

Dustin Ahrendt

# CAE-Prozesskette für individuelle orthopädische Hilfsmittel

Kombination von faserverstärkter  
additiver Fertigung und textilen  
Materialien

MOREMEDIA



Springer Vieweg

---

# CAE-Prozesskette für individuelle orthopädische Hilfsmittel

---

Dustin Ahrendt

# CAE-Prozesskette für individuelle orthopädische Hilfsmittel

Kombination von faserverstärkter  
additiver Fertigung und textilen  
Materialien

Dustin Ahrendt  
Leipzig, Deutschland

Die vorliegende Arbeit wurde am 2. März 2021 an der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden als Dissertation mit dem Titel „Entwicklung einer CAE–Prozesskette zur Herstellung und Verarbeitung funktionsangepasster biegewei-cher und biegesteifer textiler Strukturen für kundenindividuelle neuartige orthopädische Hilfsmittel“ eingereicht und am 27. Mai 2021 in Dresden erfolgreich verteidigt.

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski

Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

ISBN 978-3-658-37244-6

ISBN 978-3-658-37245-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-37245-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geographische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Steffanie Eggert

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

# Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden im Rahmen des interdisziplinären Forschungsvorhabens „Entwicklung funktionsangepasster biegeweicher und biegesteifer textiler Strukturen für kundenindividuelle neuartige orthopädische Hilfsmittel“ sowie weiterer Forschungsarbeiten.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski für die hervorragende Betreuung, den Anstoß zur Themenwahl und die stete Förderung dieser Arbeit. Ohne ihre fachliche Kompetenz, die äußerst hilfreichen Gespräche sowie die wertvollen Hinweise für das Manuskript wäre das Gelingen der vorliegenden Arbeit nicht in dieser Qualität möglich gewesen. Zudem danke ich ihr für die Übernahme des ersten Gutachtens.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Niels Modler für das Interesse an dieser Arbeit, die Unterstützung und die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. Jörg Brummund für seine fachliche Unterstützung und die Konsultationen während der Bearbeitung der Simulationsthematik. Bei Prof. Dr.-Ing. Jens Krzywinski, Felix Schmitt und Emese Papp bedanke ich mich ganz herzlich für die Zusammenarbeit und Unterstützung, insbesondere hinsichtlich des technischen Designs.

Nicht zuletzt danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts. Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Yordan Kyosev sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur für Montagetechnik für textile Produkte für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die gute langjährige Zusammenarbeit und vielen fachlichen Diskussionen. Danken möchte ich außerdem allen Studierenden, die mich während der Bearbeitung begleitet und unterstützt haben. Hierbei sind

besonders Arturo Romero Karam, Svenja Eichhorn, Nadja Schenk sowie Yazan Abraham zu nennen.

Für die sprachliche Durchsicht des Manuskripts danke ich Max Bachmann, Andreas Dobritz, Martin Trippner, Eric Wegner und Charlott Natusch.

Meiner Familie und insbesondere meiner Verlobten Anja Balzer danke ich für die Liebe, Geduld und Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Motivation	1
1.2	Wissenschaftliche Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	5
2.1	Additive Fertigung	5
2.1.1	Definition und Abgrenzung	5
2.1.2	Additiver Fertigungsprozess	6
2.1.3	Vor- und Nachteile	8
2.1.4	Einteilung der Verfahren	10
2.1.5	Extrusionsverfahren – Fused Deposition Modeling	10
2.2	Verwendung der additiven Fertigung entlang der textilen Kette	13
2.2.1	Flächenbildung	14
2.2.2	Veredlung	15
2.2.3	Konfektion	16
2.3	Additive Fertigung von Faserkunststoffverbunden	20
2.3.1	Kurzfasern	22
2.3.2	Endlosfasern	25
2.3.3	Textile Flächen/Halbzeuge	31
2.4	Orthopädische Hilfsmittel	32
2.4.1	Orthopädie	32
2.4.2	Hilfsmittel	32
2.4.3	Additive Fertigung orthopädischer Hilfsmittel	36
2.4.4	Entwicklungspotential	39

<b>3</b>	<b>Kombinatorische Fertigung</b>	41
3.1	Fügen mittels FDM	41
3.1.1	Grundlagen der Fügeverfahren	42
3.1.2	Verbindung von Textil und additiv gefertigten Elementen	43
3.1.3	Einflussparameter auf die Adhäsion	45
3.2	Materialauswahl und Charakterisierung	50
3.2.1	Textilien	50
3.2.2	Thermoplastische Polymere	60
3.3	Maschinenteknik	67
3.3.1	3D-Drucker Prusa i3 Mk3	67
3.3.2	3D-Drucker Mark One und Mark Two	68
3.4	Untersuchung der Haftungseigenschaften	69
3.4.1	Prüfmethode – 180°-Schälprüfung	70
3.4.2	Probekörperherstellung	71
3.4.3	Prüfdurchführung	72
3.4.4	Prüfergebnisse	73
3.4.5	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	86
3.5	Konfektionstechnischer Einsatz der additiven Fertigung	89
3.5.1	Prinzipien der Materialkombination	89
3.5.2	Morphologischer Kasten	90
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines orthopädischen Hilfsmittels für das Kniegelenk</b>	95
4.1	Medizinische Grundlagen	95
4.1.1	Anatomische und biomechanische Grundlagen des Kniegelenks	95
4.1.2	Indikation – Ruptur des vorderen Kreuzbandes	97
4.1.3	Behandlung und Rehabilitation	99
4.2	3D-Scan der Körperform	101
4.3	Reverse Engineering	105
4.3.1	Polygonbearbeitung	105
4.3.2	Körpermaße und Flächenrückführung	106
4.4	Gestaltungsgrundlagen	108
4.4.1	Bandage	108
4.4.2	Orthosenelemente	109
4.4.3	Gelenkelemente	110

---

4.5	Konstruktion der textilen Komponente .....	111
4.5.1	Bandagenkonstruktion und Schnittteilgenerierung .....	111
4.5.2	Zugelastische Eigenschaften .....	115
4.5.3	Kompressionswirkung .....	117
4.6	Konstruktion der biegesteifen Funktionselemente .....	123
4.6.1	3D-CAD-Konstruktion .....	123
4.6.2	Slicing .....	126
4.7	Simulation der Rückhaltekraft .....	128
4.7.1	Knieprüfstand der TU München .....	129
4.7.2	Validierung anhand einer Hartrahmenorthese .....	130
4.7.3	Simulation des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	133
4.8	Kombinierte additive Fertigung und Konfektion .....	142
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeit und Überführung in die industrielle Praxis .....</b>	<b>147</b>
5.1	Wirtschaftlichkeit .....	147
5.1.1	Materialkosten und Fertigungszeit .....	147
5.1.2	Vergleich mit klassischem Fertigungsprozess .....	150
5.2	Überführung in die industrielle Praxis .....	152
5.2.1	Innovationsbereitschaft und Entwicklungstrends .....	152
5.2.2	Mögliche Hindernisse .....	153
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>155</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>

---

# Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
ATL	Automated Tape Laying
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CBAM	Composite-Based Additive Manufacturing
Ccl	Compression class (Kompressionsklasse)
CF3D	Continuous Fiber 3D Printing
CFF	Composite Filament Fabrication
CFKV	Carbonfaserkunststoffverbund
CFM	Continuous Fiber Manufacturing
CMAS Lab	Laboratory of Composite Materials and Adaptive Structures
CNC	Computerized Numerical Control
CO	Cotton (Baumwolle)
CV	Viskose
DC3D	DesignConcept 3D
DLP	Digital Light Processing
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EL	Elastan
EoL	End of Life
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FDM	Fused Deposition Modeling
F&E	Forschung und Entwicklung
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FGF	Field Guided Fabrication

---

FKV	Faserkunststoffverbund
FLM	Fused Layer Modeling
FVG	Faservolumengehalt
GKV	Gesetzliche Krankenversicherung
GU	Gummi (auch: Rohgummi)
HKB	Hinteres Kreuzband
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ILK	Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstoff- technik
JIT	Just In Time
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KOOS	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score
LCA	Ligamentum cruciatum anterius
LOM	Laminated Object Manufacturing
MDR	Medical Device Regulation
MM3D	Multi-material 3D printing
MRR	Maschenreihenrichtung
MSR	Maschenstäbchenrichtung
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
OBJ	Object file
OP	Operation
OS	Oberseite
OWRK	Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenenergie)
PA	Polyamid
PA6.6	Polyamid 6.6 (auch: Nylon)
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
PETG	Polyethylenterephthalat glykolmodifiziert
PLA	Poly lactide
POM-C	Polyacetal Copolymer
PSM	Pore Size Meter
PVAL	Polyvinylalkohol
RTM	Resin Transfer Moulding (Spritzpressen)
SLCOM	Selective Lamination Composite Object Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering bzw. Selektives Laser Sintern
STEP	Standard for the Exchange of the Product model data

---

STL	Standard Triangulation/Tessellation Language oder Stereolithografie
TFP	Tailored-Fiber-Placement
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TSA	Tissue Soft Analyser
US	Unterseite
VKB	Vorderes Kreuzband
VMQ	Vinyl-Methyl-Silikon
WO	Wolle

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Prinzip der additiven Fertigung .....	7
Abbildung 2.2	Vergleich zwischen additiver und klassischer Fertigung .....	8
Abbildung 2.3	Kostenzusammenhänge für additive und klassische Fertigungsverfahren .....	9
Abbildung 2.4	Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren .....	11
Abbildung 2.5	Textile Wertschöpfungskette .....	14
Abbildung 2.6	Additiv gefertigte Gestrickstruktur aus Melnikova et al., 2014, S. 3 .....	14
Abbildung 2.7	Designbeispiele additiv veredelter Textilien .....	16
Abbildung 2.8	Verformung prozentual vorgedehnter textiler Flächen durch additiv applizierte Elemente unterschiedlicher Höhe .....	17
Abbildung 2.9	Projekt sonogrid .....	18
Abbildung 2.10	Herstellungsprozess kinematics dress von der Passform- über die Faltsimulation bis zum SLS .....	19
Abbildung 2.11	Beispiele kinematics dress .....	20
Abbildung 2.12	Zugfestigkeiten von FKV in Abhängigkeit vom FVG für verschiedene Fertigungsverfahren .....	21
Abbildung 2.13	Kurzfaserverstärkter STL-Prozess .....	22
Abbildung 2.14	Veränderung der Zugeigenschaften durch Glaskurzfaserverstärkung im STL-Verfahren .....	23
Abbildung 2.15	Orientierte Kurzfaserverstärkung im STL-Verfahren .....	23
Abbildung 2.16	Querschnitt eines Carbonkurzfaserfilaments für FDM .....	24

Abbildung 2.17	Einfluss des Fasermasseanteils auf die Zugeigenschaften von ABS/CF-Composites .....	25
Abbildung 2.18	Möglichkeiten der Endlosfaserintegration im FDM ...	26
Abbildung 2.19	Schliffbilder der Ausgangsmaterialien des CFF-Verfahrens .....	27
Abbildung 2.20	Düsenimprägnierung auf FDM-Basis aus Matsuzaki et al., 2016, S. 2 .....	27
Abbildung 2.21	Spezieller Druckkopf zur Endlosfaserintegration im FDM .....	28
Abbildung 2.22	Biege- und Zugfestigkeiten von ABS und 10% CF/ABS aus Yang et al., S. 212 .....	29
Abbildung 2.23	Beispielprodukte für Orthesen .....	34
Abbildung 2.24	Beispielprodukte für Schienen .....	35
Abbildung 2.25	Beispielprodukte für Bandagen .....	36
Abbildung 2.26	Additive Fertigung von Skoliosekorsetten .....	37
Abbildung 2.27	Additiv gefertigte Schienen .....	38
Abbildung 2.28	Prototypen additiv gefertigter Schienen .....	38
Abbildung 2.29	Sprungelenkorthese aus zwei additiv gefertigten Elementen und einem verbindenden Federelement aus Carbonfasern .....	38
Abbildung 3.1	Einteilung der Fügeverfahren nach .....	42
Abbildung 3.2	Aufbau einer Klebeverbindung .....	44
Abbildung 3.3	Mikroskopieaufnahme Textil-Polymer-Interface, 100-fache Vergrößerung .....	45
Abbildung 3.4	Einflussparameter auf resultierende Textil-Polymer-Haftung .....	46
Abbildung 3.5	Kontaktwinkel $\alpha$ als Maß für die Benetzbarkeit des textilen Fügepartners .....	52
Abbildung 3.6	Gemittelte Kontaktwinkel (Wasser, Glycerin) und Oberflächenenergien (polar, dispers) der Textilmaterialien .....	55
Abbildung 3.7	Gemittelte Medianwerte der Porengröße ausgewählter Textilmaterialien .....	56
Abbildung 3.8	TSA Messgerät (emtec Electronic GmbH, 2016) und prinzipielles Vorgehen für BF-bl bzw. BF-g .....	57
Abbildung 3.9	Schallfrequenzspektren dreier textiler Proben gemessen mit TSA .....	58

Abbildung 3.10	Rauigkeit und Weichheit der Textilmaterialien	59
Abbildung 3.11	Zusammenhang zwischen Benetzung und Viskosität	61
Abbildung 3.12	Zweiplattenmodell mit Plattenabstand $H$ und Scherkraft $F$	62
Abbildung 3.13	Dynamische Viskosität verschiedener thermoplastischer Polymere	63
Abbildung 3.14	Schematischer Aufbau der Vierpunkt-Biegeprüfeinrichtung	64
Abbildung 3.15	Aufbau endlosfaserverstärkter Probekörper des Vierpunkt-Biegeversuchs	65
Abbildung 3.16	Ergebnisse der Vierpunkt-Biegeprüfung	66
Abbildung 3.17	Prusa i3 Mk3 3D-Drucker	68
Abbildung 3.18	Mark Two (Gen 1) 3D-Drucker (Markforged Inc., 2019a) und CFF-Prinzip	69
Abbildung 3.19	Schematische Ansicht des 180°-Schälversuchs	70
Abbildung 3.20	Prüfkörperherstellung für den 180°-Schälversuch	72
Abbildung 3.21	Schälkurven für PLA grau auf BF-bl (US) mit 1,6 mm Offset	74
Abbildung 3.22	Schälkraft für unterschiedliche z-Offset-Werte von PLA grau auf Textil S-C (OS) mit einer Dicke von 2,0 mm	74
Abbildung 3.23	Schälkraft für unterschiedliche Schichtdicken von PLA grau auf Textil S-C (OS) mit z-Offset von 1,2 mm	76
Abbildung 3.24	Schälkräfte der Verbindung von PLA grau auf verschiedenen Textilmaterialien	77
Abbildung 3.25	Vergleich der Schälkräfte der Verbindung von PLA grau auf unbehandelten und gewaschenen Textilmaterialien	79
Abbildung 3.26	Schälkräfte der Verbindung von PETG-CF auf ausgewählten Textilmaterialien	81
Abbildung 3.27	Schälkräfte der Verbindung von Nylon auf ausgewählten Textilmaterialien	83
Abbildung 3.28	Schälprüfkörper Nylon White nach der Prüfung	84
Abbildung 3.29	Einfluss des Waschens nach 3D-Druck von Nylon White auf BF-bl (US) auf die mittlere Schälkraft	86

Abbildung 3.30	Kombinationsmöglichkeiten von textilen Flächen (blau) und additiven Elementen (grau) .....	89
Abbildung 3.31	Einteilung in Raumrichtungen .....	90
Abbildung 4.1	Bewegungsachsen und -ebenen des Menschen .....	96
Abbildung 4.2	Kreuzbänder im rechten Kniegelenk; Ansicht von lateral .....	97
Abbildung 4.3	Vordere Variante des Schubladen-Tests .....	98
Abbildung 4.4	Beispiele für 3D-Scan-Systeme zur Ermittlung der Körperform .....	103
Abbildung 4.5	Polygonmodelle von Probanden nach 3D-Scan .....	104
Abbildung 4.6	Körpermaßlinien des Beins nach ISO 8559-1 .....	106
Abbildung 4.7	Flächenrückführung des rechten Beins (1) Polygonmodell, 2) bereinigtes Polygonmodell, 3) Erstellung der Körpermaßlinien, 4) definierte Konturen, 5) erstellte Patches, 6) generiertes Netz, 7) exakte NURBS-Fläche) .....	107
Abbildung 4.8	Überschlagenes 3-Punkt-Prinzip einer Knieorthese gegen Instabilität bei vorderer Kreuzbandruptur .....	110
Abbildung 4.9	Bestimmung des Kompromissdrehpunktes des Kniegelenks nach Nietert .....	111
Abbildung 4.10	Bandagenkonstruktion in DC3D mit drei Schnittteilen .....	112
Abbildung 4.11	Aufbau einer Flachstrickmaschine .....	113
Abbildung 4.12	Softwaregestützte Abwicklung der textilen Schnittteile von 3D (links) in die 2D-Ebene (rechts) .....	114
Abbildung 4.13	Gestaltungsprozess der textilen Komponente .....	115
Abbildung 4.14	Kraft-Dehnungs-Kurven ausgewählter Textilien in MRR .....	116
Abbildung 4.15	Morphologische Verhältnisse des Beines und deren Auswirkungen auf den Kompressionsdruck ....	118
Abbildung 4.16	Kraft-Dehnungs-Diagramm für BF-bl in MRR .....	120
Abbildung 4.17	Vergleich der Drucksimulation in MRR für das Textilmaterial BF-bl mittels DC3D .....	121
Abbildung 4.18	In MRR skalierte 2D-Schnittteile (gestrichelt) für die Kniebandage .....	122
Abbildung 4.19	2D-Zuschnitt für die 3D-CAD-Konstruktion der Funktionselemente .....	124

---

Abbildung 4.20	Querschnitte zur Konstruktion der Funktionselemente .....	125
Abbildung 4.21	Bereiche der Funktionselemente .....	125
Abbildung 4.22	Aufbau ausgewählter Schichten von Bauteil 3 mit Carbonfaserverstärkung .....	127
Abbildung 4.23	Aufbau des Prüfstandes der TU München .....	129
Abbildung 4.24	Simulation einer Hartrahmenorthese .....	131
Abbildung 4.25	Simulationsergebnisse der Hartrahmenorthese .....	133
Abbildung 4.26	Designiterationen des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	134
Abbildung 4.27	Bestimmung des Reibungskoeffizienten von Textil (BF-bl) auf Hautimitat .....	135
Abbildung 4.28	3D-CAD-Modell des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels in „Ansys“ .....	137
Abbildung 4.29	Simulationsergebnisse des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	138
Abbildung 4.30	Modellmodifikationen des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	140
Abbildung 4.31	Vergleich der freien Unterschenkellänge $l_f$ .....	141
Abbildung 4.32	Endlosfaserverstärkte additive Fertigung des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	144
Abbildung 4.33	Neuartiges orthopädisches Hilfsmittel zur Verwendung im Anschluss an eine Hartrahmenorthese nach Riss des vorderen Kreuzbandes, hergestellt mittels endlosfaserverstärkter additiver Fertigung direkt auf textile Flächen .....	145
Abbildung 6.1	CAE-gestützte Prozesskette zur Fertigung kundenindividueller Produkte .....	157

---

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Einflussparameter auf die Textil-Polymer-Haftung .....	47
Tabelle 3.2	Textilmaterialien .....	51
Tabelle 3.3	Textilmaterialien Ober- und Unterseite .....	53
Tabelle 3.4	Thermoplastische Polymere .....	60
Tabelle 3.5	Viskosität verwendeter Polymere .....	63
Tabelle 3.6	Vergleich der Probekörperabmaße in mm für den Vierpunkt-Biegeversuch .....	65
Tabelle 3.7	Probekörperabmaße (Länge x Breite x Höhe) für 180°-Schälversuch .....	71
Tabelle 3.8	Prüfparameter der 180°-Schälprüfung .....	73
Tabelle 3.9	Waschparameter der textilen Vorbehandlung .....	78
Tabelle 3.10	Waschparameter der 180°-Schälprüfkörper Nylon White auf BF-bl (US) in Anlehnung an DIN EN ISO 6330, 2013 .....	85
Tabelle 3.11	Morphologischer Kasten der Kombination von Textil (blau) und additiv gefertigten Elementen (grau) .....	92
Tabelle 4.1	Klassifikation des vorderen Schubladeneffektes .....	99
Tabelle 4.2	Rehabilitationsphasen nach Ruptur des VKB .....	100
Tabelle 4.3	Vergleich der gemittelten Maximaldehnung ausgewählter Textilmaterialien .....	116
Tabelle 4.4	Körpermaße und errechnete Kräfte für den Kompressionsdruck .....	119
Tabelle 4.5	Vergleich der Parameter und Ergebnisse der Prüfung und Simulation für die Donjoy-Hartrahmenorthese .....	132
Tabelle 4.6	Simulationsergebnisse verschiedener Modifikationen des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	139

---

Tabelle 5.1	Kalkulierte Materialkosten des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	148
Tabelle 5.2	Kalkulierte Fertigungszeit des neuartigen orthopädischen Hilfsmittels .....	149
Tabelle 5.3	Vergleich der Prozessketten zur Herstellung kundenindividueller orthopädischer Hilfsmittel .....	151



## 1.1 Motivation

Bewegung und Sport stellen entscheidende Bestandteile für die Erhaltung der Gesundheit sowie einer hohen Lebensqualität dar. Zu deren Förderung und Unterstützung kommen häufig orthopädische Hilfsmittel zum Einsatz. Dies gilt altersübergreifend, da orthopädische Hilfsmittel nicht nur zur Nutzung von Trainings- bzw. leistungssteigernden Effekten im Freizeit- und Leistungssport sondern auch für die Heilung von Verletzungen und Erkrankungen des Bewegungsapparates eingesetzt werden. Hilfsmittel zur Prophylaxe und Therapie gewinnen immer mehr an Bedeutung (Kamps & Bienstein, 2009). Betrug der Anteil der Menschen mit einem Lebensalter über 65 Jahren in Deutschland 2018 noch 21,5 %, so wird dieser bis 2060 auf schätzungsweise 29,9 % steigen (Statistisches Bundesamt, 2019). Der demografische Wandel sowie das gestiegene Sport- und Gesundheitsbewusstsein führen zu einem anhaltenden Bedarfsanstieg orthopädischer Hilfsmittel und zur Zunahme damit verbundener Ausgaben. Bereits von 2010 bis 2014 sind die Gesundheitsausgaben für entsprechende Hilfsmittel in Deutschland um mindestens 3,5 % pro Jahr auf insgesamt ca. 18 Milliarden € gestiegen (Bundesverband Medizintechnologie (BVMed), 2020, Statistisches Bundesamt, 2020, Statistisches Bundesamt, 2016). Orthesen und Bandagen werden nach Schuheinlagen am häufigsten verordnet (Bucksch, Hoffmann, Osterkamp & Wittkop, 2019). Der Trend zur zunehmenden Verwendung von Bandagen und Orthesen wird aufgrund der Bevölkerungsentwicklung und der vielfältigen Anwendungsgebiete im Sportbereich in Zukunft anhalten. Für die Behandlung der Vielzahl von Beschwerden und Krankheitsbildern werden zudem anwendungsspezifische orthopädische Hilfsmittel benötigt.

Im Oktober 2019 stellt die Freie Demokratische Partei (FDP) eine Anfrage bezüglich der Position der Bundesregierung zur additiven Fertigung, insbesondere