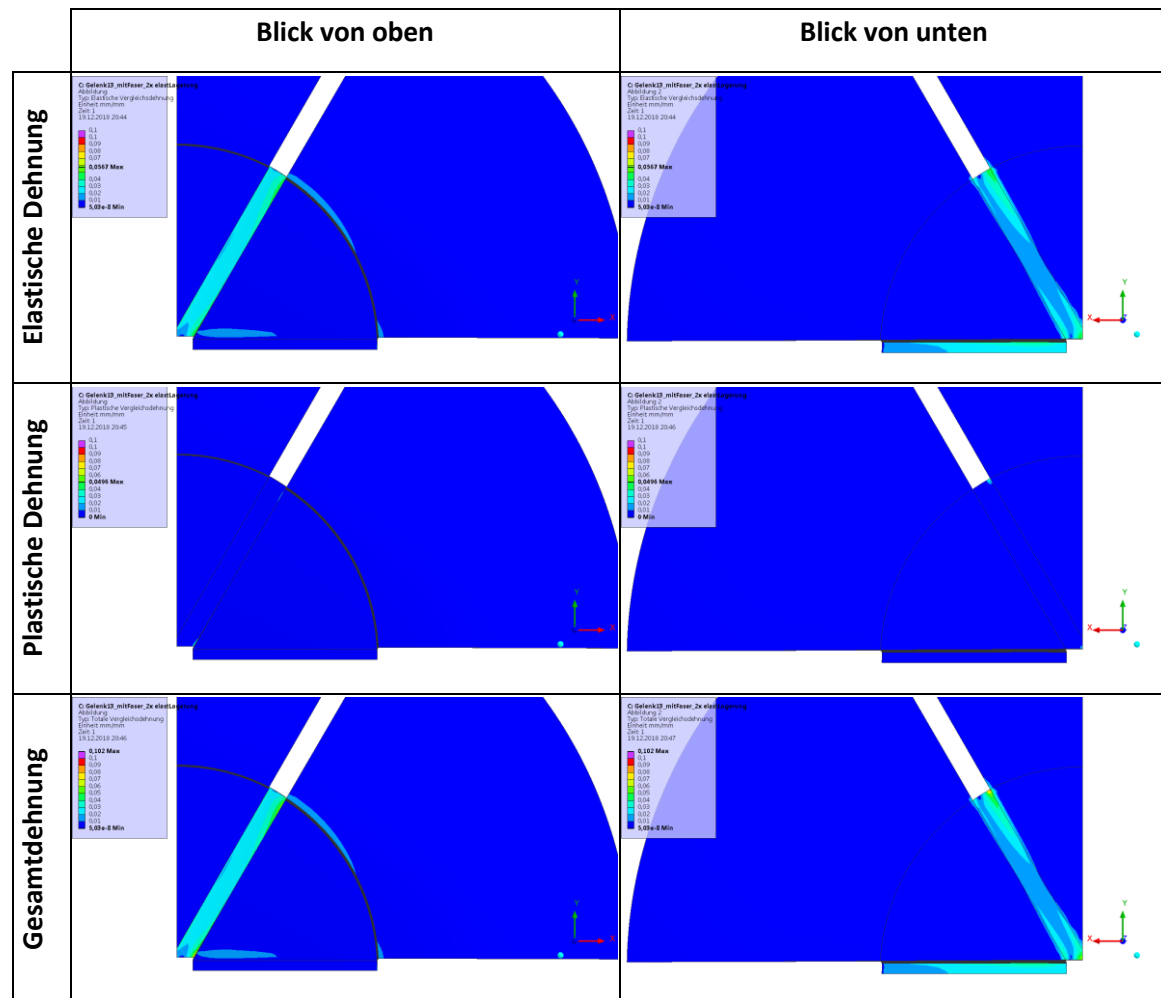


Abbildung 126: Mises-Vergleichsspannung im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N) in y-Richtung. Seitliche Ansicht auf den Symmetriequerschnitt (y-z-Ebene). Die hohen Spannungen treten in den beiden C-Faserlayers auf, welche die wesentliche Kraftübertragung übernehmen

Gedankenexperiment: Wenn ein Querschnittsbereich vollständig plastifiziert wäre, dann würde dieser Materialbereich ohne zusätzliche Laststeigerung bereits nach wenigen Minuten unzulässig große viskoplastische Verformungen erfahren, wie die Zugkriechversuche bei 22 MPa gezeigt haben. Obwohl der 3D-gedruckte Polyamidwerkstoff Mises-Vergleichsspannungen bis 30 MPa ertragen kann ohne zu versagen, würde das Filmgelenk dabei zu sehr bleibend gedehnt. Man könnte sagen, bei Belastungen oberhalb der Fließgrenze würde das Gelenk „ausleiern“, es würde sich lockern und es könnte seine ihm zugeordnete Funktion als gelenkige lasttragende Verbindung zwischen schubsteifen Platten nicht mehr erfüllen.

Dieses Simulationsbeispiel zeigt, dass mit Hilfe der FEM-Simulation des Gelenkknotens mit einem elastisch-plastischen Materialmodell der kritische Grenzzustand für unzulässig große plastische Verformungen ermittelt werden kann. Bei Langzeitbelastungen nehmen die Dehnungen auch unterhalb der Fließgrenze infolge viskoelastischen Kriechens zu. Für diesen Fall muss der rechnerische Nachweis mit einem viskoelastischen Materialmodell erfolgen. Das viskoelastische Maxwell-Wiechert-Modell (Prony-Reihe), dessen Modellparameter im Abschnitt 9.1.3 mittels Kriechkurven bestimmt wurden, ist dafür geeignet. FEM-Simulationen für das viskoelastische Langzeitverhalten konnten im Projektzeitraum jedoch nicht mehr durchgeführt werden.

Tabelle 27: Simulierte Dehnungen im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N)



9.8 Vergleich Simulationsergebnisse Gelenkknoten mit/ohne Faserverstärkung

Um den positiven Effekt der Faserverstärkung im optimierten Knotendesign zu veranschaulichen wurde der mit Faserverstärkung modellierte Gelenkknoten 13 aus dem vorigen Abschnitt verglichen mit dem Knoten gleicher Geometrie, jedoch ohne Faserverstärkung (d.h. alle Layer werden mit dem elastisch-plastischen Matrixwerkstoff PA 6 modelliert. Die Randbedingungen stimmen mit denen aus dem vorigen Abschnitt überein.

Die Kontourplots der Verschiebung in z-Richtung (senkrecht zur Zugrichtung) zeigen eindrucksvoll, dass ohne Faserverstärkung die Klebelasche am Rand der Klebefläche sehr viel stärker gebogen wird. An dieser Stelle würde infolge der Schälwirkung ein Versagen der Klebefuge begünstigt. Noch deutlicher wird der Unterschied, wenn man die Vergleichsdehnung in Abbildung 128 und die Mises-Vergleichsspannung in Abbildung 129 betrachtet. Im Matrixwerkstoff der Klebelasche und im Filmgelenkbereich treten großflächig Spannungen nahe der Fließgrenze auf. In diesen Bereichen würden unzulässig große Kriechverformungen auftreten, die mit Hilfe der Faserverstärkung verhindert werden.

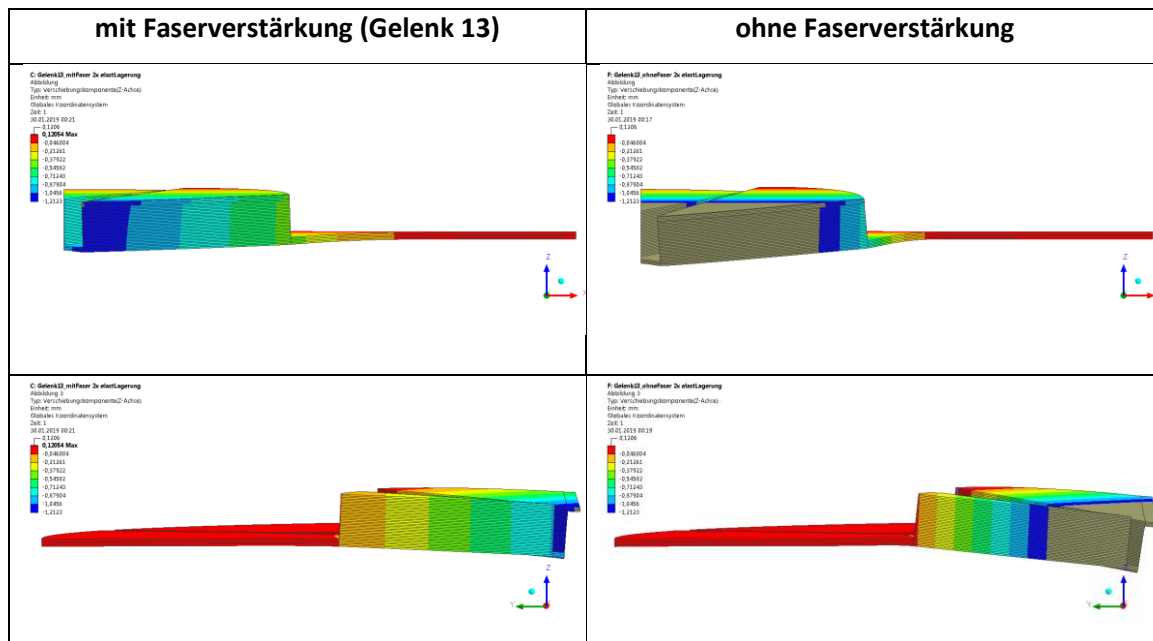


Abbildung 127: Vertikale Verformung des Gelenkknotens 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung

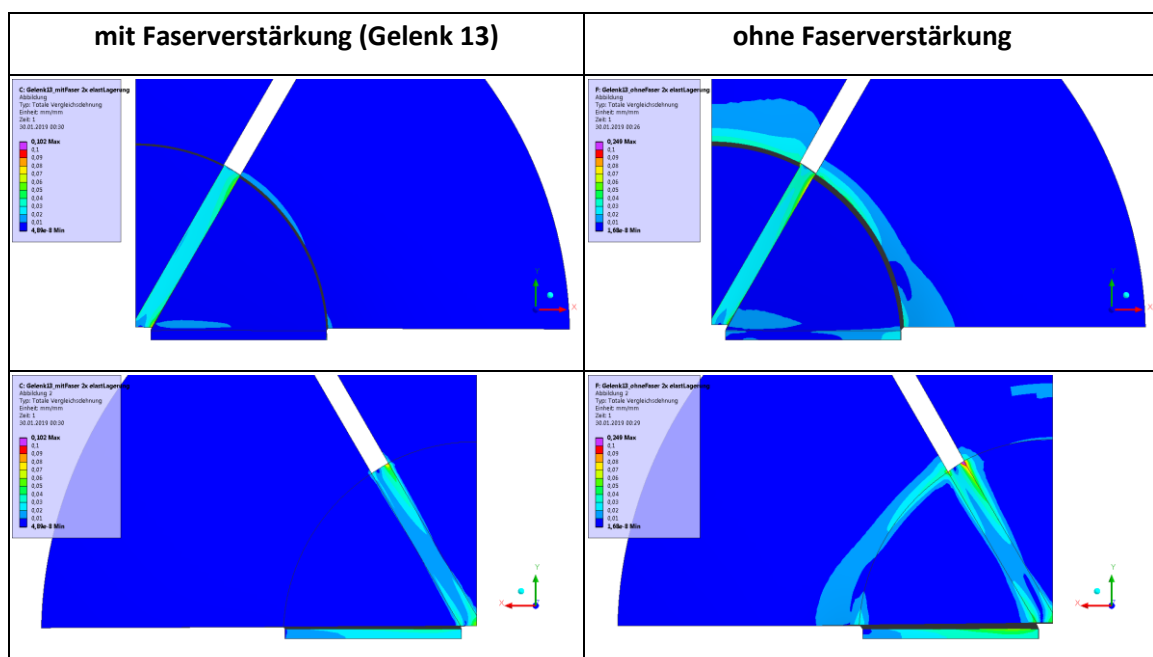


Abbildung 128: Vergleichsdehnung im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung. (oben) Ansicht von oben, (unten) Ansicht von unten.

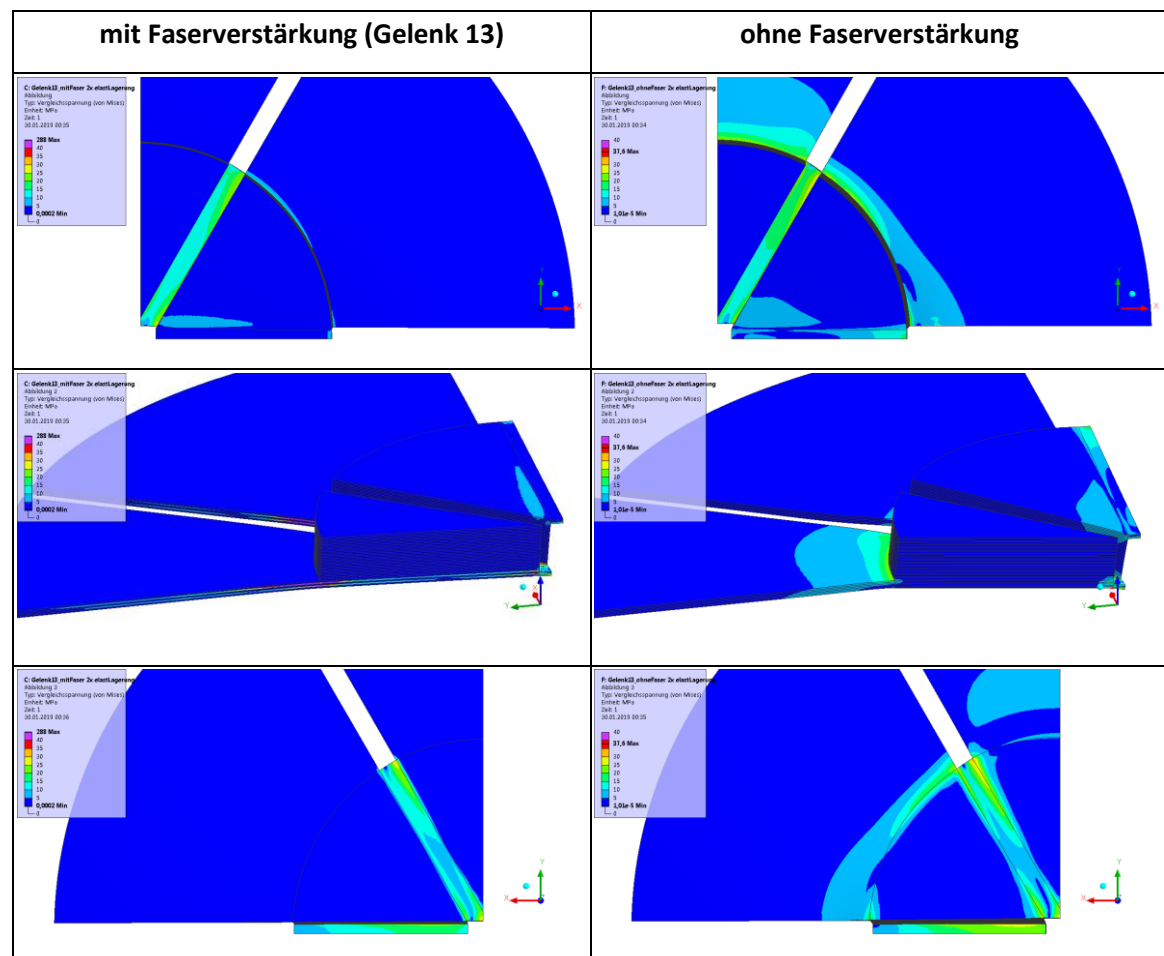


Abbildung 129: Vergleichsspannung (von Mises) im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung. (oben) Ansicht von oben, (mittig) Ansicht auf Querschnittsfläche, (unten) Ansicht von unten.

10 Beanspruchungsgerechte Dimensionierung der Gelenkknoten

10.1 Auslegungs- und Dimensionierungskonzept

Die mechanischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen hängen in sehr viel stärkerem Maße von der Temperatur, der Zeit, der Höhe und Art der Beanspruchung, dem Formgebungsprozess und weiteren Umwelteinflüssen wie zum Beispiel der Luftfeuchtigkeit ab, als dies bei den Konstruktionswerkstoffen Stahl, Beton oder Holz der Fall ist. Die additive Fertigung bringt zusätzliche Einflussfaktoren mit sich. Obwohl Polymerwerkstoffe häufig etwa eine Festigkeit aufweisen, die bei etwa einem Zehntel der Festigkeit von Metallen liegt, beträgt die Materialsteifigkeit dagegen nur etwa ein Hundertstel. Ein Kunststoffbauteil wird daher häufiger aufgrund übergroßer Verformung unbrauchbar als durch Materialbruch. Die Auslegung muss deshalb nach anderen Kriterien erfolgen als dies von den klassischen Konstruktionswerkstoffen bekannt ist. [Ehr04]

Damit die additiv gefertigten Gelenkknoten den zu erwartenden Beanspruchungen standhalten können, ist eine Vordimensionierung erforderlich. Die Bewertung der mechanischen Tragfähigkeit hinsichtlich zulässiger Spannungen und Verformungen muss dann mit Hilfe der FEM oder experimentell erfolgen.

Die zwei gefährdetsten Regionen für das Strukturversagen für das durch die Gelenkknoten verbundene Faltnetz sind die mechanisch hoch beanspruchten Gelenkachsen, die als Filmgelenke (Festkörpergelenk) ausgebildet sind, und die Klebeverbindungen zwischen den Klebelaschen der Knoten und den schubsteifen Plattenelementen. Bei der Auslegung des Gelenkknotens müssen aus Sicht des Materials folgende drei grundlegenden Beanspruchungen immer berücksichtigt werden, damit der Gelenkknoten seine ihm zugeordnete Funktion erfüllen kann:

- Wiederholte Biegeverformung in den Filmgelenken,
- Zug-, Druck- und Scherkräfte in den Filmgelenken,
- Scher- und Schälkräfte in der Klebeverbindung

Damit diese Beanspruchungen von vornherein bei der Entwicklung des CAD-Modells für die additive Fertigung berücksichtigt werden können, wurde ein parametrisches Dimensionierungskonzept entwickelt, in das Materialkennwerte einfließen, die in diesem Projekt anhand von experimentellen Untersuchungen an additiv gefertigten Proben aus dem Grundmaterial PA 6 und aus faserverstärkten PA 6 bestimmt wurden. Das Ergebnis der Vordimensionierung sind geometrische Abmessungen des faltbaren Gelenkknotens, die in das parametrische CAD-Modell transferiert werden. Das CAD-Modell dient nicht nur als Basis für die additive Fertigung, sondern auch als Geometriemodell für die FEM-Analyse, anhand der im Falle einer Über- oder Unterdimensionierung eine Korrektur der Querschnittsabmessungen erfolgen kann. Das gleiche FEM-Modell kann später als Basismodell für den Tragfähigkeitsnachweis bei verschiedenen

Lastfällen verwendet werden. Abbildung 130 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Dimensionierung bis zur Generierung des parametrischen CAD-Modells.

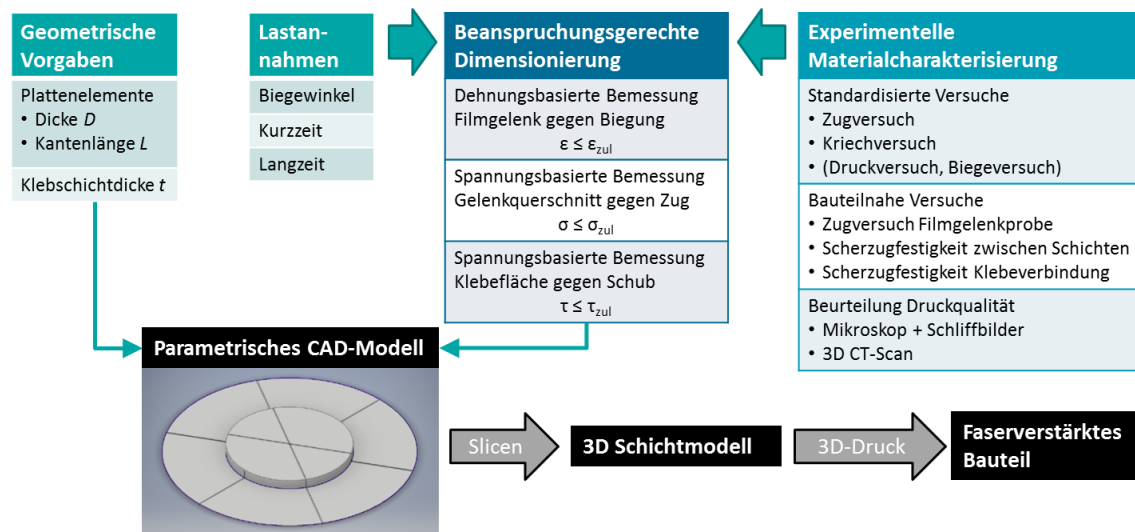


Abbildung 130: Parametrisches Dimensionierungskonzept für die beanspruchungsgerechte Auslegung von additiv gefertigten faltbarer Gelenkpunkten

Das Konzept basiert auf vereinfachten Berechnungen von Dehnungen und Spannungen im betrachteten Querschnitt entsprechend einem Nennspannungskonzept. Dabei wird von den experimentell ermittelten Kennwerten für die statische Kurzzeitbelastung ausgegangen. Die Abweichung der tatsächlichen Spannung von der Nennspannung wird über Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Die genaue Berechnung der Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit der Belastung kann später mit Hilfe von FEM-Berechnungen für den jeweiligen Lastfall erfolgen. Die Verminderung der zulässigen Spannung/Dehnung bei Langzeitbelastung oder dynamischer Belastung kann über zeitabhängige Abminderungsfaktoren erfolgen. Die hier verwendeten Bezeichnungen und Formelzeichen orientieren sich an der im Bereich der Kunststofftechnik üblichen Nomenklatur [Ehr07, Dom05].

10.2 Parametrisierung

In die Dimensionierung gehen die Abmessungen der dreieckigen Plattenelemente (Plattendicke D , Kantenlänge L) und die Dichte des Plattenwerkstoffs ρ ein. Außerdem wird die Schichthöhe s eines Layers beim 3D-Druck und die Dicke der Klebschicht t benötigt. Die schwächste Stelle des Gelenkpunktes ist der Materialbereich des Filmgelenks, dessen Abmessungen durch die Höhe h , die Länge l und die Breite b gegeben ist.

Materialseitig werden die zulässige Dehnung ε_{zul} bei maximaler Faltung des Filmgelenks, die zulässige Spannung σ_{zul} bei Zugbelastung des Filmgelenks und die zulässige Schubspannung in der Klebefläche τ_{zul} benötigt. Dabei muss zwischen Kurzzeit- und Langzeitbelastung unterschieden

werden. Die zulässigen Materialkennwerte bei Langzeitbelastung sind aufgrund der Kriechneigung des verwendeten Kunststoffs deutlich gegenüber den Kennwerten bei Kurzzeitbelastung abzumindern.

Die maßgeblichen Beanspruchungssituationen für die Dimensionierung des Gelenks sind der maximale Biegewinkel β_{max} bei der Faltung und die maximale Zugkraft F_{max} im entfalteten Zustand des Gelenks. (Druckbeanspruchungen werden als weniger gefährlich eingeschätzt.)

10.3 Dimensionierung gegen zul. Dehnung im Filmgelenk

Das erforderliche Verhältnis von Höhe zu Länge des Filmgelenks ergibt sich durch Umstellen von Gleichung (3.4):

$$\frac{h}{l} \leq \frac{2 \cdot \varepsilon_{zul}}{\beta} \quad (10.1)$$

bzw.

$$\frac{l}{h} \geq \frac{\beta}{2 \cdot \varepsilon_{zul}} \quad (10.2)$$

Wenn der tragende Querschnitt $b \cdot h$ des Filmgelenks vorgegeben ist, kann die Dimensionierung nur über die Veränderung der Länge erfolgen. Aufgrund der experimentellen Ergebnisse mit den Filmgelenkproben, die bis zu tausendmal ohne deutlich erkennbare Schädigung gefaltet wurden, wird die zulässige Biegedehnung für den additiv gefertigten Werkstoff PA 6 mit 30% angesetzt. Zum Vergleich seien hier an Filmgelenken gemessene Dehnungskennwerte für PA 6 aus der Literatur genannt [Ehr04], aus den hervorgeht, dass der maximal ertragbare Dehnungsausschlag nach 10^4 Lastwechseln 55% und nach 10^5 Lastwechseln 45% betrug.

10.4 Dimensionierung gegen zul. Spannung im Filmgelenk

Die erforderliche Querschnittsfläche in einem gleichmäßig auf Zug beanspruchten Filmgelenk wird mit der Gleichung

$$\sigma_n = \frac{F_{max}}{2 \cdot b \cdot h} \leq \sigma_{zul} \quad (10.3)$$

bzw.

$$b \cdot h \geq \frac{F_{max}}{2 \cdot \sigma_{zul}} \quad (10.4)$$

berechnet (Faktor 2, weil sich die Belastung auf zwei Filmgelenke aufteilt).

Die Grundgleichung für die konventionelle Dimensionierung lautet [Ehr07]:

$$\sigma_{max} \text{ bzw. } \sigma_{Vmax} \leq \sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} \quad (10.5)$$

mit

σ_{max} Maximaler Spannungswert bei einachsiger Beanspruchung

$\sigma_{V\ max}$ Maximaler Vergleichsspannungswert bei mehrachsiger Beanspruchung

K Kurzzeit-Festigkeitskennwert (Streckgrenze σ_S oder Spannung bei nichtelastischer Verformung $\sigma_{0,5}$ mit Verschiebung Gerade der Anfangsteigung (E-Modul) um 0,5%)

S Sicherheitsbeiwert

A Werkstoffabminderungsfaktor, berücksichtigt festigkeitsmindernde Einflüsse (Belastungsbedingungen, Umwelteinflüsse)

Der Faktor A wird in Einzelfaktoren aufgeteilt:

$$A = A_T \cdot A_{St} \cdot A_{dyn} \cdot A_{Rest} \quad (10.6)$$

A_T Festigkeitsabfall durch Temperatureinfluss gegenüber 20°C (unter 20°C wird keine Festigkeitsänderung berücksichtigt)

A_{St} Festigkeitsabfall aufgrund Zeitstandbelastung

A_{dyn} Festigkeitsabfall aufgrund dynamischer Belastung (1,3 bis 1,7)

Nach Ehrenstein [Ehr07] können folgende Werte für PA 6 mit $k = 0,0125$ angesetzt werden,

$$A_T = \frac{1}{1 - k(T/^\circ C - 20)} \quad (10.7)$$

sodass gilt:

- $A_T(20^\circ C) = 1$
- $A_T(30^\circ C) = 1,14$
- $A_T(40^\circ C) = 1,33$
- $A_T(50^\circ C) = 1,6$
- $A_T(60^\circ C) = 2$

[Ehr07] gibt folgende Richtwerte für den Festigkeitsabfall aufgrund Zeitstandbelastung an:

- $A_{St}(\text{wenige Std.}) = 1,4$
- $A_{St}(\text{Wochen}) = 1,7$
- $A_{St}(\text{Monate}) = 1,8$
- $A_{St}(\text{Jahre}) = 2$

Die restlichen Einflüsse sind zum Beispiel der Alterungseinfluss, Wassereinfluss, Kerbeinfluss, Fertigungseinfluss, Unsicherheit bei der Ermittlung der Kennwerte.

Zur überschlägigen Abschätzung von Abminderungsfaktoren eignen sich die in der Tabelle angegebenen Werte. Die Angabe von Bereichen kennzeichnet die Ungenauigkeit der Erfassung der Beanspruchung. Die Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Abminderungsfaktoren kann nach Oberbach [Obe90] aus isochronen oder isothermen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen bestimmt werden.

Tabelle 28: Abschätzung von A-Faktoren für verschiedene Thermoplasttypen (nach Oberbach [Obe90])

Thermoplaste	statisch			dynamisch	
	kurzzeitig		langzeitig	n≤10 ⁷	
	einmalig	mehrmalig		teilkristallin	amorph
teilkristallin (duktile)	1 ÷ 1,25	1,25 ÷ 1,7	1,7 ÷ 2	3,3 ÷ 5	-
amorph (spröde)	1,25 ÷ 1,5	1,5 ÷ 2	2 ÷ 2,5	-	5 ÷ 6,2
glasfaserverstärkt	1,4 ÷ 1,8	1,8 ÷ 2,2	2,2 ÷ 2,9	4	6

Der mehrachsige Spannungszustand wird mit einer mathematischen Formulierung auf ein Vergleichsspannung σ_V reduziert, von der angenommen wird, dass sie den Werkstoff in vergleichbarer Weise beansprucht. Für duktile Werkstoffe haben sich zwei Vergleichsspannungshypothesen bewährt. Mit dem Schubspannungskriterium

$$\sigma_V = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (10.8)$$

kann die Schubfestigkeit τ_B aus der Bruchfestigkeit σ_B berechnet werden:

$$\tau_B = 0,5 \sigma_B \quad (10.9)$$

Die Erfahrung zeigt [Ehr07], dass auch die Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (HMH-Kriterium nach Huber, von Mises und Hencky, kurz: Mises-Spannung)

$$\sigma_{V,HMH} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (10.10)$$

zu hinreichend genauen Ergebnissen führt. Aus der Hypothese folgt für die Schubfestigkeit:

$$\tau_B = 0,58 \sigma_B \quad (10.11)$$

Aus den bisherigen FEM-Simulationsergebnissen für einen Gelenkknoten, der eine Zugkraft zwischen zwei Platten überträgt, ging hervor, dass infolge der Kerbwirkung und zusätzlicher Biegebeanspruchung im Filmgelenk die maximale Mises-Vergleichsspannung gegenüber der Nennspannung bei reiner Zugbelastung im Filmgelenk um den Faktor 3 erhöht ist. Damit keine plastischen Verformungen auftreten, wird die Spannungsüberhöhung für die Umrechnung der Nennspannung in die lokale Vergleichsspannung $\sigma_{V,max}$ berücksichtigt. Das ist äquivalent zur Verwendung eines Sicherheitsfaktors von 3 zwischen der Fließgrenze des Materials bei Kurzzeitbelastung und der zulässigen Nennspannung aus Gl. (10.3). Bei diesem Faktor bestehen noch Festigkeitsreserven, weil der Materialbereich des Filmgelenkes zunächst nur im Kerbgrund plastisch zu fließen beginnt, der sehr viel größere Restquerschnitt jedoch elastisch bleibt und erst nach weiterer Laststeigerung sukzessive plastisch verformt wird.

10.5 Dimensionierung gegen zul. Schubspannung in der Klebefläche

Die erforderliche Fläche der Klebefuge ergibt sich aus der zu übertragenden Kraft und der Scherfestigkeit der Klebeverbindung. Die ausgewählten Klebstoffe (doppelseitiges Industrieklebeband, Silan-Hybridklebstoff) härten nicht aus. Sie verhalten sich viskoelastisch bzw. gummielastisch, Spannungsspitzen am Rand der Klebefläche werden so durch Verformung abgebaut. Die erforderliche Klebefläche kann einfach mit

$$A_{Kleb} \geq \frac{F_{max}}{\tau_{zul}} \quad (10.12)$$

berechnet werden. Die zulässige mittlere Schubspannung in der Klebefläche wird aus den gemessenen Zugscherfestigkeiten aus Abschnitt 7.3 und einem Sicherheitsfaktor von 5 berechnet. Die Form einer der sechs identischen Klebelaschen entspricht einer Teilfläche eines Kreises (siehe Abbildung 92). Der Inhalt dieser Teilfläche kann mit folgender Formel aus dem Innenradius R_i , dem Außenradius R_a und der Spaltbreite l berechnet werden:

$$A_{Kleb} = \pi(R_a^2 - R_i^2)/6 - (R_a - R_i) \cdot l \quad (10.13)$$

Die Spaltbreite ist gleich der Länge des Filmgelenks, die wie der Innenradius aus der Dimensionierung des Filmgelenks hervorgeht. Der erforderliche Außenradius kann dann aus der Formel für die Klebefläche ermittelt werden.

10.6 Bemessung Verbundwerkstoff der Klebelasche

Die Verbindungsfestigkeit der Klebeverbindung zwischen einem Plattenelement und einer Klebelasche des Gelenkknotens kann gesteigert werden, wenn die Klebelasche durch die Faserverstärkung versteift wird. Dadurch wird nicht nur die Kriechneigung des PA 6 unterdrückt, sondern vor allem der Schälwiderstand der einschnittig überlappten Klebeverbindung erhöht. Das Ziel ist dabei, die Biegesteifigkeit der Klebelasche soweit zu erhöhen, bis kein Abschälen mehr möglich ist. Anstelle der Schälbelastung, bei der die Kraft nur auf einer Linie wirkt, wird die Klebeverbindung dann auf Klaffen beansprucht. Für die Bemessung des Verbundwerkstoffes wird deshalb die von der Dicke und dem Schichtaufbau abhängige Biegesteifigkeit herangezogen. Bei Biegeverformung wird der Dehnungsverlauf über der Dicke als linear angenommen. Da heißt, in der Faserschicht treten aufgrund ihrer höheren Materialsteifigkeit auch größere Spannungen auf. Bei gleicher Dehnung in Faser und Matrix gilt der Zusammenhang

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_M} = \frac{E_F}{E_M} \quad (10.14)$$

Die Zugsteifigkeit des unidirektionalen Verbundes mit der Querschnittsfläche $A = n A_S$ kann durch Addition der Zugsteifigkeiten der n Einzelschichten mit der Schichthöhe s und der Querschnittsfläche einer Schicht A_S berechnet werden:

$$E_Z A = \sum_{i=1}^n E_i A_S = E_M A_M + E_F A_F \quad (10.15)$$

Ähnlich setzt sich die Biegesteifigkeit des Verbundes $E_B I$ (Biegemodul E_B und Flächenträgheitsmoment I) aus den Biegesteifigkeiten der einzelnen Schichten unter Anwendung des Satzes von Steiner für die Flächenträgheitsmomente der Schichten zusammen:

$$\begin{aligned} E_B I &= \sum_{i=1}^n E_i (I_i + z_i^2 A_S) \\ &= E_B A \frac{(n \cdot s)^2}{12} = \sum_{i=1}^n E_i A_S \left(\frac{s^2}{12} + z_i^2 \right) \end{aligned} \quad (10.16)$$

Der Abstand z_i bezeichnet den Abstand von der neutralen Faser.

Wird der Verbundwerkstoff abwechselnd aus einem Layer aus dem Matrixmaterial PA 6 (M) und einem Layer mit Faser (F) aufgebaut, wobei die unterste und oberste Schicht aus PA 6 sind, so kann die Berechnung der Zug- und Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Schichten mit den Gleichungen in Tabelle 29 erfolgen.

Tabelle 29: Berechnung der Zug- und Biegesteifigkeit im faserverstärkten Querschnitt der Klebelasche in Abhängigkeit des Schichtaufbaus mit der Schichthöhe s und der Querschnittsfläche einer Schicht A_S .

Schichtaufbau	Zugsteifigkeit $E_Z A$	Biegesteifigkeit $E_B I$
3 Layer: MFM	$A_S (2E_M + E_F)$	$A_S \frac{s^2}{12} (26E_M + E_F)$
5 Layer: MFMFM	$A_S (3E_M + 2E_F)$	$A_S \frac{s^2}{12} (99E_M + 26E_F)$
7 Layer: MFMFMFM	$A_S (4E_M + 3E_F)$	$A_S \frac{s^2}{12} (244E_M + 99E_F)$

11 Demonstratoren

Mit den 3D-gedruckten faserverstärkten Gelenkpunkten können sehr unterschiedliche Formänderungsvorgänge von Hüllkonstruktionen realisiert werden. Abschnitt 3.1 beschreibt bereits die drei ebenen Faltmöglichkeiten (0° bis 180°) entlang jeweils zwei coaxialen Gelenkachsen und die räumliche Faltbewegung eines einzelnen Knotens, bei der sich die Gelenkachsen im Zentrum des Knotens schneiden. Wenn ein Faltnetz aus mehreren durch Gelenkknoten verbundenen Plattenelementen gebaut wird, so erhöht sich mit jedem weiteren Knoten die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten. Um die große Vielfalt an Faltvorgängen und Anwendungsmöglichkeiten zu untersuchen, welche dank des 3D-gedruckten Gelenkknotens realisierbar sind, wurden verschiedene Demonstratoren konzipiert und gebaut. Es werden beispielhaft Skizzen und Fotos der realisierten Strukturen und Materialkombinationen gezeigt.

11.1 Fassadenverkleidung aus wabenartig angeordneten Faltelementen

Die einfachste Faltstruktur besteht aus einem zentralen Gelenkpunkt, der 6 gleichseitige dreieckigen Plattenelemente (Innenwinkel 60°) miteinander verbindet, sodass im nicht gefalteten Zustand ein gleichseitiges Sechseck entsteht. Mit dieser Sechseckstruktur kann eine ebene Fläche lückenlos gefüllt werden, indem die sechsteiligen Faltstrukturen periodisch wie bei einer Bienenwabenstruktur angeordnet werden. Abbildung 132 rechts zeigt die vom Faltwinkel abhängige Flächenabdeckung. Während im flachen Zustand die Fassadenfläche vollständig verdeckt wird, kann die Flächenabdeckung bis auf 25% reduziert werden, wenn das sechsteilige Faltelement maximal gefaltet wird. Das Foto in Abbildung 131 zeigt einen Faltzustand mit etwa 75% Flächenabdeckung. Es wurden verschiedene Materialien (Aluminium, Plexiglas transparent, Spiegelglas, Plexiglas farbig, Holz mit Lamellenstruktur, Holz mit eingefasstem Streckmetall, Plexiglas mit Foliendruck, Holz mit Filzbeschichtung) mit dem Gelenkknoten kombiniert.

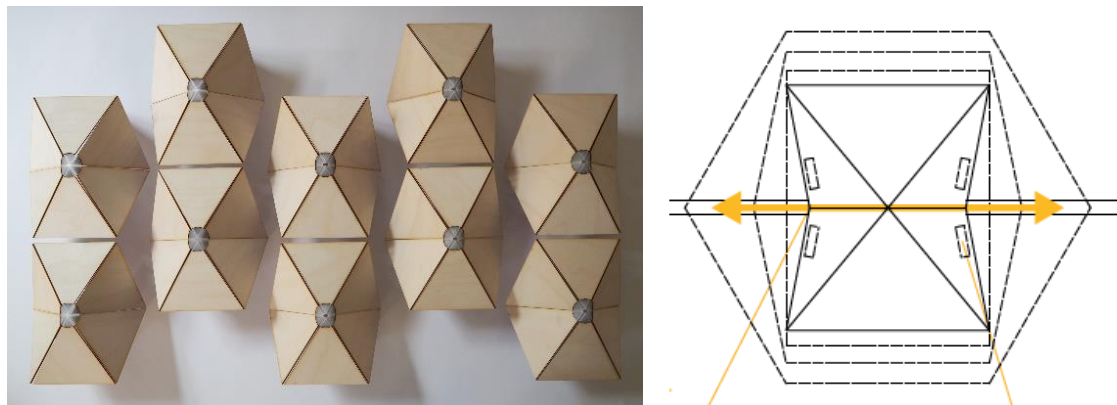


Abbildung 131: Foto des periodisch angeordneten Faltelementes und Skizze der Faltbewegung entlang einer horizontalen Führungsschiene.

Materialbeispiele

Aluminium

Plexiglas

Spiegel

Plexiglas farbig

Holzlamellen

Streckmetall

Foliendruck

Filzbeschichtung

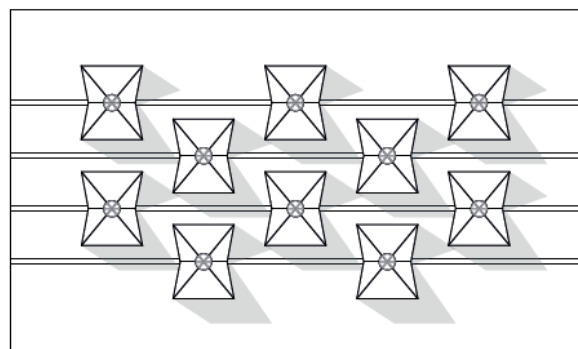
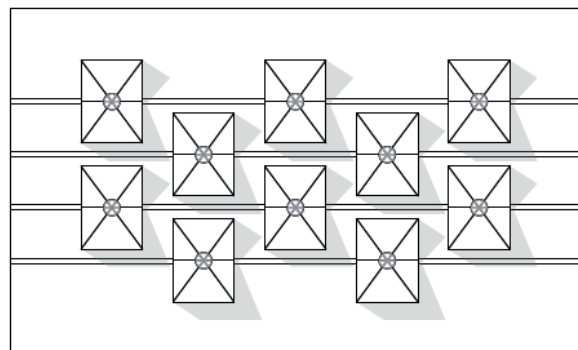
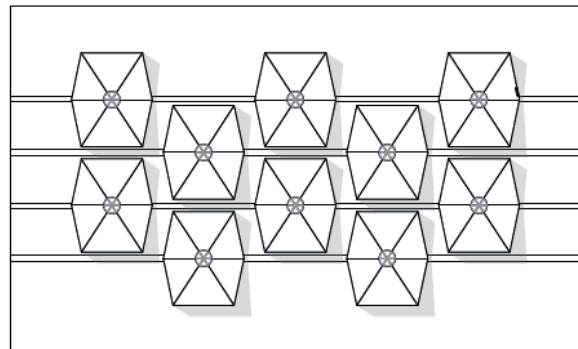
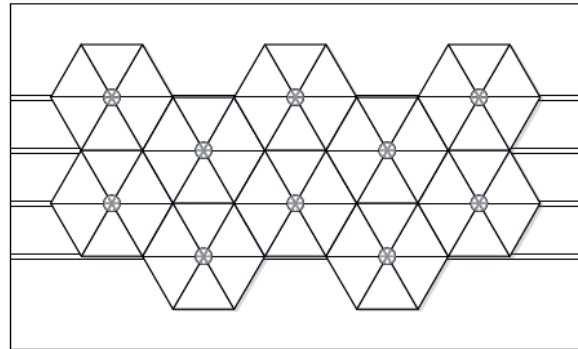
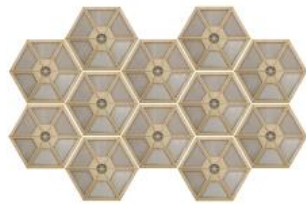
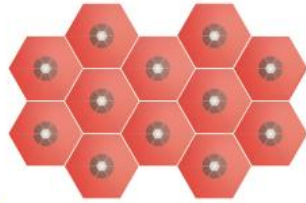


Abbildung 132: Demonstrator für formveränderliche Fassadenverkleidung mit Wabenstruktur, Kombination verschiedener Materialien mit dem 3D-gedruckten Gelenkpunkt. Änderung der Flächenabdeckung von 100% bis 25%

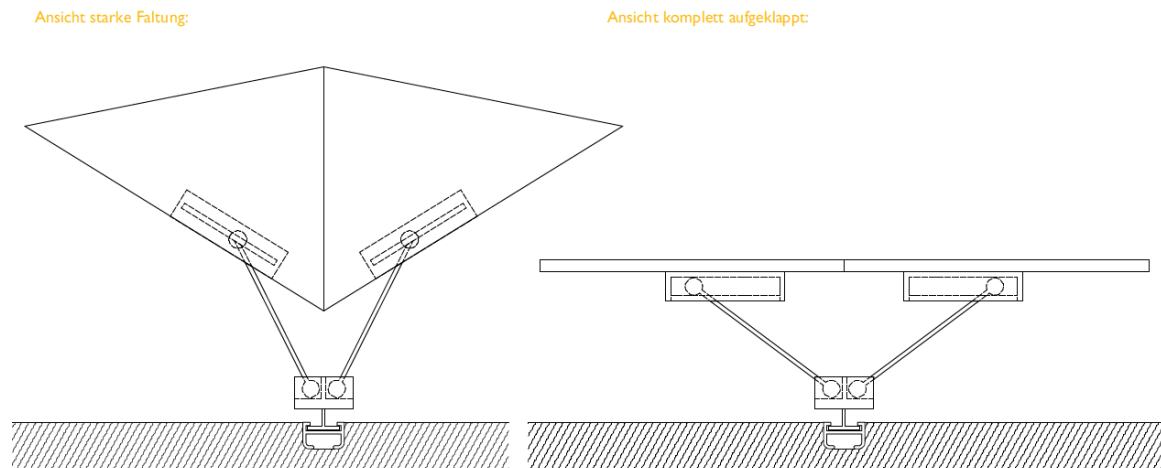


Abbildung 133: Zeichnung des konzipierten Faltmechanismus mit gelenkig gelagerten Stäben für die Realisierung der Formänderung eines einzelnen Faltelements

Die hier dargestellte formveränderliche Fassadenverkleidung hat den Nachteil, dass für jedes einzelnes Faltelement eine Mechanismus als Unterkonstruktion gebaut werden muss und die Fassade mit Führungsschienen versehen werden muss, wie es die Zeichnung in Abbildung 133 zeigt. Aufgrund des hohen Fertigungsaufwandes wurde diese mechanische Unterkonstruktion über das Entwurfsstadium hinaus bisher nicht weiterverfolgt.

11.2 Dreieckiges Faltwerk aus 16 ebenen Platten

Wenn mehr als 6 Platten durch mehrere Gelenkknoten miteinander verbunden werden, dann erhöht sich die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten. Abbildung 134 zeigt eine Auswahl an Faltmöglichkeiten für eine Demonstrator, der aus 16 dreieckigen 3 mm dicken Plattenelementen aus Birkensperholz mit der Kantenlänge 15 cm und 8 Gelenkknoten gebaut wurde. Im ausgeklappten Zustand hat das dreieckige Faltwerk eine Kantenlänge von 0,6 m und bedeckt eine Fläche von 0,156 m².

Im Vergleich zum vorherigen Demonstrator befindet sich in jeder Ecke der Dreiecke ein Gelenkknoten oder ein Teil eines Gelenkknotens. Für die Außenkanten wurden halbe Gelenkknoten verwendet, für die äußeren Ecken je ein Sechstel eines Gelenkknotens. Obwohl das dreieckige Faltwerk 15 Kreuzungspunkte besitzt, wird in der Summe nur Material für 8 vollständige Gelenkknoten verbraucht.

Das Faltwerk kann in drei um 120° gedrehte Richtungen eine ebene Faltbewegung wie bei einem Plissee realisieren, aber auch komplexe räumliche Faltbewegungen. Mit Hilfe einer noch nicht entworfenen Unterkonstruktion für die Steuerung der Faltbewegung können Flächenabdeckungen von 100% im ausgeklappten Zustand bis 0% bei maximaler Plisseefaltung (auch Ziehharmonika-Faltung oder Zick-Zack-Faltung) realisiert werden.

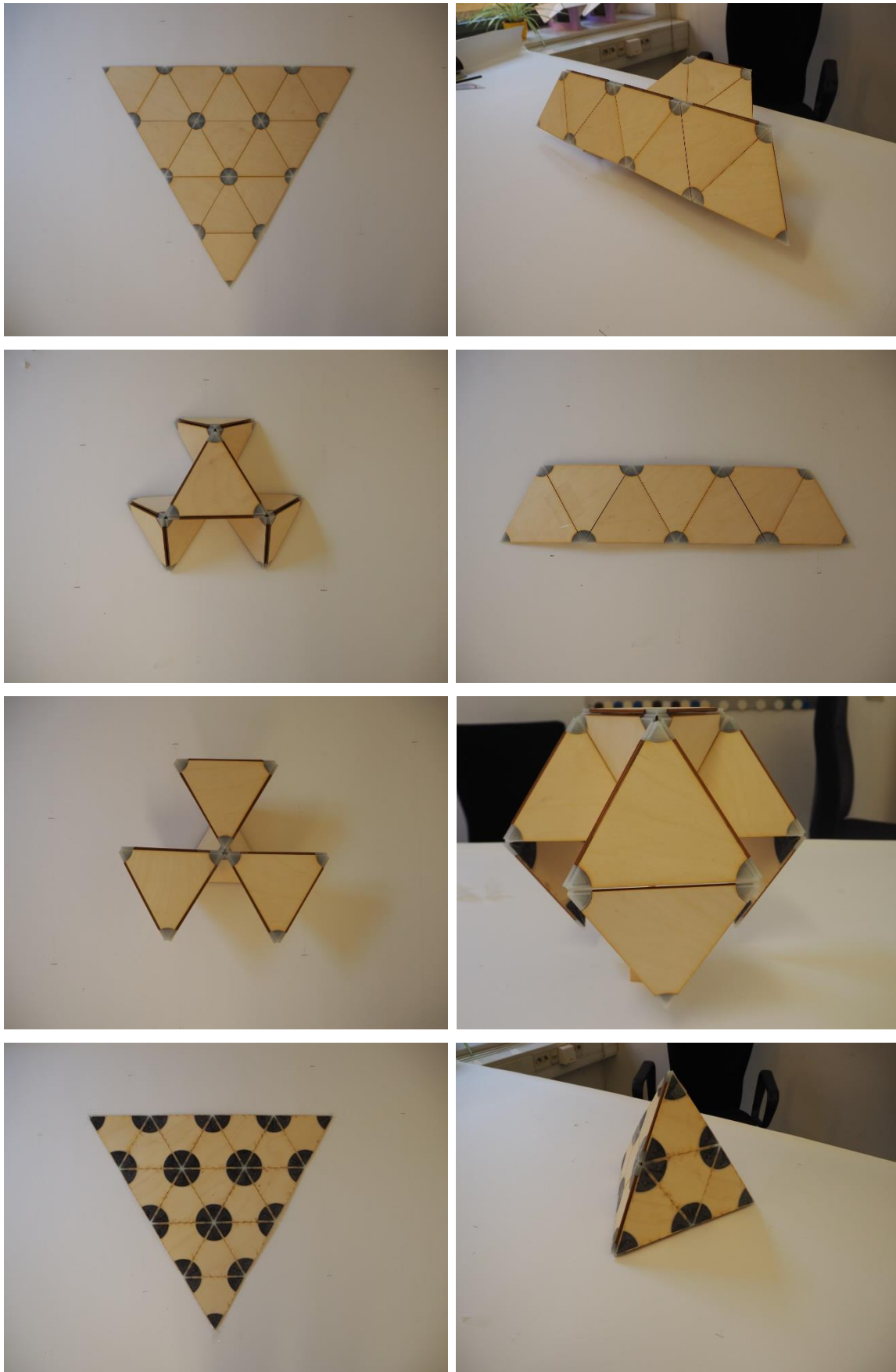


Abbildung 134: Faltmöglichkeiten eines dreieckigen Faltnetzes aus 16 Birkensperholzplatten (Dicke 3 mm, Kantenlänge 15 cm). Flächenabdeckungen zwischen 100% und 0% sind möglich.

11.3 Adaptives Faltwerk aus drei verbundenen sechseckigen Faltelementen

Der dritte Demonstrator wurde so konzipiert, dass das Faltwerk in einen einfachen Rahmen eingebaut werden und die adaptiven Faltbewegungen über ein Seilzugsystem realisiert werden können. Das Faltwerk besteht aus drei in Reihe angeordneten sechseckigen Faltelementen, also insgesamt aus 18 Platten, für die 9 Gelenkknoten benötigt werden. Die dreieckigen Platten aus Plexiglas der Dicke 3 mm und der Kantenlänge 15 cm inklusive der Bohrung mit 2 cm Radius für die Einpassung der Gelenkpunkte wurden mittels Lasercutter zugeschnitten. Die Faltstruktur wurde am obersten Plattenelement mit einem einfachen Scharnier mit dem Holzrahmen mit den Außenmaßen 90 cm x 40 cm verbunden. Die Faltstruktur hängt allein infolge ihres Eigengewichtes im Rahmen. Durch Verbindung des untersten Plattenelementes mit dem Rahmen durch ein elastisches Band wird das Faltwerk im Rahmen fixiert. Abbildung 135 zeigt den Demonstrator mit verschiedenen Faltstellungen. Die drei sechseckigen Faltelemente können unabhängig voneinander einzeln gefaltet werden. Der Faltmechanismus wird über ein Seilzugsystem bewegt, siehe Abbildung 136. Die dünnen Kunststoffseile werden mit wenig Reibung durch kleine Ösen geführt, die mit dem Rahmen und den Plattenelementen verschraubt sind. Für die maximale Faltung jedes sechsteiligen Faltelementes wird eine Seilzugkraft von etwa 10 N und ein Weg von 20 mm benötigt.



Abbildung 135: Demonstrator für ein adaptives Faltwerk aus Plexiglasplatten mit drei in Reihe angeordneten sechsteiligen Faltelementen, die unabhängig voneinander einzeln gefaltet werden können. Im maximal gefalteten Zustand beträgt die verschattete Fläche nur 25% der Fläche im aufgeklappten Zustand.



Abbildung 136: Rückseite des Demonstrators für ein adaptives Faltwerk aus Plexiglasplatten mit drei in Reihe angeordneten sechsteiligen Faltelementen, die unabhängig voneinander einzeln gefaltet werden können. Der Faltmechanismus wird über ein Seilzugsystem bewegt. Für die maximale Faltung jedes sechsteiligen Faltelementes wird eine Seilzugkraft von etwa 10 N und ein Weg von 20 mm benötigt.

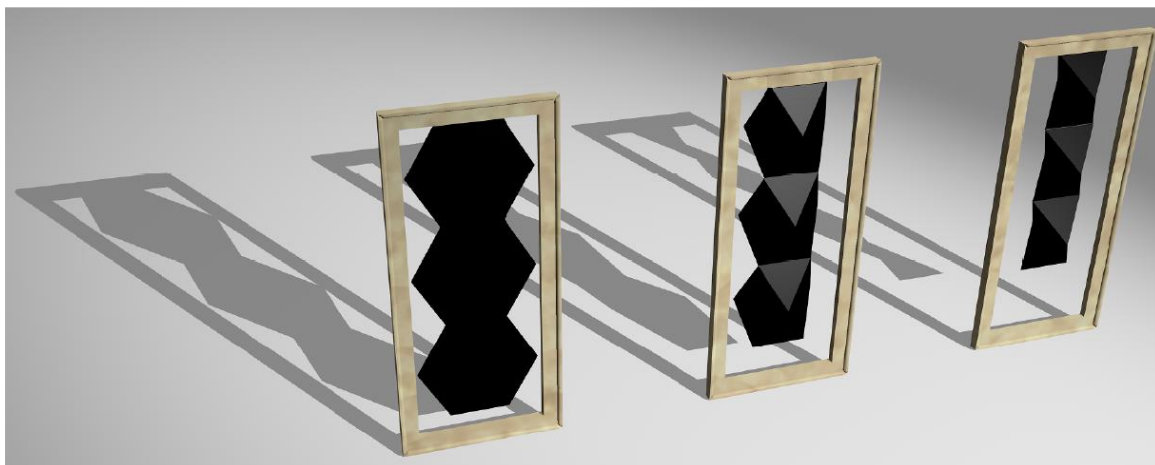


Abbildung 137: Gerendertes Modell der in einen Rahmen eingebauten nicht lichtdurchlässigen Faltstruktur (Materialbeispiel: schwarze schlagfeste ABS-Kunststoffplatten) im offenen, halb gefalteten und maximal gefalteten Zustand mit Darstellung des Schattenwurfs durch Lichteinfall.

11.4 Belastungsversuche an selbsttragender faltbarer Oktaederstruktur

Die im Abschnitt 2.3 beschriebene Faltstruktur für einen Messestand an der Bauhaus-Universität Weimar wurde mit den faserverstärkten Gelenkknoten (Knoten 13) ausgestattet (Abbildung 138).

Das Eigengewicht der zu einer Oktaederstruktur gefalteten Konstruktion beträgt 2,86 kg.

Die Kurzzeittragfähigkeit wurde in einem verschiebungsgesteuerten Druckversuch an der VTE der Bauhaus-Universität Weimar untersucht (Abbildung 139). Bei einer Gesamtverschiebung von 20 mm und einer Kraft von 1070 N wurde der Versuch abgebrochen. Die Maximalkraft konnte im Vergleich zu vorangegangenen Versuchen, bei denen die Faltstruktur mit Gelenkknoten ohne Faserverstärkung ausgestattet war, verdoppelt werden (Abbildung 140). Nach dem Versuch waren alle Knotenpunkte intakt, es konnte keine Schädigung festgestellt werden.

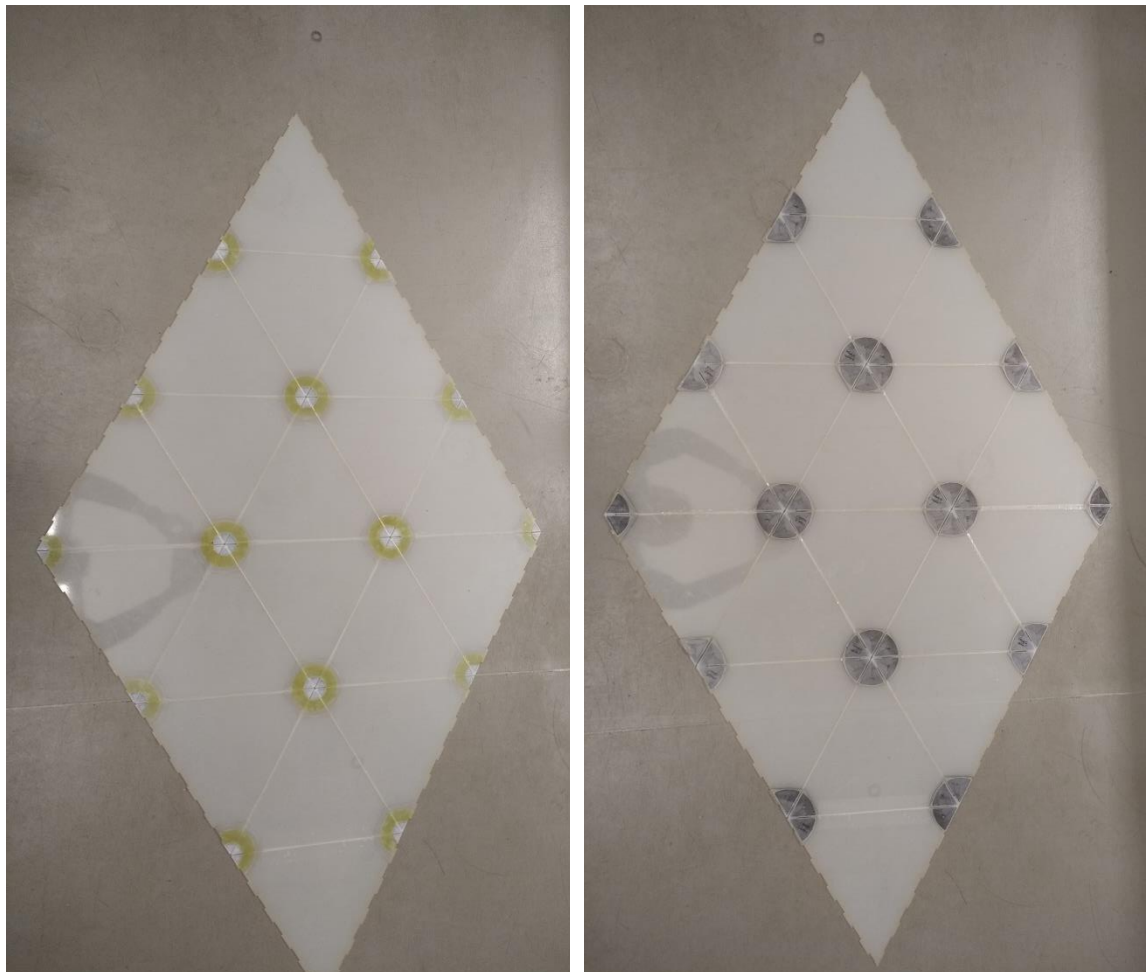


Abbildung 138: Faltwerk im Montagezustand, das linke Foto zeigt die spätere Außenseite, das rechte Foto die spätere Innenseite. Für die Verbindung der 18 Plattenelemente werden 4 volle Knoten, 8 halbe Knoten und 2 drittel Knoten verwendet.



Abbildung 139: Foto während des Druckversuchs an der Faltstruktur mit faserverstärkten 3D-gedruckten Gelenkknoten (Knoten 13).

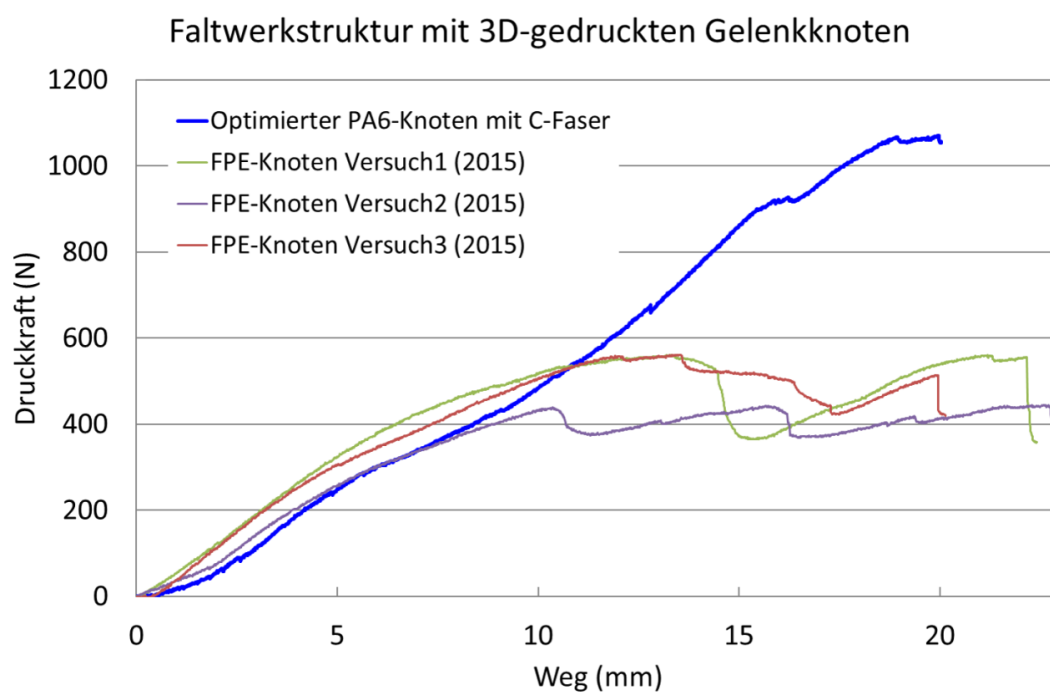


Abbildung 140: Gemessener Druckkraft-Weg-Verlaufs für Faltstruktur mit faserverstärkten 3D-gedruckten Knoten im Vergleich zu Versuchsergebnissen mit Knoten ohne Faserverstärkung aus dem Jahr 2015 [Ham16].

12 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die mit den Gelenkknoten realisierbaren formveränderlichen Hüllkonstruktionen besitzen Potential für die großmaßstäbliche Anwendung im urbanen Raum, insbesondere bei Gebäuden mit glatten lichtdurchlässigen Glasfassaden oder als Gestaltungselement für facettierte Fassaden. Adaptive Faltwerke können als veränderliche Außenwandverkleidung eingesetzt werden um folgende besondere Anforderungen an Fassaden zu erfüllen:

- Fassaden mit veränderlicher Verschattung/Lichtreflexion (Abbildung 141)
- Fassaden mit veränderlicher Schallabsorption und –reflektion (Abbildung 142)
- Nachträglichen Gestaltung und Verschattung von dreiecksfacettierten Fassaden (Abbildung 143)

Eine wichtige Funktion der Fassade ist auch die Fähigkeit, auf tages- und jahreszeitlich bedingte Wetter- und Klimaschwankungen reagieren zu können, um mit minimalem Energieaufwand ein behagliches Raumklima zu schaffen. Weil die einzelnen Faltelemente unabhängig voneinander bewegt werden können, ist es möglich, die Gebäudehülle punktuell und stufenlos den äußeren Einflüssen anzupassen.

Die Anbindung und Bewegungssteuerung im Fassaden- und Dachbereich kann über einfache Rahmen – oder Stabfachwerke erfolgen, die mit einem geeigneten Seilzugmechanismus ausgestattet sind. Die biegeeweiche Verbindung der Plattenelemente erlaubt es, dass nur kleine Kräfte für die Formänderung erforderlich sind und demzufolge die Bewegungssteuerung über kleine Schrittmotoren erfolgen kann.

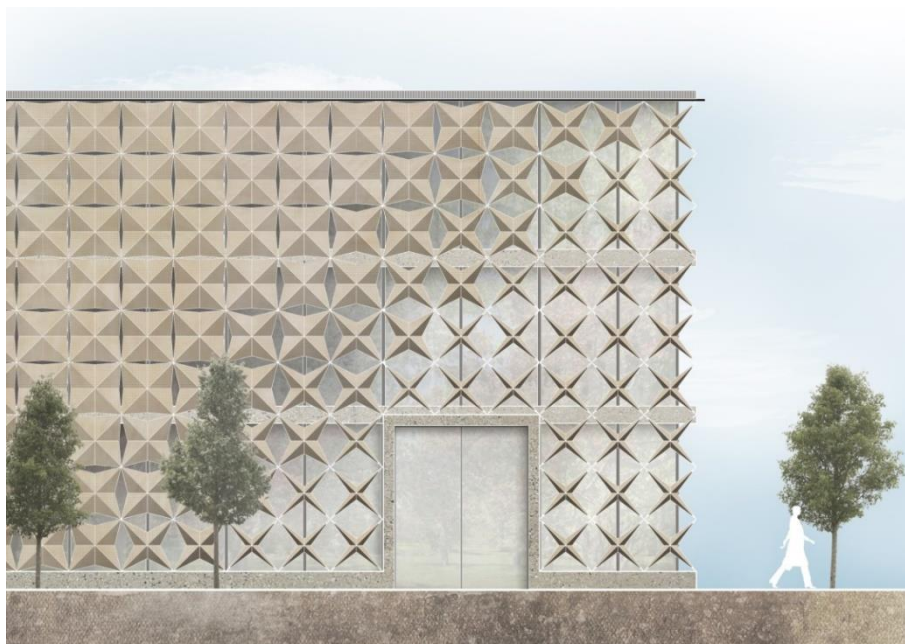


Abbildung 141: Verwendung von formveränderlichen Faltwerken für die lokale Veränderung des Lichteinfalls in Gebäuden mit Glasfassade

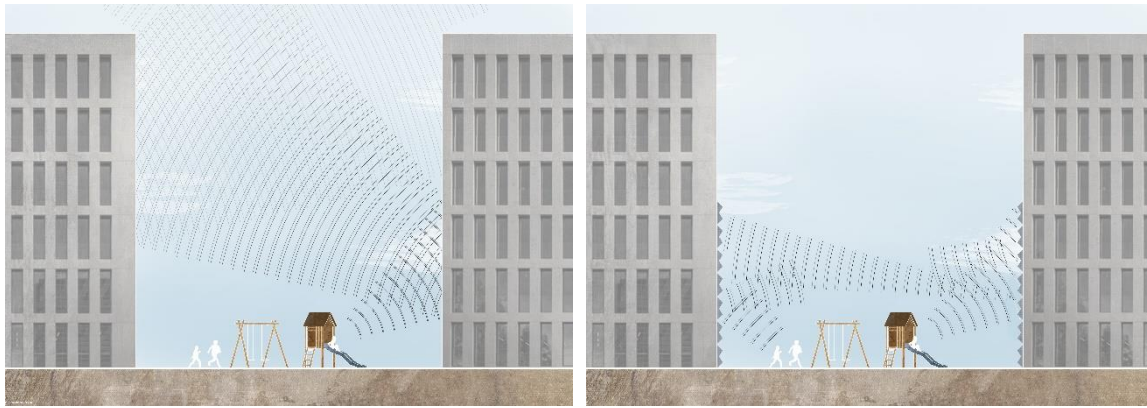


Abbildung 142: Verwendung von formveränderlichen Faltenwerken für die Veränderung der Schallreflektion und Schallausbreitung.



Abbildung 143: Mögliche Verwendung von adaptiven dreieckförmigen Faltenwerken für die nachträgliche Veränderung bzw. Ergänzung von dreiecksfacettierten Fassaden mit Verschattung, Fotovoltaik oder Beleuchtung. (Bild links: Klima-Pavillon in Weimar (www.thega.de/fileadmin/_processed_/4/b/klimapavillon_2018c_010.jpg), Bild rechts: Poly International Plaza (www.archdaily.com/877278/poly-international-plaza-som)).

Eine sehr interessante Möglichkeit zur Bewegungssteuerung kann die Verwendung von Aktoren aus Formgedächtnislegierungen (shape memory alloys) sein. Formgedächtnislegierungen zeichnen sich dadurch aus, dass plastisch verformte Werkstoffe durch eine Erwärmung in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. Die Erwärmung kann hierbei passiv durch die Umgebung (zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung) erfolgen oder aktiv durch Widerstandserwärmung beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Wird ein Draht aus einer Formgedächtnislegierung (z.B. NiTi oder NiTiCu) zu einer Feder geformt, so kann diese in Abhängigkeit von Temperatur oder mechanischer Spannung ihre Form und Steifigkeit reversibel ändern [GRAU19]. Diese besondere Materialeigenschaft hat das Potential die ideale Kombination aus Kraft und Weg für die Betätigung eines Seilzugmechanismus zur Bewegungssteuerung des Faltenwerks aufzubringen.

13 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte für adaptive Faltwerke (HiPlast)“ wurde eine Fügetechnologie für leichte und formveränderliche Faltwerke aus dreieckigen Plattenelementen entwickelt, die auf dem 3D-Druck von Verbindungselementen aus faserverstärkten Kunststoff basiert. Die Verbindungselemente übernehmen die Funktion eines in mehrere Richtungen faltbaren Gelenkknotens, der die Platten zu einer leichten faltbaren Struktur verbindet. Die einzelnen schubsteifen Plattenelemente können zum Beispiel aus Glas, Holz, Kunststoff, Aluminium oder anderen Leichtbauwerkstoffen gefertigt sein.

Die additive Fertigung von faserverstärkten Bauteilen bietet die Möglichkeit unterschiedliche Materialanforderungen in einem Bauteil und einem Fertigungsschritt zu vereinen. Der aktuelle Stand der Forschung und Technik zur additiven Fertigung von Kunststoffen mit Integration von Fasern wurde dargestellt. In naher Zukunft kann mit der Einführung neuer Technologien und Geräte für den faserverstärkten 3D-Druck gerechnet werden, mit denen faserverstärkte Bauteile schneller und kostengünstiger als bisher additiv gefertigt werden können. Grund ist das hohe Potential für Leichtbauanwendungen, denn durch die Faserverstärkung können die mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte der Bauteile massiv gesteigert werden. Während überwiegend Filamente mit bereits integrierten Kurzfasern eingesetzt werden, erfolgt in diesem Projekt die Verstärkung der Matrix mit Endlosfasern, die noch höhere Zugfestigkeiten in Faserrichtung ermöglichen. In Projekt kam der 3D-Drucker „Mark Two“ von der Firma Markforged zu Einsatz, der zu Projektbeginn der erste und einzige kommerzielle Drucker war, der Endlosfasern in eine Kunststoffmatrix einbetten kann. Der kommerzielle 3D-Drucker verwendet das FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication) mit dem thermoplastischen Kunststoff Polyamid PA 6 und das CFF-Verfahren (Continuous Filament Fabrication) für die Faserverstärkung mit Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern. Es wurden die Materialeigenschaften des additiv hergestellten thermoplastischen Kunststoffes und der Faserverbundwerkstoffe experimentell untersucht. Der Einfluss unterschiedlicher Strangorientierungen auf die Kennwerte des Matrixwerkstoffes und der Faserorientierung auf die Kennwerte des Verbundes konnte ermittelt werden. Die höchste Festigkeit wurden bei einer Strangorientierung $45^\circ/45^\circ$ und einer Faserorientierung 0° zur Zugbelastungsrichtung erreicht. Die ermittelten Materialkennwerte wurden in das FEM-Materialmodell überführt, mit dem verschiedene Geometrie- und Lastvarianten numerisch untersucht wurden. Die durchgeführten Zeitstandversuche belegen die ausgeprägte Kriechneigung des Werkstoffes PA 6 weshalb bei Langzeitbeanspruchung die tragenden Gelenkquerschnitte um mindestens den Faktor 2 größer dimensioniert werden müssen als bei Kurzzeitbelastung.

Die Anbindung des Gelenks an die schubsteifen Platten aus verschiedenen Materialien erfolgt über eine Klebeverbindung mit elastischen Haftklebstoffen, welche geeignet sind, unterschiedliche Materialien zu verbinden und thermische Dehnungsunterschiede in der Klebefuge auszugleichen. Gelenkseitig musste die Zug- und Biegesteifigkeit der Klebefläche mit Verstärkungsfasern erhöht werden um unter Last ein Abschälen der Klebelasche von den Plattenelementen zu verhindern.

Nach mehreren erfolgreichen Iterationen zur Optimierung des Gelenks konnte eine Geometrie- und Materialkombination aus Kunststoff und Faserverstärkung gefunden werden, welche sowohl den hohen Beanspruchungen bei der Biegewechselbelastung im Filmgelenk als auch der Zugbeanspruchung im Filmgelenk und Scherbeanspruchung in der Klebefuge standhält. Aufbauend auf den experimentell ermittelten Materialkennwerten wurde ein parametrisches Auslegungs- und Dimensionierungskonzept entwickelt, mit dem schnell ein vordimensioniertes CAD-Modell des Gelenkpunktes erstellt werden kann, welches sowohl als Eingabemodell für den 3D-Druck als auch als Geometriemodell für die FEM-Analyse des Gelenkpunktes dient.

Die 3D-gedruckten Knotenlösungen wurden mit verschiedenen Demonstratoren erprobt. Am erfolgversprechendsten für die Überführung in die Anwendung hat sich die Bewegungssteuerung der Falwerke mittels Seilzugsystemen herausgestellt, da sie außer einem leichten Rahmen keine weitere Unterkonstruktion benötigen und das zusätzliche Gewicht vernachlässigbar klein ist.

Ergebnispräsentationen

Am 30. März 2017 wurde das Forschungsprojekt „HiPlast“ beim Thüringer Werkstofftag in Jena bei der Posterpräsentation vorgestellt. Im Rahmen der ZukunftBau Projekttag am 08. Juni 2017 in Bonn wurden die ersten Forschungsergebnisse präsentiert. Am 16. März 2018 wurden das Forschungsprojekt beim Thüringer Werkstofftag 2018 in Weimar bei der Posterpräsentation vorgestellt. Im Rahmen der ZukunftBau Projekttag am 05. Juni 2018 in Bonn wurde der Zwischenstand des Projektes präsentiert. Am 07. März 2019 wurde die Ergebnisse des Forschungsprojektes beim Thüringer Werkstofftag 2019 in Ilmenau im Rahmen der Posterpräsentation vorgestellt. Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

Bachelor- und Projektarbeiten

An der Bauhaus-Universität Weimar wurde im Rahmen des Forschungsprojektes im Jahr 2017 eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Betrachtungen des Materialverhaltens von 3D-gedruckten Gelenkpunkten in Faltwerken“ fertiggestellt.

An der Technischen-Universität Ilmenau wurde eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Untersuchung des Kriechverhaltens eines additiv hergestellten Kunststoffbauteils“ angefertigt. Weitere Themen wurde mit Studenten in verschiedenen Projekten bearbeitet.

Literaturverzeichnis

- [DIN527] DIN EN ISO 527-2:2012, *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*
- [DIN899] DIN EN ISO 899-1:2018-03, *Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens – Teil 1: Zeitstand-Zugversuch (ISO 899-1:2017)*
- [DIN1465] DIN EN 1465:2009, *Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung*
- [ALBA] Al Bahar Towers. Website: en.wikiarquitectura.com/building/Al-Bahar-Towers
- [BASL16] Paolo Bettini, Gianluca Alitta, Giuseppe Sala und Luca Di Landro. Fused Deposition Technique for Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* (Dezember 2016)
- [BW06] Hani Buri, Yves Weinand. Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten. Zwischenbericht HOLZ 21 (August 2006), <https://raumgestaltung.tugraz.at/img/Produktdesign%2005/BuriWeinand.pdf>
- [COM14] Halil L. Tekinalp, Vlastimil Kunc, Gregorio M. Velez-Garcia, Chad E. Duty, Lonnie J. Love, Amit K. Naskar, Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. In: *Composites Science and Technology* (Oktober 2014)
- [Com17] Compositence GmbH: TowPreg - PrePreg für kostensensitive Anwendungen. www.compositence.com/fiber-placement/innovation/towpreg (05.05.2017)
- [DE12] Patent DE 10 2012 217 989 B4 2014.05.22; Laserverfahren zur Herstellung einer in verschiedene Faltrichtungen faltbaren Platte
- [Dom05] Hans Domininghaus: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 6. Auflage, Springer-Verlag Heidelberg 2005
- [Ehr02] Gottfried W. Ehrenstein. *Mit Kunststoffen konstruieren*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2002
- [Ehr04] Gunter Erhard. *Konstruieren mit Kunststoffen*, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2004
- [Ehr07] Gottfried W. Ehrenstein. *Mit Kunststoffen konstruieren*, 3. Auflage Carl Hanser Verlag, München 2007
- [Ehr11] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymer Werkstoffe (Struktur-Eigenschaft-Anwendung)*, Carl Hanser Verlag, München 2011
- [ELMH15] Thomas A. Evans, Robert J. Lang, Spencer P. Magleby, Larry L. Howell. Rigidly foldable origami gadgets and tessellations. *R. Soc. Open sci.* 2: 150067 (2015)
- [Fib18] fibretech composites GmbH: <https://fibretech-composites.de/> (18.12.2018)

- [FOW05] P. W. Fowler, S.D. Guest. A symmetry analysis of mechanisms in rotating rings of tetrahedra. In: Proceedings of royal society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences (2005)
- [GRAU19] G. RAU GmbH & Co. KG: www.g-rau.de/produkte/aktoren-aus-formgedaechtnis-legierungen.html (30.01.2019)
- [GRA98] R. W. Gray IV, D. G. Baird and J. H. Bohn, Thermoplastic Composites Reinforced With Long Fiber Thermotropic Liquid Crystalline Polymers for Fused Deposition Modeling, In: Polymer Composites, August 1998, Vol. 19, No. 4
- [Ham16] Stefan Hammer. Projektarbeit „Untersuchung einer, mit additiv hergestellten Scharnier-Eckknoten, sanierte Faltstruktur aus laminiertem Plexiglas“, Bauhaus-Universität Weimar (2016)
- [HK13] Alexander Heinrich, Karsten Kleinert. Masterarbeit „Faltung³“, Bauhaus-Universität Weimar (2013)
- [HH15] Hammer, S., Hildebrand, J.: Analyse einer gefalteten und wandelbaren Struktur aus laminierten Plexiglas. In: Glasbau 2015, Ernst und Sohn, 2015, S. 269-278
- [KER18] Kern GmbH: <https://kern.de/de/polyamide-kleben> (Webseite aufgerufen am 09.08.2018)
- [Kro95] Norbert Krollmann: Langzeitverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung. Bauphysik 17 (1995), H. 1S.11-16
- [Krü12] Krüger, G. (Hrsg.): Haftklebebänder, selbstklebende Folien und Etiketten (Entwicklung, Verarbeitung und industrieller Einsatz), Carl Hanser Verlag, München 2012
- [Kün17] Arne Künstler: Wandelbare Faltkonstruktionen aus ebenen, quasistarren Flächenelementen von nicht vernachlässigbarer Dicke, Dissertation RWTH Aachen, 2017
- [KBS07] Johannes Kunz, Simon Bachmann, Mario Studer: Filmgelenke dehnungsbezogen auslegen, Kunststoffe 12/2007, S. 129-132
- [LSP89] B. Lauke, B. Schultrich, W. Pompe: Theoretical Considerations of Toughness of Short-fibre Reinforced Thermoplastics. Wissenschaftliche Berichte 40, Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung, Dresden (1989)
- [LTT00] Robert Michael Lewis, Virginia Torczon, Michael W. Trosset: Direct search methods: then and now. Journal of Computational and Applied Mathematics 124 (2000), pp. 191-207

- [LIU15] Sciong Liu, Guoxing Lu, Yan Chen, Yew Wei Leong. Deformation of Miura-ori patted sheet. In: International Journal of Mechanical Sciences 99 (2015), S. 130-142
- [Mar1] MarkForged, Inc. & Mark3D GmbH: https://www.mark3d.com/de/wp-content/uploads/2018/11/Markforged-Broschuere_Nov-2018.pdf
- [Mar2] MarkForged, Inc. & Mark3D GmbH: <https://www.mark3d.com/de/markforged-mark-two/> (18.12.2018)
- [Mat16] Ryosuke Matsuzaki, Masahito Ueda, Masaki Namiki, Tae-Kun Jeong, Hirotsuke Asahara, Keisuke Horiguchi, Taishi Nakamura, Akira Todoroki, Yoshiyasu Hirano. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. In: Scientific Reports (März 2016)
- [MHMS02] G. Menges, E. Haberstroh, W. Michaeli, E. Schmachtenberg. Werkstoffkunde Kunststoffe, 5. Auflage, Hanser, München, 2002
- [Muf17] Sameera Mufazzal: Studies on Grübler's formula for mobility and connectivity. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 7 (2017)
- [PGL91] Manfred Pahl, Wolfgang Gleißle, Hans-Martin Laun: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991
- [Prö13] Manfred Pröbster. Elastisch Kleben (aus der Praxis für die Praxis), Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
- [PV12] Hauke Prüß, Thoams Vieto. Neue Gestaltungsfreiheiten durch 3D-gedruckte Faser-Kunststoff-Verbunde. In: RTEjournal – Forum für Rapid Technologie, Ausgabe 12. Website: www.rtejournal.de/ausgabe12/4237, Aufgerufen: 20.01.2017
- [Ras12] Manfred Rasche: Handbuch Klebetechnik, Hanser, München, 2012
- [SBB06] E. Schmachtenberg, M. Brandt, M. Brinkmann: Simulation des nicht-linear viskoelastischen Werkstoffverhaltens von Kunststoffen mit dem 3D-Deformationsmodell. Zeitschrift Kunststofftechnik 2 (2006) 5
- [SW92] Doris Schattschneider und Wallace Walker, M.C.Escher Kaleidozyklen, Köln 1992
- [SLRB03] M. L. Schofner, K. Lozano, F. J. Rodriguez-Macias, E.V. Barrera: Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. In: Journal of Applied Polymer Science 89 (2003); 3081-3090
- [SG13] Mark Schenk, Simon D. Guest. Geometry of Miura-folded metamaterials. In: PNAS, Vol. 110, No. 9 (2013), 3276-3281
- [Sei18] Tilman Seifert: Untersuchung des Kriechverhaltens eines additiv hergestellten Kunststoffbauteils (FFF-Verfahren), Bachelorarbeit, TU Ilmenau, 2018
- [SSK11] Markus Stommel, Marcus Stojek, Wolfgang Korte: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen, Carl Hanser Verlag, München 2011

-
- [Tac13] Tomohiro Tachi: Designing Freeform Origami Tessellations by Generalizing Resch's Patterns. *Journal of Mechanical Design* 135 (2013)
- [TLYWL16] Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Chucheng Yang, Qingrui Wang, Dichen Li. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. In: *Composites: Part A* 88 (2016) S. 198-205
- [Tor97] V. Torczon, On the convergence of pattern search algorithms, *SIAM J. Optim.* 7 (1997), S. 1-25
- [Wer13] Hilmar Werner. Falten im Leichtbau, *ARCH+* 131, S. 82-85
- [WR00] Alan S. Wineman, K. R. Rajagopal: *Mechanical Response of Polymers*. Cambridge University Press 2000
- [Yos55] Yoshimura, Y.: On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under axial compression, *NACA TM* 1390 (1955)
- [ZLZSL01] Weihong Zhong, Fan Li, Zuoguang Zhang, Lulu Song, Zhimin Li: Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. In: *Mater Sci Eng A* 2001;301;125-130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Miura-Ori Faltung, Bild aus [SG13].....	14
Abbildung 2: Fünf Formen des 6er Kaleidozyklus (Bild aus [FOW05]) und Faltmuster	14
Abbildung 3:Nicht starre Faltstruktur [Tac13].....	15
Abbildung 4: Starre und nicht starre Faltstruktur [ELMH15]	15
Abbildung 5: Gleichmäßige starre Faltstruktur [KNI16]	15
Abbildung 6: Nicht gleichmäßige, starre Faltstruktur [KNI16]	15
Abbildung 7: Adaptive Sonnenschutzfassade – Al Bahr Tower, Abu Dhabi [ALBA]	16
Abbildung 8: Messestand „Faltung ³ “	16
Abbildung 9: „Faltung ³ “ [HK13] im räumlich gefalteten und im ebenen Zustand	17
Abbildung 10: „Faltung ³ “, Schadensbild Delamination in den Eckpunkten	18
Abbildung 11: 3D-gedruckter Gelenkpunkt verbunden mit Acrylglasplatten.....	18
Abbildung 12: CAD-Modell eines Gelenkknotens mit Kennzeichnung der 6 Gelenkachsen. Die biegeweichen Gelenke sollen Biegewinkel von 0° (wie gedruckt) bis 180° (maximale Faltung) realisieren können. Bei räumlicher Faltung senken sich die oberen zwei Gelenkachsen 1 und 4 (Talfaltung) und heben sich die unteren vier Gelenkachsen 2, 3, 5 und 6 (Bergfaltung).....	19
Abbildung 13: Prinzipskizzen des Querschnitts durch die Gelenkachsen des additiv zu fertigenden Knotens.....	21
Abbildung 14: Geometrie beim Biegen eines Filmgelenks mit Parametern für die Berechnung ..	22
Abbildung 15: Versagensarten von Polymer-Faserverbunden bei duktilem Matrixbruch nach Lauke et. al. [LSP89]. Energiedissipation durch Debonding (Wd), Gleiten (Ws), plastische Deformation der Matrixbrücken (Wm). Pull-Out (WpΔ) und Matrixbruch. Bildquelle: wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Datei:Bruchmodell1.jpg (Version vom 14. Aug. 2017).	25
Abbildung 16: Schema – Verbundherstellung vor dem Druckprozess [TLYWL16].....	26
Abbildung 17: 3D-Drucker „Mark Two“ von Markforged [Mar2]	27
Abbildung 18: mögliche Füllstrukturen Mark Two	28
Abbildung 19: Kennzeichnung der Deckschicht (links) und der Mantelschicht (rechts)	28
Abbildung 20: Faserorientierung in der Zugprobe	29
Abbildung 21: Seitenansicht mit Stranghöhe des Matrixwerkstoff PA6	33
Abbildung 22: Draufsicht auf 2 übereinanderliegende Schichten mit Strangbreite bei Füllgrad 100%	33
Abbildung 23: Masseänderung von C-faserverstärkten 3D-druckten Proben aus Polyamid durch Wasseraufnahme.....	33

Abbildung 24: Darstellung der unterschiedlichen Strangorientierung des Matrixwerkstoffes PA6	34
Abbildung 25: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 45°/45°	35
Abbildung 26: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 30°/60°	36
Abbildung 27: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 15°/75°	36
Abbildung 28: Spannungs-Dehnungsverlauf Polyamid 6, Strangausrichtung 0°/90°	36
Abbildung 29: Spannungs-Dehnungs-Verlauf für Matrixwerkstoff PA6 mit unterschiedlichen Strangorientierungen.....	37
Abbildung 30: E-Modul Matrixwerkstoff Polyamid PA6	37
Abbildung 31: Bruchbild Zugprobe (PA 6) - unterschiedliche Strangorientierung	38
Abbildung 32: Versuchsaufbau Biegeprüfung	39
Abbildung 33: Proben Matrixwerkstoff Biegeprüfung.....	39
Abbildung 34: Biegespannung, Matrixwerkstoff (PA6), unterschiedliche Strangorientierungen .	39
Abbildung 35: Entwurf – Platte für Zugproben.....	41
Abbildung 36: additiv hergestellte Platte für Zugproben mit Aramidfaserverstärkung.....	41
Abbildung 37: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser, Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung.....	42
Abbildung 38: Zugproben, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser 0°	42
Abbildung 39: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Kohlenstofffaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung.....	42
Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Matrix PA 6 mit Aramidfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung	43
Abbildung 41: Zugproben, Matrix PA 6 mit Aramidfaser.....	43
Abbildung 42: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Aramidfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung	43
Abbildung 43: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Glasfaser, Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung.....	44
Abbildung 44: Zugproben, Matrix PA 6 mit Glasfaser.....	44
Abbildung 45: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, Matrix PA 6 mit Glasfaser, Gegenüberstellung Faserausrichtung 0° und 90° entlang der Zugrichtung	44
Abbildung 46: Schema nichtlineares Verhalten faserverstärkte Zugproben.....	45
Abbildung 47: Spannungs-/Dehnungsdiagramm, drei Fasertypen (Kohlenstoff, Aramid, Glas), Faserausrichtung 0° entlang der Zugrichtung.....	45
Abbildung 48: E-Modul, drei Fasertypen (Kohlenstoff, Aramid, Glas), Vergleich der Datenblattwerte mit den Versuchswerten.....	45

Abbildung 49: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht.....	46
Abbildung 50: Faserrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht.....	46
Abbildung 51: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht.....	46
Abbildung 52: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht	47
Abbildung 53: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht	47
Abbildung 54: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht.....	47
Abbildung 55: Faserausrichtung 0° zur Zugrichtung, obere Faserschicht	47
Abbildung 56: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, obere Faserschicht	47
Abbildung 57: Faserausrichtung 90° zur Zugrichtung, untere Faserschicht.....	47
Abbildung 58: Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Biegeversuch mit Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff, Aramid oder Glas.	48
Abbildung 59: Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuche	50
Abbildung 60: Zunahme der technischen Dehnung mit der Zeit im Zeitstand-Zugversuch von 3D-gedrucktem PA 6 bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa)	52
Abbildung 61: Zunahme der technischen Dehnung mit der Zeit im Zeitstand-Zugversuch von 3D-gedrucktem PA 6 bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa) mit logarithmischer Zeitachse	52
Abbildung 62: Kriechkurve für Proben mit mäanderförmiger 30°/60° Faserverstärkung	53
Abbildung 63: Kriechkurve für Proben mit ringförmiger Faserverstärkung.....	53
Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf des Kriechmodul von 3D-gedrucktem PA 6 im Zeitstand-Zugversuch bei vier verschiedenen Lastspannungen (11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa, 22 MPa)	54
Abbildung 65: Anpassung von Kriechkurven im Bereich von 100 h bis 1000 h an den Findley-Potenzansatz und Extrapolation auf 10000 h	56
Abbildung 66: Isochrone Spannungs-Dehnungs-Kurven für das Kriechverhalten von 3D-gedrucktem PA 6. Die Kurven bis zu einer Zeit von 1000 h wurde aus den gemessenen Kriechkurven bei 11 MPa, 13,5 MPa, 16 MPa und 22 MPa ermittelt. Die Kurve für 10000 h wurde durch Extrapolation des Findley-Potenzansatz bei 11 MPa, 13,5 MPa und 16 MPa vorhergesagt.	56
Abbildung 67: Ergebnis der kraftgesteuerten zyklischen Zugprüfung (10 Zyklen) einer additiv gefertigten Zugprobe aus PA 6. Lastzyklus der Prüfmaschine: $F_{\min} = 20 \text{ N}$, $F_{\max} = 200 \text{ N}$, Belastungsgeschwindigkeit 20 N/s.	57
Abbildung 68: Darstellung der Gelenkaufteilung für die Ermüdungsprüfung	58
Abbildung 69: Einspannung des Gelenkes an den zwei Trägerstücken	58
Abbildung 70: Versuchsaufbau – Ermüdungsverhalten	60

Abbildung 71: Delamination zwischen Träger und Scharnier	60
Abbildung 72: Riss zwischen den Strängen im Scharnier.....	60
Abbildung 73: CAD-Modell der Filmgelenkprobe. Biegeweicher Bereich rot markiert.....	62
Abbildung 74: CAD-Modell des Filmgelenks. Die winzigen Hohlräume zu beiden Seiten des Filmgelenkes dienen zur Begrenzung der Verstärkungsfasern in der zweiten Schicht der Filmgelenkprobe.	63
Abbildung 75: Bilder der ersten 4 Layer (von 24) in Software Eiger. Das PA6-Filament ist weiß, die Kohlenstofffaser blau dargestellt. Verwendete Softwareeinstellungen: 4 Wall Layers, 1 Roof & Floor Layers, Solid Fill Pattern mit Fill Density 100%.	63
Abbildung 76: Filmgelenkprobe eingespannt zwischen den Spannbacken der Zugprüfmaschine	64
Abbildung 77: Änderung der Zugfestigkeit von Filmgelenkproben mit zunehmender Zahl von Biegelastwechseln.....	65
Abbildung 78: Mikroskopbilder einer unbelasteten Filmgelenkprobe, (links) Seitenansicht mit erkennbarem additiven Schichtaufbau, (rechts) Querschliff mit sichtbaren Hohlräumen zwischen den extrudierten PA6-Fasern.....	66
Abbildung 79: Gezogene Filmgelenkprobe, Dehnung des Filmgelenkes von 2 mm auf 6 mm (200% Dehnung) mit sichtbarem Anriss.	66
Abbildung 80: Röntgenaufnahme einer Filmgelenkprobe mit C-Faserverstärkung	66
Abbildung 81: Vergleich des Wirkungsprinzips von viskoelastischen Haftklebebändern aus geschlossenzelligem Acrylat-Klebstoff (3M™ VHB™ Klebeband) gegenüber herkömmlichen Schaumstoff-Klebebändern. Bildquelle: http://multimedia.3m.com/mws/media/9309380/3m-vhb-klebeband-eine-starke-verbinding-brochure.pdf	70
Abbildung 82: Symmetrische Probenform für Bestimmung der Scherzugfestigkeit von Klebeverbindungen zwischen PA 6/ PA 6 + C-Faser und Plattenwerkstoffen. Bezeichnung als Doppelscherzugprobe.....	72
Abbildung 83: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Sperrholz und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe	73
Abbildung 84: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Plexiglas und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe.....	73
Abbildung 85: Zugscherfestigkeiten der Überlappungsklebung zwischen Aluminium und PA 6 bzw. C-Faserverstärktem PA 6 bestimmt mit Doppelscherzugprobe	73
Abbildung 86: Versagen der Klebefuge durch Dekohäsion in der Klebeschicht des doppelseitigen Klebebandes 3M VHB GPH-060GF. Verbund von Plexiglas mit C-Faserverstärktem PA 6	74
Abbildung 87: Alle gemessenen Kraft-Weg-Kurven bis zum Versagen im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe.....	74

Abbildung 88: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: Tacky Spezial	74
Abbildung 89: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: 3M VHB GPH	75
Abbildung 90: Gemessene Kraft-Weg-Kurven im Zugscherversuch mit Doppelscherzugprobe, Klebstoff: 3M 760	75
Abbildung 91: Aufbau der untersten 6 Layer von Gelenk 13, Bilder exportiert aus 3D-Druckersoftware Eiger. Die blauen Linien in Layer 2 und 4 zeigen die eingebettete Faser.....	77
Abbildung 92: Aufbau der obersten 4 Layer von Gelenk 13, Bilder exportiert aus 3D-Druckersoftware Eiger.....	78
Abbildung 93: Gesamtansicht von Gelenk 13, (links) Oberseite, (rechts) Unterseite.....	78
Abbildung 94: Mitte des Gelenkknotens, Ansicht von oben (links) und unten (rechts)	79
Abbildung 95: Blick auf Spitze eines Kuchenstücks von unten (links) und äußeres Rand der Klebefläche	79
Abbildung 96: Zoom in den Gelenkspalt am Übergang Klebelasche/Knotenkörper (links) und Gelenkspalt am äußeren Rand der Klebefläche	79
Abbildung 97: Bild des CT- gescannten Gelenkknoten 13 (Nummer 9) mit Lunkeranalyse.....	80
Abbildung 98: CT-Rekonstruktion der untersten 5 Layer (Höhe 0,625 mm) mit C-Faserverstärkung in Layer 2 und 4. Die Poren verlaufen parallel zur Richtung der Verstärkungsfasern.	81
Abbildung 99: CT-Rekonstruktion der obersten 30 Layer (Höhe 3,75 mm) ohne Faserverstärkung. Lange Poren verlaufen parallel zum Bauteilrand zwischen der konzentrischen Randschicht (4 extrudierte Stränge) und der inneren dichten gerichteten Strangfüllung. Im Vergleich zum C-Faserverstärkten Bereich sind weniger und kleinere Poren sichtbar.	81
Abbildung 100: Finite Element Analyse – Überführung des Materialmodells	83
Abbildung 101: Ablauforganigramm der Implementierung und Validierung eines Materialmodells in der FE-Simulation	83
Abbildung 102: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 11 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).....	92
Abbildung 103: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 13,5 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).....	94

Abbildung 104: Validierung der Modellvorhersage für die Zugkriechversuche bei 16 MPa mit dem Maxwell-Wiechert-Modell. Die Anpassung der Modellparameter erfolgte in vier unterschiedlich langen Zeitintervallen, jede zusätzliche Zeitdekade erhöht die Anzahl der erforderlichen Modellparameter um zwei (zusätzlicher Maxwell-Zweig im Modell).	95
Abbildung 105: 3D-Volumenelemente für die Verwendung in der FEM. Links 8-Knoten-Element mit linearem Ansatz für die Verschiebungen im Element, rechts 20-Knoten-Element mit quadratischer Ansatz für die Verschiebungen im Element. Die Seitenmittelnknoten des quadratischen Elementes erlauben die korrekte Modellierung gekrümmter Ränder	96
Abbildung 106: Fließkurven von PA 6 für verschiedene Strangorientierungen	97
Abbildung 107: FE-Simulation Zugprobe Matrixwerkstoff PA 6	98
Abbildung 108: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 0°/90° in Belastungsrichtung	98
Abbildung 109: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 45°/45° in Belastungsrichtung	99
Abbildung 110: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 15°/75° in Belastungsrichtung	99
Abbildung 111: Validierung Simulationsmodell Matrixwerkstoff PA6, Strangausrichtung 30°/60° in Belastungsrichtung	99
Abbildung 112: 3-Punkt-Biegeprüfung Matrixwerkstoff PA 6	100
Abbildung 113: FEM-Simulation der 3-Punkt-Biegeprüfung für Matrixwerkstoff PA 6, Vergleichsspannung (von Mises) im Viertelmodell	100
Abbildung 114: Validierung Materialmodell Matrixwerkstoff PA 6, Strangausrichtung 45°/45°	100
Abbildung 115: Validierung Materialmodell Matrixwerkstoff PA 6, Strangausrichtung 0°/90° ..	101
Abbildung 116: Geometriemodell des Filmgelenkes in ANSYS. Durch Ausnutzung von Symmetrien (rote Flächen) wird ein Viertelmodell definiert um den Berechnungsaufwand zu reduzieren...	101
Abbildung 117: Vernetzung des Viertelmodells mit 4704 Hexaederelementen (22081 Knoten) vom Typ Solid186 (quadratischer Verschiebungsansatz, reduzierte Integration).....	102
Abbildung 118: Kontourplot der elastischen Hauptdehnung im Querschnitt des Filmgelenkes bei einem Biegewinkel von 180°	102
Abbildung 119: Geometrievarianten für die Gestaltung des Gelenkquerschnitts	103
Abbildung 120: Viertelmodell der Geometrie des Gelenkknotens 13 in ANSYS unter Ausnutzung von Symmetrien. „Slicing“ des Volumens in horizontale Schichten, jedem Teilvolumen entspricht ein Layer beim 3D-Druck.....	104

Abbildung 121: Vernetzung des Viertelmodells von Gelenkknoten 13 mit 52754 Hexaederelementen (234696 Knoten) vom Typ Solid186 (quadratischer Verschiebungsansatz, reduzierte Integration)	105
Abbildung 122: Untere Grenzkurve für das Fließverhalten des Matrixwerkstoffes PA 6.	106
Abbildung 123: Randbedingungen im FEM-Modell von Gelenkknoten 13. (oben) Symmetrierandbedingungen in x-z-Ebene und y-z-Ebene, (mittig) Kraftrandbedingung (50 N) auf halbe Klebefläche in y-Richtung, (unten) elastische Lagerung der Klebefläche mit Steifigkeit 1 N/mm pro mm ² in z-Richtung	107
Abbildung 124: Vergleichsspannung nach von Mises auf der Oberseite des Gelenkknotens bei einer vertikalen Zugbelastung von 100 N (Viertelmodell gespiegelt an Symmetrieflächen).....	109
Abbildung 125: Vergleichsspannung nach von Mises auf der Unterseite des Gelenkknotens bei einer vertikalen Zugbelastung von 100 N (Viertelmodell gespiegelt an Symmetrieflächen).....	109
Abbildung 126: Mises-Vergleichsspannung im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N) in y-Richtung. Seitliche Ansicht auf den Symmetriequerschnitt (y-z-Ebene). Die hohen Spannungen treten in den beiden C-Faserlayern auf, welche die wesentliche Kraftübertragung übernehmen	110
Abbildung 127: Vertikale Verformung des Gelenkknotens 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung	112
Abbildung 128: Vergleichsdehnung im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung. (oben) Ansicht von oben, (unten) Ansicht von unten.	112
Abbildung 129: Vergleichsspannung (von Mises) im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N in y-Richtung) bei elastischer Lagerung im Vergleich zu Gelenkknoten gleicher Geometrie ohne Faserverstärkung. (oben) Ansicht von oben, (mittig) Ansicht auf Querschnittsfläche, (unten) Ansicht von unten.....	113
Abbildung 130: Parametrisches Dimensionierungskonzept für die beanspruchungsgerechte Auslegung von additiv gefertigten faltbarer Gelenkpunkten.....	115
Abbildung 131: Foto des periodisch angeordneten Faltelementes und Skizze der Faltbewegung entlang einer horizontalen Führungsschiene.....	121
Abbildung 132: Demonstrator für formveränderliche Fassadenverkleidung mit Wabenstruktur, Kombination verschiedener Materialien mit dem 3D-gedruckten Gelenkpunkt. Änderung der Flächenabdeckung von 100% bis 25%.....	122
Abbildung 133: Zeichnung des konzipierten Faltmechanismus mit gelenkig gelagerten Stäben für die Realisierung der Formänderung eines einzelnen Faltelements	123

Abbildung 134: Faltmöglichkeiten eines dreieckigen Faltwerks aus 16 Birkensperrholzplatten (Dicke 3 mm, Kantenlänge 15 cm). Flächenabdeckungen zwischen 100% und 0% sind möglich.	124
Abbildung 135: Demonstrator für ein adaptives Faltwerk aus Plexiglasplatten mit drei in Reihe angeordneten sechsteiligen Faltelementen, die unabhängig voneinander einzeln gefaltet werden können. Im maximal gefalteten Zustand beträgt die verschattete Fläche nur 25% der Fläche im aufgeklappten Zustand.	125
Abbildung 136: Rückseite des Demonstrators für ein adaptives Faltwerk aus Plexiglasplatten mit drei in Reihe angeordneten sechsteiligen Faltelementen, die unabhängig voneinander einzeln gefaltet werden können. Der Faltmechanismus wird über ein Seilzugsystem bewegt. Für die maximale Faltung jedes sechsteiligen Faltelementes wird eine Seilzugkraft von etwa 10 N und ein Weg von 20 mm benötigt.	126
Abbildung 137: Gerendertes Modell der in einen Rahmen eingebauten nicht lichtdurchlässigen Faltstruktur (Materialbeispiel: schwarze schlagfeste ABS-Kunststoffplatten) im offenen, halb gefalteten und maximal gefalteten Zustand mit Darstellung des Schattenwurfs durch Lichteinfall.	126
Abbildung 138: Faltwerk im Montagezustand, das linke Foto zeigt die spätere Außenseite, das rechte Foto die spätere Innenseite. Für die Verbindung der 18 Plattenelemente werden 4 volle Knoten, 8 halbe Knoten und 2 drittel Knoten verwendet.	127
Abbildung 139: Foto während des Druckversuchs an der Faltstruktur mit faserverstärkten 3D-gedruckten Gelenkknoten (Knoten 13).....	128
Abbildung 140: Gemessener Druckkraft-Weg-Verlaufs für Faltstruktur mit faserverstärkten 3D-gedruckten Knoten im Vergleich zu Versuchsergebnissen mit Knoten ohne Faserverstärkung aus dem Jahr 2015 [Ham16].....	128
Abbildung 141: Verwendung von formveränderlichen Faltwerken für die lokale Veränderung des Lichteinfalls in Gebäuden mit Glasfassade	129
Abbildung 142: Verwendung von formveränderlichen Faltwerken für die Veränderung der Schallreflektion und Schallausbreitung.....	130
Abbildung 143: Mögliche Verwendung von adaptiven dreieckförmigen Faltwerken für die nachträgliche Veränderung bzw. Ergänzung von dreiecksfacettierten Fassaden mit Verschattung, Fotovoltaik oder Beleuchtung. (Bild links: Klima-Pavillon in Weimar (www.thega.de/fileadmin/_processed_/4/b/klimapavillon_2018c_010.jpg), Bild rechts: Poly International Plaza (www.archdaily.com/877278/poly-international-plaza-som).	130
Abbildung 144: Messstellen für die Vermessung der Zugproben	151

Abbildung 145: Foto der Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuch nach Norm DIN EN ISO 527-1 (links) und der verwendeten Probengeometrie mit halbierten Querschnitts-abmessungen. Der Nennquerschnitt wurde von 40 mm ² auf 10 mm ² verringert.	151
Abbildung 146: Versuchsaufbau für die gleichzeitige Durchführung von fünf Zeitstandzugversuchen in einem klimatisierten Raum. Die Lastaufbringung erfolgt mit angehangenen Gewichten, die kontinuierliche Messung der Längenänderung mit Wegaufnehmern (HBM Typ WSF/200mm)	151
Abbildung 147: Änderung des Winkels zwischen den Nylon-Strängen in der Zugprobe nach den Kriechversuchen. Der Winkel vor Belastungsbeginn betrug in allen Fällen 45°.	152
Abbildung 148: Gemessene Kraft-Weg-Kurven beim Druckversuch mit zylindrischen Proben (10 mm Höhe, 10 mm Durchmesser) aus 3D-gedrucktem PA 6.	152
Abbildung 149: Gemessene Kraft-Weg-Kurven beim Scherzugversuch mit Doppelscherzugprobe zur Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit (Fläche 312,5 mm ²) zwischen zwei Schichten im 3D-Druck. Es trat kein Versagen in der schubbeanspruchten Schicht auf.	153
Abbildung 150: Plastisch verformte Doppelscherzugproben zur Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit zwischen zwei Layern im 3D-Druck ohne Versagen zwischen den Schichten	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektgliederung in Phasen	12
Tabelle 2: Vier Typologien zur Beschreibung von Faltungsvarianten hinsichtlich der Steifigkeit..	15
Tabelle 3: Gleichungen zur Berechnung von Steifigkeit und Festigkeit eines unidirektionalen Faser-Matrix-Verbundwerkstoffes [Ehr06], [MHMS02]	23
Tabelle 4: Mechanische Kennwerte vom PA6 und Verstärkungsfasern (Auszug Datenblatt vom 11.10.16) [Mar2]	30
Tabelle 5: Aufstellung der Materialkosten für den faserverstärkten 3D-Druck mit dem Gerät „Mark Two“	31
Tabelle 6: Entwurfs- und Prozessparameter Zugproben aus PA6	34
Tabelle 7: Entwurfs- und Prozessparameter für Biegeproben, reiner Matrixwerkstoff, verschiedene Strangorientierung	38
Tabelle 8: Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte Matrixwerkstoff PA6	40
Tabelle 9: Entwurfs- und Prozessparameter für faserverstärkte-Zugproben	40
Tabelle 10: Mechanische Eigenschaften der Verbundwerkstoffe	46
Tabelle 11: Entwurfs- und Prozessparameter für faserverstärkte Biegeproben	48
Tabelle 12: Nennmaße der Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuch	50
Tabelle 13: Versuchsplan für Kriechversuche ohne Faserverstärkung	50
Tabelle 14: Versuchsplan für Kriechversuche mit Faserverstärkung	51
Tabelle 15: Mittels linearer Regression gefittete Parameter m und n des Findley-Potenzansatzes für Kriechversuche mit 3D-gedrucktem PA 6 (Bestimmtheitsmaß R^2 in letzter Spalte)	55
Tabelle 16: Versuchsplan für Zugversuche und Schliffe mit Anzahl Biegewechseln ($0^\circ - 180^\circ - 0^\circ$)	64
Tabelle 17: Empfehlungen für das Kleben von Polyamid nach Angaben eines Kunststoffherstellers (Kern GmbH [KER18])	68
Tabelle 18: Allgemeines Eigenschaftsprofil von Silan-Hybridklebstoffen nach [Prö13]	71
Tabelle 19: Rheologische Modelle für viskoelastische Festkörper	85
Tabelle 20: Ergebnis der Parameteranpassung der viskoelastischen rheologischen Modelle an die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	88
Tabelle 21: Ergebnis der Parameteranpassung für das viskoelastische Maxwell-Wiechert-Modell mit 3, 5 und 7 Parametern an die gemessene zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	89
Tabelle 22: Langzeit-Modul und Relaxationszeiten für das Maxwell-Wiechert-Modell mit 3, 5 und 7 Parametern für die Parameteranpassung an die gemessene zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	89

Tabelle 23: Ergebnisse der Parameterbestimmung für die Prony-Reihe aus Kriechversuchen bei einer Lastspannung von 11 MPa und unterschiedlich großen Zeitintervallen für die Anpassung des Modells an die gemessenen Kurven.	91
Tabelle 24: Ergebnisse der Parameteridentifikation der Prony-Reihe für Kriechversuche bei Lastspannung 13,5 MPa.....	93
Tabelle 25: Ergebnisse der Parameteridentifikation der Prony-Reihe für Kriechversuche bei Lastspannung 16 MPa.....	93
Tabelle 26: Simulierte elastische Hauptdehnungen im Filmgelenk in Abhängigkeit von der Länge des Filmgelenks und der Querschnittsform.....	103
Tabelle 27: Simulierte Dehnungen im Gelenkknoten 13 unter Zugbelastung (100N).....	111
Tabelle 28: Abschätzung von A-Faktoren für verschiedene Thermoplasttypen (nach Oberbach [Obe90])	118
Tabelle 29: Berechnung der Zug- und Biegesteifigkeit im faserverstärkten Querschnitt der Klebelasche in Abhängigkeit des Schichtaufbaus mit der Schichthöhe s und der Querschnittsfläche einer Schicht A_s	120
Tabelle 30: Verwendete Fließkurve (Multilineare isotrope Verfestigung) in ANSYS für die FEM-Simulation des nichtlinearen Materialverhaltens des Matrixwerkstoffes PA 6 bei Kurzzeitbelastung. Untere Grenzkurve für alle Strangorientierungen.	154

A Anhang

A.1 Bilder zu den Zug- und Kriechversuchen

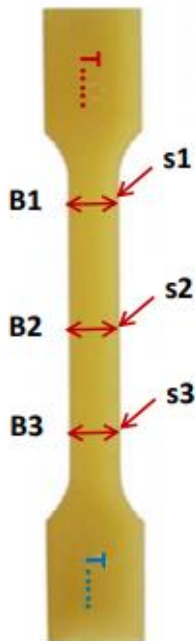


Abbildung 144: Messstellen für die Vermessung der Zugproben



Abbildung 145: Foto der Probengeometrie für Zeitstand-Zugversuch nach Norm DIN EN ISO 527-1 (links) und der verwendeten Probengeometrie mit halbierten Querschnitts-abmessungen. Der Nennquerschnitt wurde von 40 mm² auf 10 mm² verringert.

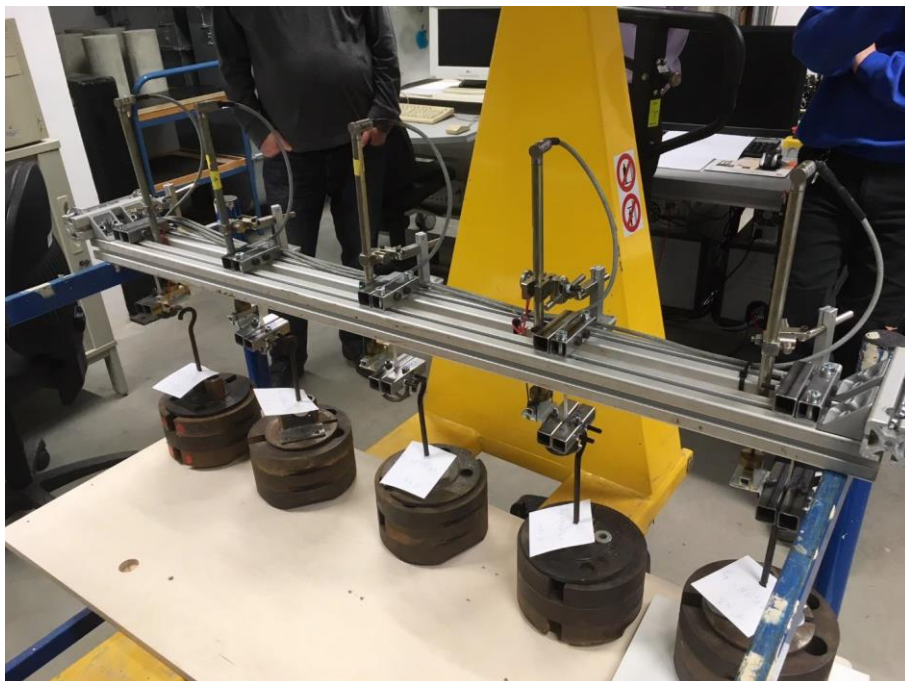


Abbildung 146: Versuchsaufbau für die gleichzeitige Durchführung von fünf Zeitstandzugversuchen in einem klimatisierten Raum. Die Lastaufbringung erfolgt mit angehangenen Gewichten, die kontinuierliche Messung der Längenänderung mit Wegaufnehmern (HBM Typ WSF/200mm)

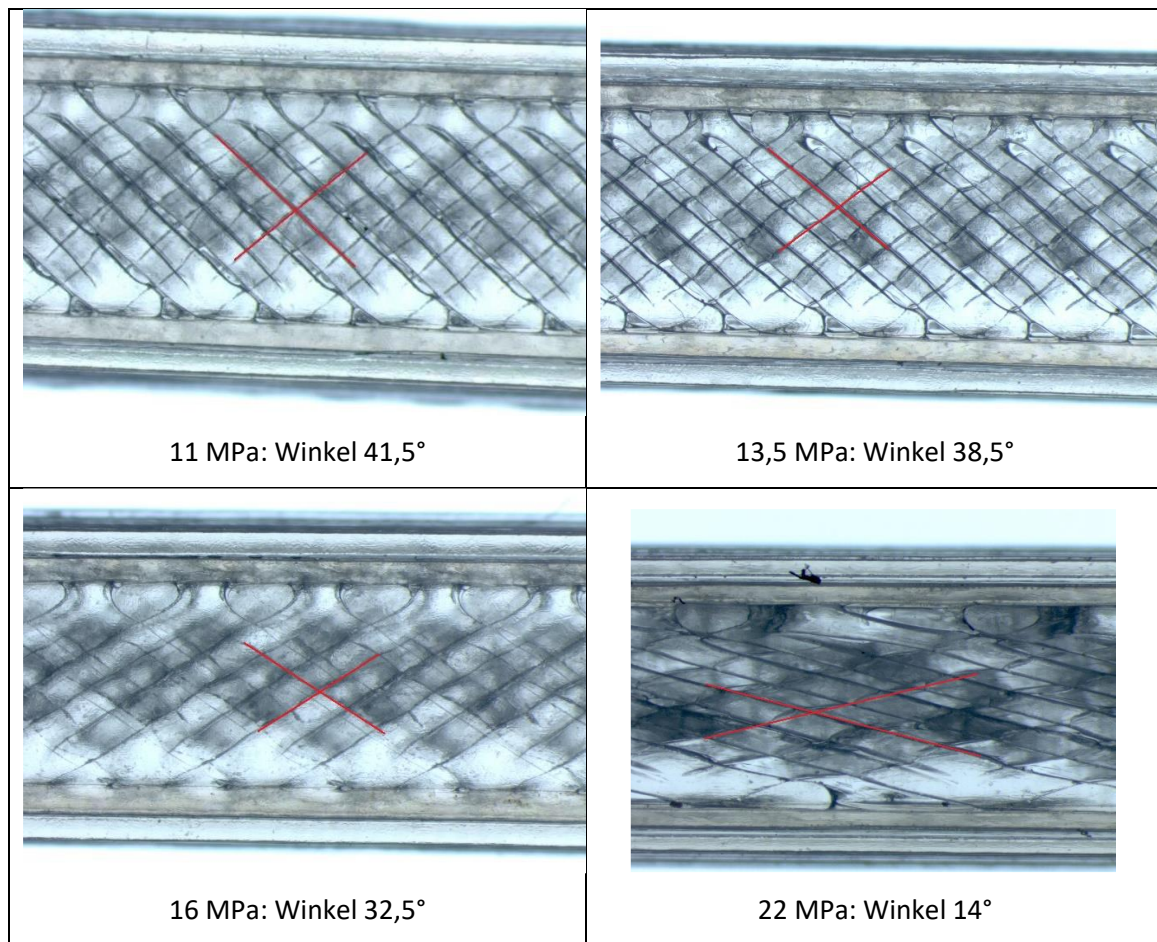


Abbildung 147: Änderung des Winkels zwischen den Nylon-Strängen in der Zugprobe nach den Kriechversuchen. Der Winkel vor Belastungsbeginn betrug in allen Fällen 45°.

A.2 Druckversuche

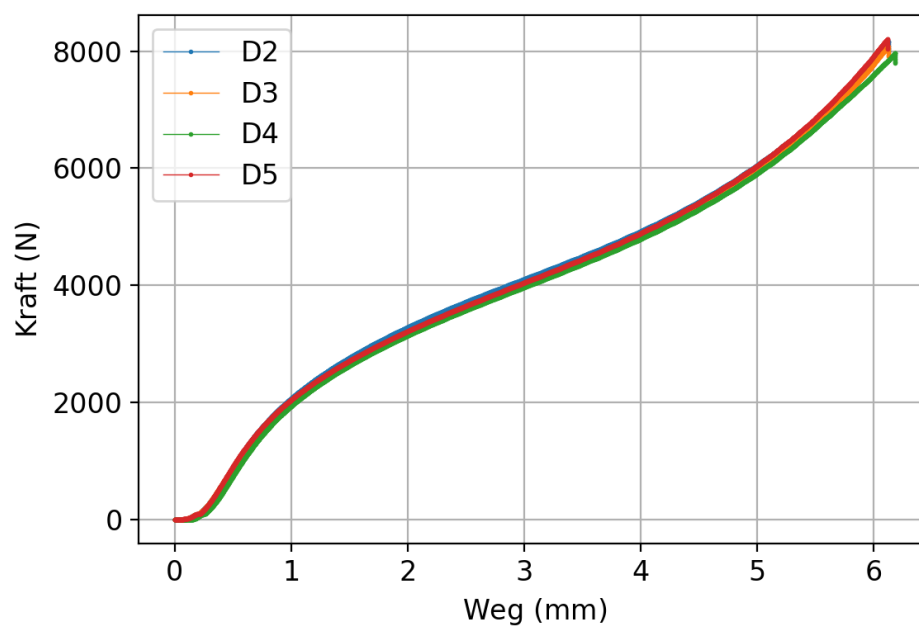


Abbildung 148: Gemessene Kraft-Weg-Kurven beim Druckversuch mit zylindrischen Proben (10 mm Höhe, 10 mm Durchmesser) aus 3D-gedrucktem PA 6.

A.3 Scherzugversuche

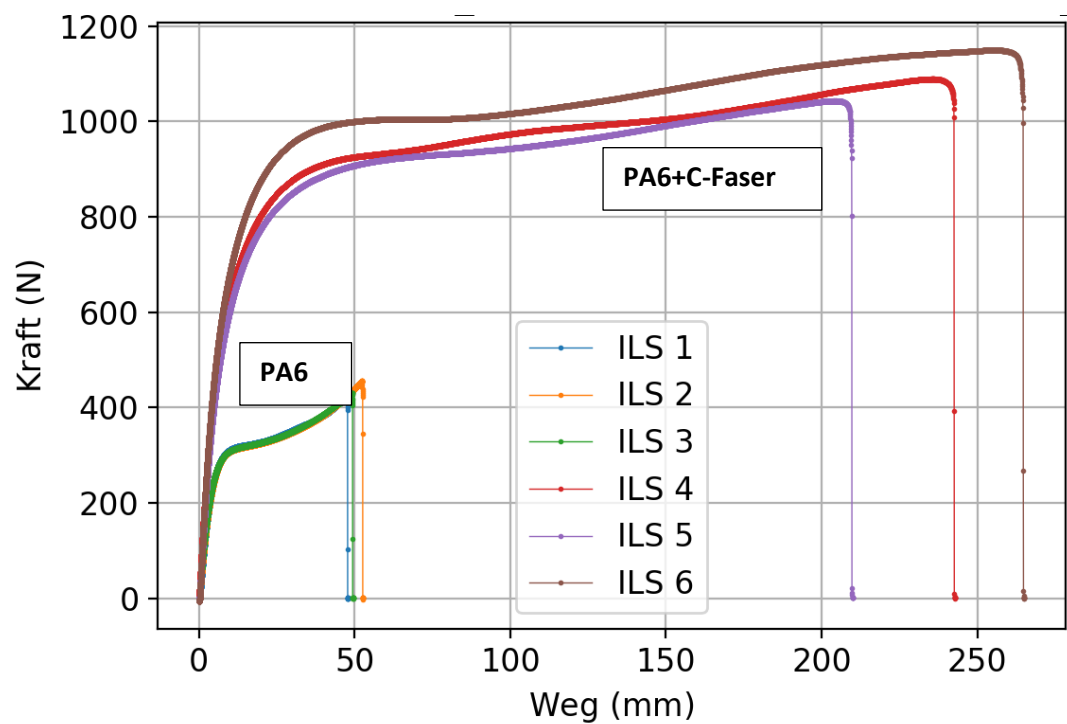


Abbildung 149: Gemessene Kraft-Weg-Kurven beim Scherzugversuch mit Doppelscherzugprobe zur Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit (Fläche 312,5 mm²) zwischen zwei Schichten im 3D-Druck. Es trat kein Versagen in der schubbeanspruchten Schicht auf.

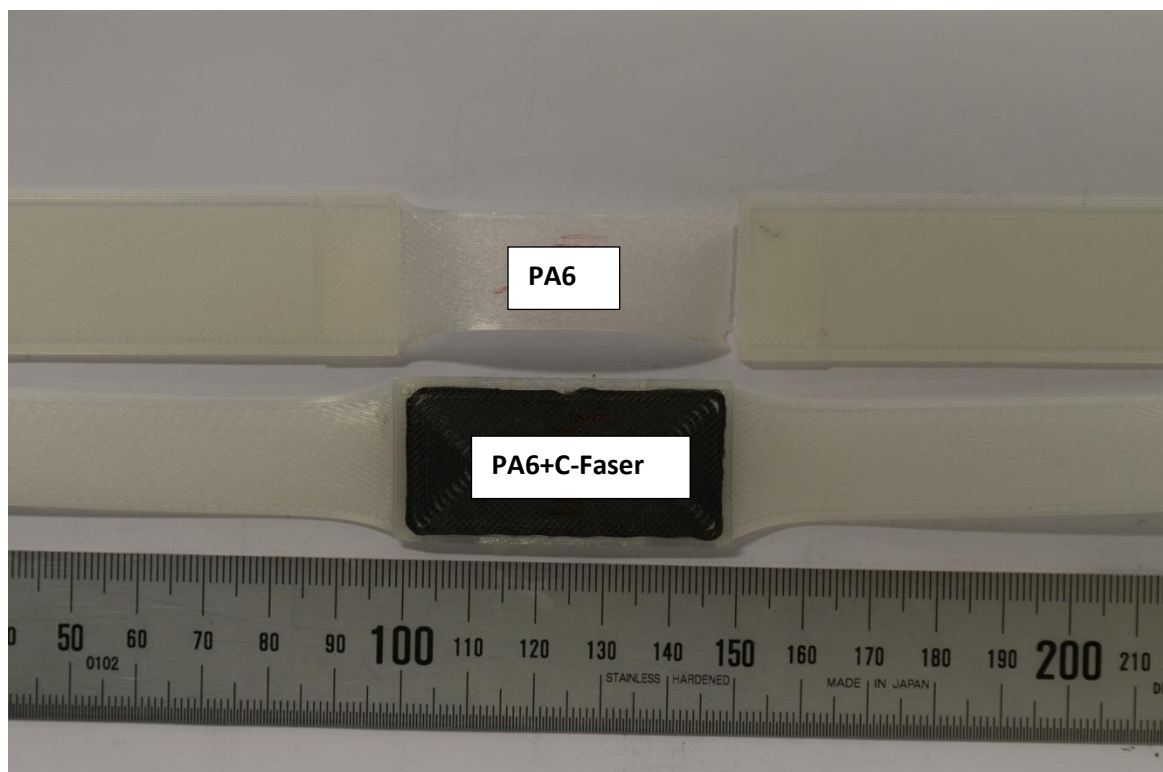


Abbildung 150: Plastisch verformte Doppelscherzugproben zur Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit zwischen zwei Layern im 3D-Druck ohne Versagen zwischen den Schichten .

A.4 Fließkurve Matrixwerkstoff PA 6 im FEM-Materialmodell

Tabelle 30: Verwendete Fließkurve (Multilineare isotrope Verfestigung) in ANSYS für die FEM-Simulation des nichtlinearen Materialverhaltens des Matrixwerkstoffes PA 6 bei Kurzzeitbelastung. Untere Grenzkurve für alle Strangorientierungen.

ϵ_{pl}	σ_{wahr}
0	21
0,001	22,4
0,002	23,5
0,003	24,3
0,004	24,8
0,005	25,2
0,01	26,4
0,02	28
0,03	29,2
0,04	30,3
0,05	31,3
0,1	34,7
0,2	38
0,3	40
0,4	42
0,5	44
1	55

A.5 Viskoelastisches Verhalten Matrixwerkstoff PA 6 im FEM-Materialmodell

Das viskoelastische Materialverhalten kann in der FEM-Software ANSYS durch eine Prony-Reihe abgebildet werden. Die Kriechversuche zeigten bereits oberhalb der kleinsten Versuchslast von 11 MPa nichtlineare viskoelastische Effekte, erkennbar im Isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm (vgl. Abbildung 66) an der Abweichung der Isochronen von einer Geraden und an den Kriechmodulkurven in Abbildung 64, die lastabhängig sind. Für die FEM-Modellierung des viskoelastischen Verhaltens von PA 6 werden deshalb nur die Parameter der Prony-Reihe aus dem Zugkriechversuchen bei 11 MPa verwendet und die Hypothese aufgestellt, dass unterhalb einer Spannung von 11 MPa das Material linear-viskoelastisch beschrieben werden kann. Für die Überprüfung der Annahme müssten Zugkriechversuche mit Lasten kleiner als 11 MPa durchgeführt werden.

Die Eingabe der Parameter der Prony-Reihe erfolgt abweichend von der Schreibweise in Abschnitt 9.1 entsprechend folgender Schreibweise mit Prony-Serien des zeitabhängigen Schubmodul $G(t)$ und Kompressionsmodul $K(t)$. Unter der Annahme, dass der Kompressionsmodul konstant ist ($K_0 = K_\infty$), können die Terme für den Kompressionsmodul entfallen ($n_K = 0$).

$$\boldsymbol{\sigma} = \int_0^t 2G(t-\bar{t}) \frac{d}{d\bar{t}}(\boldsymbol{\varepsilon}^D) d\bar{t} + \int_0^t K(t-\bar{t}) \frac{d}{d\bar{t}}(\boldsymbol{\varepsilon}^V \mathbf{I}) d\bar{t} \quad (\text{A.1})$$

$\boldsymbol{\sigma}$... Cauchy Spannungstensor

$\boldsymbol{\varepsilon}^D$... Deviatorischer Dehnungstensor

$\boldsymbol{\varepsilon}^V$... Volumendehnung

$\mathbf{I}$... Einheitstensor

$\bar{t}$... vergangene Zeit

$$G(t-\bar{t}) = G_0 \left[\alpha_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G e^{-\frac{(t-\bar{t})}{\tau_i}} \right] \quad (\text{A.2})$$

$$K(t-\bar{t}) = K_0 \left[\alpha_\infty^K + \sum_{i=1}^{n_K} \alpha_i^K e^{-\frac{(t-\bar{t})}{\tau_i}} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i \quad (\text{A.4})$$

$$K_0 = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i \quad (\text{A.5})$$

$$\alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0} \quad (\text{A.6})$$

$$\alpha_i^K = \frac{K_i}{K_0} \quad (\text{A.7})$$

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1-\nu)} \quad (\text{A.8})$$

$$K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu)} \quad (\text{A.9})$$

E_0, ν ... Elastizitätsmodul (spontaner E-Modul) und Poisson-Zahl

G_0, K_0 ... Spontaner Schubmodul, Kompressionsmodul für $t = 0$

n_G, n_K ... Anzahl Prony-Terme für Schub, Kompression

α_i^G, α_i^K ... relative Moduln der Prony-Terme für Schub, Kompression

τ_i^G, τ_i^K ... Relaxationszeiten der Prony-Terme für Schub, Kompression

Die einzugebenden Parameter sind:

- E_0, ν
- $n_G, \alpha_i^G, \tau_i^G$
- $n_K, \alpha_i^K, \tau_i^K$

A.6 Datenblatt 3M Hybrid Kleb- und Dichtmasse 760



Hybrid Kleb- und Dichtmasse 760

Produktbeschreibung

3M™ Hybrid Kleb- und Dichtmasse 760 ist ein einkomponentiges Produkt ohne Isocyanate, welches elastische Verbindungen herstellt. Es härtet schnell mit Luftfeuchte aus und entwickelt flexible und widerstandsfähige Verbindungen bei einer sehr guten Adhäsion zu den meisten Materialien.

Es ist anwendbar bei LKW Aufbauten, Anhängern, Kühlwagen, im Schiffbau, bei Klimaanlage, Belüftungsgeräten, Sandwichpaneelen und vielen anderen industriellen Applikationen.

Eine Vielfalt an Materialien in der Bauindustrie, wie Beton, Holz, Aluminium, lackierte Metalle, Fiberglas, Holz, Polystyrol, PVC, Glas, Stein und Keramik können auch in Aussenanwendungen sicher verbunden oder verfugt werden.

Eigenschaften	Nutzen
Einkomponentig / Feuchtigkeitsvernetzend	Kein Mischen Einfache Verarbeitung
Neutrales Produkt	Keine Isocyanate
Verbindet unterschiedliche Materialien	Designvielfalt
Haftet auf vielen unterschiedlichen Oberflächen	Vielseitig einsetzbar, flexibles Design
Permanent elastisch	Lange Haltbarkeit
Schnell härtend	Hohe Produktivität
Überstreichbar	Verbessertes Aussehen
exzellente UV-Beständigkeit	kein Vergilben

UV Beständigkeit

Das Produkt behält die Festigkeit und Flexibilität auch bei längerer natürlicher UV Bestrahlung. Anwendung

Hitzebeständigkeit

Bei längerem Einsatz bei Temperaturen über 90°C wird die Festigkeit mit der Zeit abnehmen, daher kann eine Verwendung bei Temperaturen oberhalb 90°C nicht empfohlen werden.

Technische Daten	
Chemische Basis	STP
Hautbildungszeit bei 23°C und 50% r. H.	20 ± 10 Minuten
Härterate bei 23°C und 50% r.H.	3 mm / 24 Stunden
Shore A Härte (ISO 868-3 Sekunden)	50 – 60
Dichte 20°C (g/cm³)	1,61
Bruchdehnung (ISO 37)	> 100 %
100% Modul (ISO 37)	> 1,3 MPa
Zugscherfestigkeit (ISO 37)	> 2 MPa
Standfestigkeit	sehr gut
Temperatureinsatzbereich	-40°C bis + 100°C
Farbe	schwarz, weiß, grau
Verarbeitungstemperatur	5°C bis + 35°C
Beständigkeit gegen Säuren und Laugen	Gut
Wasser- und Salzsprühbeständigkeit	exzellent
Konsistenz	pastös
UV Beständigkeit	hervorragend
Anstrichverträglichkeit	Wasserlacke gut / Lösemittellack Verträglichkeitstests benötigt
Schrumpf (ISO 10563)	< 2%

Verarbeitungshinweise

Oberflächenvorbereitung:

Die zu verbindenden Oberflächen müssen sauber und trocken sein. Weiterhin müssen die Oberflächen frei von Fett, Trennmitteln, Öl, kondensiertem Wasser und anderen Verunreinigungen sein, die die Adhäsion beeinflussen können. Anschleifen mit Scotch Brite 7447 und anschließende Reinigung mit Lösemitteln wird die Haftung verbessern. Mögliche Lösemittel können 3M™ Industriereiniger, oder Methyl Ethyl Keton (MEK) sein.



3M™ Power Line Kleb- und Dichtmassen

760

Technisches Datenblatt

Beim Einsatz von Lösemitteln auf gute Belüftung achten! Mögliche Entzündungsquellen im Arbeitsbereich löschen und entsprechende Vorsichtsmaßnahmen einhalten. Informationen auf dem Etikett und den Sicherheitsdatenblättern beachten. Immer durch Vortests die Beständigkeit der Substrate gegen Lösemittel prüfen.

Der Einsatz von Primer ist ein separater Schritt und hängt von den zu klebenden Substraten und dem Verwendungszweck ab. Primer können die Korrosionseigenschaften und die Haltbarkeit der Verbindung besonders bei sehr hoher Luftfeuchte verbessern. In den meisten Applikationen können Metallverbindungen mit hoher Festigkeit ohne Primer Einsatz erreicht werden. Vortests werden empfohlen um die Notwendigkeit des Primers zu bestimmen.

Anwendung

Dichtung der Austrittsöffnung durchstoßen, die dünne Dichtfolie am Boden der Kartusche entfernen, dann in Handpistole einlegen. (Bei Einsatz von Schlauchbeutelverpackungen ein Ende abschneiden und in die Handpistole mit dem offenen Ende zur Düse einlegen). Düse und Haltering aufsetzen, Düse auf die gewünschte Öffnung aufschneiden. Die geöffnete Kartusche sollte innerhalb von 24 Stunden verarbeitet sein. Das Produkt soll gut in die Fuge gepresst werden, um einen guten Verbund mit der Oberfläche sicherzustellen. Das Produkt bei Temperaturen von 5 – 35°C verarbeiten. Nicht auf gefrorene oder nasse Oberflächen auftragen. Nicht auf Silikonen oder in Verbindung mit nicht gehärteten Silikonen verarbeiten. Kontakt mit Alkohol oder Lösemitteln beim Härten vermeiden. Um die gewünschte Oberfläche zu erreichen, kann die Dichtmasse sofort nach dem Auftragen geglättet werden.

Reinigung

Ungehärtetes Produkt kann mit den gleichen Reinigungsmitteln entfernt werden, die zur Oberflächenvorbehandlung empfohlen werden. Unausgehärtetes Produkt kann nur mechanisch z.B. mit Klingen, Klavierdraht oder Schleifen mit z.B. 3M™ Scotch-Brite™ Moulding Adhesive and Stripe Removal Disc entfernt werden.

Verpackung

Kartusche, Schlauchbeutelverpackung.

Zu alternativen Verpackungen bitte den 3M Verkaufsrepräsentanten kontaktieren.

Lagerung

Lagerung von 3M™ Hybrid Kleb- und Dichtmasse 760 in der Originalverpackung bei einer Lagertemperatur von 21°C.

Entnahme nach dem „first in-first out“ Prinzip.

Haltbarkeit

12 Monate ab Lieferdatum bei Aufbewahrung in der Originalverpackung.

Sicherheitshinweise

Bitte lesen Sie vor Gebrauch des Produkts zunächst die Sicherheits- und Gesundheitshinweise auf dem Produktetikett und dem Sicherheitsdatenblatt des Produktes sorgfältig durch.

Auskunft dazu erhalten Sie von Ihrer 3M Vertretung vor Ort oder unter www.3M.com im Internet.

Die in diesem Dokument aufgeführten Angaben stellen unsere gegenwärtigen Erfahrungswerte dar und sind nicht in Spezifikationen zu übernehmen. Es obliegt dem Nutzer, vor Verwendung der Produkte selbst zu prüfen, ob sie sich, auch im Hinblick auf mögliche anwendungswirksame Einflüsse, für den von ihm vorgesehenen Verwendungszweck eignen. Alle Fragen der Gewährleistung und Haftung regeln sich nach den jeweiligen kaufvertraglichen Regelungen, sofern nicht zwingende gesetzliche Vorschriften etwas anderes vorsehen.



3M Deutschland GmbH
Industrie-Klebebänder, Klebstoffe
und Kennzeichnungssysteme
Carl Schurz Straße 1
41453 Neuss
Telefon: 02131 / 143330
Fax: 02131 / 143200
E-Mail: 3m-powerline@mmm.com
www.3m-powerline.de

3M ist eine Marke der 3M Company.
© 3M 2009. All rights reserved.

Datum: Juni 2009
Ersetzt: Neu

A.7 Datenblatt 3M VHB GPH Klebebandserie



Technische Produktinformationen | Stand: Mai 2017

3M™ VHB™ GPH Klebebandserie

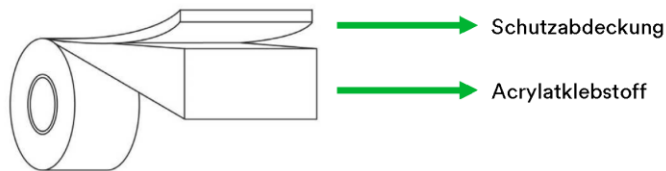
Beschreibung

- Doppelseitiges Hochleistungsklebeband
- Aus 100% geschlossenem Acrylatklebstoff
- Hohe Temperaturbeständigkeit bis zu 230° C (kurzfristig)
- Hohe Soforthaftung
- Hohe Anpassungsfähigkeit an die zu klebenden Oberflächen ermöglicht spannungsfreies Kleben und einfache Anwendung
- Gute Dichtfunktion

Vorteile und Einsatzbereiche

- Die hohe Temperaturbeständigkeit ermöglicht den Einsatz in Anwendungen mit hohen Betriebstemperaturen, wie beispielsweise vor der Verarbeitung in einer Pulverbeschichtungslinie
- Ideal für Multimaterial-Verbindungen: ein Klebeband für hoch- und mittlere energetische Werkstoffe wie z. B. Metalle (z.B. Stahl) und verschiedene Kunststoffen (z.B. PA, Acrylglas/PMMA, ABS)
- Geeignet für Anwendungen wie z.B. Metallbearbeitung, Beschilderung, Maschinenbau und Spezialfahrzeugindustrie
- Für den Innen- und Außenbereich

Aufbau



Konstruktion

	GPH-060GF	GPH-110GF	GPH-160GF
Klebstofftyp	Acrylatklebstoff		
Dicke Klebeband nach ASTM D-3652	0,60 mm	1,1 mm	1,6 mm
Dichte	710 kg/m³		
Schutzabdeckung	Silikonisierter PE Film		
Farbe Klebeband	Grau		



Physikalische Eigenschaften und Leistungsmerkmale

	GPH-060GF	GPH-110GF	GPH-160GF
 90° Schälkraft auf Stahl nach ISO 29862:2007, 90° Winkel bei RT, nach 72h Verweilzeit bei RT	25 N/cm	37 N/cm	34 N/cm
 90° Schälkraft auf PA6 nach ISO 29862:2007, 90° Winkel bei RT, nach 72h Verweilzeit bei RT	33 N/cm	48 N/cm	55 N/cm
 90° Schälkraft auf ABS nach ISO 29862:2007, 90° Winkel bei RT, nach 72h Verweilzeit bei RT	21 N/cm	33 N/cm	32 N/cm
 90° Schälkraft auf PMMA nach ISO 29862:2007, 90° Winkel bei RT, nach 72h Verweilzeit bei RT	21 N/cm	34 N/cm	37 N/cm
 Zugfestigkeit (T-Block) nach ASTM D897, auf Aluminium, nach 72h Verweilzeit bei RT, 6.54 cm² Klebefläche	410 N/6.54 cm²	439 N/6.54 cm²	470 N/6.54 cm²
 Dynamische Scherfestigkeit nach ISO 29863:2007, auf Stahl, nach 72h Verweilzeit bei RT	547 N/6.54 cm²	476 N/6.54 cm²	375 N/6.54 cm²
 Statische Scherfestigkeit nach ISO 29863:2007, auf Stahl, nach 72h Verweilzeit bei RT, gehaltenes Gewicht für 10.000 Minuten, 3.32 cm² Klebefläche	23 °C - 1000 g 150 °C - 500 g		
Temperaturbeständigkeit	Kurzzeit (Minuten, Stunden): 230 °C Langzeit (Tage, Wochen): 150 °C		

Verarbeitungshinweise



Reinigen der Oberfläche

- Geeignete Handschuhe tragen. Achten Sie auf die Hinweise im Sicherheitsdatenblatt des jeweiligen Reinigers.
- Saubere Reinigungstücher (fusselfrei, parfümfrei, weichmacherfrei) verwenden.
- Je nach Verschmutzung und Oberfläche geeignete Reinigungsmittel (z. B. 3M Reiniger für 3M VHB Klebebänder) verwenden (keine rückfettenden Haushaltsreiniger).
- Reinigung solange wiederholen, bis die Oberfläche sauber und fettfrei ist.
- Das Reinigungstuch dabei wechseln.
- Bei Glas-Oberflächen den „3M Silan Glas Primer“ einsetzen (bitte beachten Sie die entsprechenden Anwendungshinweise).



Aufbringen des Klebebandes

- Die Verarbeitungstemperatur (Objekt und Umgebungstemperatur) sollte zwischen +15° C und +25° C liegen.
- Bei Anwendungen mit dauerhafter Scher- und/oder Zugbelastung (z.B. durch das Eigengewicht des Fügeteils) beträgt der Standardwert der Klebfläche im
 - Aussenbereich mindestens 60 cm² je 1 kg Belastung
 - Innenbereich mindestens 25 cm² je 1 kg Belastung. Wenn bei Anwendungen im Innenbereich mit erhöhten Temperaturen und/oder einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zu rechnen ist (z.B. Sanitärbereiche) beträgt die notwendige Klebfläche auch hier mindestens 60 cm² je 1 kg Belastung.
- Das Klebeband auf die zu klebende Oberfläche auflegen, stramm ziehen, aber nicht überdehnen. Lufteinschlüsse vermeiden.

- Das Anfangsstück des Klebebandes, das angefasst wurde, nicht verkleben (überstehen lassen und abschneiden).
- Das Klebeband zeitnah mit mindestens 20 N/cm² gut andrücken/anrollen.



Schutzabdeckung entfernen und Aufbringen des zweiten Fügeteils

- Die Schutzabdeckung in einem Stück entfernen, um „Stoppsspuren“ zu vermeiden
- Nicht auf die Klebefläche fassen
- Nach dem Abziehen der Schutzabdeckung die Klebung des zweiten Fügeteils zeitnah durchführen, um Verschmutzungen auf der offenen Klebefläche zu vermeiden.



Andruck des zweiten Fügeteils

- Andruck des zweiten Fügeteils mit ca. 20 N/cm². Lufteinschlüsse vermeiden.
- Wichtig: Achten Sie auf die richtige Positionierung, da aufgrund der hohen Klebkraft ein Wiederablösen nicht mehr möglich ist.



Endklebkraft abwarten

- Die Endklebkraft bei 20 °C wird nach 72 Stunden erreicht.
- Durch Wärme wird der Prozess beschleunigt.

Zur genauen Auslegung Ihrer Anwendung beraten wir Sie gerne.

Weitere Informationen zur Verarbeitung finden Sie in den „Verarbeitungshinweisen für 3M Klebebänder“.

Lagerung

Bei 16 – 25 °C und 40 – 65% relativer Luftfeuchtigkeit im Originalkarton lagern.

Haltbarkeit

24 Monate ab Produktionsdatum.

Weitere Informationen

Zusätzliche Informationen zu unseren Produkten finden Sie unter www.3M-Klebtechnik.de

Wichtiger Hinweis:

Alle vorstehenden Angaben stellen unsere Erfahrungswerte dar und sind nicht in Spezifikationen zu übernehmen. Prüfen Sie bitte selbst vor der Verwendung unserer Produkte, ob es sich, auch im Hinblick auf mögliche anwendungswirksame Einflüsse, für den von Ihnen vorgesehenen Verwendungszweck eignet. Bitte stellen Sie sicher, dass bei Verwendung dieser Klebebänder alle einzuhaltenden bau- und bauordnungsrechtlichen Vorschriften beachtet werden. Alle Fragen der Gewährleistung und Haftung für diese Produkte regeln sich nach den jeweiligen kaufvertraglichen Regelungen, sofern nicht gesetzliche Vorschriften etwas anderes vorsehen.

3M und VHB sind geschützte Marken der 3M Company

© 3M 2017. All rights reserved.



3M Deutschland GmbH
Carl-Schurz-Straße 1
41453 Neuss
Tel. +49 (0) 2131 14-3330
Fax +49 (0) 2131 14-3200
E-Mail: kleben.de@mmm.com
www.3M-klebtechnik.de

3M (Schweiz) GmbH
Eggstrasse 93
8803 Rüschlikon
Tel. +41 (0) 44 724-9121
Fax +41 (0) 44 724-9014
E-Mail: kleben.ch@mmm.com
www.3M.com/ch/kleben

3M Österreich GmbH
Kranichberggasse 4
1120 Wien
Tel. +43 (0) 186 686-495
Fax +43 (0) 186 686-10495
E-Mail: kleben-at@mmm.com
www.3M.com/at/kleben

