

Produktentwicklung für den Einsatz von Rapid Manufacturing bei der Entwicklung von hydraulischen Spannbuchsen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Brökel

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik, Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Institut für Maschinenkonstruktion, Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Verteidigt am 08.06.2020

vorgelegt von

Normann Koldrack, geb. am 05.11.1984 in Rostock

aus Rostock

Rostock, den 05.11.2019



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.

i

„+hm8jköääöföü0k8<uijk,6nj m89μ,kY i
BN NNNNNUB M6TT BBBB67 MMGJMNNNNNNNU8OPI0FT
78889mzpm hjkm hxö.l7ui9u0jkü #####5T“

Theo Koldrack (5 Monate)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	2
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Forschung und Grundlagen	5
2.1	Systematik der kraftschlüssigen Verbindungen	5
2.1.1	Hydraulisch wirkende Spannbuchsen	6
2.1.2	Patente und auf dem Markt erhältliche Bauformen	8
2.2	Generative Fertigungsverfahren	10
2.2.1	Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren	11
2.2.2	Austauschformate der Daten	13
2.2.3	Potenziale und Einsatzgebiete	14
2.2.4	Herausforderungen, Grenzen und Entwicklungsziele	15
2.2.5	Das Schmelzschichtverfahren	17
2.3	Relevante Werkstoffe und deren Eigenschaften für das Schmelzschichtverfahren	20
2.3.1	Theorie der Kunststoffe	20
2.3.2	Relevante Kunststoffe für das Schmelzschichtverfahren	21
2.3.3	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)	21
2.3.4	Chemische Widerstandsfähigkeit und Lösungsmittel	23
2.3.5	Nachbearbeitung der Materialoberfläche von 3D-gedruckten Bauteilen	26
2.3.6	Verfahren für die Nachbearbeitung der Materialoberfläche von ABS	27
2.3.7	Metallische, keramische und andere Werkstoffe	29
3	Überblick zur Modellierung von Reibkontakten	30
3.1	Einführung in die Reibungsvorgänge	30
3.2	Klassische Reibungsgesetze	33
3.3	Bedeutung der räumlichen Dimension bei Kontaktproblemen	34
3.4	Auswahl einer geeigneten Simulationsmethode	36
3.5	Modellierung des Kontaktes in ANSYS	36
4	Materialkennwerte und deren Bestimmung	40
4.1	Bestimmung von Materialkennwerten und deren Normung	40
4.1.1	Probenkörpergeometrie und Vorgehen	41

4.1.2	Materialkennwerte parallel zur Druckrichtung	48
4.1.3	Bestimmung und Reduzierung der Gestaltabweichungen der Oberflächen	49
4.1.4	Materialkennwerte senkrecht zur Druckrichtung	55
4.2	Untersuchungen zur Maßhaltigkeit ringförmig gedruckter Bauteile . .	56
4.3	Untersuchungen zur Haftreibung	60
4.4	Zusammenfassung der Materialkennwerte	63
5	Numerische Modellierung und Simulation des Kontaktes	64
5.1	Modellierung und Simulation	64
5.1.1	Geometrieerzeugung in CATIA V5	64
5.1.2	Modellierung und numerische Simulation mit ANSYS	66
5.2	Untersuchte Parameter	76
5.3	Auswertung und Ergebnisse	77
6	Entwicklung von funktionsfähigen Prototypen mittels 3D-Druck	82
6.1	Anforderungen an einen Prototypen	82
6.2	Ablauf der Entwicklung	84
6.3	Füllmedium, Ventil, Gewindeeinsätze	85
6.4	Fertigung der Prototypen	86
7	Experimentelle Untersuchungen an Prototypen	87
7.1	Entwicklung und Aufbau des Prüfstandes für die Momentenmessung	87
7.2	Messdatenerfassung, -auswertung und Prüfstandsteuerung	90
7.3	Messergebnisse	94
7.3.1	Übertragbares Moment	94
7.3.2	Statische Dichtigkeitstests der Baugruppe	96
7.3.3	Zeitschwingfestigkeit und Dichtigkeit im Einsatz	97
7.3.4	Berstdruck im verbauten Zustand	100
7.4	Vergleich von Berechnung und Messung	101
8	Ausblick und Zusammenfassung	103
8.1	Ausblick	103
8.2	Zusammenfassung	105
A	Anhang	123
A.1	Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten	123
A.2	Eigene Veröffentlichungen	124
A.3	Weitere Veröffentlichungen des Lehrstuhls	124
A.4	Anhang der Kapitel	126

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110 im Vergleich zur hydraulischen Spannbuchse ETP-Express	2
2.1	Einteilung der wichtigsten reibschlüssigen Verbindungen	6
2.2	Wirkprinzip einer hydraulischen Spannbuchse	7
2.3	Nutzwert des pulverbettbasierten 3D-Druckens, der Zerspanung und des Spritzgießens, bezogen auf den Wettbewerbsfaktor Zeit und Kosten, bei der Fertigung unterschiedlicher Stückzahl	11
2.3a	Nutzwert für den Wettbewerbsfaktor Kosten	11
2.3b	Nutzwert für den Wettbewerbsfaktor Zeit	11
2.4	Datenfluss und Datenvorbereitung bei der additiven Fertigung	13
2.5	Schematische Darstellung des Materialflusses beim FDM-Prozess	18
2.5a	Schematische Darstellung des Extrusionskopfes und der Materialpositionierung	18
2.5b	Bindungsbildungsprozess zwischen den Filamenten beim FDM	18
2.6	Zweidimensionale Projektionen verschiedenartiger Polymere	21
2.7	Strukturformel von Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)	22
2.8	ABS-Zusammensetzungen und ihre Eigenschaften	23
2.9	Allgemeine Struktur eines Ketons und des Acetons	25
2.10	Schematische Darstellung der Fehlstellen eines 3D-gedruckten Bauteils	27
2.11	Andruck und Welligkeit beim Extrusionsverfahren	27
3.1	Reibungsmechanismen bei mikroskopischer Betrachtungsweise	32
3.2	Auswahl von Modellen der Furchungskomponente der Reibung	33
3.2a	Teilchenfurchung	33
3.2b	Gegenkörperfurchung	33
3.3	Klassische Idealisierung der Reibung	34
3.4	Modelle zur Simulation des dreidimensionalen Kontaktproblems	35
3.5	Asymmetrische Ziel- und Kontaktflächendefinition in ANSYS	37
3.6	Nichtlinearer Festkörperkontakt der <i>Pure Penalty</i> und <i>Augmented Lagrange</i> Formulierung	38
4.1	Prüfkörper 1A nach ISO 527-2	41
4.2	Ebenen und Bauteilausrichtung im 3D-Raum	42
4.3	Schematischer Aufbau eines ISO 527 Prüfkörpers 1A als 3D-Druck	43
4.4	Strangmuster im Zugstab Typ 1A in Abhängigkeit des Füllmusters	44

4.5	Prüfkörper A und B nach DIN EN ISO 527-5	45
4.6	Aufbau eines 3D-gedruckten Prüfkörpers vom Typ A_{3D}	46
4.7	Prüfumfang der Zugproben und Oberflächenmessungen	47
4.8	Zugfestigkeit von ABS in Abhängigkeit von der Immersionszeit in Aceton	48
4.9	Zugfestigkeit von ABS in Abhängigkeit von der Trocknungszeit	48
4.10	Ordnung der Gestaltabweichungen	50
4.11	Detailaufnahme der Oberfläche eines Probekörpers ohne chemische Behandlung	51
4.12	Einzelstreckenmessung aus einem Bereich der Abbildung 4.11	51
4.13	Mehrschichtaufnahme des Kontaktbereiches von zwei Druckbahnen einer unbehandelten Probe	52
4.14	Übersicht über die Profile bei der Messung der Oberflächenbeschaffenheit	53
4.15	Übertragungsbänder der Filterung von Welligkeit, Rauheit und Form	54
4.16	Welligkeit von ABS in Abhängigkeit von der Immersionszeit in Aceton	55
4.17	Verwendete Probengeometrie und Maße	57
	4.17a Verwendete Probengeometrie	57
	4.17b Probennummern und korrespondierende Durchmesser	57
4.18	Vergleich der Außendurchmesser zwischen Sollwert, Istwert nach dem Drucken und Istwert nach der chemischen Behandlung	58
4.19	Vergleich der Innendurchmesser zwischen Sollwert, Istwert nach dem Drucken und Istwert nach der chemischen Behandlung	59
4.20	Durchmesseränderung vom Solldurchmesser zu den gedruckten Proben, den gedruckten zu den behandelten Proben und dem Solldurchmesser zu den behandelten Proben	59
4.21	Prüfaufbau zur Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten	61
4.22	Ergebnis der Untersuchungen zum Haftreibungskoeffizienten	62
5.1	Beispiel einer ein- bzw. mehrstufigen Modellierungschronologie	65
5.2	Schematische Darstellung der IPO-Struktur eines CAD-Modells	66
5.3	Schnitt durch das ANSYS-Modell in der XZ-Ebene und Koordinatensystem des Modells	69
5.4	Konvergenzverlauf der Last- und Teillastschritte für das verwendete Modell	71
5.5	Ablauf des Newton-Raphson-Verfahrens	72
5.6	FE-Netz von Welle, Nabe und Buchse	73
5.7	Approximation eines Kreises durch ein regelmäßiges n-Eck	74
5.8	Geometrie der Elemente SOLID186 und SOLID187	74
5.9	Konvergenzanalyse des verwendeten Modells	75
5.10	Einfluss von Reibungskoeffizient und Spaltbreite	78
5.11	Einfluss von Reibungskoeffizient und Spanndruck	79

5.12	Einfluss von Spaltbreite und Spanndruck	80
5.13	Auswirkung von Reibungskoeffizient, Spanndruck und Spaltgröße auf das übertragene Moment	81
6.1	Auswahl einiger Prototypen	85
7.1	Übersicht über den Prüfstandaufbau	89
7.2	Detailansichten des Prüfstands	90
7.3	Bedienoberfläche des Prüfstands in Labview	91
7.4	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 0,5 MPa	95
7.5	Übertragbares Moment in Abhängigkeit vom Spanndruck der Buch- se, gemessen am Prüfstand	95
7.6	Standardabweichung vom Sollmoment im Messbereich	96
7.7	Wellen- und Nabensegment für statische Versuche	97
7.8	Verlauf der Untersuchung der Zeitfestigkeit mit (20 ± 10) N m	99
7.9	Druckverlust der Befüllungszyklen des Versuches zur Zeitfestigkeit	99
7.10	Berstversuch an Buchse 3.10.11	100
	7.10a Defekt am Einlass der Buchse	100
	7.10b Spanndruck beim Bersten der Buchse	100
7.11	Vergleich von Simulation und Versuch bei konstanter Spaltbreite	101
8.1	3D-gedruckte hydraulische Spannbuchse aus Metall, unbearbeitet	103
A.1	Aufnahme der Oberfläche eines Probekörpers nach 30 Sekunden Ace- tonbehandlung	127
A.2	Oberflächenaufnahme eines Reibklotzes	128
A.3	Schnitt durch das Geometriemodell für die FE-Untersuchung	129
A.4	Gerenderte Darstellung der Buchse 3.9.x	130
A.5	Foto der Buchse 3.9.12 mit Gewindeinserts	130
A.6	Übersicht über den Prüfstandaufbau vor der Umrüstung	131
A.7	Detailansichten des Prüfstands vor der Umrüstung	132
A.8	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 0,75 MPa	133
A.9	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,0 MPa	133
A.10	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,25 MPa	134
A.11	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,5 MPa	134
A.12	Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,6 MPa	135
A.13	Oberflächenaufnahme der Welle als Negativ in Silikon	136

Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit festem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials	12
2.2	Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials	12
2.3	Optische Bewertung 3D-gedruckter ABS Bauteile bei unterschiedlichen Lösungsmitteln und Immersionszeiten	25
4.1	Maße der Probekörper nach ISO 527 für die Proben Typ A, B und 1A sowie die angepassten Maße Typ A_{3D} und B_{3D}	45
4.2	Zugfestigkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Trocknungszeit nach einer Immersionszeit von 30 Sekunden in Aceton	48
4.3	Welligkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Immersionszeit in Aceton	54
4.4	Messwerte der Oberflächenuntersuchung der Reibkörper	61
4.5	Ergebnis der Untersuchungen zum Haftreibungskoeffizienten	62
4.6	Materialparameter von ABS-P430 ₃₀	63
5.1	Erweiterte Materialparameter von ABS-P430 ₃₀ für das Materialmodell in ANSYS	68
5.2	Koeffizienten der Gleichung 5.7 mit dem asymptotischen Standardfehler σ und der Anpassungsgüte χ^2_{κ}/κ	77
5.3	Korrelationsmatrix der Koeffizienten für $f(\mu, t)_{\mu^2}$	78
6.2	Anforderungsliste an eine Prototypenspannbuchse	83
A.1	Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110 im Vergleich zur ETP-Express	126

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AM	Additive Manufacturing
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
CEM	Composite Extrusion Modeling
CIM	Ceramic Injection Molding
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETP	ETP Transmissions AB
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Elemente Methode
FU	Frequenzumrichter
HP	Hewlett Packard
IPO	input–process–output
ISO	International Organization for Standardization
KEE	Krafteinleitungselement
LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition
LW	Lastwechselzahl
MIM	Metal Injection Moulding
MPC	Multi-Point Constraint
Ra	arithmetischer Mittenrauwert
RP	Rapid Prototyping
Rz	gemittelte Rautiefe
STL	Standard Triangulation/Tesselation Language

Symbolverzeichnis

D	Außendurchmesser	mm
d	Innendurchmesser	mm
E	E-Modul	N mm^{-2}
F	Kraft	N
G	Schubmodul	N mm^{-2}
k	Kontaktsteifigkeit	N mm^{-3}
m	Moment	Nm
p	Spanndruck	MPa
Ra	Mittenrauwert	μm
Rz	gemittelte Rautiefe	μm
r	Radius	mm
T	Temperatur	K
t	Spaltbreite	mm
v	Relativgeschwindigkeit	m s^{-1}
W_t	Welligkeit	μm
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	K
β, γ, Θ	Winkel	°
κ	Anzahl Freiheitsgrade	-
λ	Term der Gleichung des <i>Augmented Lagrange</i> -Verfahrens	-
λ_c	Grenzwellenlänge	μm
μ	Haftreibungskoeffizient	-
ν	Querkontraktionszahl	-
σ	Standardfehler	-
χ^2	Anpassungsgüte	-

Kapitel 1

Einleitung

Die Verbindung von Welle und Nabe zur Übertragung von Kräften und Momenten ist eine der grundlegenden Herausforderungen des Maschinenbaus, ohne die keine komplexe Maschine denkbar ist. Für diese Verbindung wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Lösungen gefunden.

Alle diese Lösungen kann man nach der Art der Kraftübertragung in die Kategorien stoff-, form-, kraft- sowie vorgespannt formschlüssig gliedern. Kraftschlüssige Verbindungen entstehen durch die Anwendung von Kräften, wie zum Beispiel Druckkräfte, Reibungskräfte oder Magnetismus.

Besonders interessant sind hier Verbindungselemente, bei denen die Kraftaufbringung nach dem Prinzip der Hydrostatik wirkt. Diese zeichnen sich durch ihre einfache Handhabung und die geringe notwendige Bearbeitung von Welle und Nabe aus. Weiterhin sind Welle-Nabe-Verbindungen mit dem Wirkprinzip der Hydrostatik die einzigen, die zuverlässig die Drehachsen zentrieren.

Die steigenden Anforderungen in zahlreichen technischen Anwendungen, z.B. durch die zunehmende Automatisierung, die Digitalisierung der industriellen Produktion (Industrie 4.0) und den konsequenten Einsatz von Leichtbauprinzipien machen es erforderlich, auch altbewährte und standardisierte Maschinenelemente hinsichtlich der erweiterten Anforderungen zu überdenken.

Durch den Einsatz neuer Technologien bei der Fertigung, wie dem 3D-Druck, sind heutzutage Lösungen denkbar, die noch vor wenigen Jahren als nicht realisierbar eingestuft wurden. Jedoch erfordert dies häufig ein Umdenken bereits während des Konstruktionsprozesses. Es müssen nicht nur die Vorteile durch den gestiegenen Freiheitsgrad bei der Konstruktion betrachtet werden, sondern es muss auch auf die Nachteile dieser Technologie eingegangen werden.

1.1 Problemstellung und Motivation

Hydraulische Spannbuchsen sind seit vielen Jahren als standardisiertes Maschinenelement auf dem Markt zu finden. Der einzige Anbieter für Spannbuchsen, die rein auf dem hydrostatischen Prinzip basieren, ist die Firma ETP Transmissions AB (ETP) mit dem Firmensitz in Schweden. Deren Produkte werden ausschließlich aus Stahl gefertigt und erfordern geringe Toleranzen und eine hohe Oberflächenqualität an den Wirkflächen. Die hierfür nötigen Bearbeitungsschritte sind aufwändig und führen im Vergleich zu mechanisch spannenden Buchsen zu höheren Fertigungskosten. Allerdings werden die hydraulischen Spannbuchsen vor allem in Bereichen eingesetzt, in denen häufige Montagen zu erwarten sind. Hierzu gehören beispielsweise Bandförderanlagen, wie sie häufig in produzierenden Unternehmen zu finden sind. Für die Reinigung oder zu Änderungen in der Produktion müssen die Buchsen oft montiert und demontiert werden.

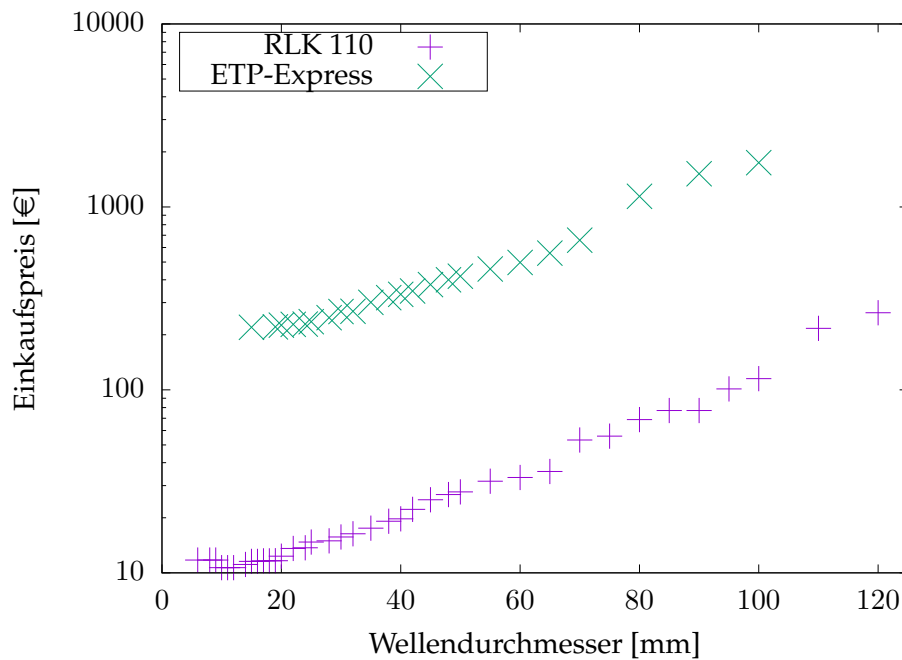


ABBILDUNG 1.1: Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110 im Vergleich zur hydraulischen Spannbuchse ETP-Express.
Werte im Anhang A.4 [118, 119, 146]

In Abbildung 1.1 sind exemplarisch die Einkaufskosten von typischen Konus-Spannelementen und hydraulischen Spannbuchsen in Abhängigkeit vom Wellendurchmesser dargestellt. Die sehr hohen Einkaufskosten der hydraulischen Spannbuchse im Vergleich zu anderen Spannelementen und die fehlenden Alternativen zu hydraulischen Spannbuchsen zeigen, dass eine Weiterentwicklung in diesem Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen erforderlich ist.

Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist der Einsatz innovativer Fertigungstechniken wie zum Beispiel dem 3D-Druck. Mit dem Ablauf des Patentes US5121329 A zum Prozess des Fused Deposition Modeling (FDM) im Jahr 2009 stieg die Anzahl der

auf dem Markt verfügbaren FDM-Drucker stark. Der Preis dieser Drucker sank mit dem Auftritt von Firmen wie MakerBot und Ultimaker auf dem Markt von über 10 000 € auf unter 300 €. [98]

Die Entwicklungen in den Jahren nach 2009 fokussierten sich besonders auf 3D-Drucker mit flüssigem, pulverförmigem und metallischem Druckmaterial. Besonders zu nennen ist hier die Vorstellung des 3D-Druckers HP Metal Jet der Firma Hewlett Packard (HP) im September 2018. HP gibt eine im Vergleich zum Lasersintern und anderen Binder-Jetting-Systemen um 50-fach höhere Produktivität an. Der Preis der Drucker, der ab 2020 an Pilotkunden ausgeliefert werden soll, wird voraussichtlich bei 400 000 € liegen [91]. Einer dieser Kunden wird die Volkswagen AG sein, welche ebenfalls im September 2018 eine Kooperation mit HP zur Weiterentwicklung dieser Technologie angekündigt hat. Das Ziel ist, die 3D-Drucktechnik auch für die Serienfertigung einzusetzen. [190]

Bisher ist die überwiegende Anwendung aller mittels 3D-Druck hergestellten Bauteile im Bereich der Prototypenherstellung und bei Designelementen zu finden. Das Potenzial dieser neuen Technologie kann und sollte auch für die Serienfertigung verwendet werden. Der 3D-Druck, der zu den additiven Fertigungsverfahren gehört, zählt zu den ressourcenschonenden Fertigungsverfahren, da es keinen oder nur geringen Materialüberschuss gibt - in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren und im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren. In einigen Fällen ist es auch möglich, den Überschuss aufzubereiten. Zudem ergeben sich Ressourceneinsparpotenziale bei der Nutzung der gefertigten Teile. Beispielsweise beim Kraftstoff durch Gewichtsreduktionen mit 3D-Bauteilen oder durch Ersatzteile, die nicht transportiert, sondern vor Ort gedruckt werden. Ein weiterer Vorteil ist der erhöhte Freiheitsgrad bei der Gestaltung der Konstruktion. Unter anderem ist es bei einigen Verfahren möglich, Hinterschneidungen, Überhänge und Hohlstellen in einem Fertigungsschritt zu erzeugen. [77, 83, 200]

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das bestehende Konzept der hydraulischen Spannbuchse mit einem additiven Fertigungsverfahren umzusetzen und so gefertigte Bauteile auf deren Funktionsweise zu überprüfen.

Um dies zu erreichen, soll überprüft werden, ob es mit additiven Fertigungsverfahren möglich ist, druckdichte Bauteile herzustellen. Hierbei wird besonders die 3D-Schmelzsichtung betrachtet. Es muss auf die inhomogene Materialqualität und Fehlstellen bei diesem 3D-Druck-Verfahren eingegangen werden und es müssen Wege aufgezeigt werden, diese Nachteile zu überwinden. Die fertigungstechnischen Anforderungen für die Herstellung von hydraulischen Spannbuchsen stehen dabei im Focus.

Es wird eine Patentanmeldung zu der Erfindung *3D-gedruckte hydraulische Spannbuchse* angestrebt, für die eine Recherche zur Patentlage erforderlich ist.

Die durchgeführten Untersuchungen bewegen sich sowohl auf dem Gebiet der Ingenieurwissenschaften, als auch auf dem der Polymerchemie. Hierfür werden in Kapitel 2 der Stand der Forschung und die Grundlagen gezeigt.

Um das Potenzial 3D-gedruckter hydraulischer Spannbuchsen hinsichtlich des übertragbaren Momentes abzuschätzen, muss auf die Problematik des Reibkontaktes eingegangen werden. Hierfür soll ein Überblick über die Modellierung von Reibkontakten gegeben (Kapitel 3) und ein Finite-Elemente-Modell erstellt werden (Kapitel 5).

Um die theoretischen Betrachtungen und Annahmen zu unterstützen und zu validieren, müssen Materialkennwerte bestimmt (Kapitel 4), Prototypen gefertigt (Kapitel 6) und Versuche an diesen vorgenommen werden (Kapitel 7). Um Materialkennwerte bestimmen zu können, muss besonders die Geometrie der Proben und die Ausrichtung im Druckraum beachtet werden, da eine ausstehende Normung hier zu differierenden Ergebnissen bei wissenschaftlichen Untersuchungen führt. Es müssen Methoden gefunden werden, die die Anisotropie 3D-gedruckter Bauteile verringern und damit die Homogenisierung der Materialeigenschaften erreichen. Hierzu kommen fehlende Kenntnisse über Problematiken wie Toleranzen und Oberflächenqualitäten durch den Einsatz dieser Methoden.

Kapitel 2

Stand der Forschung und Grundlagen

2.1 Systematik der kraftschlüssigen Verbindungen

Die vielfältigen Verbindungen zwischen Wellen und Achsen mit Naben von zum Beispiel Zahnrädern, Rollen und Hebeln, welche als Welle-Nabe-Verbindungen bezeichnet werden, können, je nach Art der Kraftübertragung, nach vier Wirkprinzipien eingeteilt werden [81, 145, 199]:

1. Stoffschlüssige Verbindungen, bei denen die Verbindungspartner mit atomaren und/oder molekularen Kräften zusammengehalten werden. Dies erfolgt z.B. durch Schweißen, Kleben oder Löten. Das Lösen dieser Verbindung ist zumeist nur durch Zerstörung möglich.
2. Formschlüssige Verbindungen, bei denen die Verbindung durch das Ineingreifen von Konturen der Verbindungselemente entsteht. Diese können durch eine bestimmte Formgebung (z.B. Polygonprofil, Kerbverzahnung, Keilwellenprofil) oder durch zusätzliche Elemente (z.B. Passfeder, Querstift oder Keile) ermöglicht werden.
3. Kraftschlüssige Verbindungen, bei denen die Kraftübertragung durch die Anwendung von zusätzlichen Kräften erfolgt. Zumeist erfolgt dies entsprechend dem Coulombschen Gesetz durch den Reibschluss. Hierzu gehören zum Beispiel der Kegelpressverband, Sternscheiben und hydraulische Spannbuchsen. Andere Kräfte, wie zum Beispiel magnetische oder strömungstechnische, sind ebenfalls möglich.
4. Vorgespannte formschlüssige Verbindungen sind eine Kombination aus Reib- und Formschlussverbindungen. Hierzu zählen hauptsächlich Verbindungen durch Keile.

Neben der Einteilung nach Wirkprinzipien kann weiterhin eine Einteilung nach der Art des Fügens und der Geometrie der Verbindung erfolgen. Exemplarisch für die Verbindungen mit Reibschluss ist dies in Abbildung 2.1 dargestellt. Von den aufgeführten kraftschlüssigen Verbindungen ist die hydraulische Spannbuchse die neuste Entwicklung, stellt aber besondere Anforderungen an die Fertigung. Aus diesem Grund wird sie im Folgenden näher betrachtet.

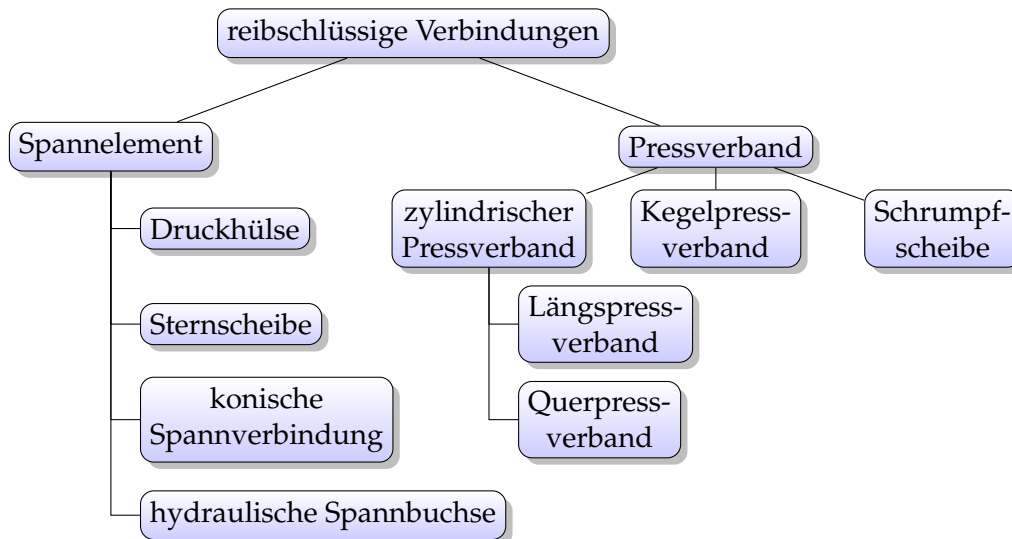


ABBILDUNG 2.1: Einteilung der wichtigsten reibschlüssigen Verbindungen nach Art des Fügens und der Geometrie der Verbindung

2.1.1 Hydraulisch wirkende Spannbuchsen

Hydraulisch wirkende Spannbuchsen gehören zu den Reibschlussverbindungen. Diese besitzen zylindrische oder kegliche Wirkflächen und werden hauptsächlich als Welle-Nabe-Verbindung zur Drehmomentenübertragung eingesetzt. Weiterhin ist es möglich, Axialkräfte zu übertragen. [81]

Reibschlussverbindungen werden vor allem dann eingesetzt, wenn es erforderlich ist, die Welle-Nabe-Paarung häufig zu lösen.

Neben der hauptsächlich verwendeten Bezeichnung *hydraulische Spannbuchse* sind in der Literatur auch Begriffe wie *hydraulische Hohlspannbuchse*, *hydraulische Hohlmantelspannhülse*, *hydrostatische Spannhülse*, *doppelwandige Spannbuchse* sowie verschiedene Kombinationen dieser Begriffe gebräuchlich. Unabhängig von der Bezeichnung basieren diese auf dem gleichen Funktionsprinzip, welches im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Die Funktionsweise und Kriterien zur Auswahl

Hydraulische Spannbuchsen basieren auf dem Pascal'schen Gesetz. Dieses Gesetz der allseitigen Druckausbreitung besagt, dass der hydrostatische Druck einer Flüssigkeit an jedem Punkt, in jede Raumrichtung, gleich stark ist. Die Buchse besteht aus einem doppelwandigen, mit Fluid gefüllten Hohlzylinder. Wird der Druck des Fluids erhöht, wirkt dieser gleichmäßig auf die Wände des Hohlzylinders. Wenn nun die hydraulische Spannbuchse zwischen Welle und Nabe positioniert wird, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, können sich die Mantelflächen verformen, bis sie mit der Welle respektive der Nabe in Kontakt treten. Ist dies erfolgt, bildet sich eine gleichmäßige Flächenpressung aus und ermöglicht den Reibschluss.

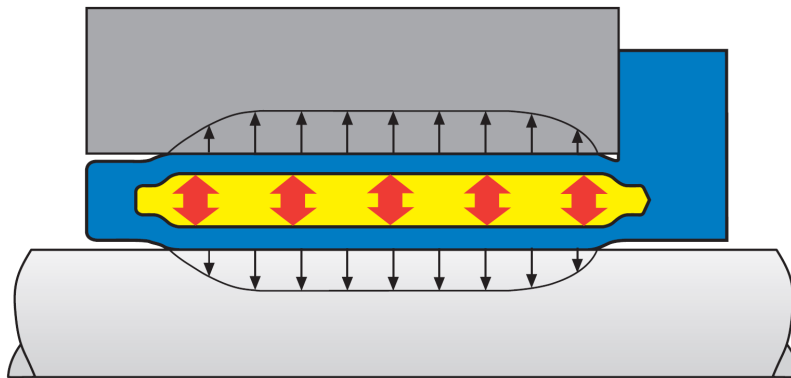


ABBILDUNG 2.2: Wirkprinzip einer hydraulischen Spannbuchse [59]

Auf dem Markt erhältliche Ausführungen zeichnen sich besonders im Bereich der Montage/Demontage gegenüber anderen reibschlüssigen Lösungen aus. Sie sind ohne Spezialwerkzeug zu verwenden und benötigen dabei ein geringes Anzugmoment. [59, 146, 153]

Bei der Demontage sind keine zusätzlichen Abdruckvorrichtungen, Demontageschrauben oder Umbauten notwendig. Eine genaue Justierung bei der Montage ist möglich, da keine axiale Bewegung beim Spannen auftritt. Die Expansion der Buchse erfolgt lediglich in radialer Richtung. Dies ermöglicht, die Buchse leicht und schnell sowie mehrfach auszurichten. Da der Einbau in jeder Winkelstellung möglich ist, ist eine gute Zugänglichkeit auch bei engen Einbauverhältnissen gegeben. Dies wird auch dadurch erreicht, dass die Spannvorrichtung axial oder radial angeordnet wird.

Wie die meisten kraftschlüssigen Verbindungen zeichnen sich die hydraulischen Spannbuchsen dadurch aus, dass an den zu fügenden Bauteilen keine Nachbearbeitungen erfolgen, wie sie z.B. bei Passfedern oder Stiftverbindungen notwendig sind. Hierdurch treten keine Bereiche mit Spannungskonzentrationen auf, was zu kostengünstigeren Maschinenelementen, die höhere Lasten bei reduzierten Materialkosten übertragen können, führt.

Die Bauform der hydraulischen Spannbuchsen ist im Vergleich zu anderen Welle-Naben-Verbindungen einfach. Dies ermöglicht eine kleine Bauform, was zu einer Verringerung der Masse des Gesamtsystems beiträgt. Ihr Einsatz erfordert keine besondere Bearbeitung der Welle und Nabe, die über die üblichen Passungen hinaus erfolgt. [59]

Das Fehlen von Nuten und anderen Querschnittsschwächungen ermöglicht eine Konstruktion frei von Überdimensionierungen. Dies und das Einsparen von Verbindungs- und Sicherungselementen verringert die Fertigungskosten der umgebenden Bauteile. Die Flächenpressung von üblichen hydraulischen Welle-Nabe-Verbindungen überschreitet selten 80 N/mm^2 . Damit ist eine große Anzahl von Materialien und Konstruktionen für die umgebenden Bauteile möglich. Die Gleichmäßigkeit der Flächenpressung aufgrund des hydraulischen Prinzips ermöglicht

eine gute Übertragung von Momenten und Kräften. [59, 153]

Aufgrund der Selbstzentrierung und des weitgehenden Fehlens von mechanischen Bauteilen stellt sich eine gute Rundlaufgenauigkeit ein, was zu einer Minimierung von möglichen Vibrationen aufgrund von Unwucht führt.

Bezüglich der Haltbarkeit und Zuverlässigkeit kann festgehalten werden, dass keine Spannungsüberhöhungen durch Kerbwirkung auftreten. Bei ausreichendem Spannen der Verbindung, was zu einem Fehlen von Mikrobewegungen führt, tritt kein Reib- und Passungsrost auf [113]. Wenn ein chemisch inertes Druckmedium gewählt wird, welches keine Reaktion mit dem umgebenden Material zeigt, sind keine chemischen Alterungsvorgänge zu erwarten.

2.1.2 Patente und auf dem Markt erhältliche Bauformen

Patente

Mittels der Patentrecherche soll im Folgenden geklärt werden, wie weit Fertigungsverfahren und Materialwahl in den Patenten im Umfeld der hydraulischen Spannbuchse betrachtet wurden. Die Ergebnisse sollen genutzt werden, um ein eigenes Patent anzumelden.

Patentrecherchen zum Thema: „hydraulische Spannelemente“ wurden unabhängig voneinander in [153] und [137] durchgeführt.

[153] hat für die Jahre 1974-1994 die Datenbanken der Deutschen Demokratischen Republik (Patentkürzel DD), der Bundesrepublik Deutschland (DE) und Europäische Patente (WO) durchsucht und folgende relevante Patente ermittelt:

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. DE 3116289 [150] | 6. DE 3820513 [86] |
| 2. DE 3909630 [143] | 7. DE 3543672 [34] |
| 3. WO 93/10928 [156] | 8. DE 4409603 [123] |
| 4. DE 3931138 [136] | 9. DE 3148676 [67] |
| 5. DD 270569 [160] | 10. DE 3816173 [79] |

[137] verwendete neben der Datenbank des *Deutschen Patent- und Markenamtes* zusätzlich die Datenbanken von *Scopus* und *Google Scholar*. Neben vier weiteren Patenten konnte auch ein Gebrauchsmuster (G) ermittelt werden:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 11. SE 518401 [117] | 14. SE 504380 [33] |
| 12. WO 98/46896 [151] | 15. G 9420239 [125] |
| 13. SE 9600076 [90] | |

Eigene Recherchen führten zu Patent (16) DE 2639320 [133] aus dem Jahr 1978, welches das älteste darstellt. Die aufgeführten Patente können zunächst zwei Gruppen zugeordnet werden. Zum einen handelt es sich um Patente zum hydraulischen Spannen von Werkzeugen und Werkstücken. Hierzu gehören die Patente 1, 2, 3, 6,

8 und 14. Zum anderen bezieht sich eine Gruppe von Patenten direkt auf das Spannen von Wellen und Naben. Hierzu gehören folgende Patente und ein Gebrauchsmuster: 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15 und 16. Die beiden Gruppen werden grundsätzlich dadurch unterschieden, dass für das hydraulische Spannen von Werkzeugen und Werkstücken lediglich eine Kontaktfläche betrachtet wird, während bei Welle-Naben-Verbindungen zwei Kontaktflächen vorliegen. Patente zum hydraulischen Spannen von Werkzeugen und Werkstücken werden im Folgenden nicht betrachtet, da ein Spannelement für Welle-Naben-Verbindungen entwickelt werden soll.

Hinsichtlich der Fertigung werden in Patent 16 lediglich Verfahren mit der Kombination Fügen durch Umformen mit stoffschlüssigen Verbindungstechniken genannt. In den Patentansprüchen 1 und 2 wird beschrieben, dass die Rohrabschnitte u-förmig gebördelt und unmittelbar miteinander verschweißt, verklebt oder verlötet werden können. Zum Material wird in der Beschreibung folgendes genannt [133]:

„Es hat sich im Rahmen der Erfindung als zweckmäßig erwiesen, daß [sic] das Außen- und Innenrohr aus schweißbarem, elastischen Stahl und der Druckzylinder aus Armaturenwerkstoff bestehen. Ebenso ist vorteilhaft, wenn der Spannbuchsenkörper aus Spritzguß [sic] oder geeignetem Kunststoff besteht.“

In Patent 4 wird eine Spannhülse aus Titan oder einer Titanlegierung mit einer zusätzlichen harten Schicht (z.B. kristallinem Bornitrid) an den Kontaktflächen beansprucht. Über die Herstellung wird keine Angabe getätigt. [136]

Patent 5 nennt lediglich, dass die nabenseitige und wellenseitige Buchse stoffschlüssig miteinander verbunden werden, um einen hermetisch dichten Ausdehnungsraum zu erzeugen. [160]

In den anderen Patenten wird keine Angabe zur Herstellung oder den Werkstoffen gemacht.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Patent unter der Nummer DE 102018123980 angemeldet. Aufgrund der patentrechtlichen Situation können zum Inhalt und Vorgang zum jetzigen Stand an dieser Stelle keine weiteren Angaben gemacht werden.

Auf dem Markt erhältliche Bauformen

Es ist einzig die Firma ETP bekannt, welche Welle-Nabe-Verbindungen herstellt, die rein hydraulisch wirken. Darüber hinaus sind hydraulisch/mechanisch kombinierte Lösungen auf dem Markt erhältlich. Bei diesen wird hydraulisch ein Klemmelement verschoben, welches Welle und Nabe miteinander verspannt. Auf diese Ausführung wird aufgrund der in Abschnitt 2.1.1 genannten Vorzüge der rein hydraulischen Lösung nicht weiter eingegangen.

Die ETP-Produktpalette umfasst hydraulische Welle-Nabe-Verbindungen, welche mit einer einzigen Schraube und mit Mehrfachverschraubung montiert werden. Zu den Elementen mit einer Schraube für die Montage gehören die *ETP-EXPRESS*,

ETP-EXPRESS R, *ETP-TECHNO* und *ETP-POWER*. Verbindungselemente mit Mehrfachverschraubung in der Produktpalette sind *ETP-MINI*, *ETP-CLASSIC* und *ETP-CLASSIC R*. *ETP-TECHNO* wird bei Ansprüchen an einen besonders guten Rundlauf und eine oftmalige Montage eingesetzt, *ETP-POWER* bei hohen radialen Belastungen. Die *ETP-EXPRESS* platziert sich zwischen diesen Anforderungen. *ETP-MINI* werden für kleine Wellendurchmesser von 6 mm bis 14 mm gefertigt. *ETP-CLASSIC* ist laut Hersteller für Einsatzfelder mittlerer Anforderung an die Montagezeit vorgesehen und ist das historisch erste Produkt der Firma ETP dieser Art der Welle-Naben-Verbindungen. Alle R-Ausführungen werden aus Edelstahl (1.4305, X10CrNiS18-9) gefertigt. [59]

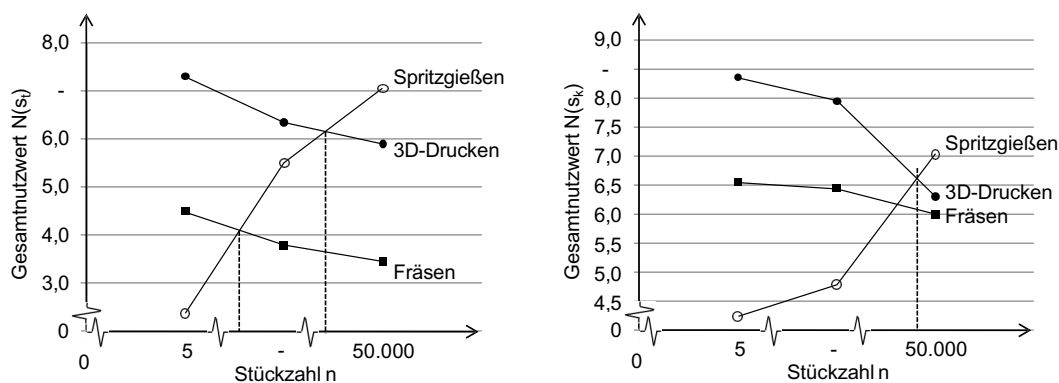
Als Vergleichsprodukt wird sich in den Abschnitten 4.2 und 6.1 dieser Arbeit auf die *ETP-EXPRESS R* bezogen. Die *ETP-EXPRESS* Produktreihe ist die meistverkaufte mit 20000 Exemplaren pro Jahr und gehört zur Standardlinie [69].

2.2 Generative Fertigungsverfahren

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen die gezielte Erstellung von Produkten durch eine schichtweise Anordnung von Ausgangsmaterialien. Das Verfahren wird auch als additives Fertigungsverfahren und der dazugehörige Prozess als *Additive Manufacturing (AM)* bezeichnet.

Der Aufbau erfolgt hierbei computergesteuert und erlaubt den Einsatz von einem oder mehreren Werkstoffen, weitgehend unabhängig von der Komplexität bzw. Geometrie. Aufgrund der schichtweisen Generierung, die werkzeuglos erfolgt, ist es unerheblich, wie viele Bauteile in einem Bauraum gefertigt werden. Diese Bauteile können sowohl unterschiedlich, als auch identisch sein. Die Vorteile der Fertigungsart wurden in [101] am Beispiel des pulverbettbasierten 3D-Druckens untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind Nutzwertanalysen, bezogen auf verschiedene Wettbewerbsfaktoren. Für die Faktoren Zeit und Kosten sind diese in Abbildung 2.3 dargestellt.

Ein Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass es bei Stückzahlen von bis zu 500 sinnvoll ist, das pulverbettbasierte 3D-Drucken einzusetzen. Gründe hierfür sind, dass keine Werkzeuge, Formen und Spannmittel benötigt werden, die Möglichkeit einer hohen Geometriekomplexität und Funktionsintegration zur Minimierung von Montageschritten, sowie die Möglichkeit der Fertigung kundenindividueller Produkte ohne Mehraufwand besteht. Diese Vorteile sind auch bei den meisten anderen generativen Fertigungsverfahren zu finden, welche im folgenden Abschnitt klassifiziert werden.



(a) Nutzwert für den Wettbewerbsfaktor Kosten

(b) Nutzwert für den Wettbewerbsfaktor Zeit

ABBILDUNG 2.3: Nutzwert des pulverbettbasierten 3D-Druckens, der Zerspänung und des Spritzgießens, bezogen auf den Wettbewerbsfaktor Zeit (2.3a) und Kosten (2.3b), bei der Fertigung unterschiedlicher Stückzahlen [101]

2.2.1 Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren

Entsprechend DIN 8580 erfolgt die Einteilung der Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen mit zahlreichen nochmals gestaffelten Untergruppen. Folgende Hauptgruppen werden genannt:

- Urformen
- Umformen
- Trennen
- Fügen
- Beschichten
- Stoffeigenschaften ändern

Allerdings werden generative Fertigungsverfahren in der aktuellen Ausgabe von 2003 nicht kategorisiert. *Urformen* wird definiert als „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts, wobei die Stoffeigenschaften des Werkstücks bestimmbar in Erscheinung treten“ [40]. Daher werden die generativen Fertigungsverfahren in der Fachliteratur zumeist dem Urformen zugeschrieben (vgl. [74]).

Eine weitere gebräuchliche Einteilung ist die grobe Gliederung nach der Gesamtheit der Fertigungsverfahren nach [25]. Der Autor unterscheidet in:

- Subtraktive Fertigungsverfahren
- Formative Fertigungsverfahren
- Additive Fertigungsverfahren

Subtraktive Verfahren erzeugen die gewünschte Geometrie aus einem Halbzeug durch Abtragen definierter Bereiche, z. B. durch Drehen oder Fräsen. Bei einem formativen Verfahren entspricht das Volumen der Ausgangsgeometrie dem Volumen der Zielgeometrie. Beispiele dafür sind das Schmieden oder das Tiefziehen. Additive Fertigungsverfahren schaffen die gewünschte Geometrie durch das Aneinanderfügen von Volumenelementen, was der Definition des Urformens in DIN 8580

nahekommt. Das Aneinanderfügen von Volumenelementen kann nach dem Aggregatzustand der Ausgangsmaterialien unterteilt werden. In Tabelle 2.1 und 2.2 sind die generativen Fertigungsverfahren nach fester, flüssiger und gasförmiger Phase des Ausgangsstoffes unterteilt.

Aggregatzustand	fest			
	Draht	Pulver		Folie/Platte
Ausgangsmaterial				
Verfestigungsmechanismus	Aufschmelzen und Erstarren	Aufschmelzen und Erstarren	Verkleben durch Binder	Ausschneiden und Kleben
Werkstoff	Kunststoff/Metall	Kunststoff/Keramik/Metall/Sand	Kunststoff/Keramik/Metall/Sand/Lebensmittel	Kunststoff/Papier
Verfahren	Extrusionsverfahren	Sintern/Schmelzen	3D-Drucken	Schicht-Laminat

TABELLE 2.1: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit festem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials (nach [73])

Aggregatzustand	flüssig		gasförmig
Ausgangsmaterial	Paste/Flüssigkeit	Aerosol	Gas
Verfestigungsmechanismus	Polymerisieren	Abscheiden	Chemische Reaktion
Werkstoff	Kunststoff/Keramik	Kunststoff	Kunststoff/Metall
Verfahren	Stereolithographie	Aerosoldrucken	LCVD

TABELLE 2.2: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren mit flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials (nach [73])

Der Begriff „3D-Drucken“ aus der Tabelle 2.1 bezieht sich nach [73] allein auf das Verfahren beim Verkleben von Pulvern, da dies in der Patentschrift US 5340656 festgelegt wurde [154]. Im allgemeinen Sprachgebrauch, in der Fachliteratur sowie in dieser Arbeit wird der Begriff „3D-Drucken“ stellvertretend für alle generativen Fertigungsverfahren verwendet. Nach der aktuellen Normung und den Richtlinien von VDI, DIN und ASTM ist diese Formulierung zutreffend, systematisch-generisch aber fehlerhaft [16, 53, 73, 189].

Die am häufigsten eingesetzten generativen Fertigungsverfahren verwenden Ausgangsstoffe mit festem Aggregatzustand, wie Draht, Pulver und Folien bzw. Platten. Die Verfestigungsmechanismen der Fertigungsverfahren mit festen Ausgangsstoffen lassen sich grob in zwei Bereiche einteilen. Zum einen erfolgt das Fügen durch Aufschmelzen und Verbinden beim Erstarren, zum anderen durch das Verkleben der Ausgangsmaterialien. Die Prozesse Extrusion, Sintern und Schmelzen sowie

das Schicht-Laminat-Verfahren gehören zu dieser Gruppe mit festen Ausgangsstoffen. [73, 101]

Bei generativen Fertigungsverfahren mit flüssigen Ausgangsmaterialien werden überwiegend nicht- oder niedrigvernetzte Monomere vom Typ Acrylat, Epoxidharz oder Vinyletherharz eingesetzt. Diese werden durch ultraviolette Strahlung lokal vernetzt und bilden so feste Schichten und Bauteile. Die Verfahren werden als Photopolymerisation, Stereolithographie oder Stereographie bezeichnet. Eine Ausnahme ist das Aerosoldruckverfahren, welches in hochfeine Tröpfchen zerstäubte Trägerflüssigkeiten mit darin eingebrachten Feststoffen verwendet. Diese Partikel besitzen einen Durchmesser von maximal 200 nm. [73]

Beim Generieren aus der Gasphase ist der wichtigste Verfestigungsmechanismus das chemische Abscheiden. Hierbei werden reaktionsfähige Gase durch externe Energiequellen zu lokalen Reaktionen angeregt und in Folge feste Stoffe definiert abgeschieden. Das Verfahren ist als Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) bekannt. [73, 101, 200]

2.2.2 Austauschformate der Daten

Bei additiven Fertigungsverfahren erfolgt die Formgebung jeder Schicht in der XY-Ebene. Die dritte Dimension entsteht durch das Aufeinanderfügen von Einzelschichten in der Z-Koordinate. Grundsätzlich sind diese Verfahren daher 2,5D-Verfahren [73]. Der gesamte Prozessablauf nach der Erstellung eines Computer-Aided Design (CAD)-Modells bis zur Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum ist vollständig automatisierbar. Entscheidend ist die Software zur Verarbeitung der CAD-Daten.

Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, werden die CAD-Daten zunächst in ein Bauteilmodell überführt und anschließend in ein Schichtmodell umgewandelt. Hierfür kann es notwendig sein, dass eine Konvertierung der Daten in ein anderes Datenformat erforderlich wird. Im Bauraummodell wird das Bauteil einzeln oder mit anderen Bauteilen so platziert, dass der zur Verfügung stehende Raum optimal ausgenutzt wird. Weiterhin kann durch die Orientierung des Bauteils im Bauraum die Druckzeit und ggf. die Menge an benötigten Hilfsstoffen beeinflusst werden.

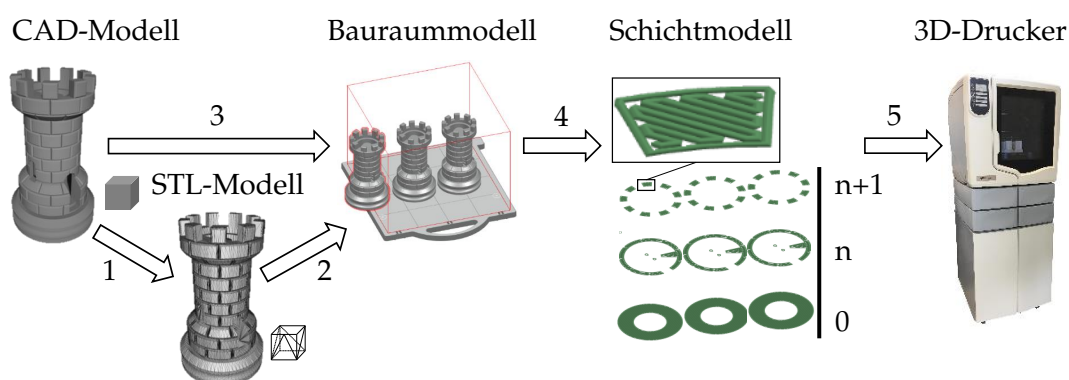


ABBILDUNG 2.4: Datenfluss und Datenvorbereitung bei der additiven Fertigung. CAD-Modell von [109]

Nach der Überführung in das Bauraummodell erfolgt das Zerlegen der Daten in ein Schichtmodell durch die eingesetzte Software. Diese wird als *Slicer* oder allgemein *Rapid Prototyping Software* bezeichnet, der Vorgang wird *Slicing* genannt. Im Folgenden werden die Bahnen für das Druckmaterial und ggf. Hilfsstoffe für jede Schicht ermittelt und an die Fertigungsanlage übertragen.

Grundsätzlich muss hier zwischen zwei Problemfeldern unterschieden werden: zum einen dem Datenfluss bei der Übermittlung der Informationen zwischen den einzelnen Modellen, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, zum anderen der Arbeitsweise des eingesetzten *Slicers*.

Die übermittelten Informationen werden bei jedem Schritt um weitere material-, verfahrens- und anlagenspezifische Daten erweitert. Zur neutralen Überführung der 3D-CAD-Modelle in die *Rapid Prototyping Software* haben sich als häufig verwendete Lösungen das STL-Format und das daraus hervorgegangene und voll kompatible AMF-Format etabliert [73] (Pfeil 1). Um die Konvertierung zu umgehen, ist es bei einigen *Slicern* möglich, die proprietären Datenschnittstellen der gängigen CAD-Programme direkt auszuwerten (Pfeil 2,3). Das Bauraummodell erweitert die Daten um die Orientierung des Bauteils im Bauraum und die Platzierung auf der Bauplattform. Diese Informationen werden dem *Slicer* übergeben (Pfeil 4), welcher das Bauraummodell in Schichten konstanter Dicke überführt und die Bahnkurven entsprechend der Maschinenparameter ermittelt. Dem Datensatz werden anschließend Materialdaten sowie prozess- und maschinenspezifische Parameter hinzugefügt und an die Fertigungsanlage übermittelt (Pfeil 5).

2.2.3 Potenziale und Einsatzgebiete

Die bereits angesprochene Flexibilität der additiven Fertigung ermöglicht es, komplexe Bauteile mit großer Funktionalität in kurzer Zeit zu erzeugen. Eine Übersicht über die Potenziale und Vorteile wurden in [101] aus verschiedenen Quellen zusammengetragen:

- Erhebliche Reduzierung der Produkteinführungszeit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren, sowohl durch vereinfachte Erstellung von Prototypen als auch durch die Möglichkeit, direkt Bauteile zu erzeugen
- Kein Erfordernis für Werkzeuge und Formen, zum Teil auch nicht für Spannmittel
- Große geometrische Gestaltungsfreiheit und damit einfache Fertigung kraftflussgerechter Bauteile
- Funktionsintegration, beispielsweise zur Vermeidung von Montageschritten
- Wirtschaftliche Fertigung von kleinen Stückzahlen und somit kundenindividueller Produkte
- Hoher Wiederverwendungsgrad des nicht verfestigten Pulvers beim Strahlschmelzen und anderen Verfahren

Aufgrund dieser Vorteile unterliegt die additive Fertigung anderen Regeln für die Konstruktion und Fertigung als konventionelle Verfahren. Wurden bei den Anfängen der additiven Fertigung nur Prototypen gefertigt, werden jetzt immer häufiger auch Anwendungen für Endprodukte entwickelt. Es gibt drei Hauptanwendungsgebiete:

- Rapid Prototyping
- Rapid Manufacturing
- Rapid Tooling

Beim *Rapid Prototyping* werden Modelle und Prototypen hergestellt, die keinen Produktcharakter aufweisen. Die hergestellten Bauteile weisen lediglich einige Aspekte des späteren Produktes auf, um so diese Produkteigenschaften in der Entwicklung abzusichern. Die hergestellten Modelle können auch rein zur 3D-Visualisierung dienen. Als Unterform ist das *Functional Prototyping* zu nennen, bei dem Funktionsprototypen hergestellt werden, um einzelne Funktionen des Produktes abzusichern.

Beim *Rapid Manufacturing* werden durch additive Fertigungsverfahren einsatzfähige Endprodukte hergestellt. Diese Produkte können auch Werkzeuge sein. In diesem Fall spricht man vom *Rapid Direct Tooling*, wenn einsatzfähige Werkzeuge hergestellt werden, oder vom *Rapid Indirect Tooling*, wenn die Werkzeuge durch das Abformen von Urmodellen hergestellt werden. Damit kann die additive Fertigung in vielen Bereichen eingesetzt werden. Im Folgenden sind einige ausgewählte Einsatzfelder für generative Fertigungsverfahren genannt:

- Architektur und Bau [20, 163, 202]
- Chemie [3, 170, 183]
- Informationstechnik [97, 114]
- Lebensmittelindustrie [78, 124, 181]
- Luft- und Raumfahrt [87, 128, 134]
- Maschinenbau [84, 110, 121, 122, 173]
- Medizintechnik [129, 162, 194]
- Mode und Design [115, 186, 191]

2.2.4 Herausforderungen, Grenzen und Entwicklungsziele

Zwar haben generative Fertigungsverfahren in vielen Industriezweigen Fuß gefasst, dennoch sind sie mit Nachteilen behaftet, deren Beseitigung einen Forschungsaufwand bedarf. Die Nachteile können in Anlehnung an [73] und [200] in vier Hauptbereiche eingeteilt werden:

1. Aufgrund der schichtweisen Arbeitsweise des Verfahrens und der verwendeten Materialsysteme besitzen additiv gefertigte Bauteile im Vergleich mit konventionellen gefertigten Bauteilen eine qualitativ schlechtere Oberfläche. Dies äußert sich in einer stufigen und/oder rauen Oberfläche. An Wirkflächen ist

daher oft eine manuelle Nachbearbeitung erforderlich, was zusätzliche Kosten verursacht und Fehlerpotenziale bei der Fertigung birgt.

2. Die eingesetzten Werkstoffe sind häufig auf das additive Fertigungsverfahren abgestimmt. Daher können sich diese vom späteren in der Serie eingesetzten Material unterscheiden oder besitzen Eigenschaften, die teilweise unbekannt sind. Kenntnisse über das dynamische oder Langzeitverhalten dieser Sonderwerkstoffe liegen oft nicht vor.
3. Additive Prozesse sind auf die Fertigung von einem oder wenigen Bauteilen ausgelegt. Wie beispielhaft für das pulverbettbasierte 3D-Drucken in Abbildung 2.3 zu sehen ist, sind ab einer bestimmten Stückzahl andere Fertigungsverfahren wirtschaftlicher. Bei der Fertigung gleicher Bauteile gehen zudem die Vorteile des Verfahrens verloren (vgl. Abschnitt 2.2.3).
4. Additive Fertigung benötigt eine auf den Prozess abgestimmte fertigungsgerechte Konstruktion der Bauteile, um alle Vorteile des Verfahrens auszuschöpfen. Die mögliche Integralbauweise und Funktionsintegration, zusammen mit der fertigungsgerechten Konstruktion, ist häufig unzureichend untersucht worden, oder bei den Konstrukteuren unbekannt [200]. Auch hier können manuelle Nachbearbeitungen und zusätzliche Prozessschritte vermieden werden.

Anhand dieser Nachteile können Handlungsziele für die weitere Forschung abgeleitet werden. Dazu gehören:

- Verbesserung der Oberflächen, was mit der Erhöhung der Druckgenauigkeit durch geringere Schichtstärken korreliert
- Verringerung der Anisotropie und damit Homogenisierung der Materialeigenschaften innerhalb und zwischen den Schichten
- Erweiterung der Materialpalette und Normung dieser
- Eliminierung beziehungsweise Verringerung der manuellen Nachbearbeitung
- Vermeidung oder Eliminierung zusätzlicher Prozessschritte
- Definition von Regeln für das fertigungsgerechte Konstruieren und Aufzeigen möglicher Funktionsintegration

Im Verlauf dieser Arbeit wird auf einen Teil dieser Handlungsziele eingegangen und es werden mögliche Verbesserungen aufgezeigt. Die Betrachtung der Verbesserung der Oberflächen, die Verringerung der Anisotropie und der manuellen Nachbearbeitung ist in Abschnitt 4.1.3 zu finden. Notwendige Regeln für das fertigungsgerechte Konstruieren im Zusammenhang mit dem beschriebenen Problem werden in Abschnitt 4.2 und 5.1.1 betrachtet. Zur Anwendung der vorhandenen Normen für die Ermittlung der Materialkennwerte wird in Abschnitt 4.1 ein Beitrag geleistet.

2.2.5 Das Schmelzschichtverfahren

Das Schmelzschichtverfahren, welches auch als *Fused Layer Modeling* (FLM) oder *Fused Deposition Modeling* (FDM) bezeichnet wird, ist ein Extrusionsverfahren, bei dem ein erhitztes thermoplastisches Material durch ein oder mehrere Düsen gepresst und der entstandene Strang definiert abgelegt wird. Das Material wird dabei soweit erhitzt, dass eine Schmelze gebildet wird und die thermische Energie im Material ausreicht, um mit bereits abgelegtem Material eine Verbindung einzugehen.

Hersteller

Das FDM ist das verbreitetste 3D-Druckverfahren, dessen Entwicklung in zwei Richtungen vorangetrieben wird [66, 103]. Zum einen sind dies Systeme für Heimanwender, welche auch Desktop-Anlagen genannt werden, zum anderen sind es Systeme für den industriellen Einsatz. Systeme mit einem Einkaufspreis für weniger als 5000 \$ zählen nach [200] zu den Desktop-Anlagen. Eine Liste von wichtigen Herstellern von FDM-Anlagen für die industrielle Anwendung ist im *Wohlers Report 2018* zu finden und wird im Folgenden, auf Systeme für Thermoplaste beschränkt, aufgeführt [200]:

- Arburg
- BigRep
- Cincinnati
- German RepRap
- Markforged
- nScript
- Rize
- Rokit
- 3D Platform
- Sharebot
- Stratasys
- Tiertime
- Xery
- XYZprinting

Es wird vermutet, dass Desktop-Anlagen von mehreren hundert Firmen produziert werden [200]. Einige der aufgelisteten Hersteller, wie *Stratasys*, *XYZprinting* und *German RepRap* produzieren Anlagen für Heim- und Industrieanwender. Weltweit Marktführer ist *Stratasys* mit Einnahmen von 673 Millionen \$ im Jahr 2017 [171, 200]. Die Firma *Stratasys* ist Erfinder und Namensgeber des *Fused Deposition Modeling* [29, 73].

Der 3D-Druckprozess

Zur Übersicht ist das Verfahren schematisch in der folgenden Abbildung 2.5 dargestellt.

Das Material, welches häufig als Filament vorliegt, wird zum Druckkopf geleitet. Hier wird es im Extrusionskopf bis zur Schmelze erwärmt, bis es extrudiert werden kann. Das Material wird in Bahnen abgelegt und verbindet sich mit dem bereits zuvor abgelegten Material. Dies passiert in drei Schritten, die in Abbildung 2.5b dargestellt sind. Zunächst treten die Bahnen untereinander Kontakt, wobei die zuerst abgelegte Bahn bereits erstarrt ist (1). Im nächsten Schritt erwärmt das zuletzt abgelegte Material die erste Bahn soweit, dass diese teilweise verflüssigt wird und es so

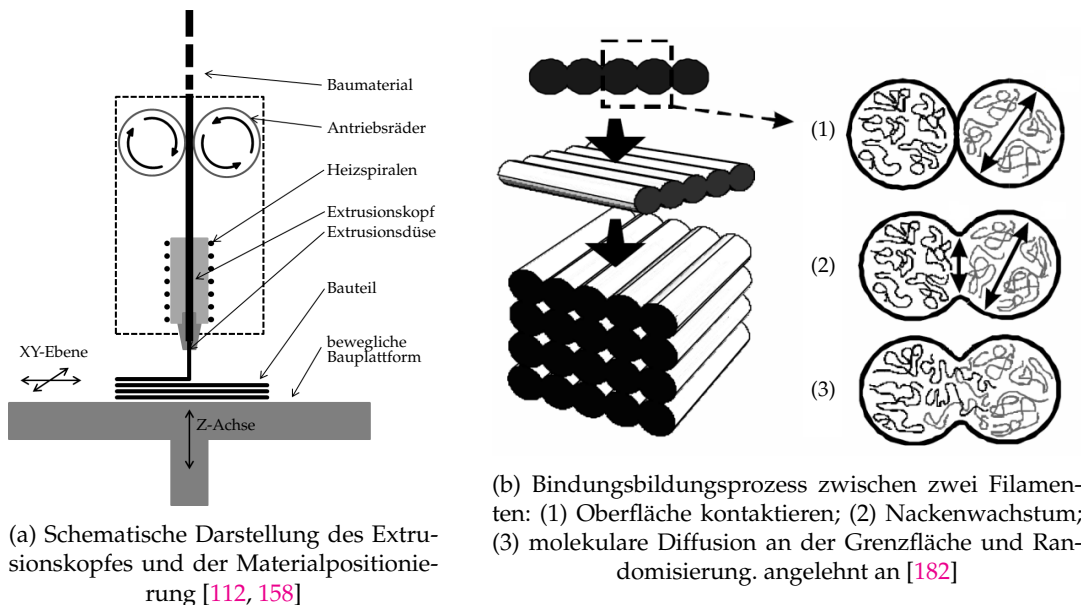


ABBILDUNG 2.5: Schematische Darstellung des Materialflusses beim FDM-Prozess

zu einem Nackenwachstum zwischen den beiden Bahnen kommt (3). Anschließend erfolgt eine molekulare Diffusion der Polymerketten und es wird ein homogenes Werkstoffgefüge gebildet (3). [182]

Restriktionen

Das FDM-Verfahren besitzt die gleichen Restriktionen wie andere generative Fertigungsverfahren, welche in Abschnitt 2.2.4 beschrieben wurden. Eine Besonderheit besteht darin, dass hier verfahrensbedingt mit vergleichsweise großen Schichtdicken gearbeitet wird. Dies verursacht, mit dem in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Nackenwachstum, qualitativ schlechtere Oberflächen als andere generative Fertigungsverfahren [73]. Positiv ist jedoch, dass die Druckgeschwindigkeit aufgrund der Schichtdicke vergleichsweise hoch ist. Des Weiteren kommt es durch die abgelegten Bahnen zur Anisotropie und Inhomogenität im Bauteil. Durch das imperfekte Verbinden einiger Bahnen kann es zu Schwachstellen (Bindenähten) und Löchern im Kontaktbereich kommen. Details dazu werden gesondert im Abschnitt 2.3.5 beschrieben.

Bei jeder Fertigungsschicht ist es erforderlich, dass die Düse mindestens einmal mit der Extrusion des Kunststoffes beginnt. An dieser Stelle wird zu viel Material eingebracht, was die Oberfläche über die gesamte Bauteilhöhe in diesem Bereich negativ beeinflusst. Dieser Effekt kann als *Andruck*, ähnlich dem Effekt beim Spitzgießen, bezeichnet werden. Eine Darstellung und nähere Beschreibung hiervon ist in Abschnitt 2.3.5 zu finden. In Abhängigkeit vom gedruckten Material können Überhänge gedruckt werden. Es sind Überhangwinkel von 45° typisch. Darüber hinaus ist es erforderlich, Stützstrukturen aus dem Druckmaterial oder mit Hilfsstoffen zu erzeugen. [206]

Das Thermoplast weist beim Abkühlen einen Polymerisationsschwund auf [61, 62]. Zusätzlich können Effekte wie Materialeigenspannungen und thermischer Schrumpf aufgrund der Wärmeausdehnung auftreten. Allerdings ist die Beschränkung auf rein thermoplastische Werkstoffe für den FDM 3D-Druck mit neuen Entwicklungen entfallen. Neben dem FDM-Drucken von Kunststoffen ist auch eine Verwendung einer Vielzahl von Stählen, Nichteisenmetallen und Keramiken möglich [121, 122].

2.3 Relevante Werkstoffe und deren Eigenschaften für das Schmelzschichtverfahren

2.3.1 Theorie der Kunststoffe

Kunststoffe sind neben z.B. metallischen und keramischen Werkstoffen eine eigenständige Werkstoffgruppe, die eine sehr hohe technologische und wirtschaftliche Bedeutung hat.

Chemisch betrachtet bestehen Kunststoffe aus organischen und halborganischen Werkstoffen mit hoher Molmasse. Die hohe Molmasse steht im Zusammenhang mit sehr großen Molekülen, sogenannten Makromolekülen, durch die die Eigenschaften der Kunststoffe wesentlich bestimmt werden. Bei allen Kunststoffen sind Kohlenstoff- und Wasserstoffatome am häufigsten am Aufbau beteiligt und bilden die Grundlage für die Polymerisation von Monomeren zu langkettigen Makromolekülen [99]. Es ist möglich, die Grundstruktur der Kunststoffmakromoleküle mit weiteren Komponenten wie Additiven und Füllstoffen gezielt zu modifizieren.

Kunststoffe können nach ihrem mechanisch-thermischen Verhalten unterschieden werden in:

- Thermoplaste
- Duromere
- Elastomere

Thermoplaste zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch Zufuhr thermischer Energie nahezu beliebig oft aufgeweicht und formbar gemacht werden können. Das Aufweichen kann ab einer bestimmten Temperatur in Schmelzen übergehen. Es wird damit eine Schmelze gebildet. Diese verfestigt sich beim Abkühlen. Die Gestalt und Größe der Thermoplastmoleküle wird durch die Bindungskräfte zwischen den Atomen bestimmt. Diese werden auch als Hauptvalenzkräfte bezeichnet. Zwischen den einzelnen Molekülketten wirken die verschiedenen Nebervalenzkräfte.

Thermoplasten lassen sich zudem nach der Ordnung der Makromolekülstränge unterscheiden, welche hauptsächlich durch die Nebervalenzkräfte hervorgerufen werden. Es wird nach dem amorphen und dem teilkristallinen Zustand unterteilt. Bei den amorphen Thermoplasten sind die Moleküle ungeordnet und ineinander verschlungen (siehe Abbildung 2.6a). Bei den teilkristallinen Thermoplasten liegen Teilbereiche der Makromoleküle in einer bestimmten Ordnung vor, z.B. im einfachsten Fall in einer parallelen Ausrichtung von Molekülstücken, wie in Abbildung 2.6b zu sehen ist. Diese Anordnung entspricht der Ordnung der Atome oder Moleküle in Kristallen. [99]

Elastomere werden bei Wärmezufuhr nicht plastisch formbar. Bei zunehmender Temperatur nimmt Ihre Elastizität aufgrund der geknäulten Molekülketten bis zur Glasübergangstemperatur zu. Darüber hinaus beginnt die Molekülstruktur zu degenerieren und wird damit zerstört. Dies trifft auch auf die Duromere zu, allerdings

sind die Makromolekülketten untereinander weitmaschig dreidimensional vernetzt (siehe Abbildung 2.6c). Aus diesem Grund verhalten sie sich im Bereich ihrer Gebrauchstemperatur elastisch. [99]

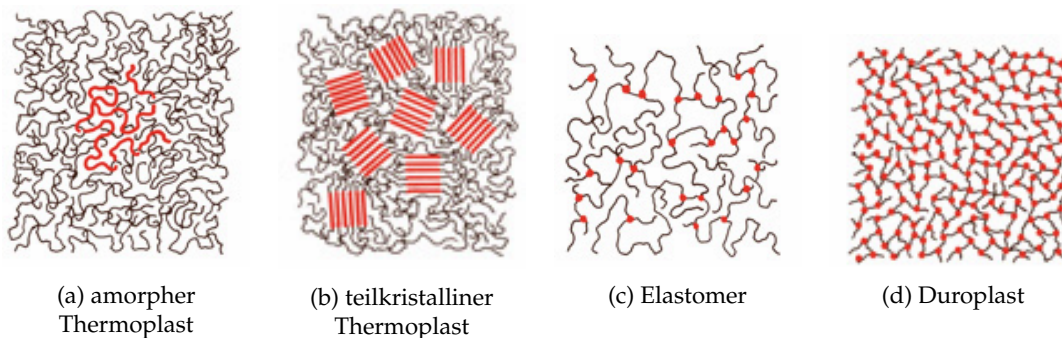


ABBILDUNG 2.6: Schematische Darstellung der zweidimensionalen Projektionen verschiedenartiger Polymere nach [99]

Duromere sind auch bei höheren Temperaturen nicht mehr plastisch verformbar. Sie werden daher als formstabile Kunststoffe bezeichnet. Ihr Molekülaufbau ist schematisch in Abbildung 2.6d dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, sind Duromere engmaschig vernetzt, wodurch ihre Eigenschaften begründet sind. Die Temperaturen im Anwendungsbereich sind im Vergleich zu den Thermoplasten und Elastomeren insgesamt höher, wenn man von speziellen Thermoplasten absieht. Die Anwendungstemperatur ist dadurch begrenzt, dass oberhalb dieser eine chemisch-thermische Zersetzung eintritt. [99]

2.3.2 Relevante Kunststoffe für das Schmelzschichtverfahren

Für das in Abschnitt 2.2.5 beschriebene Verfahren wurde eine Vielzahl geeigneter Kunststoffe entwickelt, welche vergleichbare Eigenschaften mit den gebräuchlichsten Konstruktionswerkstoffen aufweisen. Die ersten für die additive Fertigung entwickelten Hochleistungskunststoffe waren ABS und Polyphenylsulfon (PPSF) [73]. Weiterhin sind Polylactide (PLA), Acrylnitril-Styrolacrylat (ASA), Polyamid (PA), Polyethylenterephthalat (PET), Polycarbonat (PC) und Wood Plastic Components (WPC) zu nennen. Zudem sind viele weitere Kunststoffe und auch Kunststoffmischungen (sogenannte Blends) einsetzbar [73, 177].

Im Rahmen dieser Arbeit wird besonders ein Druckmaterial auf Basis von ABS verwendet, weshalb der Fokus im folgenden Abschnitt auf diesem liegt.

2.3.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)

Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer gehört zu den amorphen Thermoplasten und zeichnet sich besonders durch eine hohe Schlagzähigkeit aus. Die Einsatzgrenzen liegen im Bereich von -45 °C bis 85 °C als Dauertemperatur, wobei auch kurzfristig 100 °C erreichen werden dürfen. ABS gehört zur Gruppe der technischen Kunststoffe und ist dort der am häufigsten verwendete Kunststoff [99]. ABS

ist beständig gegen schwache Säuren, Laugen, Alkohole, Fette, Öle und Wasser. Gegenüber dem Einfluss von konzentrierten Säuren, Ketonen, Estern, Ethern, aromatischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen ist es nicht beständig [61].

Chemisch betrachtet ist ABS ein Polymerisat aus zwei Phasen. Zum einen besteht es aus einer Matrix aus Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat, zum anderen sind Partikel aus Butadien-Acrylnitril-Kautschuk eingelagert.

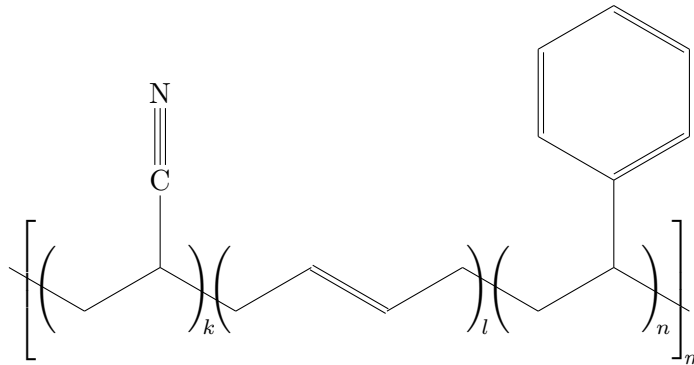


ABBILDUNG 2.7: Strukturformel von ABS

Die Strukturformel von ABS ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Im mit k bezeichneten Segment dieser Abbildung ist die Acrylnitril-Verbindung zu erkennen. Die funktionelle Gruppe aus Kohlenstoff und dreifach gebundenem Stickstoff wird als Nitril bezeichnet [19]. Das Butadien ist im Segment l zu erkennen, das Styrol mit dem charakteristischen Benzolring in Segment n . Die Nitrilgruppe gehört zu den stark polaren funktionellen Gruppen und führt zu einem Dipolmoment im Molekül. Zwischenmolekular tritt hierdurch eine elektrostatische Anziehung dauerhafter Dipole zusätzlich zu den Wasserstoffbrücken und Dispersionskräften auf [61, 81]. Dies ist unter anderem auch die Ursache für die Unbeständigkeit gegenüber aprotischen Lösungsmitteln, wie den genannten Ketonen. Eines der bekanntesten Ketone ist Aceton (siehe Abschnitt 2.3.4 - Chemische Widerstandsfähigkeit und Lösungsmittel).

Die Eigenschaften von ABS sind stark von den bei der Herstellung vorhandenen Ausgangsstoffen abhängig. Hier wird zwischen einem ABS-Blend-Polymerisat und einem ABS-Pfropfcopolymerisat unterschieden. Das Erste wird durch mechanisches Vermischen von Styrol-Acrylnitril mit Polybutadien, das mit Styrol und Acrylnitril gepfropft ist, erzeugt. Beim Zweiten erfolgt die Herstellung durch Copolymerisation von Styrol und Acrylnitril in Gegenwart von synthetischem Kautschuk (Polybutadien oder Butadien/Acrylnitril-Copolymerisat) nach dem Verfahren der Emulsionspolymerisation. Typische ABS-Kunststoffe enthalten 20 % bis 35 % Acrylnitril in der Matrix. Bei geringeren Acrylnitrilanteilen werden Kunststoffe erzeugt, die in ihren Eigenschaften mehr dem schlagzähen Polystyrol ähneln. Weitere Kombinationsmöglichkeiten der drei Hauptbestandteile und deren Auswirkungen auf ihre Eigenschaften sind in Abbildung 2.8 dargestellt. [61, 99]

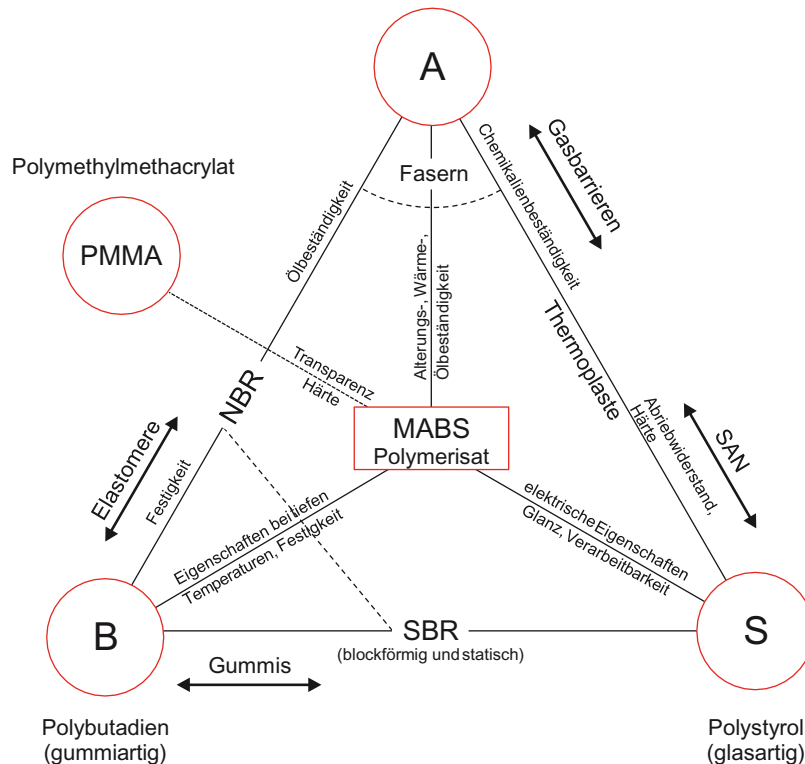


ABBILDUNG 2.8: ABS-Zusammensetzungen und ihre Eigenschaften [99]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ABS-P430, welches auch unter dem Namen ABS-M30, ABS-P430XL oder ABSplus-P430 bekannt ist, verwendet. Die genaue Zusammensetzung wird vom Hersteller nicht mitgeteilt, allerdings ist es eines der am häufigsten verwendeten ABS-Systeme für das *Additive Manufacturing (AM)* [28].

2.3.4 Chemische Widerstandsfähigkeit und Lösungsmittel

Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Einteilung der Kunststoffe wurde entsprechend ihrem morphologischen Aufbau vorgenommen. Dagegen wird das chemische Verhalten wesentlich von der chemischen Struktur der Makromoleküle bestimmt. Die chemische Widerstandsfähigkeit beeinflusst bei vielen Anwendungen die Entscheidung über den Einsatz von Kunststoffen. [61]

Nach DIN 16888 (zurückgezogen) bzw. ISO 4433 erfolgt die Einteilung der Beständigkeit in drei Klassen [36, 94]:

- widerstandsfähig (satisfactory)
- bedingt widerstandsfähig (limited)
- nicht widerstandsfähig (not satisfactory)

Mit diesen Begriffen wird das Verhalten von Kunststoffen bezüglich der Einwirkung angreifender Medien bei definierten Bedingungen qualitativ ausgedrückt. Dabei bedeutet die Bewertung *widerstandsfähig*, dass der Werkstoff als grundsätzlich geeignet

bewertet wird. *Bedingt widerstandsfähige* Werkstoffe werden von den Medien angegriffen, können aber unter eingeschränkten Bedingungen eingesetzt werden. Beispielweise kann eine dieser Einschränkungen die Dauer des Kontaktes sein. Werkstoffe der Klasse *nicht widerstandsfähig* werden als ungeeignet bewertet. Diese Klassifizierungen können durch einen akzeptablen Grad der zulässigen Schädigung erweitert werden. Ein weiteres Beurteilungskriterium für die Klassifizierung ist unter anderem die Massenveränderung durch Quellen (Zunahme) oder Lösen (Abnahme) des Kunststoffes. [57, 61]

Diese Massenveränderung ist von der Vernetzung der Kunststoffe abhängig. Stark vernetzte Kunststoffe (Duromere) quellen je nach Vernetzungsgrad wenig bis gar nicht. Bei weitmaschig vernetzten Kunststoffen (Elastomeren) können Vernetzungsbrücken eine vollständige Auflösung verhindern, die Polymere quellen jedoch. Unvernetzte Kunststoffe (Thermoplaste) besitzen zumeist eine geringere Widerstandsfähigkeit, was dazu führt, dass es zu einer Quellung oder zum Lösen im Medium kommt. Im gequollenen Zustand verändern sich die physikalischen Eigenschaften des Polymers. Dies geschieht, indem der Abstand der Makromoleküle des Kunststoffes vergrößert wird und der Einfluss der Nebervalenzkräfte damit abnimmt. Dadurch wird die Beweglichkeit der Kettensegmente erhöht. Ähnliche Eigenschaftsänderungen werden von Weichmachern ausgelöst. Weitere Auswirkungen der chemischen Beeinflussung können beispielsweise die Vergrößerung des Volumens, eine Veränderung des E-Moduls und des Torsionsmoduls sein. [61]

Um mit den Molekülen der Kunststoffe zu interagieren, ist es erforderlich, dass das angreifende Medium mit diesem in Kontakt tritt. Wenn sich niedermolekulare Substanzen bzw. Lösungsmittelmoleküle durch feste Kunststoffe bewegen, wird dieser Vorgang als Permeation bezeichnet. Dieser Vorgang läuft in drei Schritten – Adsorption, Diffusion und Desorption eines Moleküls – ab. Bei der Adsorption lagert sich das niedermolekulare Molekül zunächst an der Oberfläche an. Wenn das Molekül nicht in den Kunststoff eindringen kann, bleiben die Materialkennwerte des Kunststoffes nahezu unverändert. Jedoch ändern sich diese deutlich, wenn nach der Adsorption eine Diffusion durch das Polymer stattfindet. Diese ist abhängig von den Größenverhältnissen, der Polymerstruktur und der Temperatur. Nachdem der Kunststoff durchwandert wurde, löst sich das Molekül von der Oberfläche wieder ab (Desorption). [61, 62]

Der Transport von Medien durch Kunststoffe basiert hauptsächlich auf der aktivierten Diffusion. Die aktivierte Diffusion entsteht durch die thermische Bewegung der Makromolekülsegmente, welche zur Bildung und Verschiebung von Leerstellen in der Struktur des Makromoleküls führt. Für die Bewegung eines diffundierenden Moleküls ist eine bestimmte Menge an Energie erforderlich. Sie wird benötigt, um die Nebervalenzkräfte so weit zu schwächen, dass sich die Polymerketten voneinander trennen und eine Leerstelle bilden, durch die sich das Molekül hindurchbewegen kann. Einige Medien können diese Kräfte gezielt beeinflussen und so die Bindungskräfte der einzelnen Ketten schwächen. In diesem Fall spricht man von

Lösungsmitteln. [57, 142]

Somit sind Lösungsmittel Stoffe, die sich durch die Molekülstruktur bewegen können und die Bindungskräfte zwischen den Polymermakromolekülen schwächen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um keine chemische Reaktion handelt. Nach der Desorption der Lösungsmittelmoleküle können die Bindungen wiederhergestellt werden. [142]

Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, ist ein mögliches Lösungsmittel für ABS das Keton Aceton. Die allgemeine Strukturformel von Ketonen ist in Abbildung 2.9a dargestellt, die für Aceton in Abbildung 2.9b.



ABBILDUNG 2.9: Allgemeine Struktur eines Ketons und des Acetons

Das einfachste Keton Aceton gehört zu den aprotisch-polaren Lösungsmitteln. Im Gegensatz zu den protischen Lösungsmitteln besitzen diese keine Wasserstoffatome, die Brücken bilden können. Jedoch weist Aceton eine polare Carbonylgruppe ($\text{C}=\text{O}$) auf, was dazu führt, dass andere polare Stoffe, wie auch ABS, das eine stark polare Nitrilgruppe besitzt, gelöst werden können. [61, 62, 142]

In [15] werden Lösungsmittel für ABS untersucht. Speziell werden hier die Effekte auf die Oberfläche betrachtet, auf welche in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird. Ein Auszug der Ergebnisse ist in Tabelle 2.3 dargestellt. Methylenchlorid wurde nicht untersucht, da ABS hier eine Unbeständigkeit aufweist, aber keine Löslichkeit.

Immersionszeit [s]	15	60	300	900
4-Methyl-2-pentanon	geringe Veränderung	glänzende Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-
Aceton	sehr glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-
Chlorbenzol	glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-
Ethylacetat	glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-
Methylethylketon	sehr glatte Oberfläche	sehr glatte Oberfläche	-	-
m-Xylol	keine Veränderung	keine Veränderung	keine Veränderung	sehr glatte Oberfläche
Toluol	glänzende Oberfläche	geringe Veränderung	sehr glatte Oberfläche	-

TABELLE 2.3: Optische Bewertung 3D-gedruckter ABS Bauteile bei unterschiedlichen Lösungsmitteln und Immersionszeiten [15]

Vier frei im Handel verfügbare Lösungsmittel für ABS sind:

- Methylenchlorid (auch: Dichlormethan)
- Methylethylketon (auch: Butanon, Ethylmethylketon, Methylpropanon)
- Aceton
- Ethylacetat

Für die in Kapitel 4 beschriebene Anwendung scheidet Dichlormethan aus, da es aufgrund der hohen Flüchtigkeit ein gefährliches Atemgift darstellt [148]. Aceton wird der Explosionsgruppe II A zugeordnet und Methylethylketon II B. Somit ist Methylethylketon explosionsgefährdeter, da weniger Zündenergie erforderlich ist [21]. Aceton ist flüchtiger als Methylethylketon und Ethylacetat, was zu einer hohen Desorptionsrate führt [35].

[15] kommt zu der Schlussfolgerung: „dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Medien relativ gering sind. Durch die notwendige Anpassung der Einwirkzeit kann die fehlende Aggressivität einiger Medien ausgeglichen werden.“ und weiter: „Durch die schnelle Behandlung [mit Aceton; Anmerk. d. Verf.] können sehr gute Ergebnisse erzielt werden.“

Aus diesen Gründen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Lösungsmittel Aceton verwendet.

2.3.5 Notwendigkeit der Nachbearbeitung der Materialoberfläche von 3D-gedruckten Bauteilen

Im Abschnitt 2.2.5 wurde bereits auf das verwendete Fertigungsverfahren und im Abschnitt 2.3.3 auf das verwendete Material eingegangen. Der dort beschriebene Effekt der Oberflächenspannung beim Ablegen einzelner Druckbahnen wirkt sich positiv auf die Oberflächenbeschaffenheit aus, allerdings kann kein vollständig glatter Übergang zwischen den Ebenen und Bahnen erreicht werden. Im Folgenden wird aufgezeigt, aus welchen Gründen eine Bearbeitung der Materialoberfläche an Wirkflächen erforderlich ist. In Abbildung 2.10 ist schematisch der Aufbau eines 3D-gedruckten Bauteils dargestellt.

Dargestellt sind die abgelegten Schichten in der XZ-Ebene. Wie bereits beschrieben (siehe 2.2.5), ist eine Verbindung zwischen dem extrudierten heißen Material und dem bereits abgekühlten Bauteil nur zufriedenstellend, wenn Parameter, wie das extrudierte Volumen und die Oberflächenspannung, aufeinander abgestimmt sind. Bei Abweichungen von den vorgegebenen Parametern, z.B. aufgrund von Materialfehlern oder unerwarteten Temperaturschwankungen, kann es zu Lücken im Schichtaufbau kommen. Zudem kann keine glatte Außenfläche erzeugt werden. Die Welligkeit an der Bauteiloberfläche steht im direkten Zusammenhang mit der gedruckten Schichtdicke.

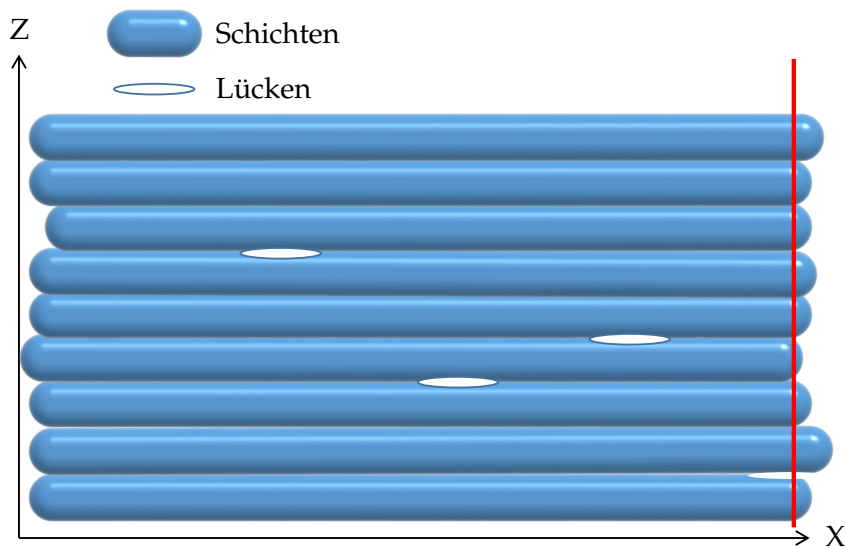


ABBILDUNG 2.10: Schematische Darstellung der Fehlstellen eines 3D-gedruckten Bauteils

Das schichtenbasierte Extrudieren erfordert, dass jeder Strang mindestens einen Anfang und ein Ende aufweist. Das Aufeinandertreffen beim Schließen der Kontur erzeugt eine Fehlstelle, welche zusätzlich durch das Ein- und Ausfahren des Druckkopfes verstärkt wird. Der so auftretende Defekt kann in Anlehnung an den „An-guss“ beim Spritzgießen „Andruck“ genannt werden und ist in Abbildung 2.11 gezeigt. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn der Andruck bei jeder Schicht an der gleichen Position liegt.



ABBILDUNG 2.11: Andruck und Welligkeit beim Extrusionsverfahren [73]

2.3.6 Verfahren für die Nachbearbeitung der Materialoberfläche von ABS

Für ein druckdichtes Bauteil ist es erforderlich, diese Lücken zwischen den Bahnen zu schließen. Hierfür sind drei Verfahren als Postprozess denkbar.

- Verfahren 1: Da alle FDM-Systeme thermoplastisches Material verwenden, ist es denkbar, dieses nach dem Erstarren wieder zu erwärmen und so Bereiche

mit Bindenähten neu zu vernetzen und Lücken zu schließen. ABS besitzt eine Glasübergangstemperatur von 100 °C [195]. Daher muss die Oberfläche des Bauteils auf mindestens diese Temperatur erwärmt werden, um eine Neuvernetzung zu erreichen. In [1] wurde die thermische Glättung, bei der eine Reduktion der mittleren Rautiefen von bis zu 88 % erreicht wurde, untersucht. Es wurde weiterhin gezeigt, dass der Luftstrom zum lokalen Aufschmelzen des Kunststoffes und zu Abträgen an diesen Punkten führt.

- Verfahren 2: Das Bauteil kann mit einem Material beschichtet werden, welches sowohl die Lücken, als auch die Täler der welligen Oberflächenstruktur schließt. ABS zeichnet sich durch Galvanisierbarkeit aus. Über einen Beizvorgang können die Butadienpartikel der Oberfläche gezielt entfernt werden und bilden so eine mechanische Verankerung für elektrochemisch aufgetragene Kupfer- und Nickelschichten [15, 195]. Bei diesem Verfahren wird allerdings die Welligkeit der Oberfläche nur bedingt reduziert. Farben und Lacke können aufgrund ihrer Oberflächenspannung die Welligkeit ausgleichen und Löcher schließen, benötigen jedoch zumeist ein Lösungsmittel, um mit der Oberfläche eine Verbindung eingehen zu können.
- Verfahren 3: Statt ein Füllmaterial über ein Lösungsmittel mit der Bauteiloberfläche zu verbinden, ist es möglich, die Bauteiloberfläche direkt mit einem Lösungsmittel so weit zu erweichen, dass es zum Fließen des Materials kommt. Aufgrund von Oberflächenspannung und Gravitation werden nun die Berge abgebaut und füllen die Täler und Lücken der Oberfläche auf. Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche des Bauteils mit dem Lösungsmittel in Kontakt gebracht. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann das Bauteil in eine mit Lösungsmittel gesättigte Atmosphäre gebracht werden und zum anderen direkt in das Lösungsmittel getaucht werden. Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, geht das Lösungsmittel keine chemische Reaktion mit dem Kunststoff ein und desorbiert von der Oberfläche. [15]

Der Einsatz von Lösungsmitteln für die Nachbearbeitung der Oberfläche wurde als Verfahren gewählt, da hierbei kein zusätzliches Material dauerhaft appliziert werden muss. Dass für Bauteile aus Kunststoff (wie ABS) die Oberflächenqualität durch Nachbehandlung mit Lösungsmitteln beeinflusst werden kann, wurde bereits mehrfach untersucht [15, 70, 71, 74]. Eine Begründung der Auswahl eines Lösungsmittels und die Erläuterung der Wirkungsweise erfolgte in Abschnitt 2.3.4. Für diese Nachbearbeitung sind die Prozessparameter und der Einfluss auf die Materialkennwerte, insbesondere für das hier verwendete ABS-P430, unbekannt.

2.3.7 Metallische, keramische und andere Werkstoffe

Neben den beschriebenen, rein auf Kunststoff und -blends basierenden Druckmaterialien, ist es auch möglich, andere Werkstoffe zu drucken. Es muss zwischen *Design-* und *Funktionswerkstoffen* unterschieden werden. Designwerkstoffe werden wie folgt beschrieben: „Mit ein wenig Nachbearbeitung wird aus dem unscheinbaren Druckmaterial ein zum Verwechseln [sic] ähnliches Metallobjekt. Sowohl das Aussehen als auch die Haptik und das Gewicht erinnert an echtes Metall.“ [149].

Für das *Rapid Manufacturing* besitzen diese Werkstoffe eine untergeordnete Rolle. Für das Drucken von Funktionswerkstoffen wie Metall und Keramiken im FDM-Verfahren gibt es nach derzeitigem Kenntnisstand nur die Möglichkeit des CEM-Verfahrens (Composite Extrusion Modeling). Bei diesem Verfahren werden Spritzgussgranulate im 3D-Drucker aufgeschmolzen und verarbeitet. Zu diesen Granulaten gehören die MIM- und CIM-Materialien (englisch für Metal- bzw. Ceramic-Injection-Molding), welche aus dem klassischen Spritzguss bekannt sind. Bei diesen Materialien werden feine Metall- oder Keramikpulver mit einem organischen Binder vermischt. Nach dem Formgebungsprozess, der hier im 3D-Drucker geschieht und im Spritzgussverfahren üblich ist, wird der Binder entfernt und das Bauteil gesintert. Ein Ausblick auf die Verwendung dieser Materialien wird in Kapitel 8 gegeben. [121, 122]

Bei dem CEM-Verfahren ist es auch möglich, gefüllte Kunststoffe zu drucken. Als Füllstoffe sind hier Glas-, Mineral- und Carbonfasern möglich. Allerdings können dies aufgrund der Granulierung nur Kurzfasern sein. Das Drucken von Endlosfasern ist möglich, indem Faserfilamente in der Düse mit aufgeschmolzenem Kunststoff ummantelt und dann abgelegt werden. Weiterhin sind Materialrollen mit eingebetteten Fasern auf dem Markt erhältlich. Der Faservolumengehalt der so gefertigten Materialien liegt bei unter 30 % und erreicht damit noch nicht den der industriellen Faserverbundhalbzeuge von bis zu 70 %. [2, 120, 185]

Da alle diese Materialien auf einem thermoplastischen Binderstoff basieren, wird zum Nachweis der Umsetzbarkeit von 3D-gedruckten hydraulischen Spannbuchsen von der Verwendung der genannten Materialien abgesehen.

Kapitel 3

Überblick zur Modellierung von Reibkontakten

3.1 Einführung in die Reibungsvorgänge

Reibungsvorgänge sind neben der Verschleißproblematik Bestandteil der Tribologie. Der Begriff *Tribologie* wurde unter der Berücksichtigung des interdisziplinären Zusammenwirkens von Physik, Chemie, Werkstoffwissenschaften und Ingenieurdisziplinen geschaffen und durch Erkenntnisse der Computertechnik und Nanotechnik erweitert. [31, 207]

Nach [31] kann der Kontaktvorgang in atomare, molekulare Wechselwirkungen und in mechanische Wechselwirkungen getrennt werden. Bei den hier vorliegenden Festkörper/Festkörper-Grenzflächen handelt es sich bei atomaren und molekularen Wechselwirkungen um Adhäsion. Mechanische Wechselwirkungen entstehen beim Kontakt von zwei Oberflächen infolge der Mikrogeometrie technischer Oberflächen. Unter Einwirkung einer Normalkraft kommt es hier zu diskreten Mikrokontakten, was zu Mikrodeformation führt. Daher muss zwischen einer geometrischen oder nominellen Kontaktfläche und der meist erheblich kleineren realen Kontaktfläche unterschieden werden.

Die Art der Reibung eines tribologischen Systems wird mittels der Stribeckkurve eingeteilt. Bei dem hier zu betrachtenden Fall soll keine Relativbewegung zwischen den beiden Reibpartnern stattfinden, daher wird nur der Fall der Haftreibung betrachtet.

Da jeder Reibungsvorgang einen Energieaufwand erfordert, kann aus physikalischer Sicht eine Energiebilanz aufgestellt werden. Im Folgenden ist eine Übersicht über die Einzelprozesse der Reibung aufgelistet [31]:

I. Energieeinleitung

- Berührung technischer Oberflächen
- Bildung der wahren Kontaktfläche
- Mikrokontaktflächenvergrößerung (junction growth)
- Delamination von Oberflächen-Deckschichten
- Grenzflächenbindung und Grenzflächenenergie

II. Energieumsetzung

- Deformationsprozesse (mikroskopisch/atomar und makroskopisch)
- Adhäsionsprozesse (führen erst bei einer Relativbewegung zu einer Energieumsetzung durch das Trennen adhäsiver Bindungen)
- Furchungsprozesse (Deformation)

III. Energiedissipation

(a) Thermische Prozesse (makroskopisch)

- Erzeugung von Wärme (mechanisches Wärmeäquivalent)

(b) Energieabsorption

- Photonen-/Elektronenanregungen
- Elastische Hysterese
- Gitterdeformationen
- Erzeugung und Wanderung von Punktfehlern und Versetzungen
- Ausbildung von Eigenspannungen
- Mikro-Bruchvorgänge
- Phasentransformationen
- Tribochemische Reaktionen

(c) Energieemission

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung
- Schwingungsausbreitung/Photonenemission
- Schallemission
- Photonenemission (Tribolumineszenz)
- Elektronen- und Ionenemission

Diese genannten Prozesse sind experimentell festgestellt worden und können an der beobachteten Reibung beteiligt sein. Die Reibungsmechanismen können vereinfacht in:

- Adhäsion und Scheren
- Plastische Deformation
- Furchung
- Elastische Hysterese (Dämpfung)

eingeteilt werden und sind in der Übersicht in Abbildung 3.1 dargestellt.

Polymer-Stahl-Paarungen sind vielfach in Gleitlagern zu finden, welche ungeschmiert und wartungsfrei sind. Das Reibungs- und Verschleißverhalten bei diesen Paarungen hängt vor allem von den wirkenden Kräften und der Rauheit des Stahlpartners ab. [31]

Da bei Gleitlagern die Eigenschaften unter einer Relativbewegung der Reibpartner entscheidend sind, sind in der Literatur keine detaillierten Untersuchungen zur Reibung ohne Relativbewegung zu finden. Allerdings können aufgrund der Erkenntnisse aus Untersuchungen der Gleitreibung Aussagen zu den vereinfachten Reibungsmechanismen getroffen werden.

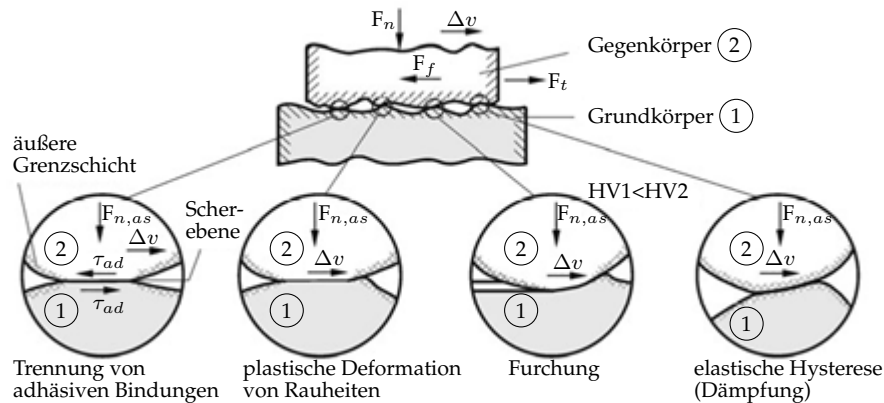


ABBILDUNG 3.1: Grundlegende Reibungsmechanismen bei mikroskopischer Betrachtungsweise nach [175]

Adhäsion und Scheren treten besonders im Zusammenhang mit den Oberflächenenergien der Reibpartner auf. Besonders bei metallischen Gleitpaarungen kann es bei Mangelschmierung oder Überbeanspruchung zum so genannten „Fressen“ aufgrund von Adhäsion kommen. Für Kunststoff/Kunststoff-Paarungen ist es möglich, die Reibungszahl direkt aus der Kenntnis der polaren und dispersen Oberflächenenergieanteile der Gleitpartner zu berechnen. Bei Kunststoff/Metall-Paarungen ist der Einfluss der Adhäsion geringer. [31]

Grund für die Adhäsion kontaktierender Festkörper sind Wechselwirkungskräfte auf atomarer Ebene und chemische Bindungen. Diese sind ebenfalls für den Zusammenhalt im Inneren der festen Körper verantwortlich und lassen sich in (starke) Hauptvalenzbindungen und (schwache) Nebervalenzbindungen einteilen. Einige Arten dieser Bindungen, wie Atom- und Van-der-Waals-Bindungen, treten beim Metall/Polymer-Kontakt auf, andere, wie die metallische Bindung, sind aufgrund der fehlenden freien Elektronen nicht anzutreffen. [23, 30, 32]

Die **plastische Deformation** tritt beim Kontakt mit einer tangentialen Relativbewegung auf und führt zum Energieverlust durch dissipative Prozesse. Die Theorien hinter diesen Betrachtungen beruhen zumeist auf der Annahme ideal-plastischer Körper. Da beim Metall/Kunststoff-Kontakt zwei Körper mit unterschiedlicher Härte aufeinandertreffen, ist dieser Effekt zu vernachlässigen und stattdessen die Furchung zu betrachten.

Furchung tritt beim Eindringen einer Oberfläche in einen weicheren Gegenkörper auf. Dass dieser Effekt erheblich zum Reibwiderstand beitragen kann, wurde von Gümbel im Jahr 1925 untersucht [31, 82].

Zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Erzeugung der Reibkomponente sind bekannt. Zum einen ist es die direkte Furchung der Rauheitsspitzen eines Reibpartners in den anderen (*Gegenkörperfurchung*), zum anderen die Furchung durch eingebettete Verschleißpartikel (*Teilchenfurchung*). Beide Modelle sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

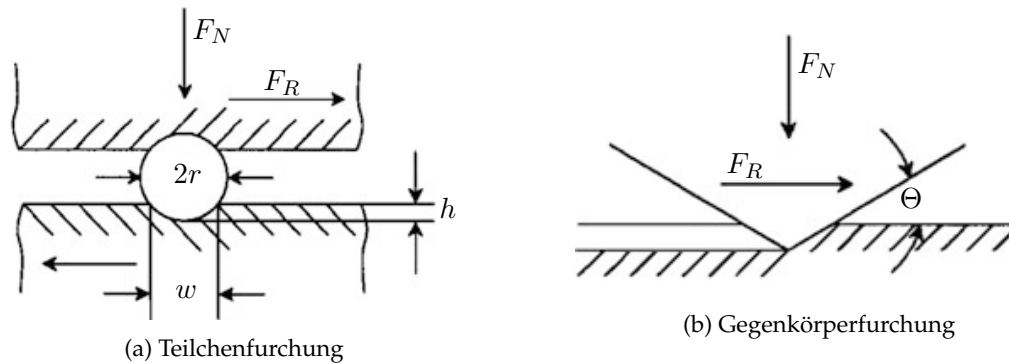


ABBILDUNG 3.2: Auswahl von Modellen der Furchungskomponente der Reibung [31]

Diese Modelle müssen zusammen betrachtet werden, da es bei der Gegenkörperfurchung zu Materialanhäufungen vor dem furchenden Rauheitshügel kommt, was zu Effekten der Teilchenfurchung führt. Weitere Modelle beziehen sich auf die Furchung von spröden Materialien mit Mikrobruchvorgängen und die Möglichkeit der Furchung doch eingebettete Verschleißpartikel. [31]

Bei der **elastischen Hysterese und Dämpfung** handelt es sich um Vorgänge der Energiedissipation, also um einen Vorgang, bei dem die mechanische Bewegungsenergie in eine andere Energieform überführt wird. Der größte Teil der Energie wird in Wärme umgeformt. Neben der Weiterleitung dieser Reibungswärme findet eine Energieabsorption und eine Energieemission (Schall-, Photon-, Elektronen- und Ionenemission) statt.

3.2 Klassische Reibungsgesetze

Die ersten Aufzeichnungen zur Reibung stammen von *Leonardo Da Vinci* (1452-1519). Er stellte die Unabhängigkeit der Größe der Kontaktfläche und die Abhängigkeit von der Normalkraft für die Reibung fest. Dieser Zusammenhang geriet in Vergessenheit und wurde 1699 von *Guillaume Amontons* (1663-1705) wiederentdeckt und veröffentlicht [139].

Leonhard Euler (1707-1783) verwendete erstmals den griechischen Buchstaben μ für den Reibungskoeffizienten [60]. In den Aufzeichnungen von *Charles Augustin de Coulomb* (1736-1806) aus dem Jahr 1785 wird erstmals zwischen der statischen und der kinetischen (auch dynamischen) Reibkraft unterschieden. Die statische Reibkraft ist erforderlich, um den Gleitvorgang zu initiieren. Die dynamische Reibkraft ist zum Erhalten des Gleitens erforderlich. Er stellte fest, dass die Reibkraft während des Gleitens nahezu unabhängig von der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner ist. Daraus ergibt sich das bekannteste Modell der Reibung für den eindimensionalen Fall für das Haften mit dem statischen Reibungskoeffizienten μ^{st} :

$$|\vec{F}_{st}| \leq \mu^{st} \cdot |\vec{F}_N| \quad (3.1)$$

und für das Gleiten mit der skalaren Relativgeschwindigkeit v und dem konstanten dynamischen Reibungskoeffizienten μ^{dyn} :

$$\vec{F}_{dyn} = -\mu^{dyn} \cdot \left| \vec{F}_N \right| \cdot \text{sign}(v) \quad (3.2)$$

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.3 dargestellt und wird, obwohl es auf alle in diesem Abschnitt bisher genannten Urheber zurückgeht, als Coulombsches Reibungsgesetz bezeichnet. [27, 169]

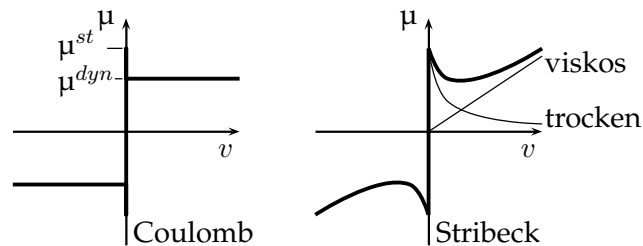


ABBILDUNG 3.3: Klassische Idealisierung der Reibung [169]

In [63] wird gezeigt, dass über die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibungskoeffizienten von vielen Autoren berichtet wurde. Im Zusammenhang mit der Untersuchung von geschmierten Lagern wird sich besonders oft auf die Forschung von Richard Stribeck (1861-1950) bezogen. Dieser beschreibt den Übergang von Trockenreibung auf Flüssigkeitsreibung. Stribeck beschreibt den Verlauf der Reibkraft in Zusammenhang mit der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner im Falle der hydrodynamischen Reibung. Findet keine Geschwindigkeitsänderung statt, kann auch hier die Gleichung 3.1 als Näherung verwendet werden. [169, 179]

3.3 Bedeutung der räumlichen Dimension bei Kontaktproblemen

Ein Ansatz der vorliegenden Arbeit ist es, die Dimension des Kontaktproblems zu reduzieren. Der Grad der Dimension sollte nach Möglichkeit von drei auf eins reduziert werden - bei Beibehaltung der wichtigen Eigenschaften. Eine Vielzahl von Kontaktproblemen lässt sich mit eindimensionalen Modellen abbilden, deren Ergebnisse mit dem des dreidimensionalen Originals exakt übereinstimmen [76, 138].

„Nach dieser Abbildung werden die Lösungen kontaktmechanischer Probleme solchermaßen trivialisiert, dass zu ihrer Durchführung keine speziellen Kenntnisse erforderlich sind außer Grundkenntnissen der Algebra und der Analysis.“ [138]

In der folgenden Abbildung 3.4 sind grundlegende Modelle für das dreidimensionale Kontaktproblem genannt und im anschließenden Abschnitt diese kurz beschrieben.

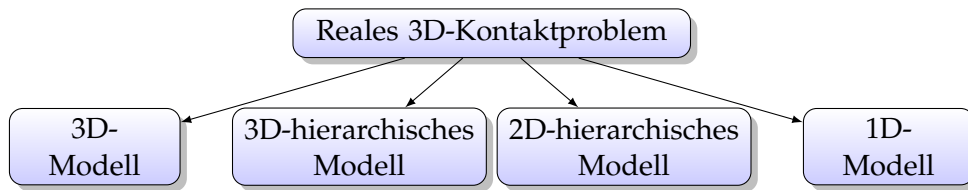


ABBILDUNG 3.4: Modelle zur Simulation des dreidimensionalen Kontaktproblems. Angelehnt an [76]

- **3D-Modell**

Es ist möglich, ein vollständiges Modell mittels der Finite Elemente Methode (FEM) zu erzeugen. Hierfür ist es erforderlich, dass das gesamte Volumen diskretisiert wird. Im einfachsten Fall hat jeder Knoten der erzeugten Elemente drei Freiheitsgrade. Für die Betrachtung des Kontaktes rauer Oberflächen ist eine sehr feine Vernetzung an der Oberfläche erforderlich. In Abhängigkeit von der Oberflächentopologie sind Elementgrößen von bis zu 10 nm notwendig. Diese Methode besitzt mehrere Vorteile. So kann die Originaloberflächentopographie verwendet werden und Deformationen können an der Oberfläche sowie im Inneren des Körpers berechnet werden. Die Methode ist weit bekannt und eine große Anzahl von Rechenprogrammen ist auf dem Markt verfügbar. Allerdings benötigen diese eine sehr hohe Rechenzeit, was besonders bei numerischen Experimenten und Optimierungsrechnungen zu einem praktisch unmöglichen Rechenaufwand führt. [76]

- **3D-hierarchisches Modell**

Diese Modelle besitzen eine hierarchische Anordnung der Teilchen, wie sie z.B. bei Feder-Masse-Modellen mit ausschließlich vertikalen Freiheitsgraden verwendet werden. Die Beschränkung auf vertikale Freiheitsgrade gewährleistet einen relativ geringen Gesamtfreiheitsgrad bei gleichzeitiger feiner Diskretisierung der Oberfläche im Vergleich zum FE-Modell. Auch hier kann die Originaloberflächentopographie genutzt und alle Deformationen berechnet werden. [76]

- **2D-hierarchisches Modell**

Zweidimensionale Modelle verzichten auf den Freiheitsgrad in Dickenrichtung. Es ist notwendig, die gemessene zweidimensionale Oberflächentopographie auf eine eindimensionale umzurechnen. [76]

- **1D-Modell**

Bei eindimensionalen Modellen sind die Teilchen entlang einer Linie angeordnet. Eine Umrechnung von gemessenen zweidimensionalen Oberflächentopographien ist erforderlich. Der größte Vorteil dieses Modells ist die geringe Rechenzeit. [76]

3.4 Auswahl einer geeigneten Simulationsmethode

Für die Untersuchung der Problemstellung ist es erforderlich, die Strukturen in ein Modellkontinuum entsprechend der Elastizitätstheorie zu überführen. Das Reibverhalten der Werkstoffpaarung muss dazu mit einem Gesetz erfasst werden, um auf der Modelloberfläche beschrieben zu werden. Wenn die Fläche des Kontaktbereiches gegenüber der Oberflächenrauheit ausreichend groß ist, kann das Reibverhalten als homogen angesehen werden [88]. Da sich die Betrachtung nicht auf Mischreibungszustände bezieht, ist auch keine Betrachtung der rauen Oberfläche erforderlich [76]. Bei dem Modell der hydraulischen Spannbuchse, welches in Abschnitt 5.1.1 beschrieben wird, handelt es sich um eine komplexe Geometrie, welche als CAD-Modell vorliegt. Die Reibflächen selber sind im Vergleich einfacher aufgebaut und haben die Form von Zylindermantelflächen. Dies ermöglicht es, für die Berechnung ein 3D-FE-Modell mit einem 1D-Kontaktmodell für die Kontaktfläche zu verwenden. Des Weiteren ist ein FE-Modell erforderlich, da für die Auslegung hydraulischer Spannbuchsen und für die Analyse des Kontaktes mit den umgebenen Baugruppen deren Verhalten bestimmt werden muss. Eine analytische Betrachtung ist nur bei einfachen Geometrien möglich. Technisch umfangreiche Konstruktionen können aufgrund der Komplexität der Differentialgleichungssysteme nicht mit vertretbarem Aufwand in vollem Umfang analytisch bearbeitet werden. Das hier beschriebene Problem folgt, wie sich zeigen wird, den linear-elastischen Materialeigenschaften, jedoch sind diese aufgrund des in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Fertigungsverfahrens anisotrop. Zudem kommt es zur Verformung der hydraulischen Spannbuchse im Spalt zwischen Welle und Buchse beziehungsweise Buchse und Nabe.

Die Auswahl des geeigneten Modells für den Kontakt erfolgt im folgenden Abschnitt.

3.5 Modellierung des Kontaktes in ANSYS

Nach allgemeinem physikalischen Verständnis können sich Oberflächen fester Körper, die in Kontakt treten, nicht durchdringen. An diesen Oberflächen können Drucknormalkräfte und tangentialer Reibungskräfte übertragen werden. Hingegen können sie in der Regel keine Zugnormalkräfte übertragen und sich somit auch wieder voneinander lösen. Die Änderung des Kontaktstatus führt zu einer Steifigkeitsänderung des Systems, welches damit ein nicht lineares Problem darstellt.

Die Modellierung des Kontaktes erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird geprüft, ob ein symmetrisches oder asymmetrisches Berechnungsverfahren genutzt werden kann. Anschließend wird ein geeigneter Berechnungsalgorithmus ermittelt und als letzter Schritt werden zu diesem spezielle Anpassungen vorgenommen.

Standardmäßig wird in ANSYS ein symmetrisches Kontaktmodell bevorzugt. Hierbei muss keine besondere Überlegung getroffen werden, welche Fläche als Kontakt-

und welche als Zielfläche definiert wird. Bei einem symmetrischen Kontakt werden beide Seiten als Kontakt- und als Zielfläche vernetzt. Dies führt zu einer guten Lösung, allerdings bei verdoppeltem Rechenaufwand. [130]

Bei einem asymmetrischen Kontaktmodell, bei dem nur eine Seite als Kontaktfläche und die Gegenseite als Zielfläche vernetzt wird, ist somit der Rechenaufwand reduziert. Allerdings kann es zur Durchdringung der beiden Kontaktpartner kommen. Bei asymmetrischem Verhalten können die Knoten der Kontaktfläche nicht die Zielfläche durchdringen, je nach Position der Knoten kann jedoch die Zielfläche die Kontaktfläche durchdringen. Dieses Verhalten ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

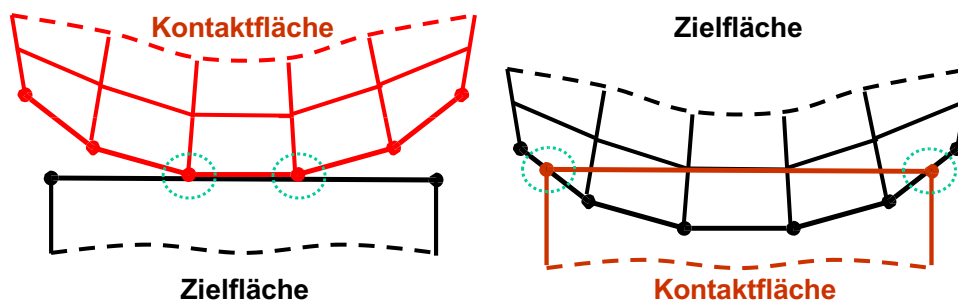


ABBILDUNG 3.5: Verhalten bei asymmetrischer Ziel- und Kontaktflächendefinition. Angelehnt an [6]

Es ist entscheidend, die richtige Auswahl der Kontakt- und Zielfläche zu treffen. Es sind in den ANSYS-Dokumentationen [5, 6] und Handbüchern [75, 88, 130] Regeln veröffentlicht worden, die auf das hier entstandene Problem Anwendung finden:

- die gröber vernetzte Seite sollte die Zielfläche sein, die fein vernetzte Seite die Kontaktfläche
- sind beide Kontaktflächen parallel, kann die Auswahl beliebig sein
- ist eine Fläche steifer als die andere, sollte die steifere die Zielfläche darstellen
- die größere Fläche sollte die Zielfläche sein
- die Fläche mit der höheren Wichtigkeit für die Analyse sollte die Kontaktfläche sein

Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, sollte eine symmetrische Definition verwendet werden. Da nicht alle der im Folgenden vorgestellten, in ANSYS hinterlegten Lösungsverfahren eine symmetrische Definition erlauben, sollten die Zielflächen die Flächen der Nabe und der Welle sein und somit die Kontaktflächen an der Hohlspannbuchse.

Um das Durchdringen von Körpern in der Simulation zu verhindern, müssen Beziehungen zwischen den Oberflächen hergestellt werden. Für die Berechnung des nichtlinearen Festkörperkontaktes von Flächen stellt ANSYS folgende vier Modelle zur Verfügung:

- Pure Penalty
- Augmented Lagrange
- Normal Lagrange
- Multi-Point Constraint (MPC)

Sowohl die Formulierungen nach dem *Augmented Lagrange*, als auch dem *Pure Penalty*-Verfahren verwenden einen Strafterm und basieren auf folgender Gleichung [6]:

$$F_{normal} = k_{normal} * x_{penetration} \quad (3.3)$$

Für die endliche Kontaktkraft F_{normal} gibt es ein Konzept der Kontaktsteifigkeit k_{normal} . Umso größer die Kontaktsteifigkeit ist, umso kleiner ist die Durchdringung $x_{penetration}$. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

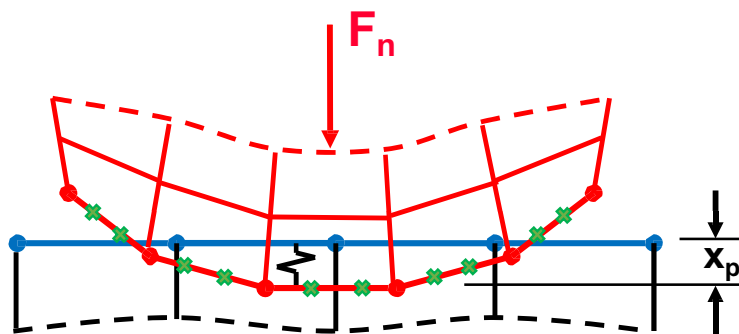


ABBILDUNG 3.6: Nichtlinearer Festkörperkontakt nach der *Pure Penalty* und *Augmented Lagrange* Formulierung. Angelehnt an: [6]

Für eine ideale Lösung müsste die Kontaktsteifigkeit einen unendlichen Wert annehmen, was zu einer Durchdringung von Null führt. Dies ist numerisch bei Straftermbasierten Verfahren nicht möglich. Allerdings sind die Ergebnisse dieser Gleichung zutreffend, wenn die Durchdringung vernachlässigbar klein ist. [5, 6]

Der Hauptunterschied zwischen dem *Pure Penalty* und dem *Augmented Lagrange*-Verfahren ist, dass beim *Augmented Lagrange*-Verfahren ein zusätzlicher Term eingeführt wird, der die Kontaktkraft modifiziert. Dies wird in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$F_{normal} = k_{normal} * x_{penetration} + \lambda \quad (3.4)$$

Der Term λ führt zu einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber der Größe der Kontaktsteifigkeit.

Als weitere Möglichkeit der Kontaktdefinition steht die *Normal Lagrange*-Methode zur Verfügung. Die *Normal Lagrange*-Methode ersetzt die Formulierung der Drucknormalkraft durch einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Dadurch ist die Kenntnis der Kontaktsteifigkeit nicht erforderlich und es wird erzwungen, dass keine Durchdringung stattfindet.

Als letzte Möglichkeit für die Kontaktdefinition steht das MPC-Verfahren zur Auswahl. Dieses ist nur für Probleme ohne Trennung oder dauerhaften Kontakt zwischen den Kontaktpartnern anwendbar und wird daher nicht betrachtet.

Für die Simulation wurde die *Normal Lagrange*-Methode gewählt, da hier der Einfluss der Kontaktsteifigkeit nicht untersucht werden muss [6]. Weiterhin wird die Durchdringung verhindert und muss damit nicht zusätzlich kontrolliert werden. Diese Auswahl weist die Einschränkung auf, dass der direkte Gleichungslöser verwendet werden muss, was die Modellgröße einschränkt. Es muss auf die Art und Weise der Detektierung des Kontaktes geachtet werden. Das *Pure Penalty* und das *Augmented Lagrange*-Verfahren verwenden zusätzliche Stützstellen, um den Kontakt bzw. die Durchdringung zu ermitteln. Diese sind in Abbildung 3.6 durch die grünen Markierungen dargestellt. Die *Normal Lagrange*-Methode detektiert die Durchdringung nur an den Knotenpunkten. Aus diesem Grund wurde für die Einstellung des Kontakterkennens die Auswahl „Knoten - Normal zur Zielfläche“ gewählt. Die Durchdringung muss insbesondere beim Kontakt von gekrümmten Flächen und an Ecken beachtet werden, da es hier durch die Geometrieabstraktion durch den *Solver* zu Konflikten an den Oberflächen kommen kann. Die gewählte *Normal Lagrange*-Methode lässt nur eine asymmetrische Berechnung des Kontaktes zu. Daher wird die eingangs des Abschnittes beschriebene Zuordnung der Kontakt- und Zielfläche verwendet.

Das in ANSYS an den Knoten hinterlegte Reibungsmodell kann Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von Temperatur, Zeit, Normalkraft, Gleitstrecke und anhand der relativen Gleitgeschwindigkeit verwenden [5]. Da diese Abhängigkeiten für die vorliegende Materialpaarung zunächst unbekannt sind, wird entsprechend dem Coulombsche Reibungsmodell eine Konstante verwendet und der Kontaktstatus für jeden Knoten ermittelt.

Kapitel 4

Materialkennwerte und deren Bestimmung

4.1 Bestimmung von Materialkennwerten und deren Normung

Für die verschiedenen Werkstoffe existieren spezifische Normen zum Ermitteln der Materialkennwerte. Im Folgenden sind einige Normen aufgeführt, um Kennwerte im Zugversuch zu ermitteln.

- Metalle: ISO 6892-1, ASTM E 8, ASTM E 21, DIN 50154 [13, 14, 38, 52]
- Kunststoffe: ISO 527-1/2/3, ASTM D 638 [12, 47–49]
- Faserverstärkte Verbundwerkstoffe: ISO 527-4/5, ISO 14129, EN 2561/2597, ASTM D 3039/D3039M [7, 41–43, 50, 51]
- Weichelastische Schäume: ISO 1798, ASTM D 3574 [9, 44]
- Hartschäume: ISO 1926, ASTM D 1623 [8, 92]
- Gummi: ISO 37, ASTM D 412, DIN 53504 [11, 39, 93]
- Fasern und Filamente: ISO 5079, ASTM D 3822 [10, 46]

Keine dieser Normen wurde mit dem Hintergrund geschrieben, 3D-gedruckte Materialien zu prüfen.

Mit dem Einfluss der Anisotropie beim 3D-Druck auf das Werkstoffverhalten haben sich bereits mehrere wissenschaftliche Arbeiten beschäftigt. In [4, 205] wurde festgestellt, dass die Ausrichtung der Schichten einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat und dass eine unidirektionale Schichtung in Zugrichtung die größte Belastbarkeit begünstigt. Außerdem wurden Untersuchungen über Einflüsse von Luftspalten und verschiedenen Schichtdicken durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass auch ein Einfluss auf mechanische Kennwerte besteht [167].

Die Materialkennwerte des verwendeten ABS-P430 sind im Datenblatt des Herstellers genannt [176] und zusätzlich in [28] bestätigt. Die Materialprüfungen wurden hierfür nach der ASTM D638 und D790 durchgeführt. Allerdings sind in den Normen der American Society for Testing and Materials (ASTM) und des Deutschen

Instituts für Normung (DIN) für die Materialprüfung additive Fertigungsverfahren nicht berücksichtigt. Unter Leitung der Internationalen Organisation für Normung (ISO) und in Zusammenarbeit mit dem ASTM wurde im Januar 2017 die DIN EN ISO/ASTM 52900 „Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie“ als erste Norm, die sich auf den 3D-Druck bezieht, veröffentlicht [53]. Die Veröffentlichung weiterer Normen, besonders in Bezug auf die Materialeigenschaften, steht zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit aus. Unter der ISO, deren Mitglied die DIN ist, wurden bis zu Beginn des Jahres 2019 neun Normen mit Bezug zum 3D-Druck veröffentlicht. Allerdings sind diese auf Begriffsdefinitionen und allgemeine Prinzipien beschränkt. Weitere Normen sind in der Entwicklung. [95, 132, 201]

Bei der Nennung von Normen in dieser Arbeit wird jeweils nur die höchste Normungsorganisation zusammen mit der Dokumentennummer genannt, da alle untergeordneten Institutionen diese anerkennen. Beispiel: DIN EN ISO 527-1 wird zu ISO 527-1.

Die zum Beginn des Abschnitts genannten Normen sind nicht zur Prüfung 3D-gedruckter Proben geeignet, da keine Festlegung zur Orientierung der Druckbahnen in jeder Schicht existiert. Die Geometrien der Probekörper sind mit den meisten AM-Verfahren verfahrensbedingt nicht wie in den Normen gefordert herstellbar. Im folgenden Abschnitt wird daher auf diese Problematik näher eingegangen und eine mögliche Probengeometrie für das hier verwendete Drucksystem und Material gezeigt.

4.1.1 Probekörpergeometrie und Vorgehen

Ziel ist es, eine Probengeometrie zu finden, welche es erlaubt, die Materialeigenschaften zu ermitteln. Diese muss für das hier verwendete AM-System geeignet sein und sicherstellen, dass alle gedruckten Bahnen parallel oder senkrecht zur Zugrichtung angeordnet sind.

Die ISO 527 - Teil 1-3 kennt für die Zugprüfung von Kunststoffen den Vielzweckprobekörper 1A, welcher in der Abbildung 4.1 dargestellt ist.

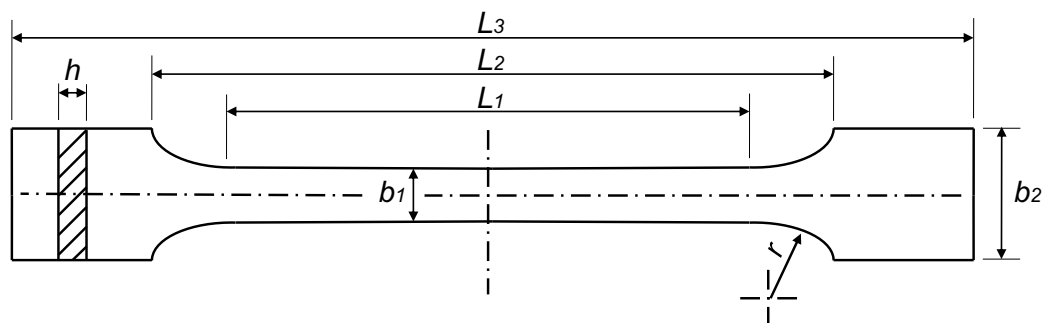


ABBILDUNG 4.1: Probekörper 1A nach ISO 527-2 [48]

Es existieren drei grundsätzlich mögliche Orientierungen, um diese Geometrie im Bauraum eines 3D-Druckers herzustellen. Diese sind in Abbildung 4.2 in Anlehnung an DIN 52921 dargestellt.

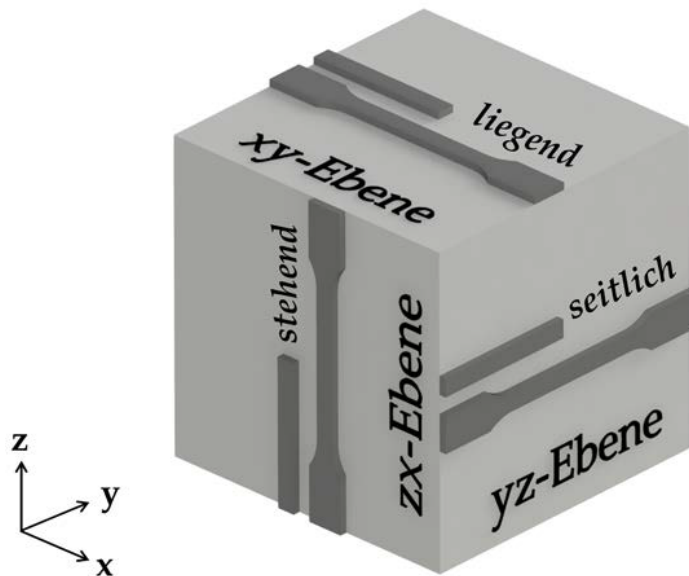


ABBILDUNG 4.2: Ebenen und Bauteilausrichtung im 3D-Raum in Anlehnung an ISO/ASTM 52921 [26, 54]

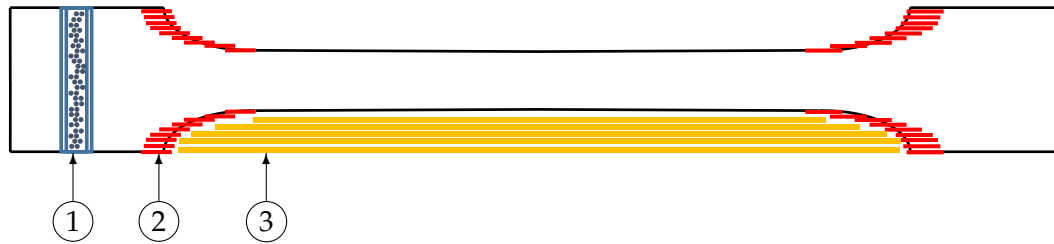
- Orientierung 1 - parallel zur XY-Ebene: Hierbei besteht ein großflächiger Kontakt zwischen der Bauteilplattform und dem zu druckenden Bauteil bei FDM-Systemen. Es kann ein Effekt auftreten, welcher als *Warp* bezeichnet wird. Das *Warping* entsteht durch ungleichmäßig verteilte Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeiten in den einzelnen Schichten und äußert sich durch gekrümmte Bauteile oder verbogene Randbereiche besonders in den unteren Lagen eines Bauteils. Hauptursache ist hier das Schrumpfen des Kunststoffes aufgrund seiner thermischen Eigenschaften. Bei Materialien mit einer hohen Drucktemperatur, zu dem ABS zählt, tritt dieser Effekt verstärkt auf. [100, 152, 192]

Zusätzlich wird die Oberfläche des Probekörpers, die in Kontakt mit dem Druckbett steht, beeinträchtigt. Die abgelegten Bahnen sind, im Vergleich zu den an der Oberseite gedruckten, stärker abgeflacht und weisen eine geringere Welligkeit auf. Da dies großflächig und nur einseitig geschieht, ist eine so hergestellte Probe für die Ermittlung der Kennwerte nicht geeignet.

- Orientierung 2 - parallel zur YZ-Ebene: Bei dieser Orientierung wird die Probe von einer Seitenfläche ausgehend aufgebaut. Schematisch ist dies in Abbildung 4.3 dargestellt.

Der Kontakt zur Bauplattform wird verringert. Jedoch treten bei Radien in Z-Richtung Treppeneffekte (2) auf. Diese sind durch die Schichtbauweise bedingt und besitzen eine Kerbwirkung. Die Verrundungen auf der ursprünglichen Probengeometrie, die die Kerbwirkung verringern sollen, führen nun zu einer Verstärkung der Kerbwirkung.

Es können nur Überhänge bis zu einem vom System und Material abhängigen Winkel gedruckt werden. Das hier eingesetzte System erlaubt Überhänge bis



- ① Schnitt mit Deckschicht und Füllmaterial ② Treppenstruktur ③ Füllmaterial

ABBILDUNG 4.3: Schematischer Aufbau eines ISO 527 Prüfkörpers 1A als 3D-Druck

zu einem Winkel von 43° . Bei einem größeren Winkel kann das Bauteil nicht gedruckt werden, oder es müssen zusätzliche Stützstrukturen ③ eingesetzt werden. Diese müssen nach dem Druck vom Bauteil gelöst werden und beeinflussen an diesen Stellen die Oberfläche. Da die Stützstrukturen im Normalfall nur einseitig eingesetzt werden, entstehen unsymmetrische Bauteile.

Die Probendicke ist bei dieser Orientierung ein weiteres Problem. Die übliche Software für FDM-Systeme konturiert das Bauteil und füllt die inneren Bereiche auf. Das Auffüllen geschieht herstellerabhängig. Bei der eingesetzten Software von *Stratasys* wird das Bauteil in Abhängigkeit vom Maschinenkoordinatensystem mit $\pm 45^\circ$ Bahnen gefüllt. Dieser Winkel war zum Zeitpunkt der Probenherstellung nicht veränderbar. Mit einer neuen Version der Software wurde nach Abschluss der Versuche ein variabler Parameter eingeführt [178].

Stratasys empfiehlt, mit der geringstmöglichen Wanddicke zu drucken. Die Konturierung erfolgt mit zwei Druckbahnen und ist softwareseitig nicht steuerbar, was zu einer minimal druckbaren Wandstärke von vier Bahnen führt. Es ist möglich, dieses Verhalten mit entsprechender Software zu steuern, allerdings widerspricht dies der Wandstärkenempfehlung von *Stratasys* und steht für die Versuche nicht zur Verfügung. Es kann nur ein ganzes Vielfaches der Schichtdicke bei minimal vier Bahnen als Wandstärke eingesetzt werden. [172] Bei Einsatz dieser minimalen Wandstärke muss das spezielle Softwareverhalten zum Füllen dickerer Bauteile nicht betrachtet werden. Bei dem verwendeten FDM-System werden Schichtstärken von 0,33 mm gedruckt, was zu einer minimalen und zugleich Zielwandstärke von 1,32 mm für das eingesetzte System führt. Die Breite einer Bahn entspricht der Schichthöhe. Probekörper dürfen eine Wandstärke von 1,32 mm nicht über- oder unterschreiten.

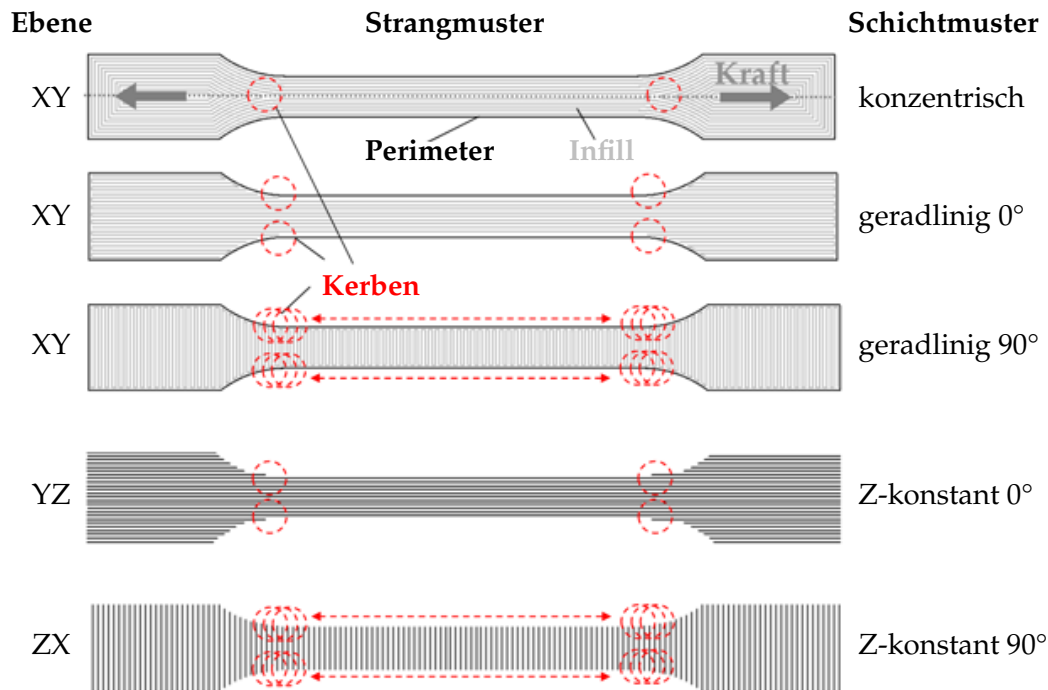


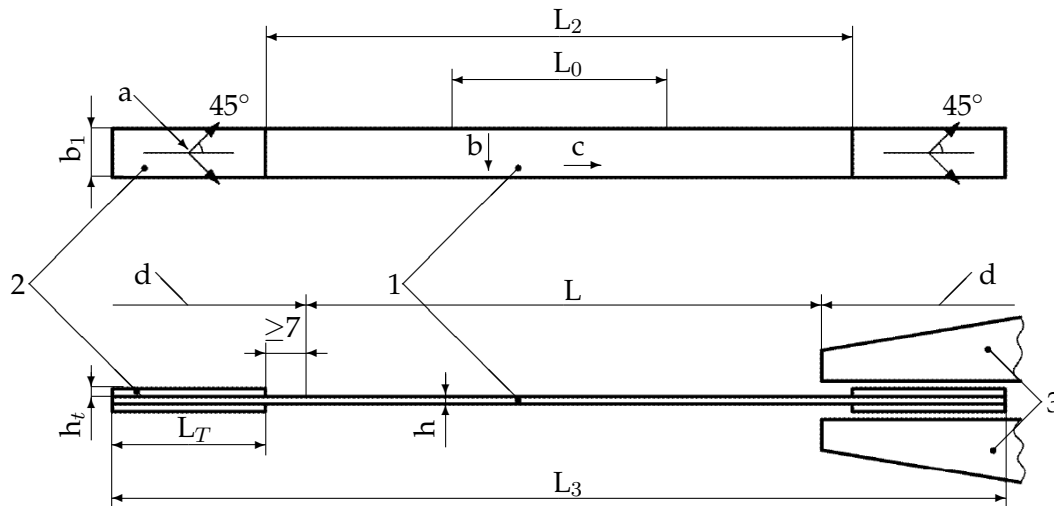
ABBILDUNG 4.4: Erzeugung unidirektionaler Strangmuster im Zugstab Typ 1A in Abhängigkeit des Füllmusters und der Bauteilorientierung nach [26]

- Orientierung 3 - parallel zur XZ-Ebene: Die Probe wird senkrecht stehend auf der schmalen Seitenfläche der Krafteinleitungselemente (KEE) gedrückt. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus ist diese Orientierung die einzig mögliche, um Probekörper für die Ermittlung der Materialeigenschaften senkrecht zu den Druckbahnen zu fertigen. Die Herausforderungen für diese Orientierung werden im späteren Verlauf dieses Abschnittes beschrieben.

In Abbildung 4.4 sind weitere übliche Probenausrichtungen und Füllmuster für die Zugproben vom Typ 1A dargestellt.

In anderen Veröffentlichungen zu den mechanischen Eigenschaften wurde gezeigt, dass die Festigkeit bei unidirektionaler Bahnorientierung entlang der beanspruchten Kraftrichtung zu maximalen Kennwerten führt. Zudem konnte gezeigt werden, dass Bauteile ohne Lufteinschlüsse höhere Festigkeitskennwerte erreichen. [80, 164, 198] Es ist zu schlussfolgern, dass der Vielzweckprobekörper 1A nach ISO 527 Teil 1-3 und geometrisch ähnliche Probekörper für den 3D-Druck mit dem eingesetzten AM-System und für die Ermittlung der Materialeigenschaften nicht geeignet sind. Für faserverstärkte Kunststoffe sieht die ISO 527 Teil 4/5 eine Probengeometrie vor, welche keine Verrundung aufweist. Sie ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Diese Probekörper sind für die Prüfung von unidirektionalen verstärkten Kunststoffen vorgesehen. Aufgrund der geringen relativen Bruchdehnung sind diese Proben größer als der Vielzweckprobekörper 1A. Wegen der hohen Elastizitätsmoduln faserverstärkter Kunststoffe ist der Querschnitt reduziert. Um die Faserausrichtung nicht zu beeinträchtigen, sind die Krafteinleitungselemente genauso breit wie der Prüfbereich. Um die Krafteinleitung durch die Klemmbacken zu homogenisieren



- 1 Probekörper
 2 Krafteinleitungselement (KEE)
 3 Klemmbacken
 a Orientierung des Krafteinleitungsmaterials
 b Faserrichtung in Probekörper Typ B
 c Faserrichtung in Probekörper Typ A
 d Klemmeneinheit

ABBILDUNG 4.5: Probekörper A und B nach DIN EN ISO 527-5 [51]

und Schäden an den Fasern zu verhindern, werden KEE eingesetzt. Der Probekörper Typ A ist für die Prüfung parallel zur Faserrichtung und der Probekörper Typ B für die Prüfung senkrecht zur Faserrichtung vorgesehen. [51]

Die Maße der Probekörper Typ A, B und 1A werden in Tabelle 4.1 gezeigt.

Typ	A	B	1A	A_{3D}	B_{3D}
L_3	Gesamtlänge		250	140	150
L_2	Abstand der KEE		150 ± 1	-	$\equiv L_1$
L_1	paralleler Teil		$\equiv L_2$	80 ± 2	90
b_1	Breite		$15 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
h	Dicke		$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$
L_T	Länge der KEE		>50	$30,35 \pm 1,6$	30
H_T	Dicke der KEE		0,5 bis 2	-	1,32

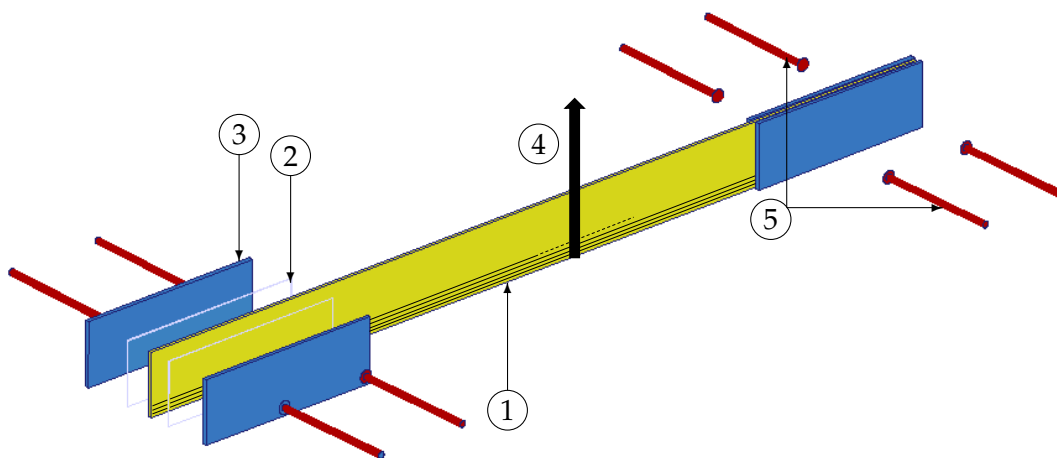
 TABELLE 4.1: Maße der Probekörper nach ISO 527 für die Proben Typ A, B und 1A sowie die angepassten Maße Typ A_{3D} und B_{3D}

Die für Proben aus dem 3D-Druck gewählten Maße kombinieren die äußere Form der Proben Typ A, B mit den Maßen der Probe 1A. Grundsätzlich ist es auch möglich, direkt die Proben vom Typ A/B zu verwenden, jedoch sind diese für den Bauraum des verwendeten FDM-Systems zu groß. Zudem sind geringere Kräfte und höhere Dehnungen zu erwarten, was es erlaubt, kürzere Proben zu verwenden.

Die für die Probekörper A_{3D} und B_{3D} gewählten Maße sind in Tabelle 4.1 zu finden. Die Geometrie A_{3D} wird für die Proben mit der Druckrichtung parallel zur

Zugrichtung verwendet und die Geometrie B_{3D} für die Proben mit der Druckrichtung senkrecht dazu. Diese Geometrie wurde auf Basis des parallelen Teils des Probekörpers A1 erstellt. Die Abschnitte mit den Rundungen entfallen, was zu einer Gesamtlänge von 140 mm führt. Die Länge der KEE wurde beibehalten. Für die KEE wurde das gleiche Material wie für die Probekörper mit identischer Druckbahnausrichtung verwendet. Um die Zielwandstärke zu erreichen, wurde die Probendicke auf 1,32 mm (4-fache der Schichtdicke) festgelegt und ist damit mit der Dicke der Probe A vergleichbar. Die Höhe der Probe wurde auf ein Vielfaches der Schichtdicke vergrößert, was bei 31 Schichten zu einer Höhe von 10,23 mm führt.

Der Aufbau und die Orientierung der Probe im Druckraum ist in Abbildung 4.6 dargestellt.



- | | |
|--|-----------------|
| ① Druckbahn | ④ Druckrichtung |
| ② Klebeschicht | ⑤ Fügerichtung |
| ③ Krafteinleitungselemente (Aufleimer) | |

ABBILDUNG 4.6: Aufbau eines 3D-gedruckten Prüfkörpers vom Typ A_{3D}

Für die Proben wird die Orientierung 2 verwendet. Es besteht über die gesamte Länge der Probe Kontakt mit der Bauplattform. Da diese Probe vier Druckbahnen breit ist und das Eigengewicht der Probe im Vergleich zur Probe 1A verringert wurde, kommt es zu vernachlässigbar kleinen Deformationen an den unteren Bahnen. Es müssen keine Überhänge oder Stützmaterial gedruckt werden. Durch die gewählte Geometrie entstehen keine makroskopischen Kerben.

Die Geometrie der Zugproben zur Prüfung der Materialkennwerte mit senkrecht zur Zugrichtung angeordneten Bahnen besitzt die gleiche Form. Jedoch wurde die Breite auf 20 mm erhöht, da zu erwarten ist, dass geringere Festigkeiten erreicht werden und kein anderes Messgerät bzw. anderer Messbereich verwendet werden soll, um diese Proben zu prüfen.

Versuche mit der Orientierung 3 haben gezeigt, dass es bei zunehmender Probenhöhe zum Schwingen der Probe beim Drucken kommt. Dies geschieht aufgrund der Bewegungen des Druckkopfes und des Absenkens der Bauplattform. Das Ablegen

der Schichten kann wegen des Schwingens nicht mehr über der vorherigen erfolgen. Mit zunehmender Bauteilhöhe nimmt dieser Fehler zu, bis das Drucken schließlich fehlschlägt. Um das Aufschwingen der Probe zu verhindern, wird die Probe mit Stützmaterial umschlossen gedruckt. Dies führt zu einer größeren Querschnittfläche und damit zu einem höheren Flächenträgheitsmoment, was das Aufschwingen der Probe auf einen vernachlässigbar kleinen Wert reduziert. Da die Probe vollständig mit Stützmaterial umschlossen ist, werden alle Flächen gleichmäßig beeinflusst und ein unsymmetrisches Verhalten bei der Prüfung verhindert.

ISO 527-5 lässt als KEE Materialien zu, welche mindestens die gleichen Festigkeitskennwerte wie das zu prüfende Material aufweisen. Es wurden Aufleimer aus dem gleichen Material mit der gleichen Orientierung und einer Länge von 30 mm gedruckt und entsprechend ISO 527-5 mit einem hochelastischen Klebemittel aufgebracht.

In Abbildung 4.7 ist der Prüfumfang dargestellt.

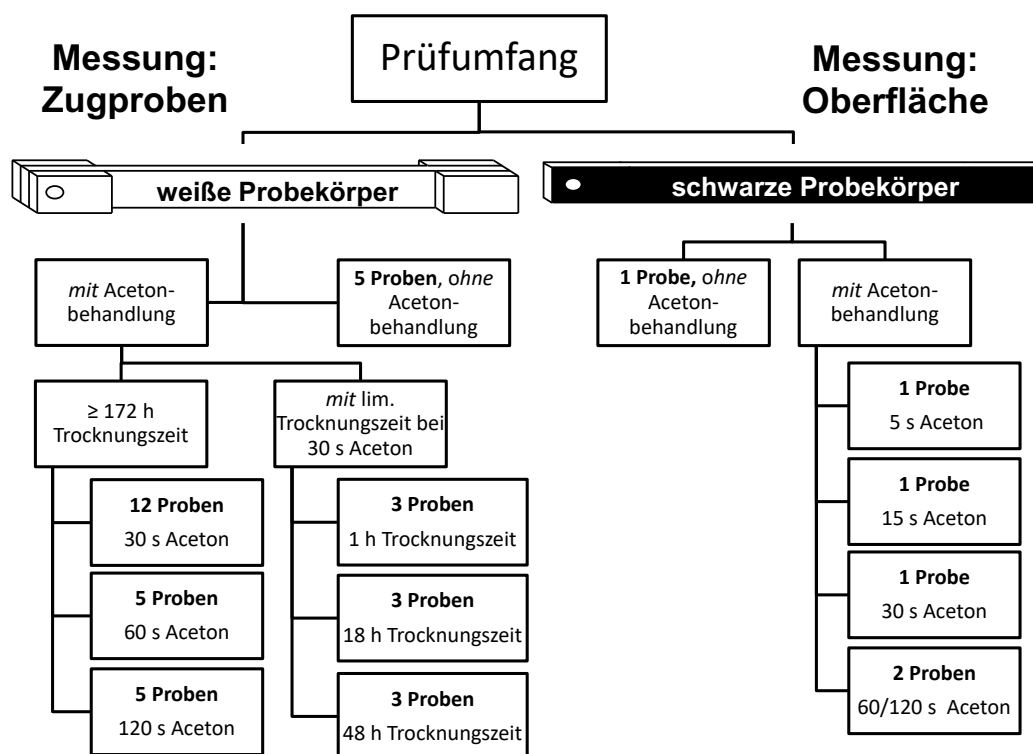


ABBILDUNG 4.7: Prüfumfang der Zugproben und Oberflächenmessungen

Für die Zugprüfung wurden Proben aus nicht eingefärbtem ABS hergestellt. *Stratasys* spricht hier von der Farbe *Ivory* (englisch für Elfenbein) [177]. Für ein besseres Verständnis werden im Rahmen dieser Arbeit die nicht eingefärbten Proben als *weiße* Proben bezeichnet. Im Sortiment der Firma *Stratasys* ist ein mit weißen Pigmenten versetztes ABS zu finden, welches allerdings keine Verwendung in dieser Arbeit findet.

Alle Zugproben wurden auf der servohydraulischen Prüfmaschine MTS 858 untersucht. Dabei wurde nach ISO 527-2 gearbeitet und mit einer Dehnung von 2 mm/min bis zum Bruch der Proben geprüft. Der Abstand zwischen den Klemmbacken, die einwirkende Kraft und die Zeit seit dem Versuchsstart wurden mit einer Frequenz von 100 MHz dokumentiert und in der Auswertung verwendet.

4.1.2 Materialkennwerte parallel zur Druckrichtung

Bei der Bestimmung der Materialkennwerte parallel zur Druckrichtung wurden sowohl der Einfluss der Zeit der Lösungsmittelexposition, als auch der Desorption (Trocknungszeit) auf die Zugfestigkeit untersucht. Dabei wurde, wie in Abschnitt 2.3.4 begründet, Aceton als Lösungsmittel eingesetzt.

Für die Versuche wurden die beschriebenen Probekörper vollständig in unverdünntes Aceton getaucht und anschließend hängend bei Raumtemperatur getrocknet. In Abbildung 4.8 ist die Zugfestigkeit der Proben nach einer Trocknungszeit von 172 h bei unterschiedlichen Immersionszeiten dargestellt. Bei Immersionszeiten über 120 s erfolgte eine starke Deformation der Oberfläche und Materialverlust in das Lösungsmittel so, dass diese Proben nicht mehr geprüft werden konnten. Für diese Versuche wurden je Expositionszeit fünf Proben behandelt und geprüft. Die unbehandelten Proben wiesen eine Zugfestigkeit von $(32,18 \pm 0,61) \text{ N/mm}^2$ auf. Nach einer Einwirkzeit von 30 Sekunden fiel diese auf 84,7 % $((27,81 \pm 1,68) \text{ N/mm}^2)$, nach 60 Sekunden auf 80,8 % $((25,8 \pm 1,6) \text{ N/mm}^2)$ und nach 120 Sekunden auf 74,7 % $((22,59 \pm 0,12) \text{ N/mm}^2)$ im Vergleich zu den unbehandelten Proben.

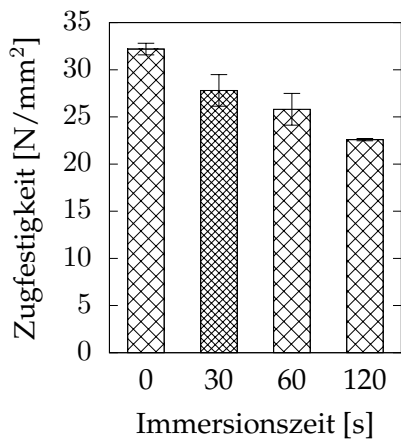


ABBILDUNG 4.8: Zugfestigkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Immersionszeit in Aceton

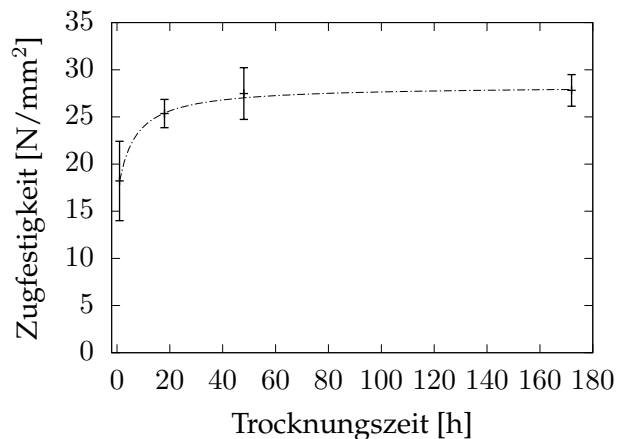


ABBILDUNG 4.9: Zugfestigkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Trocknungszeit nach einer Immersionszeit von 30 Sekunden in Aceton

Trocknungszeit [h]	1	18	48	172
Zugfestigkeit [N/mm²]	18,21 ± 4,21	25,35 ± 1,50	27,48 ± 2,74	27,81 ± 1,68

TABELLE 4.2: Zugfestigkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Trocknungszeit nach einer Immersionszeit von 30 Sekunden in Aceton

Zusätzlich zur abnehmenden Zugfestigkeit ist ein Anstieg der maximalen Bruchdehnung mit zunehmender Immersionszeit messbar. Dieser Effekt lässt sich damit begründen, dass mit steigender Tauchzeit mehr Aceton vom ABS absorbiert wird. Auch wenn das Aceton als Lösungsmittel keine chemischen Veränderungen im ABS auslöst, dringt es tief in die Strukturen ein und schwächt hier die Bindungen zwischen den Polymerketten. Teile des Lösungsmittels können in diesen Bereichen über eine längere Zeit und auch dauerhaft in die Struktur eingebettet werden und damit nicht vollständig an der Oberfläche desorbieren (siehe Abschnitt 2.3.4) [71].

Um diesen Effekt nachzuweisen, wurden Proben 30 Sekunden lang in Aceton getaucht und anschließend unterschiedlich lange getrocknet. In Tabelle 4.2 und Abbildung 4.9 ist die maximale Zugkraft in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Trocknungszeiten dargestellt.

Wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist, nimmt die Zugfestigkeit mit steigender Trocknungszeit zu. Nach 48 Stunden sind 98,8 % der Endfestigkeit erreicht. Bei einer Trockenzeit von weniger als 48 Stunden ist ein erhöhter Abfall der Zugfestigkeit festzustellen. Bei einer Regressionsanalyse unter Verwendung eines beschränkten Wachstumsmodells zeigt sich, dass nach 16 Stunden 90 % der maximalen Zugfestigkeit erreicht sind. Für nachfolgende Versuche wurde eine Trocknungszeit von mindestens 48 Stunden vorgesehen.

Anhand dieser Ergebnisse, die zeigen, dass die Trocknungszeit von signifikanter Bedeutung für die Materialeigenschaften ist, ist nicht nachzuvollziehen, aus welchen Gründen in anderen Veröffentlichungen zu diesem Thema Angaben über die Trocknungszeit fehlen oder lediglich eine Stunde nach der Behandlung abgewartet wurde [72, 96, 155].

Die ermittelte Zugfestigkeit von $(32,18 \pm 0,61) \text{ N/mm}^2$ für unbehandeltes ABS-P430 liegt oberhalb des im Herstellerdatenblatt angegebenen Wertes von 31 N/mm^2 . Da kein Unsicherheitsbereich angegeben wurde und die Differenz gering ist, wird geschlossen, dass die gewählte Probengeometrie vergleichbare Ergebnisse wie die der Herstelleruntersuchung nach ASTM D638 liefert. [176]

4.1.3 Bestimmung und Reduzierung der Gestaltabweichungen der Oberflächen

Die Beschaffenheit der Oberfläche und ihre Qualität hängen davon ab, wie stark die real gefertigte Oberfläche vom Idealmaß abweicht. Während die gemittelte Rautiefe (Rz) beim Drehen üblicherweise zwischen $4 \mu\text{m}$ bis $63 \mu\text{m}$ liegt, wird bei additiven Fertigungsverfahren ein Rz von $50 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$ akzeptiert [68, 74]. Technisch ist eine ideale Oberfläche nicht möglich. Nach DIN 4760 werden Abweichungen in sechs Ordnungen unterteilt, welche in Abbildung 4.10 dargestellt sind. Dabei nimmt die Dimension der Oberflächenbeeinflussung mit zunehmender Ordnung ab.

Die erste Ordnung gibt die Formabweichung (z.B. Rundheits- und Ebenheitsabweichungen) an. Die zweite Ordnung steht für Welligkeiten, die beispielsweise durch Schwingungen des Werkzeugs, außermittiges Einspannen oder aufgrund der

Form der Laufabweichungen von Werkzeugen entstehen können. Die Ordnungen drei bis fünf fassen die Rauheit zusammen. Dabei handelt es sich z.B. um Rillen (3. Ordnung), Riefen, Schuppen (4. Ordnung) und Ausprägungen der Gefügestruktur (5. Ordnung). Die Ausprägung der sechsten Ordnung entsteht durch unterschiedlichen Gitteraufbau des Werkstoffes. Die Überlagerung der Abweichungen aller Ordnungen ergeben die reale Oberfläche. [31, 37, 199]

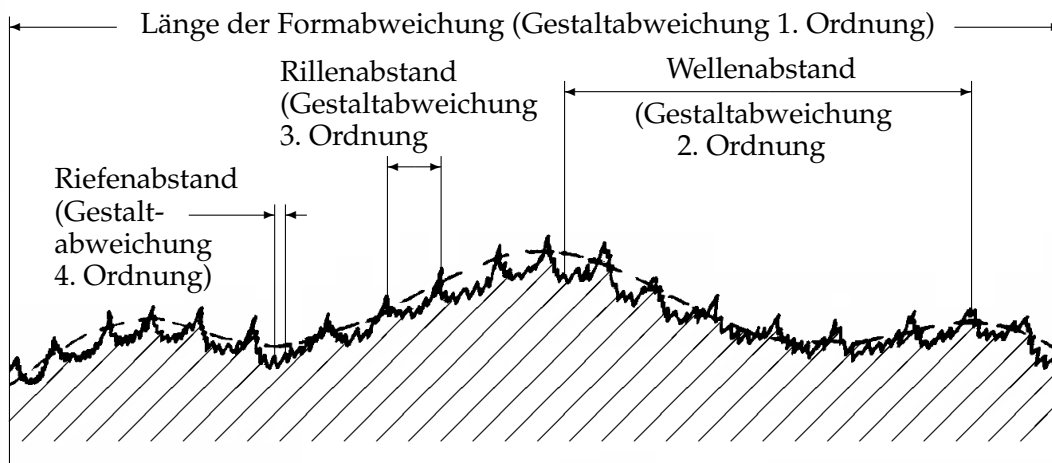


ABBILDUNG 4.10: Ordnung der Gestaltabweichungen nach [126]

Nach DIN 4760 sind Gestaltabweichungen der 2. Ordnung (Welligkeit) überwiegend periodisch auftretende Abweichungen, bei denen das Verhältnis der Wellenabstände zur Wellentiefe zwischen 1000:1 und 100:1 liegt. Bei Gestaltabweichungen der 3. bis 5. Ordnung liegen diese Verhältnisse zwischen 100:1 und 5:1. Wie bereits in Abschnitt 2.2.5 und 2.3.5 beschrieben, entsteht aufgrund der Extension des Materials eine Gestaltabweichung an der Bauteiloberfläche. Es wird gezeigt werden, dass hierbei Verhältnisse zwischen Wellenabstand und Wellentiefe von 2,7:1 bis 330:1 auftreten. Diese liegen nach der genannten Definition der DIN nicht klar im Bereich der 2. Ordnung (Welligkeit), werden aber im Rahmen dieser Arbeit dieser zugeprochen. Auch können die in den Beispielen der DIN für die Entstehungsursachen genannten Gründe wie „Form der Werkzeugschneide“ und „Zustellung“, dem 3D-Drucken nicht zugeordnet werden. Eine Detailaufnahme der Oberfläche ist in der Darstellung 4.11 zu finden.

Hier wird ein Wellenberg einer Extrusionsbahn zwischen zwei Tälern (5) gezeigt, welche nach dem Tal auf der rechten Seite und dem in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Nackenwachstum wieder in eine weitere Extrusionsbahn übergeht. Zu sehen sind unterschiedliche Oberflächendefekte, die den Ordnungen der Gestaltabweichung zugeordnet werden können. Formabweichungen (1. Ordnung) sind in dieser Darstellung nicht festzustellen. Deutlich ist die Welligkeit (2. Ordnung) zu erkennen. An Markierung (1) ist der vertikale Verlauf einer periodischen Rille (3. Ordnung) zu sehen. Dieser, auch auf anderen Aufnahmen zu erkennende Defekt, ist vermutlich aufgrund eines Schadens oder durch Materialansammlungen an der Extrusionsdüse



ABBILDUNG 4.11: Detailaufnahme der Oberfläche eines Probekörpers ohne chemische Behandlung

entstanden. Markierung ② zeigt eine aperiodische Rille unbekannter Entstehungsart. Rauheiten der 4. Ordnung sind im Bereich der Markierung ④ zu sehen. Da der Werkstoff beim Ablegen der Bahn in einer flüssigen Phase vorliegt, können sich Partikel mit der Oberfläche verbinden. Nach ISO 4288 sind die Oberflächenkenngrößen nicht geeignet, Unvollkommenheiten zu beschreiben. Defekte wie Poren und Kratzer werden ausgeschlossen [45, 104].

Die gezeigte Aufnahme 4.12 und alle folgenden Messungen der Oberfläche wurden mit dem Konfokalmikroskop OLS4000 der Firma Olympus LEXT durchgeführt. Die Funktion dieses Mikroskops beruht auf dem Prinzip, dass ein Laserstrahl mit einem Durchmesser von $0,2\ \mu\text{m}$ auf das zu prüfende Element gerichtet wird und die Distanz mittels der Reflektionsintensität bestimmt wird. In Abbildung 4.12 ist das Profil der Abbildung 4.11 dargestellt.

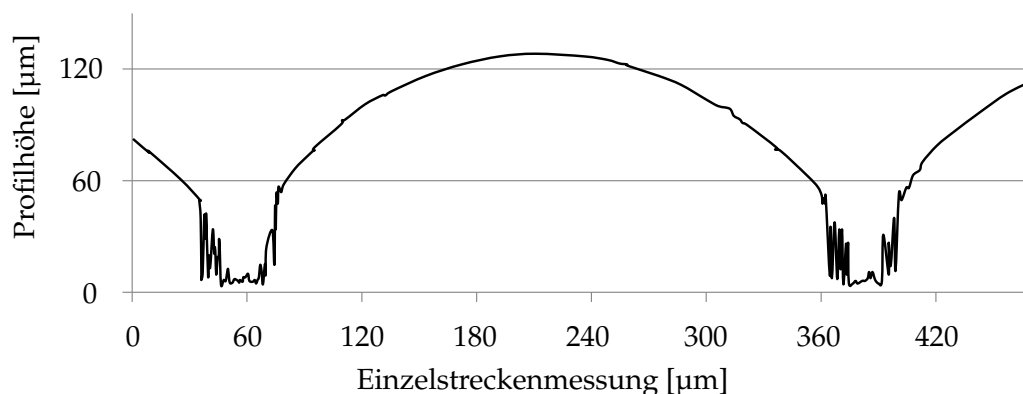


ABBILDUNG 4.12: Einzelstreckenmessung aus einem Bereich der Abbildung 4.11

Zu sehen ist, dass es im Bereich der Täler zu Fehlern bei der Messung kommt. Dies liegt am Winkel zwischen dem ausgesandten Laserlicht und der Bauteiloberfläche.

Ein hoher Anteil des Lichtes wird hier so reflektiert, dass es nicht mehr detektiert werden kann. Um das Profiltal zu vermessen, wurde eine Mehrschichtaufnahme vorgenommen. Diese ist in Abbildung 4.13 zu sehen.

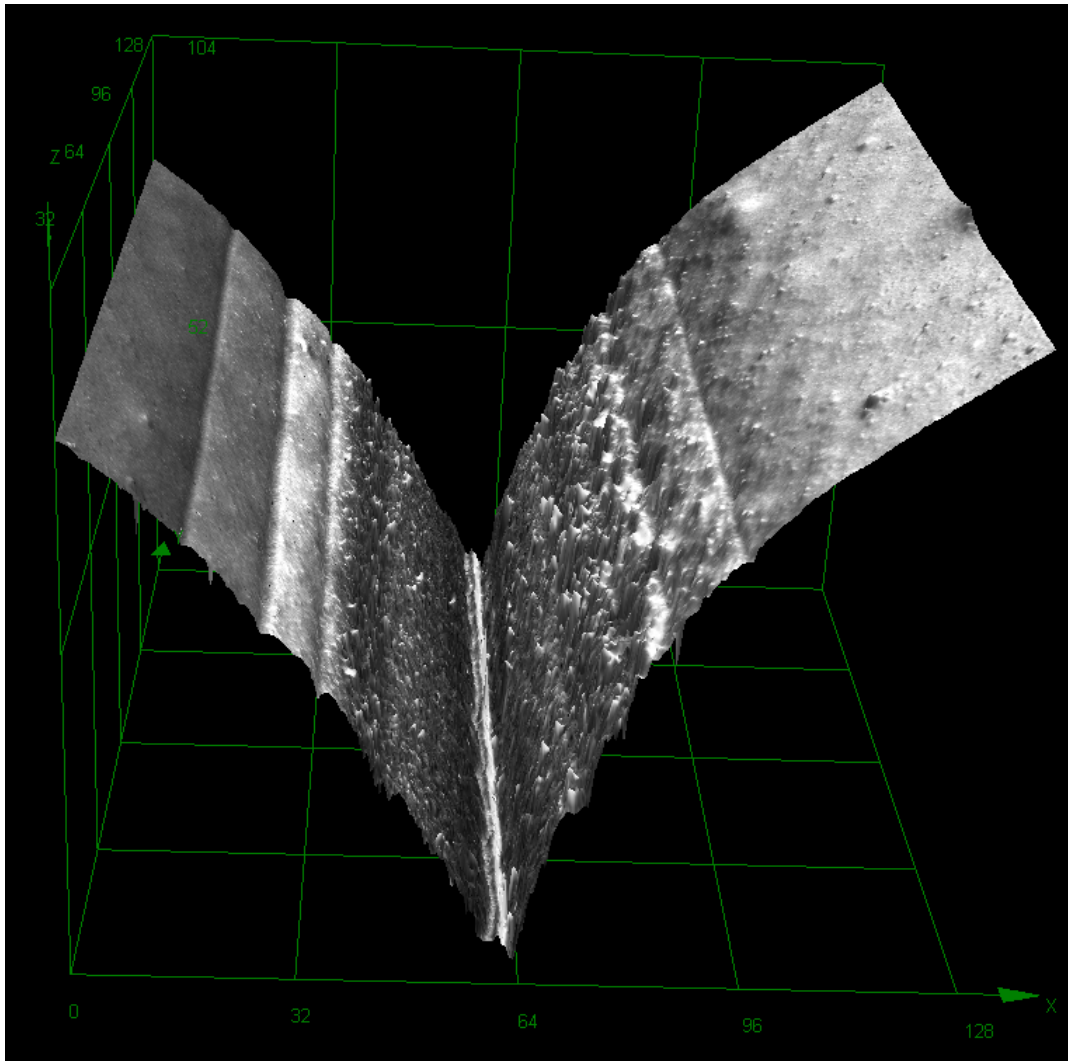


ABBILDUNG 4.13: Mehrschichtaufnahme des Kontaktbereiches von zwei Druckbahnen einer unbehandelten Probe. (Achsenbeschriftung in μm)

Hierbei wird in mehreren Höhengritten der Fokus der Aufnahme verschoben und die Belichtungsintensität angepasst, so dass ein größerer Höhenbereich erfasst werden kann. Die einzelnen Aufnahmen werden dann per Software montiert. Die Übergänge zwischen den Aufnahmen sind durch die horizontal verlaufenden Linien auf der Oberfläche zu erkennen. Für die Darstellung der Einzelstreckenmessung 4.12 konnte das Größe des Profiltals bestimmt werden. Es wurde ermittelt, dass eine maximale Profilhöhe von $123,6 \mu\text{m}$ bei einem Abstand der Täler von $330 \mu\text{m}$ vorliegt. Der Abstand der Täler entspricht damit der zu erwarteten Schichthöhe des Druckprozesses.

Die in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Proben aus nicht eingefärbtem ABS können nicht für die Aufnahmen am Konfokalmikroskop verwendet werden. Diese Proben

weisen eine geringe Opazität auf, was dazu führt, dass der Laserstrahl teilweise in das Bauteil eindringt und die Oberfläche nicht fokussiert werden kann. Um dies zu verhindern, wurde, wie in Grafik 4.7 dargestellt, schwarz eingefärbtes ABS gedruckt und für alle Oberflächenmessungen verwendet. Laut Herstellerangabe können die mechanischen Eigenschaften bei eingefärbtem Material um bis zu zehn Prozent reduziert sein. Aus diesem Grund wurden sie nicht für die zu druckenden Probekörper und Bauteile verwendet [176].

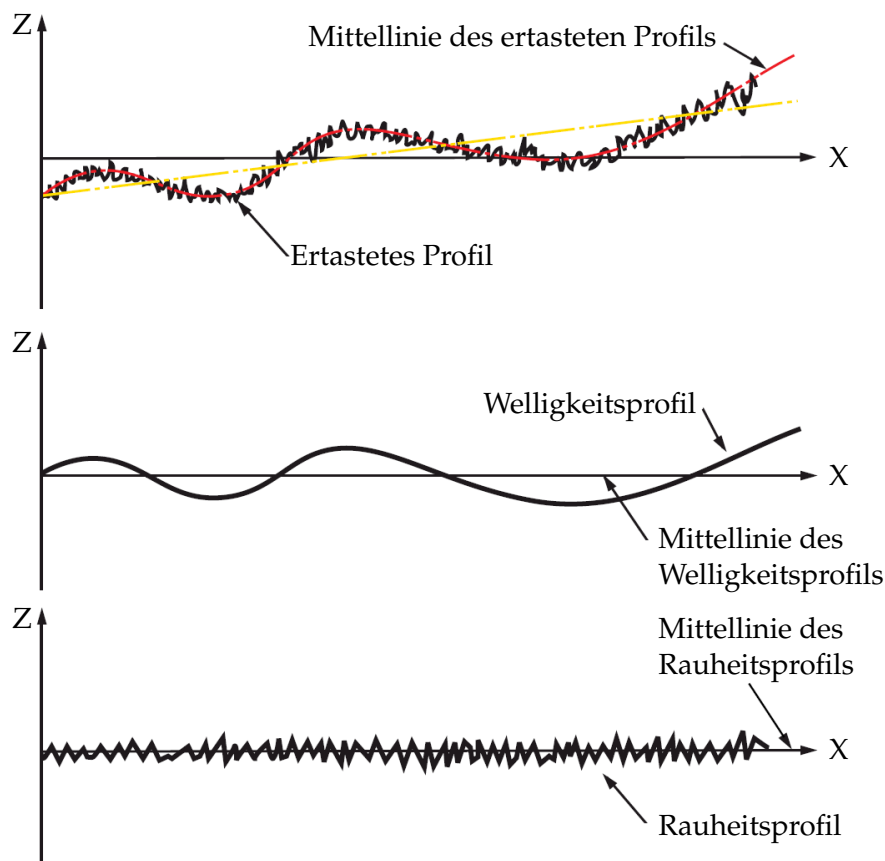


ABBILDUNG 4.14: Übersicht über die Profile bei der Messung der Oberflächenbeschaffenheit [85]

Um die Welligkeiten von den Gestaltabweichungen höherer Ordnung zu trennen, wird zunächst das ertastete Profil (Abbildung 4.14 Oben) entsprechend der Mittellinie ausgerichtet und anschließend in Welligkeitsprofil (Abbildung 4.14 Mitte) und Rauheitsprofil (Abbildung 4.14 Unten) getrennt. Dies geschieht nach ISO 4288 mit ein Filter und einer Grenzwellenlänge λ_c . Die Funktionsweise dieses Filters ist in Abbildung 4.15 dargestellt.

Die Grenzwellenlänge λ_c legt fest, welche Wellenlängen der Rauheit und welche der Welligkeit zugeordnet wird. Nach ISO 4288 wird die Grenzwellenlänge zusammen mit der erforderlichen Messstrecke in Abhängigkeit des zu erwartenden Wertes für den Kennwert des arithmetischen Mittenrauhwertes (R_a) entsprechend einer Tabelle bestimmt. Da dieser zunächst unbekannt ist, wurde nach Anweisung der ISO 4288

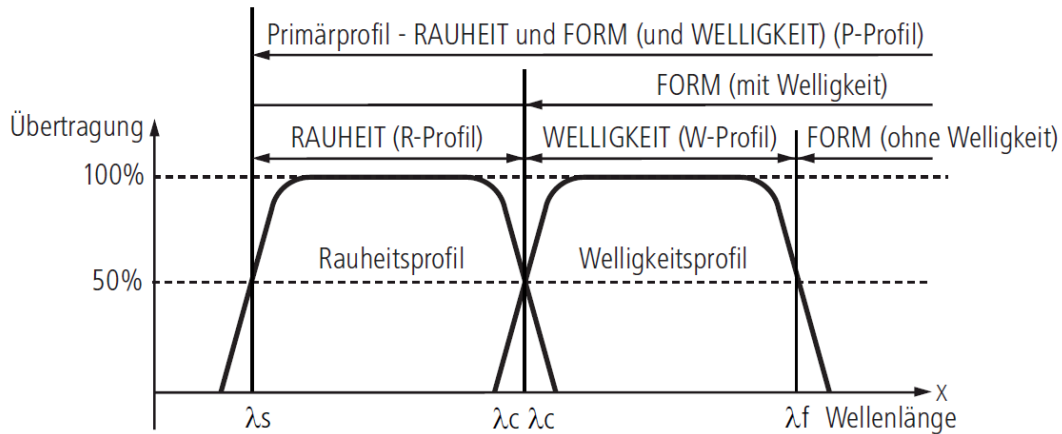


ABBILDUNG 4.15: Übertragungsbänder der Filterung von Welligkeit, Rauheit und Form [85]

dieser Wert durch eine Messung ohne Filter abgeschätzt. Dies ergab einen Mittenrauhwert zwischen $0,1 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$ und damit eine Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ und eine erforderliche Messstrecke von 4 mm . Für den hier vorliegenden Fall ist die Wellenlänge der Welligkeit bereits bekannt. Sie entspricht der Schichtdicke mit $0,33 \text{ mm}$. Daher muss mindestens dieser Wert verwendet werden, um die Welligkeit von der Rauheit zu trennen. Es wurde eine Grenzwellenlänge von $0,3 \text{ mm}$ gewählt. [31, 45, 157, 159, 168]

Die Filterung des Oberflächenprofils erlaubt es, die Gestaltabweichungen aufgrund des Schichtaufbaus von denen, die material- und düsenbedingt entstehen, zu trennen.

Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren hat das hier verwendete Extrusionsverfahren eine besonders nachteilige Oberflächencharakteristik, wie in Abschnitt 2.3.5 beschrieben. Diese ist zudem stark vom Winkel zwischen der zu druckenden Körperaußenfläche und der XY-Ebene abhängig. (siehe Abschnitt 2.3.5 und 4.3) [74]

Nach Trennung der Profile wurde aus dem Welligkeitsprofil die mittlere Höhe der Welligkeit ermittelt. Dies geschah für Proben, die jeweils $0, 5, 15, 30, 60$ und 120 Sekunden in Aceton getaucht wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Tabelle 4.3 dargestellt:

Immersionszeit [s]	0	5	15	30	60	120
Welligkeit W_t [μm]	$123,6 \pm 0,5$	$7,5 \pm 3,0$	$2,0 \pm 1,7$	$0,10 \pm 0,01$	-	-

TABELLE 4.3: Welligkeit von ABS P-430 in Abhängigkeit von der Immersionszeit in Aceton

Wie zu Beginn des Abschnitts beschrieben, beträgt das Verhältnis der Wellenabstände zur Wellentiefe $2,7:1$ und wird mit einer zunehmenden Tauchzeit größer. Ab einer

Tauchzeit von 30 Sekunden ist die Welligkeit der Proben so gering, dass sie die gleiche Größenordnung wie die Rauheit einnimmt. Bei längerer Tauchzeit ist keine Welligkeit mehr feststellbar, allerdings nehmen Oberflächendeformationen und Defekte zu. In Abbildung 4.16 ist der Zusammenhang zwischen Tauchzeit und Welligkeit graphisch dargestellt.

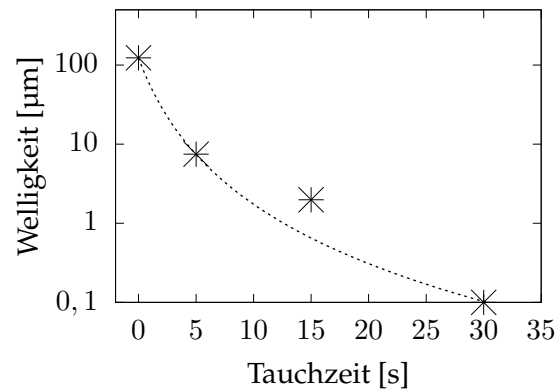


ABBILDUNG 4.16: Welligkeit von ABS P-430 in Abhängigkeiten von der Immersionszeit in Aceton

Es kann geschlussfolgert werden, dass eine Immersionszeit von 30 Sekunden ausreichend ist, um die Welligkeiten auf der Oberfläche zu minimieren. Aufgrund der Untersuchungen zur Zugfestigkeit kann weiterhin festgestellt werden, dass für weitere Versuche nur Proben mit 30 Sekunden Tauchzeit betrachtet werden müssen. Eine längere Tauchzeit führt zu geringeren Festigkeitskennwerten und keiner besseren Oberfläche, dafür zu Formabweichungen besonders an Kanten und Ecken. Im Anhang ist in Abbildung A.1 die Oberfläche einer Probe nach 30 Sekunden Tauchzeit dargestellt. Für diese Probe wurde zusätzlich zur Welligkeit auch die Rauheit der Oberfläche bestimmt. Das gemittelte Ergebnis aus 15 Einzelstreckmessungen ergab eine mittlere arithmetische Rauheit (R_a) von $(1,02 \pm 0,05) \mu\text{m}$.

4.1.4 Materialkennwerte senkrecht zur Druckrichtung

Zur Ermittlung der Materialkennwerte senkrecht zur Druckrichtung wurden sieben Probekörper mit den in Abbildung 4.5 und Tabelle 4.1 Spalte B_{3D} dargestellten Maßen gedruckt. Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, wurden diese Proben von Stützmaterial umgeben gefertigt, welches vor der Acetonbehandlung entfernt wurde. Alle Proben wurden 30 Sekunden behandelt und eine Woche getrocknet.

Die Zugprüfung erfolgte unter den gleichen Bedingungen, wie für die Zugproben mit einer parallelen Druckrichtung, die in Abschnitt 4.1.2 beschrieben wurde. Es wurde eine Zugfestigkeit von $(19,71 \pm 1,40) \text{N}/\text{mm}^2$ ermittelt. Das E-Modul dieser Proben wurde gemäß der Deutsches Institut für Normung (DIN) anhand des Sekantenanstiegs ermittelt und beträgt $(1544 \pm 31) \text{N}/\text{mm}^2$.

4.2 Untersuchungen zur Maßhaltigkeit ringförmig gedruckter Bauteile

Durch verschiedene Einflüsse kann die Maßhaltigkeit gedruckter Bauteile beeinflusst werden. Vier Haupteinflüsse werden hier genannt:

1. Toleranz aufgrund der Positioniergenauigkeit des Druckers
2. Schrumpfung und Schwindung des gedruckten Materials
3. Softwarebedingte Umwandlung der CAD-Daten
4. Nachbehandlung der Bauteile

zu 1.) Die Toleranz ist von der Positioniergenauigkeit in der XY-Ebene sowie der Z-Achse abhängig. Da die verwendete Software das digitale Modell des Bauteils für den Druckprozess in Schichten teilen muss, ist in der Z-Achse eine Genauigkeit von $Z_{-0}^{+Schichtdicke}$ zu erwarten. Diesen Wert gibt auch *Stratasys* in den Unterlagen zum Drucker an [177]. Allerdings wird zur Genauigkeit in der XY-Ebene keine Angabe gemacht. Eine Nachfrage beim Hersteller hat ergeben, dass diese Werte für diesen Drucker nicht vorliegen [196].

zu 2.) Schrumpfung und Schwindung des gedruckten Materials sind besonders von den Temperaturänderungen abhängig. Es ist darauf zu achten, dass es zu zwei Phasenübergängen des Druckmaterials kommt. Das Kunststoffendlosmaterial wird vom festen Zustand in der Düse in den flüssigen Zustand überführt. Nach Verlassen der Düse kühlt das Material wieder ab und härtet aus. Die Menge des ausgestoßenen Materials wird vom Drucker gesteuert und ist bei dem verwendeten Drucker nicht durch den Benutzer beeinflussbar. Der Hersteller hat Parameter hinterlegt, um die Ausgabe der richtigen Materialmenge zu gewährleisten.

Des Weiteren kommt es aufgrund der Wärmeausdehnung beim Abkühlen zum Schrumpfen des Bauteils. *Stratasys* gibt einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $8,82 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ für das verwendete Material ABS-P430 [176]. Die Druckkammer hat während des Druckens eine Temperatur von $76 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Düsen werden auf $311 \text{ }^\circ\text{C}$ geheizt. Die Auswirkung der Wärmeausdehnung auf die Maßhaltigkeit des Durchmessers ringförmiger Bauteile kann mit folgender Formel überschlägig berechnet werden:

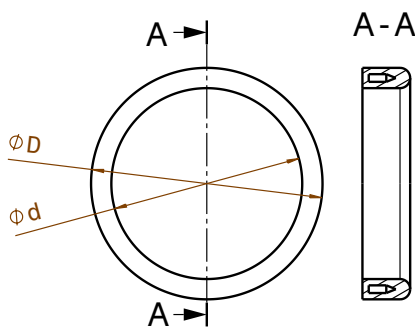
$$\frac{\Delta D}{D_0} = \alpha * \Delta T \quad (4.1)$$

Hierbei ist α der Wärmeausdehnungskoeffizient, D_0 der Ausgangsdurchmesser und ΔT die Temperaturänderung. $\frac{\Delta D}{D_0}$ stellt die prozentuale Durchmesseränderung dar. Das Abkühlen des Bauteils von der Temperatur in der Druckkammer auf die Raumtemperatur ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) führt zu einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = -56 \text{ K}$. Multipliziert man diese mit dem angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten für das ABS-P430, erhält man eine Durchmesserabweichung von $-0,49 \%$. In der Herstellerdokumentation ist nicht angegeben, ob Korrekturen durch die Software vorgenommen werden.

zu 3.) Es ist die Umwandlung der CAD-Daten in einen maschinenlesbaren Programmcode zu beachten. Das allgemeine Vorgehen hierfür wird im Abschnitt 2.2.2 beschrieben. Wenn die CAD-Daten vor Übergabe an den *Slicer* in ein anderes Format überführt werden, kann es zu Abweichungen von den Originaldaten kommen. Besonders ist die Diskretisierung bei der Überführung in Dateiformate wie STL, welches häufig für den Austausch von 3D-Druckmodellen verwendet wird, zu beachten. Bei diesem Format werden die Oberflächen von Körpern durch Dreiecksfacetten beschrieben. Insbesondere bei gekrümmten Oberflächen kommt es zu Abweichungen von den Ausgangsdaten, da Näherungen verwendet werden müssen. Um diese Probleme zu vermeiden, wurden alle CAD-Modelle ohne Überführung in andere Dateiformate an den verwendeten *Slicer* übergeben.

zu 4.) Hier ist die in Abschnitt 2.3.5 beschriebene chemische Nachbehandlung zu nennen. Durch die Abnahme der Welligkeit (erklärt in Abschnitt 4.1.3) kommt es in diesem Zusammenhang zu Veränderungen der Bauteilmaße.

Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurden Probekörper hergestellt, wie sie in Abbildung 4.17a zu sehen sind. Diese ringförmigen Probekörper weisen im Inneren eine Kammer mit variabler Breite auf. Die Wandstärke wurde konstant bei dem minimal druckbaren Wert von 1,33 mm gehalten. Die untere Seite wurde eben mit der gleichen Wandstärke verschlossen und die obere verrundet. Die Höhe beträgt 10 mm. Die Form orientiert sich somit am oberen Ende der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Buchsengeometrie.



(a) Verwendete Probengeometrie

Probe	d [mm]	D [mm]
1	40,0	48,0
2	39,9	48,1
3	39,8	48,2
4	39,7	48,3
5	40,0	48,5

(b) Probennummern und korrespondierende Durchmesser

ABBILDUNG 4.17: Verwendete Probengeometrie und Maße

Ziel der Versuche ist es, die Abweichung zwischen konstruiertem und gedrucktem Körper zu ermitteln. Dies ist erforderlich, um sicherzustellen, dass zum einen die Buchse gefügt und zum anderen der Spalt zwischen Welle und Buchse bzw. zwischen Buchse und Nabe bestimmt werden kann. Weiterhin soll untersucht werden, welchen Einfluss die chemische Behandlung hat, da bei der Untersuchung der Welligkeit nicht ermittelt werden kann, wie viel Material von der Oberfläche abgelöst

Hinweis! Symmetrie
Bauteil: Bauteilname

Für die Versuche wurde als Zielwert ein Außendurchmesser (D) von 48 mm und

Aluminium-Kantrohr
DIN EN 573-3 / EN 755-1 / 755-2 / 755-9

1	_MUSTERTEIL_ 1	01	_ NORM _	01	_ Muster _	_ DIM _	_ 999 _
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1	Name	Datum	HRO - Hanseatic Racing Organisation Universität Rostock				
f/m/c/v	gezeichnet	Musterstudent	12.02.2011	Zeichnungsname: Musterbauteil			

ein Innendurchmesser (d) von 40 mm festgelegt. Hierbei darf der Außendurchmesser nicht über- und der Innendurchmesser nicht unterschritten werden. Die Werte orientieren sich an den Maßen der ETP-Express 40 mit den gleichen Nennmaßen für Außen- und Innendurchmesser. Dies soll gewährleisten, dass bei Versuchen am Prüfstand die gedruckte Buchse eine bestehende ETP-Express 40 ersetzen kann.

Für die Untersuchungen wurden fünf Ringe mit den Maßen wie in Tabelle 4.17b darstellt, gedruckt. Dabei wurden die Durchmesser zumeist um 0,1 mm, im Einzelfall um 0,2 mm variiert. An den so hergestellten ringförmigen Proben wurden an fünf bis acht Punkten beide Durchmesser vor und nach der chemischen Behandlung bestimmt.

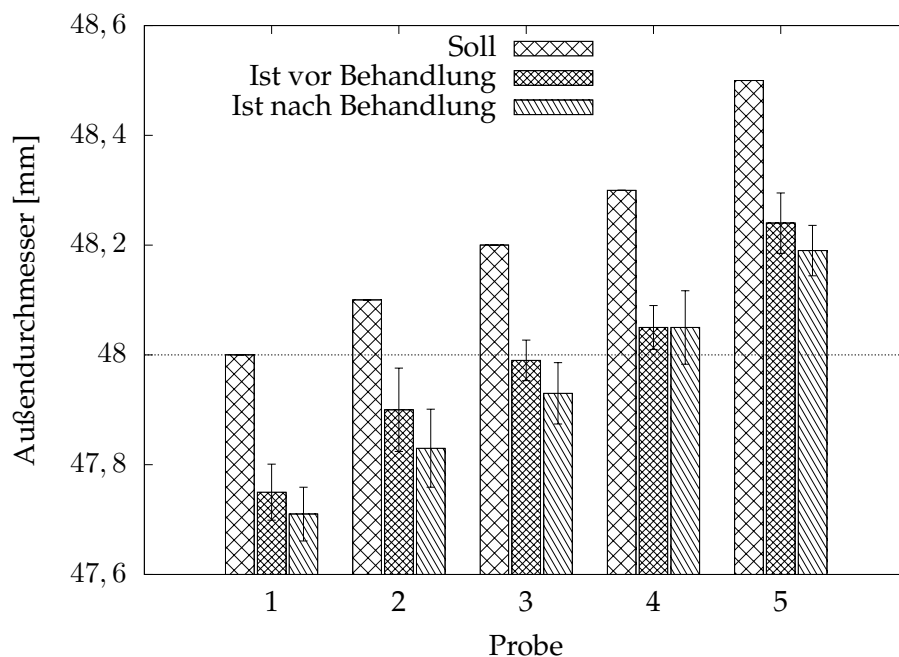


ABBILDUNG 4.18: Vergleich der Außendurchmesser zwischen Sollwert, Istwert nach dem Drucken und Istwert nach der chemischen Behandlung

In Abbildung 4.18 und 4.19 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt. Dabei wurde der jeweilige Zielwert von 40 bzw. 48 mm mit einer horizontalen gepunkteten Linie markiert.

Es ist zu erkennen, dass der Außendurchmesser bei allen Proben kleiner als der Sollwert ist. Zudem führte die chemische Behandlung zu einer weiteren Abnahme des Durchmessers. Probe 3 (Sollaußendurchmesser 48,2 mm) zeigt hier das beste Ergebnis. Der mittlere Durchmesser liegt mit $(47,93 \pm 0,06)$ mm immer unterhalb des Zielwertes. Daher wurde ein zu druckender Außendurchmesser von 48,2 mm gewählt, um den Zieldurchmesser zu erreichen.

In Abbildung 4.19 ist zu erkennen, dass der Innendurchmesser nach dem Druck bei allen Proben kleiner ist als der Sollwert. Nach der chemischen Behandlung nimmt dieser zu, erreicht den Sollwert im Mittel aber nicht. Probe 1 (Sollinnendurchmesser von 40 mm) zeigt das beste Ergebnis. Mit einem Innendurchmesser

von $(39,95 \pm 0,06)$ mm liegt dieser zwar unter dem Zielwert, jedoch im Toleranzfeld. Daher wurde der zu druckende Innendurchmesser von 40 mm gewählt, um den Zieldurchmesser zu erreichen. Alle mit diesem Durchmesser gedruckten Buchsen konnten gefügt werden.

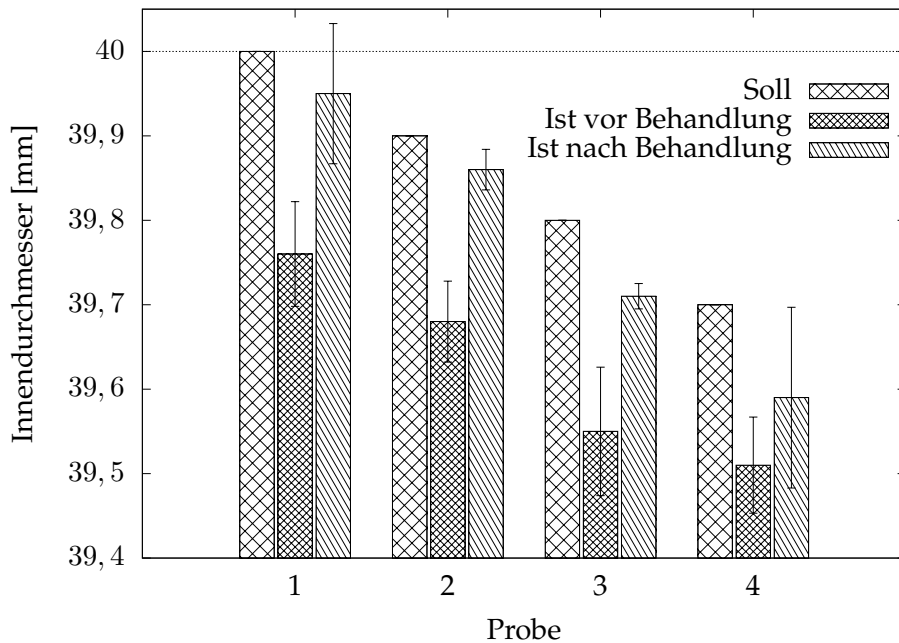


ABBILDUNG 4.19: Vergleich der Innendurchmesser zwischen Sollwert, Istwert nach dem Drucken und Istwert nach der chemischen Behandlung

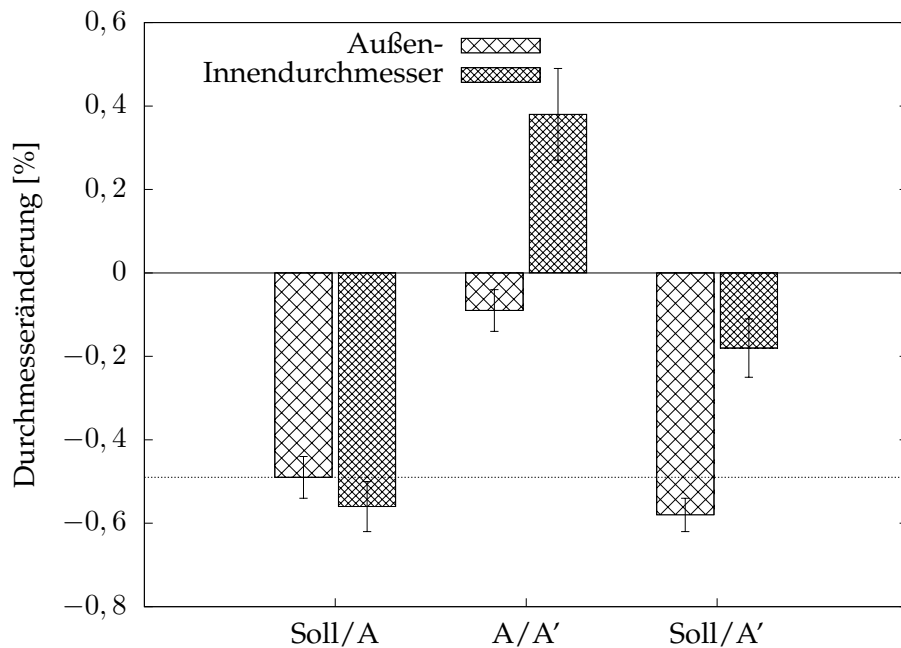


ABBILDUNG 4.20: Durchmesseränderung vom Soll Durchmesser (Soll) zu den gedruckten (A) Proben, den gedruckten zu den behandelten (A') Proben und dem Soll Durchmesser zu den behandelten Proben

Um den Einfluss der Wärmedehnung und der chemischen Behandlung zu bestimmen, wurde die Auswirkung dieser Faktoren verglichen und in Abbildung 4.20 dargestellt. Gezeigt wird die prozentuale Durchmesseränderung für Innen- und Außendurchmesser:

- Soll/A: der Vergleich vom Sollwert (Soll) zu den gedruckten (A) Proben
- A/A': der Vergleich der gedruckten (A) zu den behandelten (A') Proben
- Soll/A': der Vergleich des Sollwertes (Soll) zu den behandelten (A') Proben

Hierfür wurden die Messungen aller Proben einbezogen. In der Darstellung wurde bei $-0,49\%$ eine gepunktete Linie zur Orientierung eingezeichnet. Dieser Wert entspricht dem erwartenden Schrumpfen aufgrund der Temperaturänderung beim Abkühlen.

Beim Vergleich vom Soll Durchmesser zur gedruckten Probe ($-0,49 \pm 0,05\%$) ist zu erkennen, dass der erwartete Wert aufgrund der Wärmeausdehnung erreicht wird. Für den Innendurchmesser liegt dieser mit ($-0,56 \pm 0,06\%$) leicht über dem erwarteten Wert. Beim Vergleich zwischen unbehandelter und behandelter Probe nimmt der Außendurchmesser ab und der Innendurchmesser zu. Allerdings geschieht dies nicht im gleichen Maße. Der Außendurchmesser nimmt ($-0,09 \pm 0,05\%$) ab, der Innendurchmesser wird ($0,38 \pm 0,11\%$) größer. Eine Ursache könnte darin liegen, dass der Innendurchmesser vom Lösungsmittel länger benetzt wird, da es hier schlechter abtrocknet. Allerdings konnte eine verstärkte Schädigung durch das Lösungsmittel an der Innenseite nicht beobachtet werden und es kam auch zu keiner Häufung von Defekten an diesen Flächen.

Die Standardabweichung der Mittelwerte der unbehandelten Proben zeigt die Positioniergenauigkeit des 3D-Druckkopfes zusammen mit der Messungenauigkeit. Diese liegt für den Innen- und Außendurchmesser zwischen $\pm 0,04$ mm und $\pm 0,08$ mm.

Bezogen auf die oben genannten vier Haupteinflüsse ist festzustellen, dass die Toleranz aufgrund der Positioniergenauigkeit des Druckers und die softwarebedingte Umwandlung der CAD-Daten einen Einfluss hat, welcher im Vergleich zum Temperaturverhalten des gedruckten Materials und der Nachbehandlung der Bauteile vernachlässigbar gering ist. Die beiden letztgenannten Einflüsse wurden durch eine Anpassung der CAD-Daten kompensiert.

4.3 Untersuchungen zur Haftreibung

Für die Berechnung des zwischen Buchse und Welle/Nabe übertragbaren Momentes ist es erforderlich, den Haftreibungskoeffizienten der hier vorliegenden Materialpaarung Stahl/ABS-P430 zu ermitteln. Dieser Wert ist nicht in den geläufigen Tafelwerken zu finden.

Für die Versuche wurden Probekörper aus ABS-P430 zwischen zwei Reibklötze gebracht und mit unterschiedlichen Klemmkraften herausgezogen. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4.21 zu sehen.

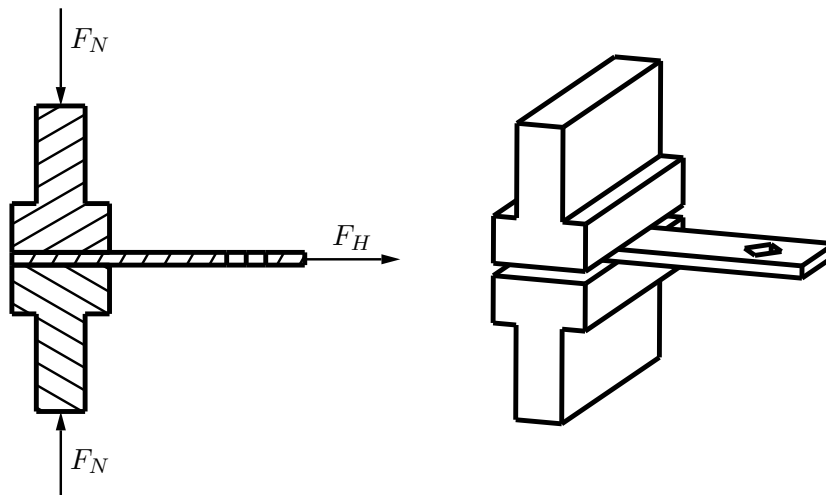


ABBILDUNG 4.21: Prüfaufbau zur Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten

Die Reibklötze bzw. Klemmkörper sind 10 mm breit und 30 mm lang. An der Verjüngung wurden sie in die Backen der servohydraulischen Prüfmaschine Typ MTS 858 gespannt. Die Rautiefe der Klemmkörper orientierte sich an den Empfehlungen der Firma ETP für Welle und Nabe mit $(2 \pm 10) \mu\text{m}$ [59]. Dieser Wert ist eine beim Drehen üblich erreichbare Rauheit [68]. Wie in Tabelle 4.4 zu sehen, wurde eine mittlere Rautiefe von $(1,78 \pm 0,33) \mu\text{m}$ respektive $(1,70 \pm 0,13) \mu\text{m}$ gemessen. Im Anhang A.2 ist die Konfokalmikroskopaufnahme der Oberfläche eines Reibklötzes dargestellt.

Parameter	Reibkörper A	Reibkörper B	ETP empfohlen
mittlere Rautiefe (Ra) [μm]	$1,78 \pm 0,33$	$1,70 \pm 0,13$	2 ± 1 [59]

TABELLE 4.4: Messwerte der Oberflächenuntersuchung der Reibkörper und empfohlene Rautiefe für ETP-Verbindungen für Welle und Nabe

Die verwendeten Proben besitzen ebenfalls eine Breite von 10 mm und 30 mm Länge und sind mit einer Öffnung für den Anschluss eines Federkraftmessers ausgestattet. Ihre Dicke beträgt entsprechend der empfohlenen Schichtstärke 1,33 mm (siehe Abschnitt 4.1.1). Die Orientierung der Druckbahn entspricht der Auszugsrichtung der Proben. Die gleiche Orientierung weisen die Druckbahnen beim Wirken eines Momentes auf die gedruckten Spannbuchsen auf (siehe Kapitel 6). Es wurden sowohl Probekörper, die 30 Sekunden mit Aceton behandelt wurden, als auch unbehandelte verwendet. Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, konnte eine mittlere arithmetische Rauheit (Ra) von $(1,02 \pm 0,05) \mu\text{m}$ für die behandelten ABS-P430 Proben ermittelt werden.

Die Probekörper wurden entsprechend der Darstellung eingelegt, so dass eine Kontaktfläche von 100 mm^2 vorlag, und nach Aufbringen einer Klemm-/Normalkraft

F_N herausgezogen. Es wurden je Klemmkraft und Behandlung fünf Proben geprüft. Das Ausziehen der Proben erfolgte manuell mit einem Federkraftmesser. Jeder Versuch wurde per Video aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

Als Klemmkraft wurden Werte zwischen 50 N bis 150 N gewählt. Dies entspricht einer Flächenpressung von 0,5 MPa bis 1,5 MPa und liegt damit in einem Bereich, in dem die in Abschnitt 7.3 beschriebenen Versuche an realen Prototypen stattfanden. Die Ergebnisse der Versuche mit dem nach Gleichung 3.1 ermittelten Haftreibungskoeffizienten sind in Tabelle 4.5 und Abbildung 4.22 gezeigt.

Klemmkraft [N]	unbehandelt			behandelt			
	50	75	100	50	100	125	150
Flächenpressung [MPa]	0,5	0,75	1,0	0,50	1,0	1,25	1,5
Reibungskoeffizient μ_H	0,68	0,67	0,77	0,49	0,55	0,6	0,61
Standardabweichung	0,02	0,06	0,10	0,03	0,04	0,08	0,03

TABELLE 4.5: Ergebnis der Untersuchungen zum Haftreibungskoeffizienten

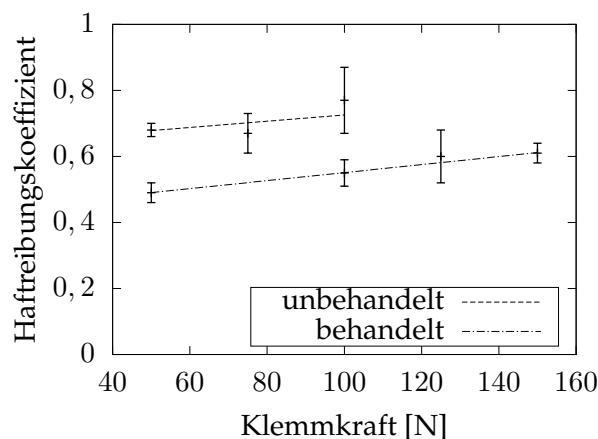


ABBILDUNG 4.22: Ergebnis der Untersuchungen zum Haftreibungskoeffizienten

Bei den Versuchen wurde ein Haftreibungskoeffizient zwischen 0,68 und 0,77 für die unbehandelten Proben und zwischen 0,49 und 0,61 für die behandelten Proben festgestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Klemmkraft bei beiden Probenarten der Haftreibungskoeffizient ansteigt. Wie bereits eingangs beschrieben, hat die Furchungsarbeit einen erheblichen Einfluss auf die Reibung. Es ist davon auszugehen, dass die Rauheitsspitzen tiefer in den weicheren Gegenkörper eindringen und so mehr Reibung erzeugen.

Bei der in Kapitel 5 folgenden Berechnung wird das Coulombsche Reibungsmodell verwendet. Da dies eine Konstante für den Haftreibungskoeffizienten vorsieht, wird dieser als untere Grenze zunächst mit 0,5 abgeschätzt. Da im Folgenden nur der Haftreibungskoeffizient μ_H betrachtet wird, wird dieser verkürzt als Reibungskoeffizient μ bezeichnet. Eine weitere Betrachtung erfolgt in Abschnitt 7.3 nach Auswertung der Versuche am Prüfstand.

4.4 Zusammenfassung der Materialkennwerte

In Tabelle 4.6 sind die ermittelten Materialkennwerte aus diesem Kapitel und bekannte Werte aus der Literatur zusammengefasst. In Aceton behandeltes ABS-P430 wird mit der Behandlungsdauer als tiefgestellter Index gekennzeichnet (z.B. ABS-P430₃₀). Die Orientierung wird mittels hochgestelltem Index gekennzeichnet. Die Ausrichtung YZ entspricht hierbei den Werten in Richtung der abgelegten Bahnen und ZX senkrecht dazu (vergl. Abschnitt 4.1.1 und Abbildung 4.2)

Parameter	Einheit	ABS-P430 ₃₀ ^{YZ}	ABS-P430 ₃₀ ^{ZX}
E-Modul E	MPa	1964 ^a	1544
Zugfestigkeit σ_m	MPa	27,8	19,7
Dichte ρ	g cm ⁻³		1,04 ^b
Querkontraktionszahl ν	-		0,4 ^c
Reibkoeffizient μ	-		0,5 ^d

TABELLE 4.6: Materialparameter von ABS-P430 nach einer Behandlung von 30 Sekunden mit Aceton für die Simulation und weitere Berechnungen
 a) studentische Arbeit [158]
 b) Ansys 19.1 Materialdatenbank
 c) ABS-P430 Materialdatenblatt [176]
 d) gegenüber Stahl

Ausgehend von diesen Werten wird im anschließenden Kapitel 5 die numerische Simulation des Kontaktes einer hydraulischen Spannbuchse mit Welle und Nabe durchgeführt. Dabei werden die Materialkennwerte von acetonbehandeltem ABS-P430 verwendet.

Kapitel 5

Numerische Modellierung und Simulation des Kontaktes zur Momentenübertragung

5.1 Modellierung und Simulation

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, bietet sich zur Lösung dieses komplexen Problems die Finite Elemente Methode (FEM) an. Das computergestützte Verfahren hat die Möglichkeit, eine umfangreiche Parametervariation in vertretbarer Zeit durchzuführen. Diese Parameter können sich auf die Geometrie, das Material, Kräfte, Momente sowie auf Verschiebungen beziehen. Die experimentelle Untersuchung dieser Parametervariationen ist aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren nicht in vertretbarem Rahmen durchführbar und wird daher mit ausgewählten Parametern zur Validierung des Modells durchgeführt.

Die Modellierung der Geometrie erfolgt mit dem CAD-Programm CATIA V5-6R2018, die FEM-Berechnung und Definition der Randbedingung mit ANSYS 19.1.

5.1.1 Geometrieerzeugung in CATIA V5

Für die Geometrieerzeugung mit CATIA V5-6R2018 wurden die drei folgenden, auf unterschiedlichen Ebenen wirksamen Modellierungsansätze miteinander kombiniert:

- Adaptermodellierung
- input-process-output (IPO)
- Parametrische Assoziativität

Bei der **Adaptermodellierung** (auch Skeletonmodellierung) handelt es sich um ein Schnittstellenmodell, bei dem definierte geometrische Informationen zwischen *Adapter* und Bauteilen ausgetauscht werden. Dies ist besonders bei Baugruppen mit Bauteilen, die in Beziehung zueinanderstehen, hilfreich, da geometrische Informationen, die mehrere Bauteile betreffen, zentral gesteuert werden können. Bei der Umsetzung dieser Methode für das Modell einer hydraulischen Spannbuchse wurden

alle Parameter, die die äußere Gestalt und damit angrenzende Bauteile beeinflussen, in den *Adapter* verlagert. Parameter, welche von diesen abgeleitet werden, sind im Modell des Bauteils zu finden.

Das **IPO-Modell** ist aus der elektronischen Datenverarbeitung abgeleitet. Die Abkürzung leitet sich von den ersten Buchstaben der Begriffe *Input-Process-Output* ab und beschreibt die Reihenfolge, in der Daten verarbeitet werden. Auf die Modellierung in einem CAD-Programm übertragen bedeutet dies, dass die Konstruktion eines Bauteils in Abschnitte unterteilt wird, welche zum einen logisch getrennt sind und zum anderen klar definierte Ein- und Ausgabeparameter besitzen. Diese Parameter können alle üblichen Konstruktionselemente wie zum Beispiel Flächen, Linien, Punkte, aber auch Zahlenwerte sein. Dieses Verfahren lässt sich bei den meisten historienbasierten CAD-Systemen einsetzen. Diese lassen sich in Systeme mit einstufiger und mehrstufiger Modellierungschronologie unterteilen, deren Strukturen in Abbildung 5.1 dargestellt sind.

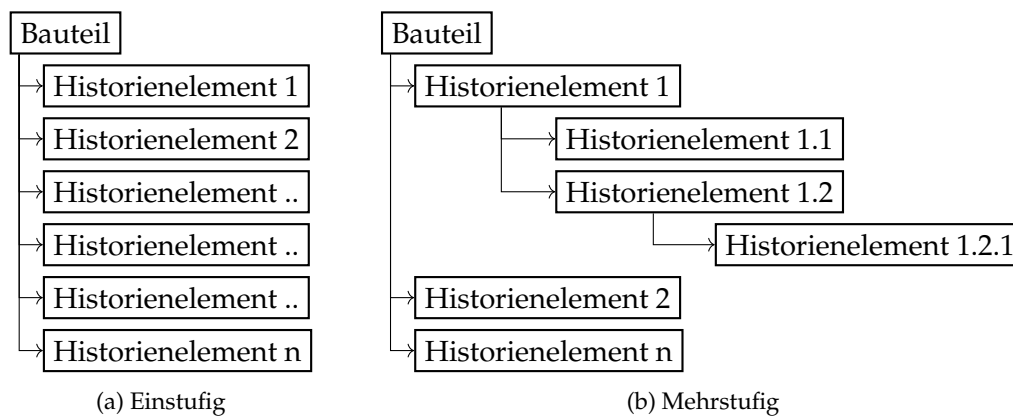


ABBILDUNG 5.1: Abstraktes Beispiel einer einstufigen bzw. mehrstufigen Modellierungschronologie nach [188] und [135]

CATIA V5 verwendet eine mehrstufige Modellierungschronologie, die auch das Referenzieren von Historienelementen aus jedem Ast gestattet, solange keine Update-Schleifen erzeugt werden. Dies kann zu schwer nachvollziehbaren vernetzten Strukturen führen. Die Trennung in die drei Bereiche *Input*, *Process* und *Output* sowie Konstruktionsabschnitt ermöglicht es, den Konstruktionsprozess logisch zu strukturieren und zu dokumentieren. Durch die Gliederung des Bauteils in Abschnitte können Änderungen vorgenommen werden, ohne dass das vollständige Modell betrachtet werden muss. Jeder Abschnitt besitzt einen eigenen Bereich, der als Schnittstelle zu anderen Abschnitten angelegt ist. Dieses ist zum einen der *lokale Input* und zum anderen der *lokale Output*. Weiterhin besitzt jedes Bauteil einen *globalen Input* und einen *globalen Output*. Die Verarbeitung der Eingangsparameter erfolgt im Bereich *Process*. Historienelemente im *Process* dürfen dabei nur auf Elemente im eigenen *Input* verweisen und Elemente im *Output* nur auf den eigenen *Process*. Um die Verknüpfung zwischen den Abschnitten zu erreichen, dürfen im *lokalen Input* Parameter aus den anderen *lokalen Outputs* oder *globalen Inputs* verwendet werden. Der *globale Input*

und *Output* ist als Schnittstelle zu anderen Bauteilen oder auch dem Adapter vorgesehen. Die IPO-Struktur eines CAD-Modells ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt.

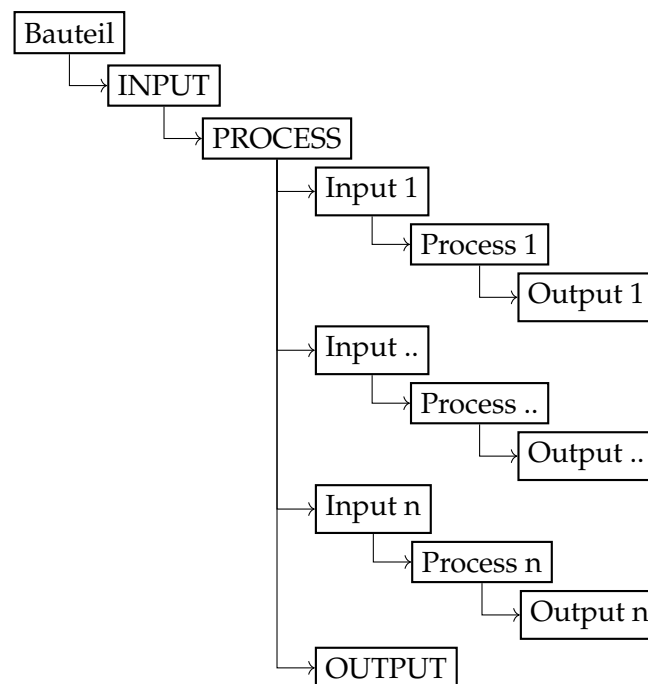


ABBILDUNG 5.2: Schematische Darstellung der IPO-Struktur eines CAD-Modells

Die Vorteile des IPO-Modells können nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn beim eigentlichen Konstruktionsprozess auf **parametrische Assoziativität** geachtet wird. Im Gegensatz zu der üblichen geometrischen Modellierung werden bei diesem Verfahren geometrische Objekte mithilfe von Kontrollmechanismen dynamisch-assoziativ an neue geometrische Randbedingungen angepasst. Das Ergebnis ist ein Modell, welches eine konsistente und effektive Planung sowie eine interaktive Steuerung des Bauteilmodells ermöglicht. [135]

Um Funktionsflächen updatestabil an ANSYS zu übergeben, wurden diese im CAD-Modell benannt und über die Funktion *Publications* ausgegeben. In ANSYS werden diese Geometriedefinitionen als *Named Selection* bezeichnet.

5.1.2 Modellierung und numerische Simulation mit ANSYS

Für die Modellierung wird ANSYS Workbench und ANSYS Mechanical eingesetzt. Diese Module sind mit einer grafischen Benutzeroberfläche ausgestattet und unterstützen bei der Erstellung des Programmcodes. ANSYS verwendet hier die eigene Skriptsprache ANSYS Parametric Design Language (APDL), die für die Verwendung von Lochkarten entworfen wurde, um den *Solver* (Gleichungslöser) zu steuern. ANSYS Mechanical enthält nicht den vollen Funktionsumfang von ANSYS

Classic, welches weiterhin entwickelt wird und als Vorgänger für ANSYS Mechanical betrachtet werden kann. Jedoch können fehlende Funktionen mittels APDL-Kommandoblöcken ergänzt werden. [75]

ANSYS Workbench wird als Projektmanager der Simulation eingesetzt, um die verschiedenen Berechnungsprojekte zu verwalten. Es enthält die Verwaltung von Analysetypen, Materialdaten, Geometrievarianten sowie deren Berechnungsergebnisse. ANSYS Mechanical ist das eigentliche Simulationswerkzeug für die FEM. Im Folgenden werden die gewählten Einstellungen und Annahmen für die Simulation beschrieben.

Geometrie- und Materialdefinition

Die Simulation verwendet Geometriedaten der hydraulischen Spannbuchse sowie die der umgebenden Bauteile Welle und Nabe. Auf die Berücksichtigung von Symmetrie wurde abgesehen, da nicht alle möglichen Varianten der Buchse symmetrisch aufgebaut sind. Weiterhin kann keine Symmetrie verwendet werden, wenn eine Verschiebung senkrecht zur Symmetrieebene stattfindet [58].

Ventilanschlüsse, Gewindebuchsen und andere Anbauten an die Spannbuchse werden nicht simuliert. Diese befinden sich nicht in dem Bereich, der für den Kontakt zur Welle und Nabe entscheidend ist.

Mit der ANSYS Version 19.1 wurde der Strukturmechanik eine neue Materialbibliothek hinzugefügt. Die Daten stammen von der Firma Granta Design, welche zur ANSYS Inc. Gruppe gehört. Hierin sind auch Materialdaten von ABS enthalten. Diese können für die Simulation nicht direkt übernommen werden, da das 3D-gedruckte Material andere Parameter aufweist. Jedoch können diese Definitionen als Grundlage verwendet und angepasst werden. Hierzu wurde das Materialmodell um einen orthotrop elastischen Bereich erweitert. Wie in Kapitel 4 beschrieben, verhält sich das gedruckte Material transversal isotrop. Dieses Verhalten kann mit einem orthotrop elastischen Bereich dargestellt werden, indem die Materialparameter in Richtung zweier Achsen identisch definiert werden. Die Geometrie ist dabei so ausgerichtet, dass die X-Achse der Wellenrichtung entspricht. Öffnungen zum Befüllen der Buchse liegen in der XZ-Ebene. Aus diesem Grund entspricht das E-Modul in X-Richtung dem E-Modul senkrecht zur 3D-Druckrichtung. Das E-Modul in Y und Z-Richtung entspricht demzufolge dem E-Modul parallel zur 3D-Druckrichtung. Für die transversale isotrope Nachgiebigkeitsmatrix ist aufgrund deren Symmetrie folgende Gleichung festgelegt [161]:

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} \quad \leftrightarrow \quad \nu_{yx} = \nu_{zx} = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \nu \quad (5.1)$$

Die Querkontraktionszahl in der Ebene senkrecht zur Vorzugsrichtung ist durch die Isotropieannahme gebunden und führt zu:

$$G_{\perp} = \frac{E_{\perp}}{2(1 + \nu_{yz})} \quad \rightarrow \quad \nu_{yz} = \nu_{zy} = \frac{E_{\perp}}{2G_{\perp}} - 1 \quad (5.2)$$

Unter der Annahme, dass die Querkontraktionszahl isotrop ist, kann das Schubmodul in den Ebenen wie folgt bestimmt werden:

$$G_{xy} = G_{xz} = \frac{E_{\perp}}{2(1 + \nu)} \quad G_{yz} = \frac{E_{\parallel}}{2(1 + \nu)} \quad (5.3)$$

Unter Verwendung dieser Gleichungen und der Materialkennwerte aus Tabelle 4.6 können folgende Materialparameter von ABS-P430₃₀ für das Materialmodell in ANSYS berechnet werden:

Parameter	Einheit	ABS-P430 ₃₀
E-Modul E_x	MPa	1544
E-Modul E_y, E_z	MPa	1964
Schubmodul G_{yz}	MPa	701
Schubmodul G_{xy}, G_{xz}	MPa	551
Querkontraktionszahl ν	-	0,4

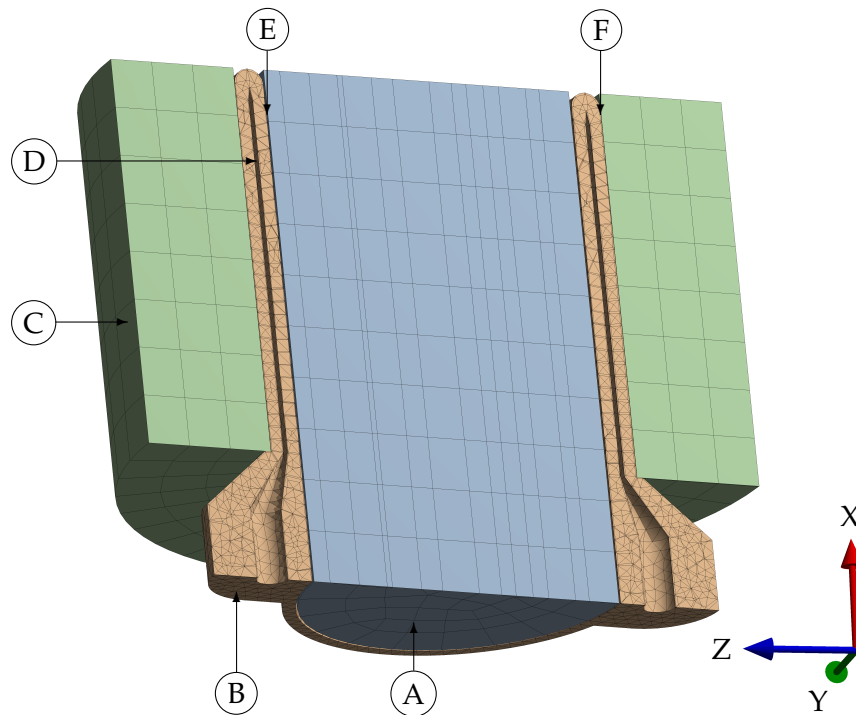
TABELLE 5.1: Erweiterte Materialparameter von ABS-P430₃₀ für das Materialmodell in ANSYS

Für die Welle und Nabe wurden die in ANSYS hinterlegten Materialparameter für Baustahl (S235JR) verwendet. Aufgrund der erheblich geringeren Festigkeit und Steifigkeit des Materials der Buchse ist keine nähere Betrachtung des Materials für Welle und Nabe erforderlich. Für die verwendeten Materialien wurde ein linear-elastisches Materialmodell verwendet. Eine Untersuchung zu den maximal auftretenden Dehnungen hat gezeigt, dass diese bei jeder Berechnung im elastischen Bereich liegen.

Randbedingungen und Lasten

Die Simulation wird in zwei Lastschritten durchgeführt. Im ersten wird der Druck in der Buchse bis zum Sollruck aufgebaut und die Flächenpressung zwischen Welle und Buchse sowie Buchse und Nabe hergestellt. Dabei verformen sich die Außenwände der Buchse. Anschließend wird im zweiten Schritt der Druck in der Buchse konstant gehalten und ein Moment über die Kontaktbereiche übertragen, bis es zum Überschreiten der Haftreibung kommt. Dieser Druck wirkt senkrecht auf die Innenflächen der Buchse.

Zur idealisierten Lagerung der Bauteile sind in beiden Lastschritten die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade der Welle an den Elementen der Stirnflächen (A) gesperrt. Die Buchse kann sich in der YZ-Ebene bis zum Kontakt mit der Welle bzw. Nabe frei bewegen. Ebenso ist die Rotation um die X-Achse frei, um die Übertragung von Kräften über die Buchse zu gestatten. Die Rotation um die Y und Z-Achse wurde gesperrt (B). Eigene, vorab getätigte Untersuchungen, haben gezeigt, dass diese Einschränkung vergleichbare Ergebnisse zum nicht gesperrten Zustand erzielt. Jedoch führt dies zu einem schnelleren Konvergieren der Rechnung und damit zu einer reduzierten Rechenzeit. Die Verschiebung in Richtung X-Achse



- | | |
|--|-------------------------------------|
| (A) Fläche für die Lagerung der Welle | (D) Fläche für die Druckaufbringung |
| (B) Fläche für die Lagerung der Buchse | (E) Kontaktbereich Welle/Buchse |
| (C) Fläche für die Lagerung der Nabe | (F) Kontaktbereich Nabe/Buchse |

ABBILDUNG 5.3: Schnitt durch das ANSYS-Modell in der XZ-Ebene und Koordinatensystem des Modells

wurde an Fläche (B) verhindert. Dies ist nur im ersten Lastschritt erforderlich, da es beim ersten Kontakt der Buchse mit einem anderen Körper zu einer ungebremsten Verschiebung in Richtung der X-Achse kommt, was eine Lösung des Gleichungssystems verhindert. Nachteil dieser Randbedingung ist, dass Verschiebungen aller anderen Elemente nur in Richtung der positiven X-Achse erfolgen können. Da es beim Druckaufbau im ersten Lastschritt auch zu einer Längenänderung der Buchse kommt, kann diese nur in Richtung der positiven X-Achse erfolgen, was zu erhöhter Spannung im Kontaktbereich führt.

Alternative Randbedingungen zur Verhinderung dieser Körperbewegung wurden untersucht und ausgeschlossen. Zum einen wurde ein weiterer Kontakt zwischen dem Bereich des Anschlages der Buchse und der Nabe definiert. Dabei ist es möglich, das Abheben des Kontaktes zu untersagen. Allerdings führt dies zu den gleichen Effekten wie bei der verwendeten Lösung bei signifikant erhöhtem Rechenaufwand.

Eine weitere Möglichkeit der Modellierung ist es, den Kontakt zwischen dem Anschlag und der Nabe darzustellen und das Abheben mit einem Federelement zwischen diesen Flächen zu verhindern. Hierbei muss die Federsteifigkeit so weit angepasst werden, bis es zu keiner erheblichen Körperbewegung kommt. Dafür ist eine

umfangreiche Parameterstudie erforderlich, da diese Federsteifigkeit vom Buchseninnendruck und dem Reibungskoeffizienten abhängig ist. Eine sehr hohe Federsteifigkeit hätte die gleichen Auswirkungen wie die der festen Einspannung in dieser Achse, ebenfalls bei erheblich erhöhter Rechenzeit.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Lagerung wurden untersucht, indem die Lagerreaktionen an der Einspannung bzw. die Kräfte im Kontaktbereich des Anschlages bezüglich der X-Achse gemessen wurden. Bei allen Lösungen lag das resultierende übertragene Moment der Buchse innerhalb der Konvergenzgenauigkeit. Daher wurde die eingangs beschriebene Lösung mit dem geringsten Rechenaufwand gewählt.

Um die übertragbare Kraft der Kontakte zu ermitteln, sind zwei Varianten möglich. Zum einen kann im zweiten Lastschritt eine Verdrehung der Nabe um die X-Achse durchgeführt werden und zum anderen ein Moment auf die Nabe aufgebracht werden. Allerdings führt ein Moment auf der Nabe zu einer unendlichen großen Verdrehung des Körpers, sobald der Haftkontakt versagt und damit eine Gegenkraft fehlt. Dies wiederum ist nicht mehr berechenbar, die Lösung schlägt fehl. Es wäre möglich, das Moment in Iterationen so weit zu erhöhen, bis das Modell nicht mehr berechenbar wird.

Die verschiebungsgesteuerte Simulation hat den Vorteil, dass die Simulation beendet wird, sobald die Verschiebung erreicht wird. Die notwendige Verdrehung, um das Versagen des Haftkontaktes bei allen gerechneten Varianten zu garantieren, wurde in einer Parameterstudie untersucht und auf zwei Grad festgelegt.

Sowohl die verschiebungsgesteuerte als auch die momentengesteuerte Simulation führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Da bei der verschiebungsgesteuerten Simulation das Moment nicht variiert werden muss, reduziert dies die notwendige Anzahl der zu lösenden Versuche und wurde daher gewählt. Folglich wurden damit alle Verschiebungen und Rotationen der Nabe im ersten Lastschritt untersagt und im zweiten eine Verdrehung um die X-Achse von zwei Grad vorgegeben. Beides geschieht an der Fläche (C).

Einflüsse aufgrund von Temperatur und Gravitation wurden nicht betrachtet.

Gleichungslöser, Konvergenz und weitere Einstellungen

Wie im Abschnitt "Modellierung des Kontaktes in ANSYS" erwähnt, kann mit dem gewählten Kontaktmodell nur der direkte Gleichungslöser verwendet werden. Daher wird im Folgenden nur dieser betrachtet. Um diesen Gleichungslöser optimal einzusetzen, müssen die zu lösenden Gleichungssysteme in den Arbeitsspeicher des Rechners passen. Bei der Verwendung von mehr als einem Prozessor müssen zudem Kopien für jeden Prozessor angelegt werden.

Um die Berechnung weiter zu beschleunigen, wurden die im Abschnitt "Randbedingungen und Lasten" genannten Schritte der Lastaufbringung weiter unterteilt. Die Standardeinstellungen sehen vor, dass ANSYS jeden Schritt der Lastaufbringung automatisch in kleinere Schritte aufteilt, um schneller eine Konvergenz zu erreichen.

Durch die manuelle Definition dieser Teilschritte kann zusätzlich Rechenzeit gespart werden. Durch wiederholtes Rechnen mit unterschiedlich vielen Teilschritten hat sich dabei ergeben, dass jeder Lastschritt durch drei weitere Schritte unterteilt werden sollte. Ein Konvergenzverlauf mit diesen Teilschritten ist an Abbildung 5.4 zu sehen.

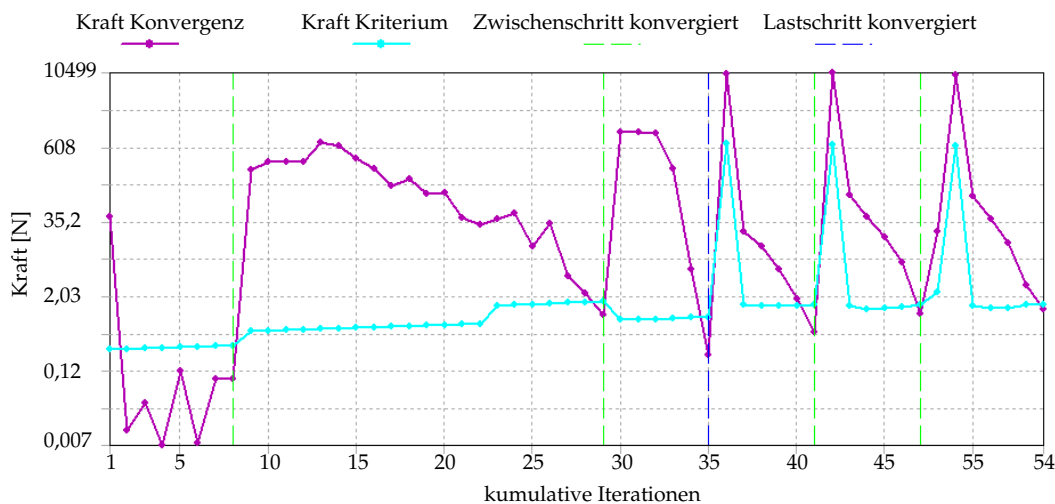


ABBILDUNG 5.4: Konvergenzverlauf der Last- und Teillast Schritte für das verwendete Modell

Die Achsen zeigen die Anzahl der durchgeführten Iterationen und den Restwert (eng. *residual*) der Kraft. Der Restwert ist die Differenz zwischen den internen und externen Kräften. Ziel ist es, diesen Restwert so weit zu verringern, dass er innerhalb eines festgelegten Kriterienbereiches liegt. In diesem Fall wird die Lösung als *konvergiert* betrachtet. Das Konvergenzkriterium der Kraft ist in türkis dargestellt und die im Modell erreichte Restkraft in magenta. Die senkrechte blaue Linie zeigt den Übergang von Lastschritt 1, dem Aufbringen des Innendruckes auf die Buchse, und dem Lastschritt 2, der Auslenkung der Nabe. Die senkrechten grünen Linien zeigen die erreichte Konvergenz der Teilschritte.

Es ist zu beachten, dass die aufgebrachten Kräfte in den Lastschritten entsprechend der Teilschritte aufgeteilt wurden. Im ersten Lastschritt ist dies der Innendruck der Buchse und im zweiten die Verdrehung der Nabe. Wie im Graphen zu erkennen ist, sind dennoch unterschiedlich viele Iterationen zwischen den Teilschritten nötig, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Um die Konvergenz für die meisten nicht linearen Analysen in den gängigen FEM-Programmen zu ermitteln, wird das Newton-Raphson-Verfahren eingesetzt [174]. An dieser Stelle wird nur auf eine Variante und die grundsätzlichen Aussagen zum Konvergenzverhalten eingegangen.

Beim Newton-Raphson-Verfahren wird die nachfolgende Gleichung gelöst:

$$[K_{n,i}^T]\{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (5.4)$$

Hierbei ist $[K_{n,i}^T]$ die Tangentensteifigkeitsmatrix für den Schritt n und die Iteration i .

$\{F^a\}$ ist der an der elastomechanischen Struktur angreifende Lastvektor. $\{F^{nr}\}$ ist der Vektor für die Rückstellkräfte. Der Vektor $\{u\}$ enthält die Verschiebungen des Systems. Bei jeder iterativen Lösung dieser Gleichgewichtsbedingung wird die verbliebene Differenz zwischen den Rückstellkräften $\{F^{nr}\}$ und dem angreifenden Lastvektor $\{F^a\}$ ermittelt und mit dem Konvergenzkriterium verglichen. Bei Erfüllung wird mit der Berechnung des nächsten Lastschrittes fortgefahren. [5]

In Darstellung 5.5a ist die Lösung der Gleichung 5.4 für den ersten Schritt graphisch dargestellt und in Darstellung 5.5b für den folgenden Schritt der Iteration. Weitere Schritte verlaufen entsprechend. Eine Lösung am Ende dieses Iterationsprozesses entspricht der Last $\{F^a\}$. Damit ist diese Lösung im Gleichgewicht.

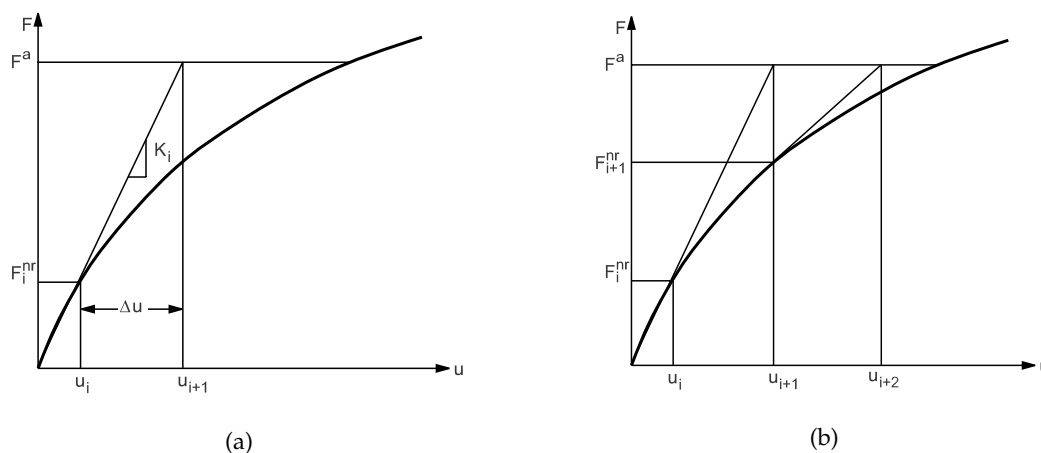


ABBILDUNG 5.5: Ablauf des Newton-Raphson-Verfahrens [5]

Für die überwiegende Mehrzahl der berechneten Parametervariationen konnte mit den genannten Teillastschritten eine Konvergenz erreicht werden. Bei den Varianten, bei denen dies nicht möglich war, wurde die Anzahl der Teillastschritte erhöht. Hierbei handelte es sich ausschließlich um Varianten, bei denen der Innendruck der Buchse keinen oder einen sehr geringen Kontakt mit der Nabe und/oder Welle zuließ.

Für die Berechnung aller Varianten wurde die Option „starke Deformation“ aktiviert. Hierbei werden bei jedem Iterationsschritt die Vektoren der angreifenden Kräfte so angepasst, dass sie immer entsprechend ihrer Ausgangsdefinition auf die Oberfläche wirken. Die Auswirkung dieser Option wurde untersucht und festgestellt, dass Änderungen der untersuchten Parameter nur innerhalb der Konvergenzstreuung stattfanden. Jedoch konnte mit der Aktivierung Option „starke Deformation“ eine reduzierte Rechenzeit bei den angesprochenen problematischen Parametervariationen beobachtet werden.

Um die übertragenen Kräfte im Kontaktbereich zu berechnen, ist es erforderlich, die Option „Knotenkräfte“ zu aktivieren.

Vernetzungsstrategie und Konvergenzanalyse

Bei der Vernetzung wird die bestehende Geometrie diskretisiert. Es entstehen einfach zu beschreibende Teilgebiete, die als Elemente bezeichnet werden, welche über ihre Eckknoten bzw. Mittelknoten miteinander verbunden sind.

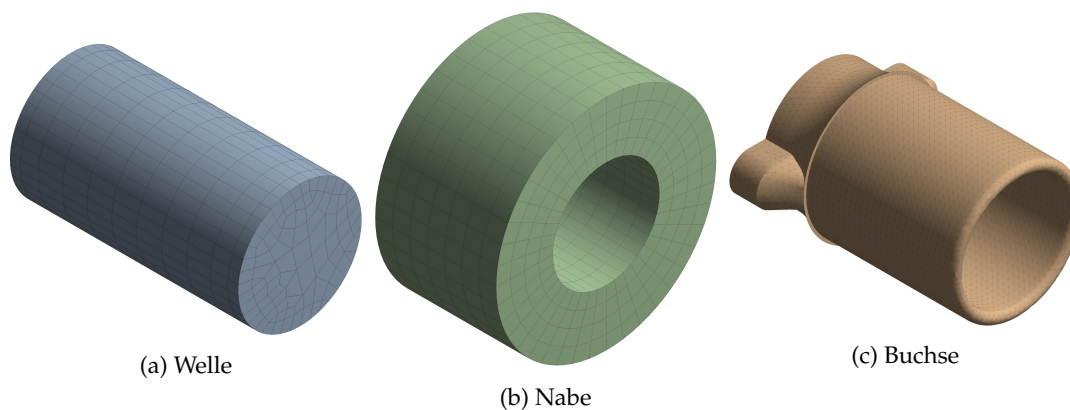


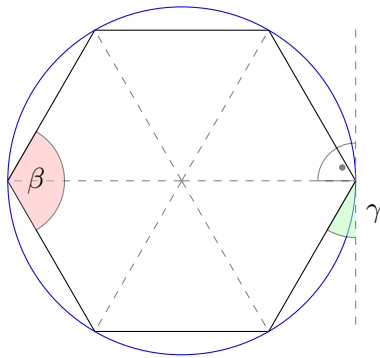
ABBILDUNG 5.6: FE-Netz von Welle, Nabe und Buchse

Das Modell besteht aus drei Geometrien, welche in Abbildung 5.6 mit der resultierenden Vernetzung an der Oberflächliche zu sehen sind. Dabei wurden unterschiedliche Vernetzungsstrategien eingesetzt.

Die **Welle** (Abbildung 5.6a) wurde mit der Einschränkung vernetzt, dass die Mantelfläche 40 gleich breite Elemente aufweisen muss. Dies hat den Hintergrund, dass der bereits angesprochene Fehler zwischen der diskretisierten Oberfläche und der modellierten Oberfläche gering sein sollte. Seit Version 19.1 unterstützt ANSYS Workbench eine Funktion mit dem Namen „Krümmung erfassen“ beim Vernetzten, welche den Winkel zwischen zwei angrenzenden Elementen mit der Ursprungsgeometrie vergleicht und gegebenenfalls automatisch feiner vernetzt. Allerdings führt diese Option zu unsymmetrischen Netzen und wird daher durch den folgenden Ansatz ersetzt.

Beim Vernetzten erfolgt eine Approximation des Kreises durch regelmäßige n-Ecke. In Abbildung 5.7 wird dies für ein Sechseck gezeigt. Der Winkel γ , welcher zwischen einer Seite (Sekante) und einer Tangente einer dazugehörenden Ecke aufgespannt wird, berechnet sich, in Weiterführung an die Berechnung der Innenwinkelsumme (Gleichung 5.5), wie in Gleichung 5.6 gezeigt. n entspricht hier der Anzahl der Ecken.

Vorversuche zu der Analyse haben gezeigt, dass es ab einem Winkelfehler von weniger als 5° zu keinem der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Konflikte kommt. Bei Verwendung eines 40-Ecks würde ein Fehlwinkel γ von 9° auftreten. Für die Vernetzung wurden *SOLID186* Elemente verwendet, welche einen zusätzlichen Mittelknoten an jeder Kante aufweisen. Daher wird effektiv ein 80-Eck verwendet, welches einen Fehlwinkel γ von $4,5^\circ$ aufweist. Eine schematische Abbildung eines *SOLID186* Elementes ist in Darstellung 5.8a zu sehen. Die Punkte Q,R,S,T,U,V,W,X,Y und Z



$$S_{\beta} = \sum_{n=0}^n \beta = (n - 2) * 180^{\circ} \quad (5.5)$$

$$\gamma = 180^{\circ} - \frac{S_{\beta}}{n} \quad (5.6)$$

ABBILDUNG 5.7: Approximation eines Kreises durch ein regelmäßiges n-Eck; hier n = 6

sind die genannten Mittelknoten. Insgesamt wurden 1001 *SOLID186*-Elemente für die Vernetzung der Welle verwendet.

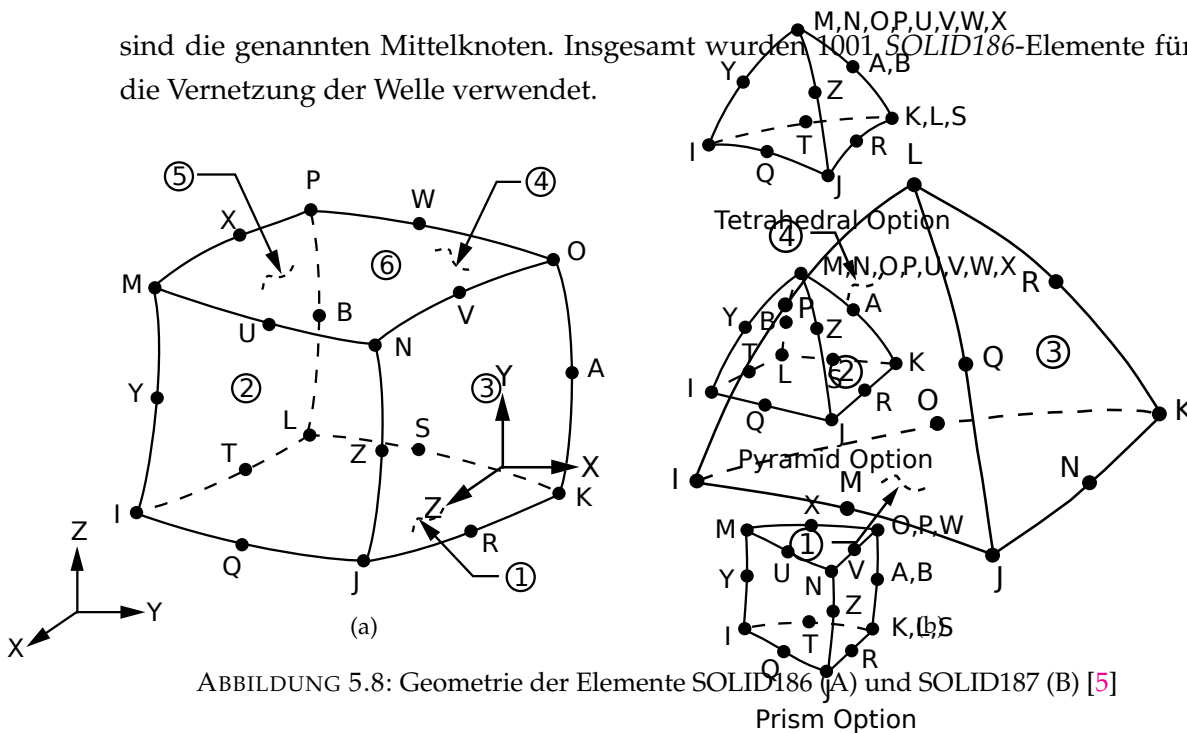


ABBILDUNG 5.8: Geometrie der Elemente *SOLID186* (A) und *SOLID187* (B) [5]

Bei der Vernetzung der **Nabe** (Abbildung 5.6b) wurde darauf geachtet, gleichförmige Hexaederelemente in der gesamten Geometrie zu verwenden. Dies bietet sich bei ringförmigen Strukturen an und führt hier zu lediglich vier unterschiedlich geformten Hexaedern, welche je 280-mal eingesetzt wurden. Diese 280 Hexaederelemente ergeben sich aus der gleichen Einschränkung wie bei der Welle, bei der 40 gleich breite Elemente über den Umfang erzwungen wurden und sieben Elemente über die Länge verwendet worden sind. Wie bei der Welle handelt es sich hierbei um *SOLID186* Elemente, von denen 1120 eingesetzt wurden.

Bei der Vernetzung der **Buchse** muss beachtet werden, dass sich diese im Vergleich zu den anderen Körpern stärker verformt und eine komplexere Geometrie aufweist. Daher werden hier *SOLID187* Elemente, wie sie in Abbildung 5.8b zu sehen sind, eingesetzt. Diese sind besonders für die hier auftretenden unregelmäßigen Netze geeignet [5]. Die Buchse wurde mit der Vorgabe der zu benutzenden Elemente

vernetzt. Die Elementengröße wurde mit dem Ziel variiert, eine Konvergenzanalyse durchzuführen.

Bei der Konvergenzanalyse wird die H-Methode angewandt. Bei dieser werden durch eine feinere Netzaufteilung bei der Diskretisierung mehr Elemente erzeugt, was zu genaueren Ergebnissen führen soll. Ziel der Konvergenzanalyse ist es, die minimale Anzahl der Elemente zu ermitteln, die notwendig sind, um ein Ergebnis innerhalb eines Konvergenzkriteriums zu erzielen. Für die Konvergenzanalyse wurden alle ANSYS Optionen für eine interne Konvergenzanalyse und automatische Netzverfeinerungen (adaptive Vernetzung) deaktiviert. Es wurde die maximale Kantenlänge der Elemente der Buchse variiert. Die Vernetzung der Welle und Nabe wurde nicht verändert. Die graphische Darstellung der einzelnen Berechnungen ist in Darstellung 5.9 zu sehen.

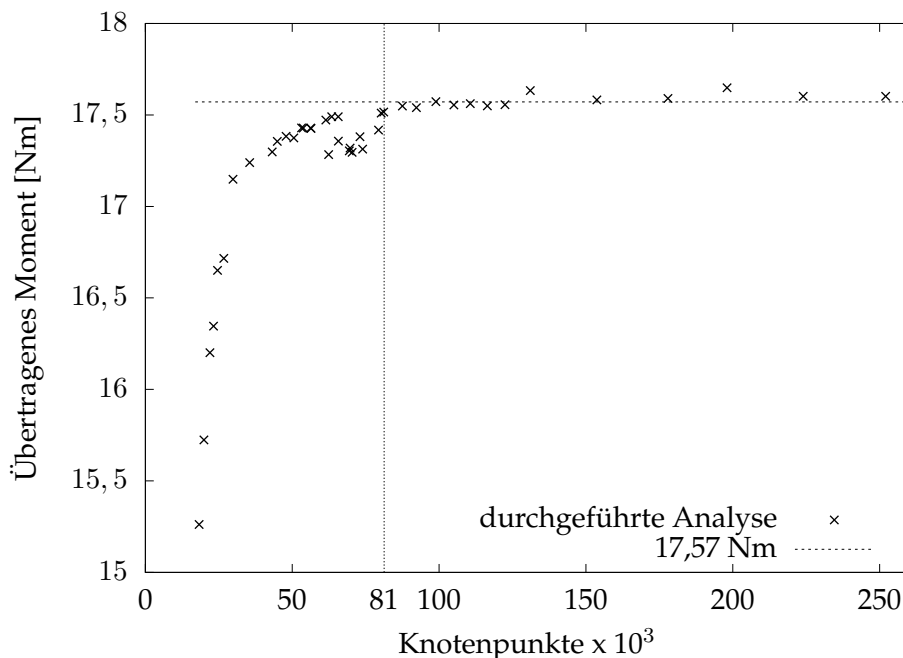


ABBILDUNG 5.9: Konvergenzanalyse des verwendeten Modells

Auf der Abszisse ist die Anzahl der Knoten im Modell aufgetragen, auf der Ordinate das maximal übertragene Moment. Die horizontale Linie stellt einen Wert von 17,57 Nm dar. Dieser ist der Mittelwert aller Messpunkte über 80 000 Knoten. Die Standardabweichung für diese liegt bei $\pm 0,04$ Nm bzw. $\pm 0,23$ %. Im Bereich von 65 000 bis 80 000 Knoten ist eine Reduzierung des übertragenden Momentes zu erkennen. Dies ist auf eine Singularität zurückzuführen, die durch eine feinere Vernetzung aufgelöst werden konnte. Daher sollten mehr als 80 000 Knoten eingesetzt werden, was bei einer Elementgröße von 2 mm mit 81 153 Knoten erreicht ist. Dieser Wert wird fortan in den Simulationen verwendet und ist in der Darstellung durch die vertikale Linie gekennzeichnet.

Aus dieser Vernetzung ergibt sich, dass für den Kontakt zwischen Buchse und Welle 4384 Elemente im Kontaktbereich liegen. Diese wurden auf der Seite der Buchse

mit 4384 *CONTA174* Elementen und auf der Seite der Welle mit ebenso vielen *TARGE170* Elementen vernetzt. Die umgekehrte Vernetzung der Welle mit *CONTA174* Elementen und Buchse mit *TARGE170* Elementen ist nicht erforderlich, da wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ein asymmetrisches Kontaktmodell verwendet wird. Im Kontakt Nabe/Buchse kommen 5026 *CONTA174* Elemente auf Seite der Buchse zum Einsatz und ebenso viele *CONTA174* Elemente für die Nabe. Weiterhin wurde die äußere Mantelfläche der Nabe und die Ventilseite der Buchse mit *CONTA174* Elementen vernetzt, um die äußeren Lasten einzubringen. Zum Aufbringen des Drucks auf die Innenseite der Buchse wurde diese Fläche mit 9083 *SURF154* Elementen vernetzt.

Die Reduzierung der Vernetzung auf das erforderliche Minimum ergab 242 337 zu lösende Gleichungen (Freiheitsgrade). Um dieses Problem in ANSYS zu berechnen, wird 1 GB Arbeitsspeicher benötigt. Wie bereits beschrieben, ist diese Menge für jeden Rechenprozess erforderlich. In Abhängigkeit von der Rechnerausstattung ist es bei dieser Modellgröße nun möglich, mehrere Prozessoren/Prozesse für die Berechnung einzusetzen.

5.2 Untersuchte Parameter

Das CAD-Modell und das FE-Modell, welche in Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2 beschrieben wurden, besitzen zahlreiche Parameter, deren Einfluss untersucht werden kann. Da es sich um eine kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindung handelt, wird besonders der Kontaktbereich betrachtet. Das übertragene Moment ist direkt abhängig vom Innendruck der Buchse, welcher den ersten Untersuchungsparameter darstellt. Simuliert wird eine Druckänderung in der Buchse gegenüber dem äußeren Druck von 0 MPa bis 2 MPa. Bei diesem Druckbereich ist die Flächenpressung zwischen den Bauteilen vergleichbar mit den Flächenpressungen beim Versuch zur Haftreibung in Abschnitt 4.3. Bei den in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Versuchen am Prüfstand wird ein Manometer mit einem ähnlichen Messbereich verwendet.

Als weiterer Parameter wird der Haftreibungskoeffizient betrachtet. Dieser ist mit den Vorversuchen (Abschnitt 4.3) nicht eindeutig bestimmbar und wird daher für die Simulation variiert. Es wird ein Bereich von 0,3 bis 0,8 berechnet.

Von den zahlreichen geometrischen Parametern werden alle aus dem Bereich, der sich nicht zwischen Welle und Nabe befindet, nicht betrachtet. Diese sind vergleichsweise frei in der Gestaltung und daher nicht entscheidend, um die Funktionsweise nachzuweisen. Im Anhang A.4 wird in Abbildung A.3 eine Übersicht über die geometrischen Parameter gezeigt. Die Wandstärke der Buchse ist abhängig vom 3D-Druckverfahren und wurde in Abschnitt 4.1.1 festgelegt. Damit ist es als Einziges die Variation des Spalts in der Buchse sinnvoll. Einer Veränderung der Breite der Druckkammer beeinflusst direkt den Spalt zwischen der Buchse und der Nabe bzw. der Welle und der Buchse. Da dieser Wert für die Montage entscheidend ist und durch den Fertigungsprozess (siehe Abschnitt 4.2) beeinflusst ist, wird als dritter

Parameter der Spalt zwischen Buchse und der Nabe bzw. der Welle und der Buchse gewählt. Dieser wird als symmetrisch angenommen und variiert zwischen einem direkten Kontakt der Bauteile und 0,25 mm.

5.3 Auswertung und Ergebnisse

Um die Abhängigkeit der Parameter zu untersuchen, sind in den folgenden Darstellungen das übertragene Moment in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten (μ) und der Spaltbreite (t), dem Reibungskoeffizienten und dem Spanndruck (p) (5.10) sowie der Spaltbreite (5.11) und dem Spanndruck (5.12) dargestellt. Für eine bessere Visualisierung und für nachfolgende Berechnungen wurde eine Fläche passend zu den Datenpunkten gefittet. Hierfür wurde als Ausgangsgleichung eine Fläche zweiter Ordnung (Paraboloid) gewählt, welche in Gleichung 5.7 gezeigt wird.

$$f(x, y) = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 \tag{5.7}$$

Um die Anpassungsgüte zu überprüfen, wurde der Chi-Quadrat-Test (χ^2) verwendet. Bei Verwendung des normalisierten Chi-Quadrat-Wertes (χ^2_κ/κ) kann eine Hypothese bei einem Wert um 1,0 oder weniger akzeptiert werden [141, 197]. κ gibt die Anzahl der Freiheitsgrade an.

	$f(\mu, t)_{\mu^2}$		$f(\mu, t)$		$f(\mu, p)$		$f(t, p)$	
	Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ
a	3,04	$\pm 0,72$	0	-	0	-	0	-
b	121,94	$\pm 2,36$	121,39	$\pm 0,62$	-80,37	$\pm 0,53$	-372,37	$\pm 3,27$
c	-87,18	$\pm 6,16$	0	-	0	-	53,39	$\pm 0,16$
d	-0,01	$\pm 2,04$	0	-	0	-	301,82	$\pm 19,04$
e	-683,88	$\pm 6,42$	-681,4	$\pm 5,42$	96,68	$\pm 0,36$	-32,36	$\pm 2,5$
f	448,84	$\pm 24,65$	0	-	0	-	0	-
κ	42		46		57		51	
χ^2_κ/κ	0,13		1,06		0,28		0,23	

TABELLE 5.2: Koeffizienten der Gleichung 5.7 mit dem asymptotischen Standardfehler σ und der Anpassungsgüte χ^2_κ/κ

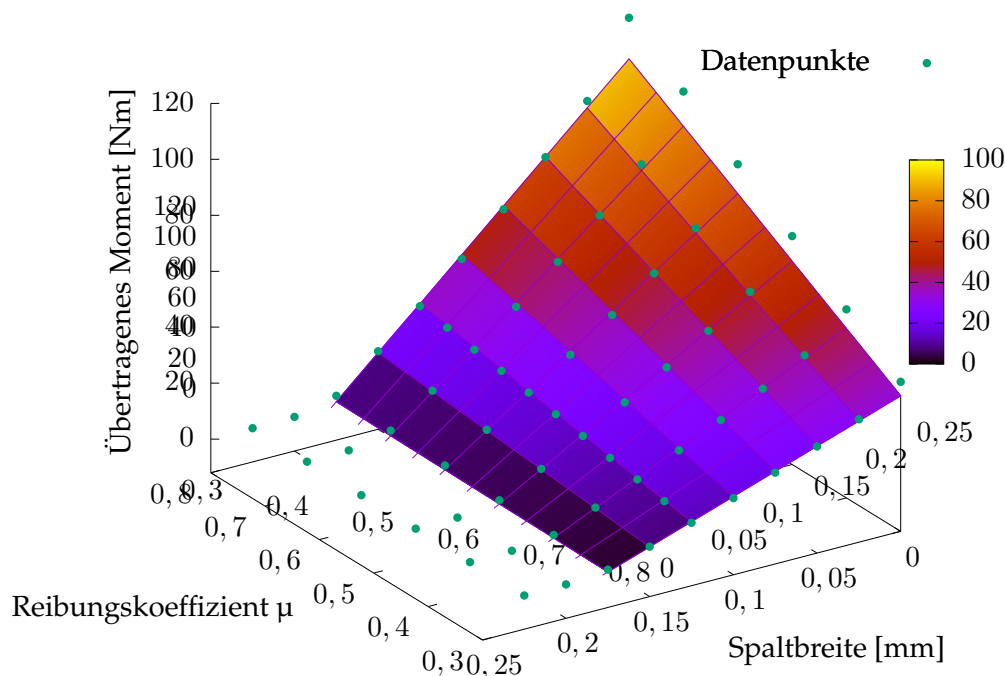
Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Um Parameter ohne Korrelation zu ermitteln, wurde eine Korrelationsmatrix erstellt. Diese wird beispielhaft für die Funktion $f(\mu, t)_{\mu^2}$ in der Tabelle 5.3 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass der Parameter d , welcher den quadratischen Anteil des Reibungskoeffizienten μ darstellt, unabhängig von den Parametern c , e und f ist. Es besteht lediglich eine Abhängigkeit von a und b .

b ist der lineare Anteil des Reibungskoeffizienten und a eine Konstante für die Gleichung, welche eine Verschiebung auf der Z-Achse (also dem übertragenen Moment) darstellt.

	a	b	c	e	f	d
a	1					
b	-0,906	1				
c	-0,508	0,145	1			
e	0,477	-0,244	-0,585	1		
f	0,261	-0,006	-0,799	0,012	1	
d	0,773	-0,951	0,017	-0,039	0,006	1

 TABELLE 5.3: Korrelationsmatrix der Koeffizienten für $f(\mu, t)_{\mu^2}$

Somit können der Parameter d und die Konstante a aus der Gleichung entfernt werden. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis es nur noch vollständig abhängige Parameter gibt. Das Resultat ist in Tabelle 5.2 Spalte $f(\mu, t)$ und in der Darstellung 5.10 zu sehen.


 ABBILDUNG 5.10: Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient μ und der Spaltbreite t bei einem Spanndruck von 1,2 MPa

Es wird der Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten μ und der Spaltbreite dargestellt. Der Spanndruck liegt für diese Untersuchungen bei 1,2 MPa. Der Reibungskoeffizient wurde von 0,3 bis 0,8 in Schritten von 0,1 variiert und die Spaltbreite von 0 mm bis 0,2 mm in Schritten von 0,05 mm. Bei einer Spaltbreite von 0,1 mm konnten zusätzliche Daten verwendet werden, daher ist hier der Reibungskoeffizient in Schritten von 0,05 variiert. Die Datenpunkte bei einer Spaltbreite von 0 mm wurden für die Approximation der Fläche nicht betrachtet, da hier Ausreißer auftreten. Aufgrund der Vernetzung kommt es bei dieser Spaltbreite zu lokalen Durchdringungen der Ausgangsgeometrien, was zu einer Vorspannung ähnlich einer Pressverbindung führt.

Bei Betrachtung der Grafik ist zu erkennen, dass ab einer bestimmten Spaltbreite

keine Kraft mehr übertragen wird. Dieser Wert ist unabhängig vom Reibungskoeffizienten. Die Aussage kann bei Betrachtung der Gleichung 5.7 mit den Parametern aus Tabelle 5.2 Spalte $f(\mu, t)$ bestätigt werden. Die Gleichung der Fläche lautet:

$$f(\mu, t) = 121,39\mu - 681,4\mu t \quad (5.8)$$

Es zeigt sich, dass eine Schnittgerade der Fläche $f(\mu, t)$ mit der Ebene bei 0 N m bei einer Spaltbreite von 0,178 mm auftritt, wenn ein Spanndruck von 1,2 MPa herrscht. Dieser Wert ist unabhängig vom Reibungskoeffizienten und entspricht damit den Erwartungen an die physikalischen Randbedingungen.

Nachfolgend ist in Abbildung 5.11 der Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und dem Spanndruck dargestellt.

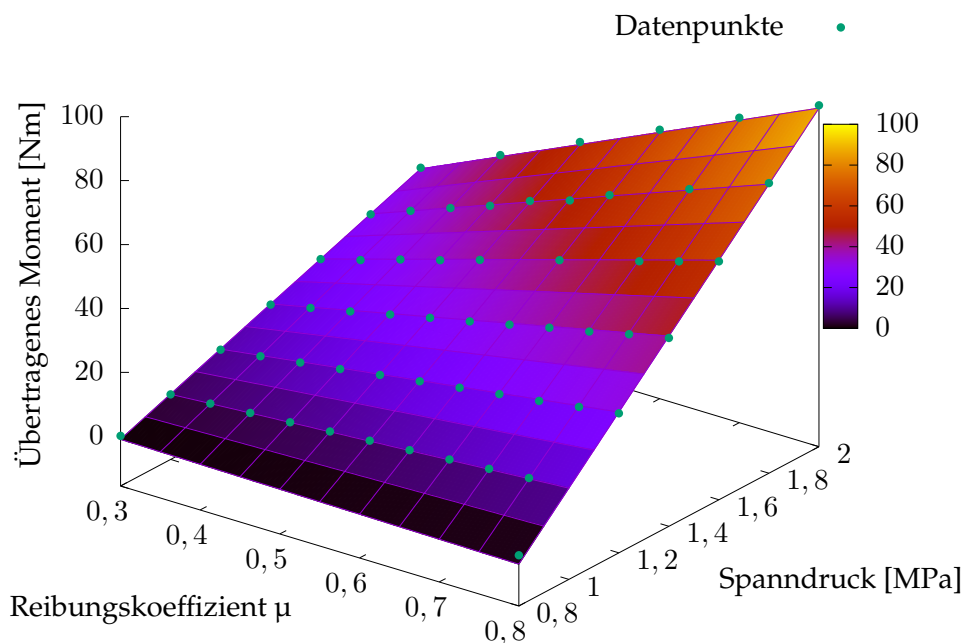


ABBILDUNG 5.11: Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient μ und dem Spanndruck p bei einer Spaltbreite von 0,125 mm auf das übertragene Moment

Die beiden Spalten zwischen der Buchse und Nabe bzw. Welle sind bei den Ergebnissen für die Darstellung auf einen Ausgangswert von 0,125 mm festgelegt. Der Reibungskoeffizient wurde von 0,3 bis 0,8 in Schritten von 0,05 variiert und der Spanndruck von 0,8 MPa bis 2,0 MPa in Schritten von 0,2 MPa.

Ebenso wie in der Darstellung 5.10 ist zu erkennen, dass es bei einem übertragenen Moment von 0 N m zu einem reibungskoeffizientenunabhängigen Verhalten kommt. Auch hier kann der Wert für den nötigen Spanndruck mit der Gleichung 5.7 und den Parametern aus Tabelle 5.2 Spalte $f(\mu, p)$ berechnet werden. Es ergibt sich für eine Spaltbreite von 0,125 mm ein Spanndruck von 0,83 MPa, ab dem ein Moment übertragen werden kann.

Da der Reibungskoeffizient keinen Einfluss auf den ersten Kontakt zwischen Welle und Nabe hat, ist die Betrachtung des Verhaltens der Spaltbreite und des Spanndruckes auf das übertragene Moment sinnvoll. Dies ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

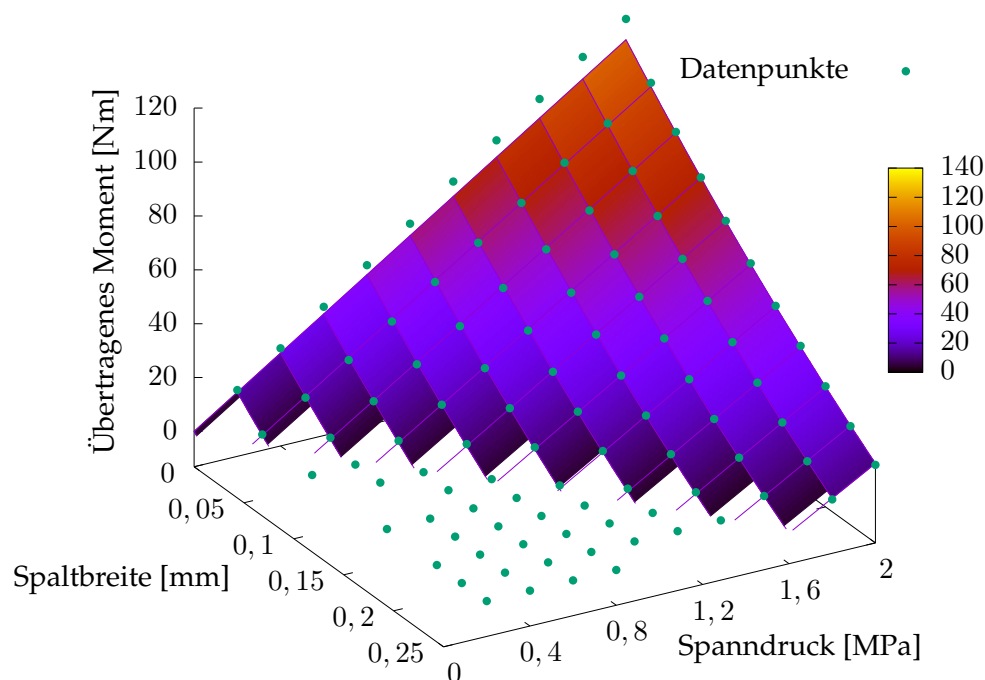


ABBILDUNG 5.12: Zusammenhang zwischen der Spaltbreite t und dem Spanndruck p bei einem Reibungskoeffizienten von 0,5 auf das übertragene Moment

Für diese Darstellung wurde der Reibungskoeffizient auf 0,5 festgelegt. Die Spaltbreite wurde von 0 mm bis 0,2 mm in Schritten von 0,05 mm und der Spanndruck von 0,8 MPa bis 2,0 MPa in Schritten von 0,2 MPa variiert. Es ist darauf zu achten, dass es bei Modellen, bei denen kein vollständiger Kontakt ausgebildet und damit kein Moment übertragen werden konnte, bei einigen Parameterkombinationen zu keiner Konvergenz im Modell kam. Dies ist besonders bei hohen Spanndrücken und großem Spalt und bei kleinem Spalt mit niedrigen Drücken aufgetreten.

Die dargestellte Fläche stellt die Gleichung 5.7 mit den Parametern aus Tabelle 5.2 Spalte $f(t, p)$ dar und lautet:

$$f(t, p) = -372,37t + 53,39p + 301,82t^2 - 32,36tp \quad (5.9)$$

Auch hier wurden die Datenpunkte bei einer Spaltbreite von 0 mm und übertragenen Momenten von weniger als 0,1 N m nicht in der Regressionsanalyse betrachtet. Es zeigt sich, dass beide Parameter einen nicht linearen Einfluss auf das übertragene Moment haben.

Die Darstellung des Zusammenhanges aller drei Parameter auf das übertragene Moment ist graphisch nur unter Einschränkungen möglich. Abbildung 5.13 zeigt eine

Darstellung dieser 4-dimensionalen Daten. Hierfür wurden Flächen gleicher Momente in Inkrementen von 20 N m dargestellt. Zusätzliche Datenpunkte für die Darstellung wurden linear interpoliert.

Die Ergebnisse ermöglichen es, für jede Parameterkombination das zu übertragene Moment zu ermitteln oder im Umkehrschluss vom Moment auf die Parameter zu schließen. Dies wird bei der Bewertung der experimentellen Ergebnisse in Abschnitt 7.4 verwendet.

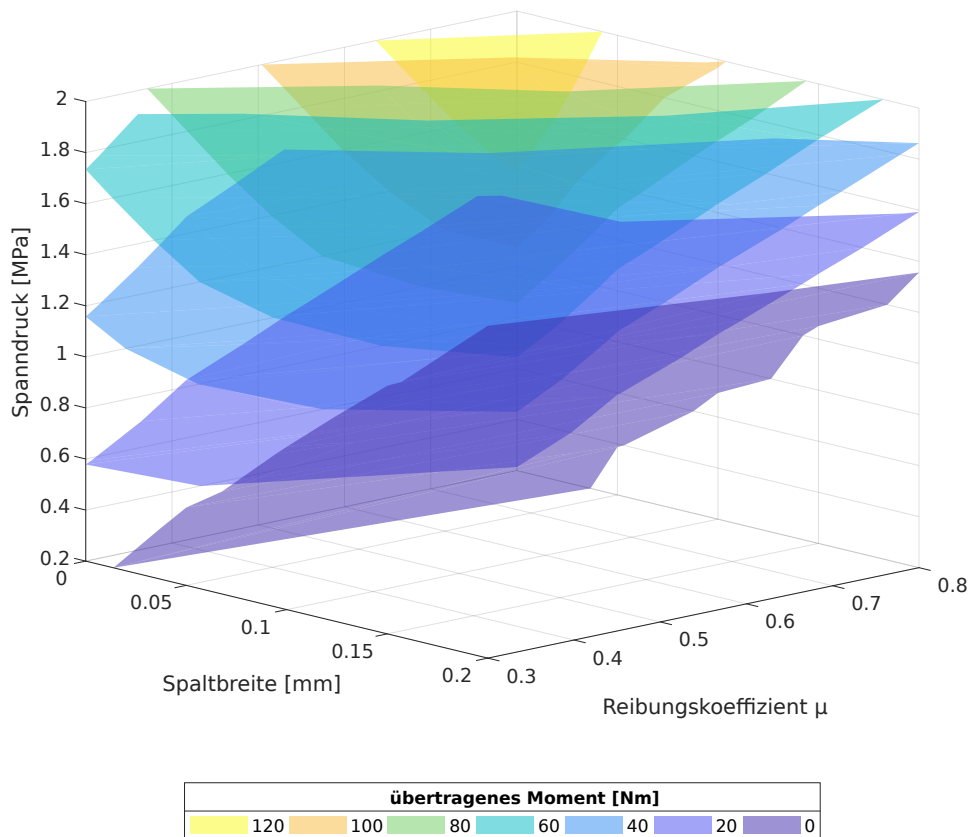


ABBILDUNG 5.13: Auswirkung von Reibungskoeffizient, Spanndruck und Spaltgröße auf das übertragene Moment

Kapitel 6

Entwicklung von funktionsfähigen Prototypen mittels 3D-Druck

Die Entwicklung erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die Anforderungen an den Prototypen aufgestellt. Anschließend wurde die Interaktion zwischen CAD-Geometrie und *Slicer* in Bezug auf die Dichtigkeit des Bauteils betrachtet. Als nächster Schritt erfolgte die Betrachtung der Oberflächenbehandlung und die Qualifizierung eines Ventils, inklusive eines nötigen Gewindeeinsatzes. Abgeschlossen wurde die Entwicklung der Prototypen mit Dichtigkeitstests der gesamten Baugruppe, bevor Versuche am Prüfstand stattfanden.

6.1 Anforderungen an einen Prototypen

Die Anforderungen an einen Prototypen sind in der Anforderungstabelle 6.2 erfasst. Für diesen wurde festgelegt, dass eine bestehende hydraulische Spannbuchse vom Typ ETP-Express 40 am Prüfstand (siehe Abschnitt 7) ersetzt werden soll. Mit dieser Anforderung sind die Dimensionen des Durchmessers der Welle und der Nabe sowie die Länge der Klemmfläche vorgegeben. Aufgrund der zunächst unbekanntenen Toleranzen 3D-gedruckter Bauteile und dem im Vergleich zu Edelstahl elastischeren Verhalten des Druckmaterials wurde ein Spalt wellen- und nabenseitig kleiner als 0,25 mm gefordert. Entsprechend der ETP-Express 40 soll ein einseitiger Anschlag für die Nabe vorhanden sein.

Der Vorteil hydraulischer Spannelemente, keine beweglichen Komponenten zu beinhalten, soll beibehalten werden. Dabei wird die Einschränkung vorgenommen, dass dies nicht für das verwendete Ventil zutrifft. Da sich diese Arbeit auf die Anwendung der 3D-Drucktechnik fokussiert, wird für das Ventil und nötiges Werkzeug der Einsatz von Kaufteilen gefordert. Die Fertigung soll mit dem 3D-Drucker *uPrint SE Plus* und dem zugehörigen Material ABS-P430 geschehen. Daraus leitet sich die Forderung ab, dass ein Füllmedium verwendet werden muss, welches gegen das 3D-Druckmaterial beständig ist.

Die Forderung nach einem übertragbaren Moment von 100 N m wurde in Absprache

mit der Firma Norditec Antriebstechnik GmbH, angelehnt an mögliche Einsatzbereiche, festgelegt. Dies ist als Wunsch formuliert, da das übertragbare Moment im Zusammenhang mit dem Spanndruck untersucht werden soll.

Anforderungsliste für:		Datum: 10. Juni 2020	
Prototyp der hydraulischen Spannbuchse			
Nr.	F/W	Anforderung	Bemerkung, Quantifizierung
1		Geometrie	
1.1	F	Durchmesser Welle (d)	40 mm
1.2	F	Durchmesser Nabe (D)	48 mm
1.3	F	Länge des Klemmbereiches (L)	55 mm
1.4	F	Spalt naben- und wellenseitig	< 0,25 mm
1.5	F	einseitiger Nabenanschlag	vorhanden
2		Kinematik	
2.1	F	bewegliche Teile	keine (Ventil ausgenommen)
3		Kräfte / Momente	
3.1	W	übertragbares Drehmoment	100 N m
4		Energie	
5		Stoff	
5.1	F	Material der Buchse	ABS-P430
5.2	F	Fluides	nicht ABS-P430 schädigend
5.3	W	Ventil	fluidbeständig
6		Sicherheit	
6.1	W	Bruchverhalten	keine Splitterbildung
7		Fertigung	
7.2	F	3D-Drucker	uPrint SE Plus
7.3	F	Ventil	Kaufteil
8		Montage	
8.1	W	de-/montierbar	ja, wiederverwendbar
8.2	W	Montagewerkzeug	Kaufteil

TABELLE 6.2: Anforderungsliste an eine Prototypenspannbuchse

6.2 Ablauf der Entwicklung

Um die Dichtigkeit 3D-gedruckter Bauteile zu untersuchen und darauf basierende Konstruktionsregeln festzulegen, wurden buchsenähnliche Geometrien gedruckt und einzelne Aspekte untersucht. Die Testobjekte erhielten eine Versionierung der Form A.B.C. Sprünge in der Entwicklung erhielten eine neue Hauptversionsnummer (A), Varianten eine Nebenversionsnummer (B) und Kopien einer Variante eine Buildnummer (C).

Im Folgenden wird eine Übersicht ausgewählter wichtige Schritte der Entwicklung gegeben. Bis Version 2.1.0 wurde die Druckdichtigkeit ausschließlich mit Luft geprüft. Bis Version 3.0.0 wurde eine Geometrie, angelehnt an die in der Anforderungsliste 6.2 geforderten, verwendet, welche geringere Außen- und Innendurchmesser aufweist. Zusätzlich ist eine Auswahl der gedruckten Buchsen in Abbildung 6.1 gezeigt.

- Buchse 0.1.0 wurde am 10.01.2018 gedruckt. Diese Buchse besitzt Flächen parallel zur Bauplattform des Druckers. Besonders an diesen Flächen konnte eine Undichtigkeit festgestellt werden.
- Bei Version 0.2.0 konnte durch Verrundungen die Undichtigkeit reduziert werden.
- Version 0.3.0 bis 0.6.0 wurden für Versuche zur Acetonbehandlung und alternativer Lösungen verwendet. Version 0.5 konnte einen Druck von 0,1 MPa über den Verlauf von zwei Tagen halten.
- Ab Version 1.0.0 wurde die Wanddicke auf die minimal druckbaren Werte reduziert (siehe Begründung in Abschnitt 4.1.1) und Versuche zur Tauchzeit in Aceton vorgenommen.
- Buchse 1.0.1 war luftdicht bei 0,6 MPa.
- Ab Version 2.0.0 wurde der Bereich des Anschlags und der Befüllungsöffnungen bearbeitet. Version 2.1.0 erhielt einen symmetrischen Auslass.
- Version 3.0.0 und folgende erhielten die geforderte Geometrie der Anforderungsliste und konnten damit am Prüfstand verbaut werden. Von 3.0.0 bis 3.9.0 wurden hauptsächlich verschiedene Flanschbereiche getestet.
- Die Buchsen 3.9.x wurden für Versuche am Prüfstand eingesetzt, gesondert im Anhang als Abbildung A.4 und A.5 gezeigt.
- Version 4.0.0 wird für alternative FDM-Verfahren verwendet, welche in Kapitel 8 angesprochen werden.

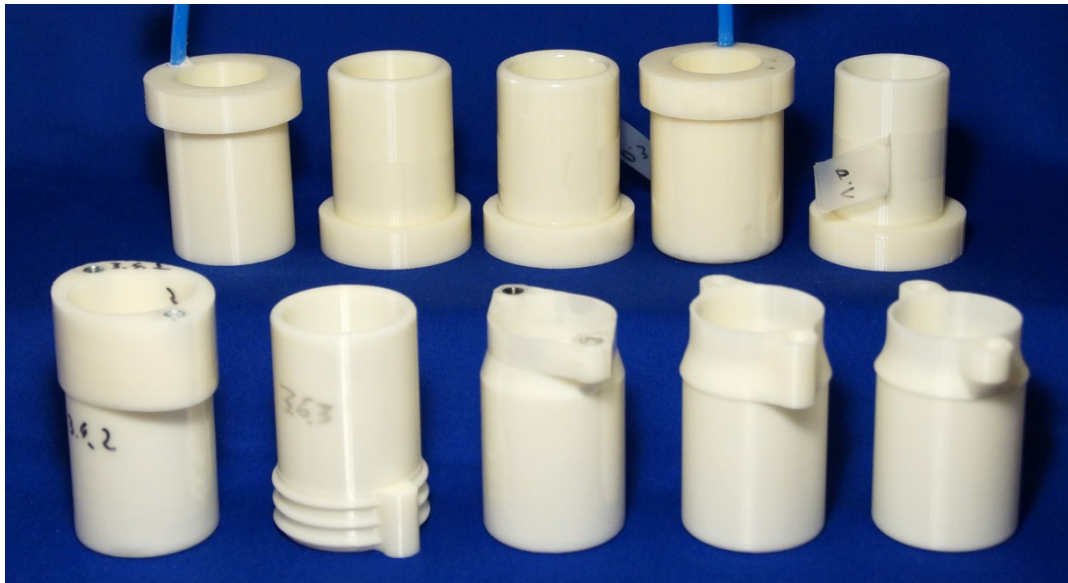


ABBILDUNG 6.1: Auswahl einiger Prototypen v.l.n.r. oben: 0.1; 0.2; 0.3; 0.5 und 1.0
unten: 3.4; 3.6; 3.7; 3.8 und 3.9

6.3 Füllmedium, Ventil, Gewindeeinsätze

Verschiedene Füllmedien und die Möglichkeit der luftfreien Befüllung für Hohlmantelspannhülsen wurde in [105] untersucht. ETP verwendet für seine Buchsen der Expresss-Reihe ein ölähnliches Medium mit Lebensmittelzulassung [59]. Für die Prototypen wurde entschieden, Fett als Medium einzusetzen. Hauptgrund hierfür ist die einfache Handhabung und gute Verfügbarkeit. Andere geeignete Füllmedien werden in Kapitel 8 angesprochen.

Fett als Füllmedium erlaubt es, auf vorhandene Ventil- und Befülltechnik zurückzugreifen. Als Ventil wurden DIN 3404 Flachschiernippel mit 10 mm Kopf und M6 Gewinde verwendet. Auf diese Flachschiernippel wird eine Schiebekuppelung einer Fettpresse geschoben und Fett in die Prototypen gepresst. Es wurde die Manometer-Fettpresse HS55 der Firma MAFA-Sebald Produktions-GmbH benutzt. Um die Flachschiernippel mit M6 Gewinde in die Buchse einzuschrauben, wurden Gewindeeinsätze der Firma Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH vom Typ Ensät-SBD eingesetzt. Diese besonders dünnwandigen Einsätze sind mit einem selbstschneidenden Gewinde für den Einsatz in Kunststoff vorgesehen [102]. Um die Dichtigkeit zwischen Kunststoff und Einsatz zu erhöhen, wurde zusätzlich ein ABS-geeigneter Klebstoff auf die Schneidflächen aufgebracht. Die Dichtigkeit der Gewindeeinsätze wurde an eigenen Testkörpern geprüft. Die Testkörper mit eingeklebten Gewindebuchsen konnten einem Druck von 10 MPa bis zum Versagen standhalten. Der Bruch erfolgte nicht im Gewindebereich. Die Ventile wurden gegenüber den Gewindeeinsätzen mit Teflondichtband oder Gewindedichtmittel abgedichtet. Ein Bersttest nach dem in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Versuch zur Dauerfestigkeit an einer am Prüfstand verbauten Buchse ergab einen Berstdruck von 8 MPa. Das Versagen trat am Einlass im Übergang zwischen Gewindeeinsatzkernloch und Druckkammer auf.

6.4 Fertigung der Prototypen

Die Fertigung der Prototypen ab Version 3.0.0 läuft in den vier folgenden Schritten ab:

1. Buchsenkörper 3D-drucken
2. Gewindeeinsätze und Ventile montieren
3. Acetonbehandlung
4. Befüllen

Im ersten Schritt wird der Buchsenkörper im 3D-Drucker hergestellt. Dieser Vorgang dauert mit dem verwendeten *uPrint SE Plus* für eine Buchse ca. 1,5 Stunden. Die Druckzeit steigt linear mit der zu druckenden Anzahl.

Nach Abschluss des Druckens werden die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Gewindebuchsen und Ventile montiert.

Die montierten Ventile verhindern bei der folgenden Acetonbehandlung das Eindringen des Lösungsmittels in den Buchsenkörper und ermöglichen es, die Buchse bei der Behandlung festzuhalten, ohne dass die angeweichte Oberfläche berührt werden muss. Die Buchsen wurden 30 Sekunden lang vollständig in das Aceton getaucht und anschließend mindestens 48 Stunden getrocknet. Die Parameter hierfür wurden in Abschnitt 4.1.3 ermittelt.

Für die Befüllung wurde ein Ventil entfernt und über das zweite Fett in die Buchse gebracht. Durch die Öffnung kann die verdrängte Luft entweichen. Etwaige Luft-einschlüsse werden für diese Prototypen nicht betrachtet und wurden, wie bereits erwähnt, in [105] untersucht.

Nach der Befüllung ist die Buchse bereit für die Montage. Das entfernte Ventil kann wieder montiert, die Öffnung mit einem Blindstutzen verschlossen, oder wie in den Versuchen geschehen, ein Manometer in den offenen Anschluss geschraubt werden.

Kapitel 7

Experimentelle Untersuchungen an Prototypen

Mit den nachfolgenden Untersuchungen werden drei Ziele verfolgt:

- Nachweis der Funktionsfähigkeit 3D-gedruckter hydraulischer Spannbuchsen
- Validierung der numerischen Untersuchungen
- Untersuchung des Haftreibungskontaktes

Um dies zu erreichen, ist ein Prüfstand erforderlich, dessen Entwicklung und Aufbau im Folgenden beschrieben wird.

7.1 Entwicklung und Aufbau des Prüfstandes für die Momentenmessung

Ursprünglich wurde der Prüfstand im Rahmen des Projektes HYLOW entwickelt, welches das Ziel hatte, einen Wasserkraftkonverter für geringe Förderhöhenunterschiede zu entwickeln [22]. Nach dem Auslaufen des Projektes wurde der Prüfstand für den Test von Hohlmantelspannhülsen im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Norditec Antriebstechnik GmbH teilweise umgebaut, aber nicht eingesetzt [105].

Im Jahr 2017 wurde damit begonnen, den Prüfstand für die Prüfung von hydraulischen Spannbuchsen umzurüsten. Da davon ausgegangen wurde, dass Spannbuchsen im direkten Vergleich zu bestehenden Lösungen der Firma ETP Transmission AB geprüft werden, wurde ein Prüfmoment von 1000 N m angestrebt. Der umgerüstete Prüfstand ist im Anhang auf Abbildung A.6 und A.7 zu sehen. Als Vergleich dazu wird in Abbildung 7.1 und 7.2 der Stand nach 2018 gezeigt.

Bei diesem Umbau wurde die bestehende, manuell betätigte mechanische Bremse gegen die pneumatische Bremszange DH 025 PFM-635R-25 der Firma RINGSPANN GmbH getauscht. Diese kann bis 5900 N Klemmkraft bei einem Maximaldruck von 0,6 MPa erzeugen. Die Bremszange kann mit der in dieser Ausbaustufe verbauten Bremsschreibe (D=610 mm) ein Drehmoment von 1700 N m bremsen. [146]

Der verbaute Asynchronmotor der Firma Antriebstechnik G. Bauknecht AG mit 450 W und einer Nenndrehzahl von 1450 min^{-1} wird über einen Frequenzumrichter (FU) der Siemens Aktiengesellschaft vom Typ SINAMICS G110 gesteuert. Dieser hat eine maximale Ausgangsleistung von 2200 W und ist mit einem einphasigen Netzanschluss versehen. Besonders hervorzuheben ist hierbei der integrierte EMV-Filter. Aufbauten mit anderen FU's haben gezeigt, dass ein Filter für eine rauscharme Messung an den verbauten analogen Sensoren erforderlich ist. Alle Kabel mit hochfrequenter Spannung und Messleitungen wurden geschirmt. Zusätzlich ist der FU in einer Elektroinstallationsbox aus Stahl verbaut. [165]

Der Motor ist mit einem Winkelgetriebe mit der Übersetzung 90:1 ausgestattet. Somit stehen bis zu 16 min^{-1} und ca. 260 N m bei Nenndrehzahl auf der Abtriebsseite des Winkelgetriebes zur Verfügung. Kurzfristig können höhere Momente bei verringerter Motordrehzahl erreicht werden. Bei einer Übersetzung der Riementriebe von 1,6:1 konnten maximal 950 N m an der Welle der Bremsscheibe gemessen werden.

Zur Druckregelung in der pneumatischen Bremse ist ein Proportionalregelventil der Firma Festo Vertrieb GmbH & Co. KG (im folgenden Festo genannt) mit der Bezeichnung VPPM-6L-L-1-G18-0L6H-V1P-S1C1 verbaut. Dieses ermöglicht, den Betriebsdruck der Bremse zwischen 0,006 MPa bis 0,6 MPa einzustellen, was mit der später beschriebenen Regelung geschieht. [64]

Die Messung des Bremsmomentes erfolgt indirekt über die Messung der Reibungskraft. Die pneumatische Bremse ist über Scherstäbe der Firma tectis GmbH (Baureihe F3270) mit dem Aufbau verbunden. Jeder der Sensoren kann ein Gewicht von bis zu 450 kg messen. Zwei Scherstäbe sind parallel verbaut und werden von einem Messverstärker ausgelesen. Das entsprechende Bremsmoment wird, wie im Abschnitt 7.2 beschrieben, errechnet. Der Aufbau mit zwei Scherstäben ist bis zu einem Bremsmoment von 1500 N m geeignet. Bei größeren Momenten muss ein weiterer Scherstab parallel eingebaut werden. Dieser ist bereits elektrisch angeschlossen, aber nicht eingebaut. [147, 184]

Mit der Idee, gedruckte hydraulische Spannbuchsen aus Kunststoff herzustellen, wurden entsprechend des in der Anforderungstabelle 6.2 definierten zu übertragenden Drehmomentes die Anforderungen an den Prüfstand angepasst. Zu Beginn des Jahres 2018 wurde mit Umbauten begonnen. Messungen am Prüfstand sollten nun mit einem wählbaren Bremsmoment zwischen 5 N m bis 100 N m stattfinden.

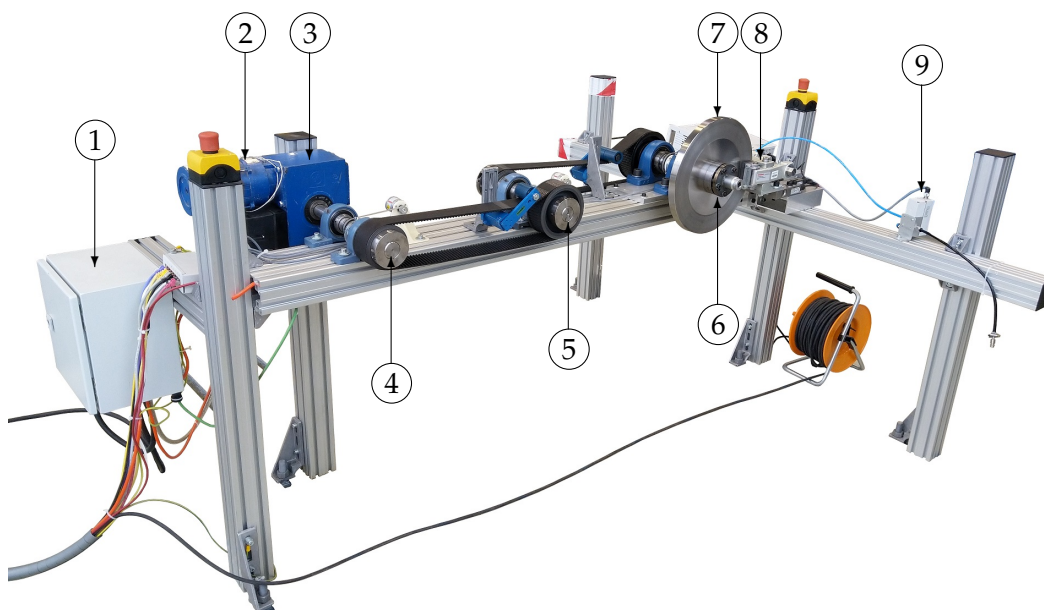
Mit dem bisherigen Aufbau waren Messungen mit weniger als 50 N m nicht möglich. Um den Messbereich anzupassen, wurde der in der Bremszange verbaute Druckzylinder gegen kleinere der Firma Festo getauscht. Hierfür wurde der Kurzhubzylinder AEVC-32-25-I-P für einen Messbereich von 5 N m bis 65 N m und der AEVC-40-25-I-P für bis zu 100 N m gewählt.

Messungen an diesem Baustand haben eine Oszillation des Bremsmomentes bei konstantem Luftdruck im Druckzylinder gezeigt. Die Korrelation der Oszillation mit der Drehzahl ließ auf einen Fluchtungsfehler der Bremsscheibe zur Welle schließen. Aus diesem Grund wurde die bestehende Bremsscheibe gegen ein Produkt der

Firma RINGSPANN GmbH mit der Bezeichnung *Bremsscheibe B 355/12,5* getauscht. Zusätzlich wurde die Bremsscheibe zusammen mit der Welle 3 und dem verwendeten Spannmittel als montierte Baugruppe auf einer Drehbank abgedreht, um so den Fluchtungsfehler weiter zu reduzieren.

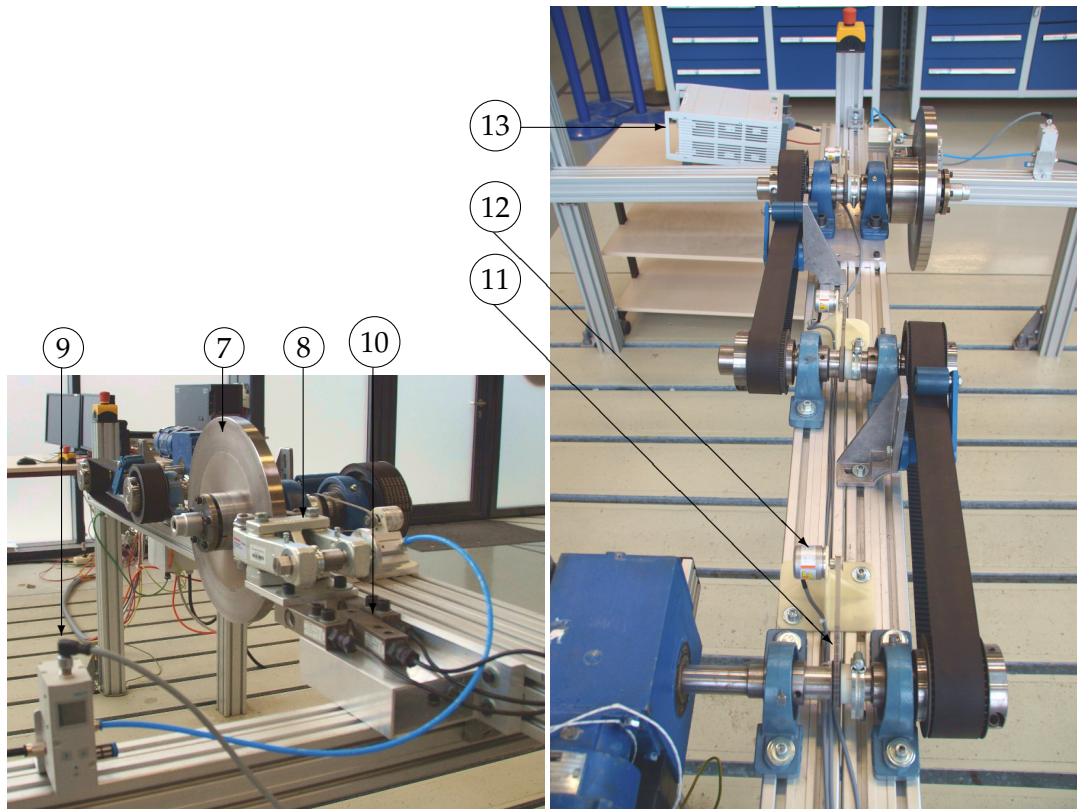
Um die Messung mit niedrigen Klemmkraften zu verbessern, wurde die rückstellende Federung der Bremszange entfernt. Die hier eingesetzte Feder besaß eine Federvorspannung, was bei der Überwindung dieser Vorspannung zu einem sprunghaften Anstieg der Bremskräfte führte. Das Entfernen der Federung verhindert das Abheben der Bremsbacken bei eingezogenem Druckzylinder, was zu Bremsmomenten kleiner als 5 Nm führt und damit unterhalb des gewünschten Messbereiches liegt. Weiterhin ist es nicht vorgesehen, Messungen mit Nulldurchgang der Belastung vorzunehmen.

Um den Schlupf der verwendeten Riemen zu verhindern und das Wechseln von Komponenten im Antriebsstrang zu erleichtern, wurden die verwendeten Keilriemen gegen Zahnriemen mit einer Übersetzung von 2,24:1 getauscht. Nach dem Umbau besitzt die erste Stufe eine Übersetzung von 1,4:1 und die zweite 1,6:1.



- | | |
|---------------------|--|
| ① Frequenzumrichter | ⑥ Welle 3 mit Adapter zur Momentenkalibrierung |
| ② Motor | ⑦ Bremsscheibe |
| ③ Winkelgetriebe | ⑧ pneumatisch betätigte Bremse |
| ④ Welle 1 | ⑨ Druckregelventil |
| ⑤ Welle 2 | |

ABBILDUNG 7.1: Übersicht über den Prüfstandaufbau



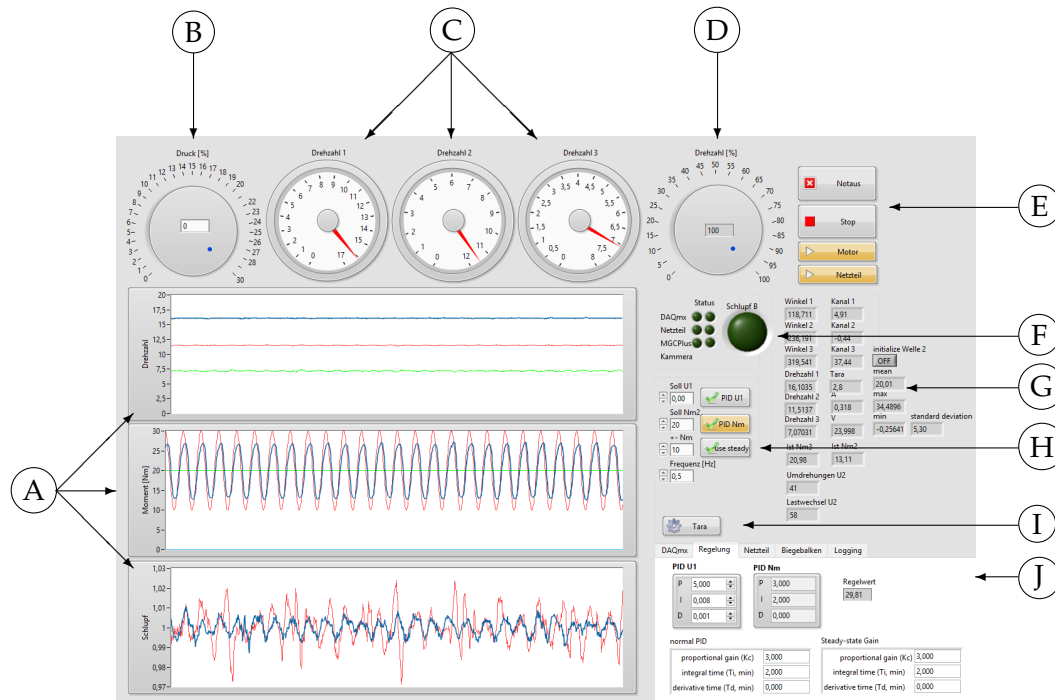
- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| ⑦ Bremscheibe | ⑪ Zahnriemen für Inkrementalgeber |
| ⑧ pneumatisch betätigte Bremse | ⑫ Inkrementalgeber |
| ⑨ Druckregelventil | ⑬ Analog/Digitalwandler MGCplus |
| ⑩ Kraftaufnehmer | |

ABBILDUNG 7.2: Detailansichten des Prüfstands

7.2 Messdatenerfassung, -auswertung und Prüfstandsteuerung

Die Steuerung des Prüfstandes erfolgt mittels Labview 2018. Zur Kommunikation mit dem Prüfstand wird das Multifunktions-I/O-Gerät NI-DAQmx USB-6341 von National Instruments eingesetzt. Mit diesem ist es möglich, die angeschlossenen Sensoren auszulesen und die Funktionen des Ventils sowie des FU's zu steuern. Die Spannungsversorgung der Sensoren und der Messverstärker MGCplus der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik für die Auswertung der Scherstäbe sind mittels Schnittstelle zusätzlich in Labview integriert. Das Labornetzteil PWS4323 der Tektronix GmbH ist mittels USB-Schnittstelle mit dem Steuerungsrechner verbunden. Der Messverstärker ist zur Minimierung von elektromagnetischen Störeinflüssen nahe an den Scherstäben und damit entfernt von Störquellen, wie dem FU und dem Prüfstandrechner, platziert. Für die Übertragung der Messwerte wird die TCP/IP Schnittstelle verwendet.

Die in Labview erstellte Oberfläche zur Anzeige der Messdaten und zur Steuerung des Prüfstands ist in Abbildung 7.3 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.



- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> (A) zeitlicher Verlauf der Drehzahlen, Bremsmoment und Schlupf (B) manuelle Steuerung der Druckluft (C) Drehzahlen der Wellen 1, 2 und 3 (D) manuelle Steuerung der Motordrehzahl (E) Schalter für den Betrieb | <ul style="list-style-type: none"> (F) Status der wichtigen Komponenten (G) Wiedergabe der Rohmesswerte und anderer Größen (H) Regler für Drehzahl und Moment (I) Schalter zum Tарieren (J) zusätzliche sekundäre Einstellmöglichkeiten |
|--|--|

ABBILDUNG 7.3: Bedienoberfläche des Prüfstands in Labview

Bedienoberfläche und Funktion der Prüfstandsteuerung

Die Steuerung der Motordrehzahl und des anliegenden Momentes kann über zwei Wege erfolgen. Zum einen ist es möglich, die Frequenz des FU und den Betriebsdruck der Bremse zwischen 0 und 100 % mit den Bedienelementen (B) und (D) manuell zu steuern. Zum anderen kann über die Schalter bei (G) eine Regelung der Drehzahl und des Bremsmomentes auf einen Sollwert aktiviert werden, was zugleich die manuelle Wahl der Parameter deaktiviert. Für das Bremsmoment ist es zusätzlich möglich, eine schwelende Belastung mit wählbarer Periodendauer und Amplitude vorzugeben. Für die Regelung wird ein PID-Regler verwendet, dessen Parameter in den erweiterten Funktionen (J) angepasst werden können. Dabei werden für die Momentenregelung zwei Parametersätze verwendet. Parametersatz 1 wird für das Anfahren an den Sollwert verwendet und ist so eingestellt, dass kein

Überschwingen auftritt. Parametersatz 2 ist mit „aggressiveren“ Regelparametern versehen und kann nach dem Einschwingen manuell aktiviert werden. Die Parameter wurden ausgehend von der Methode von Ziegler und Nichols ermittelt.

Die aktuelle Drehzahl für jede der drei Wellen wird an der Anzeige (C) dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Messwerte wird in den Graphen (A) wiedergegeben. Zusätzlich werden an der Position (G) Rohdaten der Sensoren und Hilfsgrößen abgebildet. Dies sind unter anderem der gemessene Winkel an den Inkrementalgebern, die daraus errechnete Drehzahl, das Signal aus den Kraftaufnehmern, Spannung und Strom des Netzteils und statistische Größen der laufenden Messung.

Der untere Graph (A) zeigt den Schlupf zwischen den Wellen 1 und 2 sowie zwischen 2 und 3. Der Schlupf wird durch die Bestimmung der zu erwarteten Winkeländerung der Ausgangswelle zur Eingangswelle unter Betrachtung des bekannten Übersetzungsverhältnisses errechnet. Der gezeigte Verlauf des Schlupfes entsteht aufgrund von Einflüssen der Rundungsgenauigkeit der Software, dem elastischen Verhalten der Riemen und Messtoleranzen der Sensoren und wird durch die adaptive Y-Achse überhöht dargestellt. Mikrorutschen kann mit dieser Methode nicht zuverlässig detektiert werden und wird mit Markierungen an der Verbindung überprüft. Ab einem Schlupf von 1,15 wird das Durchrutschen der Welle-Nabe-Verbindung visuell an (F) dargestellt.

Der mittlere Graph zeigt das mittlere Sollmoment (grün), den Sollmomentverlauf (rot) und das Istmoment (blau) an der Welle 2 an. Die Werte für die Sollwerte können bei (H) angepasst werden.

Der obere Graph zeigt den Verlauf der Drehzahl der drei Wellen.

Der Status der angeschlossenen Geräte kann mit den Anzeigen im Bereich (F) überprüft werden. Das DAQmx hat zwei Anzeigen für die Softwareschleifen zum Lesen und Schreiben von Werten. Die Funktionsbereitschaft des Netzteils wird mit der ersten Lampe dargestellt. Die zweite signalisiert die aktivierte Strombegrenzung (Überlast, Kurzschluss). Die erste Anzeige in der Zeile MGCplus signalisiert die Verbindung zum Analog/Digitalwandler, die zweite eine aktive der Tara Funktion (I).

Das Speichern aller Mess- und Rechengrößen beginnt bei jedem Starten der Software und wird zur Laufzeit in eine Datei abgelegt. Als Dateiname wird das Datum und die Uhrzeit des Softwarestarts gewählt.

Mit den Bedienelementen bei (E) kann das Notaus des FU aktiviert werden, die Software beendet und Motor und Netzteil getrennt de-/aktiviert werden.

Das zugrundeliegende Blockschaltbild der Bedienoberfläche ist zur besseren Übersichtlichkeit in Funktionsabschnitte unterteilt. Aus Gründen der Komplexität kann an dieser Stelle nur ein Überblick über den Aufbau gegeben werden.

Im Blockschaltbild sind sechs separate Hauptschleifen mit getrennten Funktionsbereichen erstellt. Diese können parallel ausgeführt werden und gewährleisten so eine zuverlässige Ausführung zeitkritischer Komponenten. Dazu gehören:

1. Lesende Operationen am NI-DAQmx
 2. Schreibende Operationen am NI-DAQmx
 3. Kommunikation mit dem Messverstärker
 4. Kommunikation mit dem Netzteil
 5. Darstellen der gemessenen Werte
 6. Speichern aller relevanten Daten
- In der ersten Schleife sind alle lesenden Operationen des NI-DAQmx und die Auswertung dieser zusammengefasst. Gelesen werden die drei Inkrementalgeber, die je einen Winkel ausgeben. Da jeder Inkrementalgeber mit einer Übersetzung von 1:3 mit den Wellen verbunden ist, wird hier auch der tatsächliche Winkel der Welle bestimmt und die Drehzahl über den Winkel des vorherigen Schleifendurchlaufs und der Laufzeit der Schleife berechnet. Zusätzlich wird der Schlupf zwischen den Wellen bestimmt.
 - Schreibende Operationen am NI-DAQmx sind in der zweiten Schleife. Hierzu gehört die Kommunikation mit dem FU. Es wird der Start/Stop des Motors, ein Notausignal und die Solldrehzahl signalisiert. Für Start/Stop und Notaus wird ein binäres Signal verwendet, für die Solldrehzahl ein analoges Signal zwischen 0 V bis 10 V. Weiterhin wird der Druck für das Ventil vorgegeben. Hierfür wird ebenfalls ein analoges Signal mit 0 V bis 10 V benutzt. Für beide analogen Signale befinden sich in dieser Schleife auch die bereits erwähnten PID-Regler, sowie die Steuerung der schwellenden Belastung.
 - In der dritten Schleife erfolgt die Kommunikation mit dem Messverstärker. Die drei Signale der Scherstäbe werden ausgelesen und in das entsprechende Moment umgerechnet. Ebenso werden statistische Größen zum Verlauf des Bremsmomentes berechnet. Die Tarafunktion ermöglicht das Setzen eines Nullpunktes für das zu messende Moment.
 - Die Kommunikation mit dem Netzteil erfolgt in der vierten Schleife. Bei der Initialisierung der Kommunikation wird eine Spannung von 24 V und eine maximale Stromstärke von 1 A festgelegt. Während der Schleifenlaufzeit wird der am Netzteil abgegebene Strom überwacht und bei einem Wert über 0,9 A ein optisches Warnsignal ausgegeben. Mit 24 V können die drei Inkrementalgeber und das Pneumatikventil betrieben werden. Im normalen Betrieb benötigen diese vier Baugruppen einen Strom von weniger als 300 mA. Der Einschaltstrom alle Baugruppen liegt über 1 A, was zu einer kurzzeitigen Aktivierung der Strombegrenzung beim Anlaufen des Prüfstands führt.
 - Die Darstellung der Werte auf der Bedienoberfläche erfolgt in der fünften Schleife.

- Die sechste Schleife beinhaltet die Speicheroperation aller relevanten Größen, welche alle 50 ms geschrieben werden und im Folgenden aufgeführt sind:
 - Drehzahlen der drei Wellen
 - Solldruck des Pneumatikventils in Prozent
 - Sollbremsmoment
 - Messwerte der drei Scherbalken
 - das errechnete Moment an Welle 2 und 3
 - Schlupf zwischen Welle 1/2 und 2/3
 - Umdrehung der Welle 2 seit Programmstart
 - Lastwechsel der Welle 2 seit Programmstart
 - Sollwert des schwellenden Momentes
 - Sollfrequenz der schwellenden Belastung
 - Systemzeit des Speichervorgangs mit maximaler Präzision

Für die Ausführung der Schleifen 1, 2 und 3 wird jeweils ein eigenständiger Prozessor zugeordnet, da die Laufzeit dieser Schleifen auf 50 ms festgelegt ist und die Berechnung innerhalb dieser Zeit ablaufen muss.

Die anderen Schleifen laufen zum Teil mit längeren Pausen nach jedem Durchlauf oder sind von geringerer Priorität für den sicheren und zuverlässigen Betrieb des Prüfstands.

7.3 Messergebnisse

7.3.1 Übertragbares Moment

Für die Bestimmung des übertragbaren Momentes in Abhängigkeit vom Buchseninnendruck werden Buchsen der Version 3.9.X verwendet. Anhand der in Abbildung 7.4 gezeigten Messung bei 0,5 MPa Innendruck wird der Ablauf der Messung beschrieben.

Es sind das Sollmoment, das Istmoment, der Schlupf und das übertragene Moment über die Versuchsdauer dargestellt. Die Messungen wurden für 0,5 MPa; 0,75 MPa; 1,0 MPa; 1,25 MPa; 1,5 MPa und 1,6 MPa durchgeführt und sind im Anhang in Abschnitt A.4 dargestellt. Das zu übertragene Moment wird in Stufen von 2,5 N m, beginnend bei 5 N m, erhöht. Beim Auftreten von Schlupf wird die Messung unterbrochen und der Buchseninnendruck um 0,25 MPa erhöht und mit der letzten vollständig absolvierten Messstufe begonnen. Im Fall der dargestellten Messung wurde somit die folgende Messung bei 0,75 MPa und 7,5 N m begonnen. Jede Messstufe wurde ca. fünf Minuten gehalten. Das dargestellte Maximum von 67,5 N m wurde bei einem Innendruck von 1,6 MPa erreicht.

Die Auswertung der Messreihen ist in Abbildung 7.5 dargestellt und zeigt den Buchseninnendruck in Relation zum übertragenen Moment. Die Höhe der Balken gibt die letzte vollständig absolvierte Momentenstufe wieder (zum Vergleich: 7,5 N m bei der Messung in Abbildung 7.4). Der Fehlerbalken zeigt das übertragene Moment zum

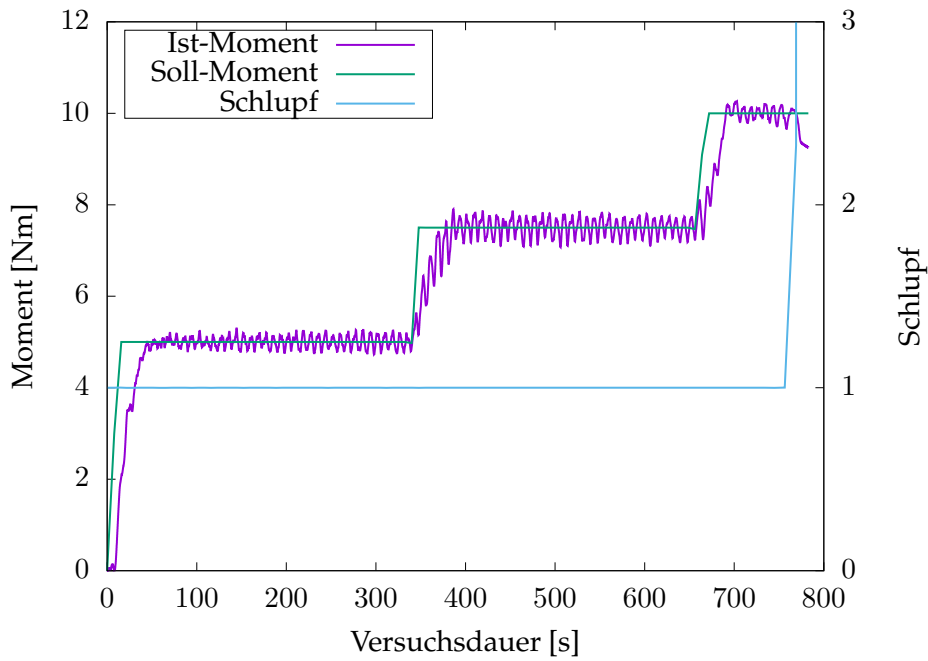


ABBILDUNG 7.4: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 0,5 MPa

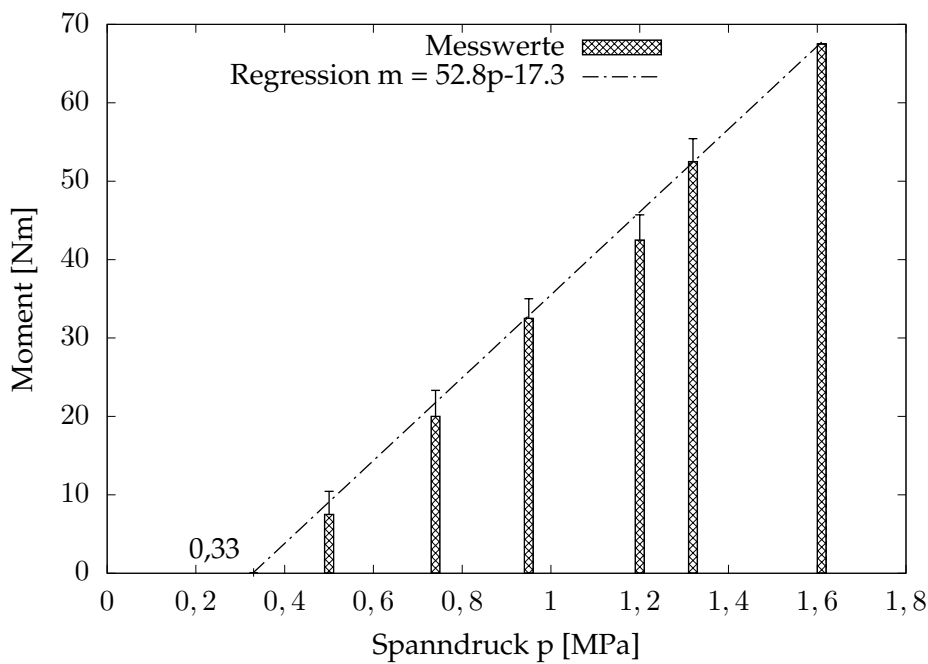


ABBILDUNG 7.5: Übertragbares Moment in Abhängigkeit vom Spanndruck der Buchse, gemessen am Prüfstand

Zeitpunkt des ersten Auftretens von Schlupf zwischen Welle und Buchse oder Buchse und Nabe. Die Regression durch die Messpunkte zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Druck und übertragbarem Moment.

$$m = 52,8p - 17,3 \quad (7.1)$$

Der Schnittpunkt dieser Regression mit der Ordinate gibt den mindestens erforderlichen Innendruck an, der für den Kontakt der Baugruppen erforderlich ist. Für die Buchsen der Version 3.9.X sind es 0,33 MPa.

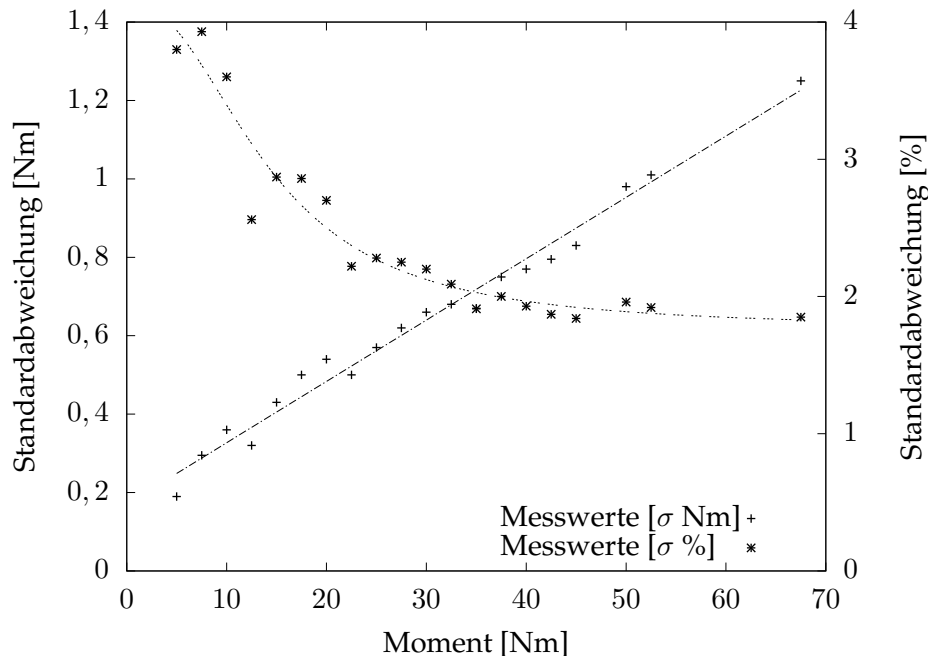


ABBILDUNG 7.6: Standardabweichung vom Sollmoment im Messbereich

Die in dieser Arbeit genannten Momente, welche am Prüfstand ermittelt wurden, werden ohne eine Angabe einer Standardabweichung genannt. Die Standardabweichung zu jedem Messwert kann aus der Darstellung 7.6 ermittelt werden. Diese zeigt den Messfehler als Standardabweichung in Abhängigkeit des gemessenen übertragenen Momentes. Wiedergegeben ist der Absolutwert in Newtonmeter und die relative Standardabweichung in Prozent.

7.3.2 Statische Dichtigkeitstests der Baugruppe

Um die Dichtigkeit der Prototypen zu testen, wurde je ein Wellen- und Nabensegment gefertigt. Diese ermöglichen es, die Buchse zu montieren, ohne den Prüfstand verwenden zu müssen. Welle und Nabe sind zusammen mit einer Buchse in Abbildung 7.7 dargestellt.

Beide Segmente sind mit Bohrungen versehen, um bei einem Zugversuch die axiale Klemmkraft zu ermitteln.

Zusätzlich können die Segmente zur Prüfung der Montierbarkeit eingesetzt werden. Mittels Grensrachenlehren konnte ein Wellendurchmesser von maximal 40,002 mm ermittelt werden. Der Innendurchmesser der Nabe beträgt mindestens 48,01 mm.

Um die Dichtigkeit zu testen, wurden die Buchsen auf den jeweils zu prüfenden Innendruck gebracht und der Druckverlauf protokolliert. Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die für die Versuche am Prüfstand verwendete Probengeometrie

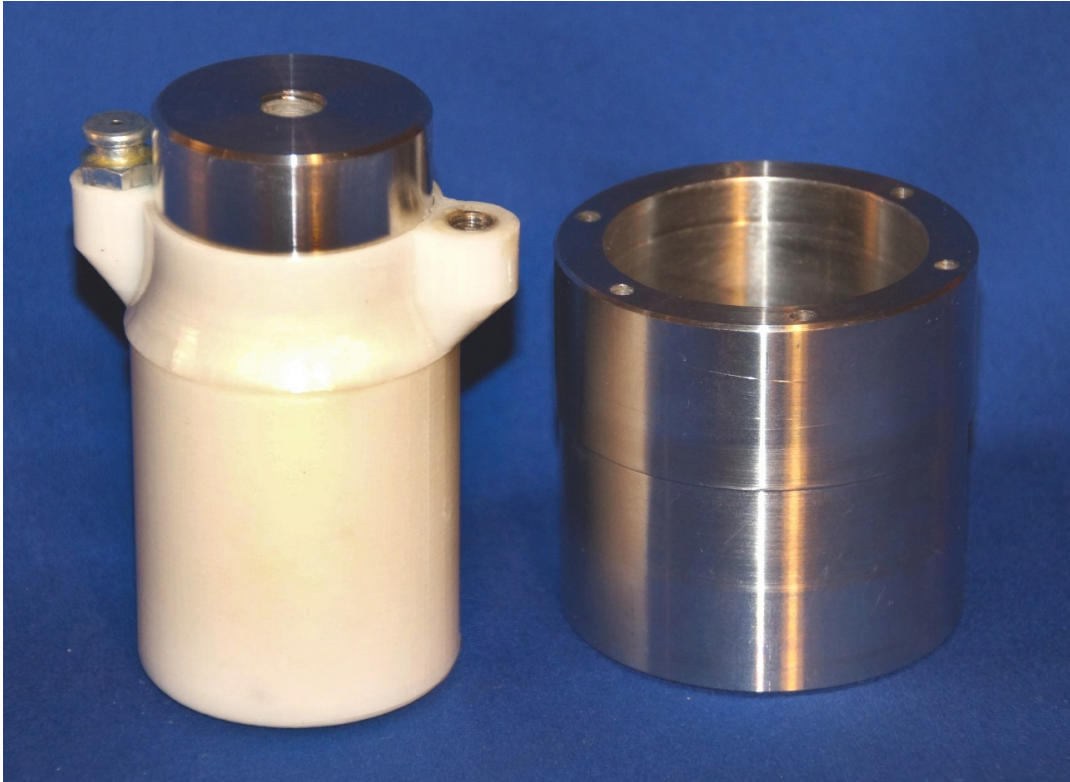


ABBILDUNG 7.7: Wellen- und Nabensegment für statische Versuche

mit der Nummer 3.9.

Es zeigte sich, dass das verwendete Ventil zwar gegenüber dem Fett undurchlässig ist, jedoch flüssige Bestandteile (Öl) nicht zuverlässig zurückhalten kann. Durch den Vorgang des *Ausblutens* trennt sich mit zunehmender Standzeit die feste und flüssige Phase des Fettes. Es konnte beobachtet werden, dass durch den Spalt zwischen der federbelasteten Kugel und dem Ventilkopf des Schmiernippels Öl austritt.

Neben dem Austritt von Öl an der Ventilkugel konnte bei allen Dichtigkeitstests ein verstärktes Abfallen des Druckes in den ersten Stunden der Versuche festgestellt werden. Bei einer Wiederbefüllung blieb dieser Druckabfall aus. Daraus ist zu vermuten, dass eingeschlossene Luftblasen austreten. Es konnte bei keinem Versuch ein Öl/Fettaustritt an einer anderen Stelle als am Ventil beobachtet werden.

Somit ist die verwendete Kombination von Ventil und Füllmedium nicht für eine dauerhafte Anwendung oder einen produktiven Einsatz geeignet. Da im Rahmen dieser Arbeit das Fertigungsverfahren der Buchse im Vordergrund steht, wird an der Verwendung des Fettes festgehalten.

7.3.3 Zeitschwingfestigkeit und Dichtigkeit im Einsatz

Als Zeitschwingfestigkeit wird die Spannungsamplitude bezeichnet, bei der ein Werkstoff bei gegebener Mittelspannung eine bestimmte Schwingspielzahl ohne Bruch ertragen kann [24]. Die Schwingspielzahl wird auch als Lastspiel- oder Lastwechselzahl (LW) bezeichnet.

Für den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Spannbuchse wurde ein Versuch durchgeführt, um die Zeitschwingfestigkeit zu untersuchen. Dafür wurde eine Schwingenspielzahl von 10^5 gewählt, welche zwischen der Kurzzeitfestigkeit (bis $5 \cdot 10^4$) und der Dauerfestigkeit (materialabhängig ab 10^6) liegt [166]. Da der Prüfstand während der gesamten Versuchslaufzeit beaufsichtigt werden muss, war eine höhere Schwingenspielzahl aus zeitlichen Gründen nicht vertretbar.

Als Amplitude wurden (20 ± 10) Nm gewählt. Um die Amplitudenspitze von 30 Nm zu übertragen, ist nach Gleichung 7.1 ein Mindestdruck von 0,896 MPa erforderlich. Da das Ventil, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, nicht vollständig dicht ist, wird erwartet, dass der laufende Versuch für Befüllungsvorgänge unterbrochen werden muss. Befüllungsvorgänge werden zwischen 1,0 MPa bis 1,05 MPa durchgeführt. Für jede Befüllung wird ein Buchseninnendruck von 1,2 MPa angestrebt.

Für die gewählte Amplitude wurde in einem Vorversuch die maximale Frequenz der Schwingenspiele untersucht. Es zeigte sich, dass 1 Hz für den zuverlässigen Betrieb möglich ist. Bei Frequenzen zwischen 1,0 Hz bis 1,2 Hz sind sporadische Regelprobleme erkennbar gewesen. Bei höheren Frequenzen war das Regeln auf die Sollamplitude nicht mehr möglich. Folglich wurde 1 Hz als Versuchsfrequenz gewählt. Mit den geforderten 10^5 Schwingenspielen ergibt dies eine Versuchslaufzeit von 27,7 h.

Während dieser Zeit ist es zu keinem Ausfall der Welle-Nabe-Verbindung gekommen. Bei ≈ 21000 LW wurde eine Verdrehung der Welle zur Buchse von ca. 30° festgestellt. Bei ≈ 43300 LW wurde eine weitere Verdrehung zwischen Welle und Buchse von ca. 5° festgestellt. Bei der Verdrehung um 30° wurde eine Spitzenlast von 36,4 Nm gemessen. Während die Lastspitze auftrat, lag ein Spanndruck von mindestens 1,1 MPa an der Buchse an. Nach Gleichung 7.1 ist ein Spanndruck von 1,02 MPa erforderlich, um ein Moment von 36,4 Nm zu übertragen. Da somit der kritische Spanndruck nicht unterschritten wurde, ist mit den aufgezeichneten Messwerten nicht nachvollziehbar, wieso es zu dieser Verdrehung kam. Sollte es zu einer kurzzeitigen hohen Auslastung des Prüfstandsrechners gekommen sein, ist es möglich, dass einige Messwerte nicht gespeichert wurden und der Regler keine Werte an das Druckregelventil senden konnte.

Abbildung 7.10a stellt einen Befüllvorgang dar. Zu erkennen ist ein Versatz der Indikatoren für die Verdrehung von Buchse und Welle.

Während des Versuchszeitraums wurde, inklusive der Initialbefüllung bei Versuchstart, der Solldruck siebenmal aufgebaut. Abbildung 7.8 zeigt den Verlauf der Untersuchung. Zusätzlich sind die Befüllungsvorgänge mit einer vertikalen Linie markiert und nummeriert.

Abbildung 7.9 zeigt den Abfall des Drucks nach jedem Befüllvorgang. Zur besseren Visualisierung wurden die Messpunkte mit je einer linearen Regression dargestellt. Ein zu erwartender exponentieller Zusammenhang kann nicht festgestellt werden. Es ist zu erkennen, dass der Druckabfall nach der ersten und zweiten Befüllung

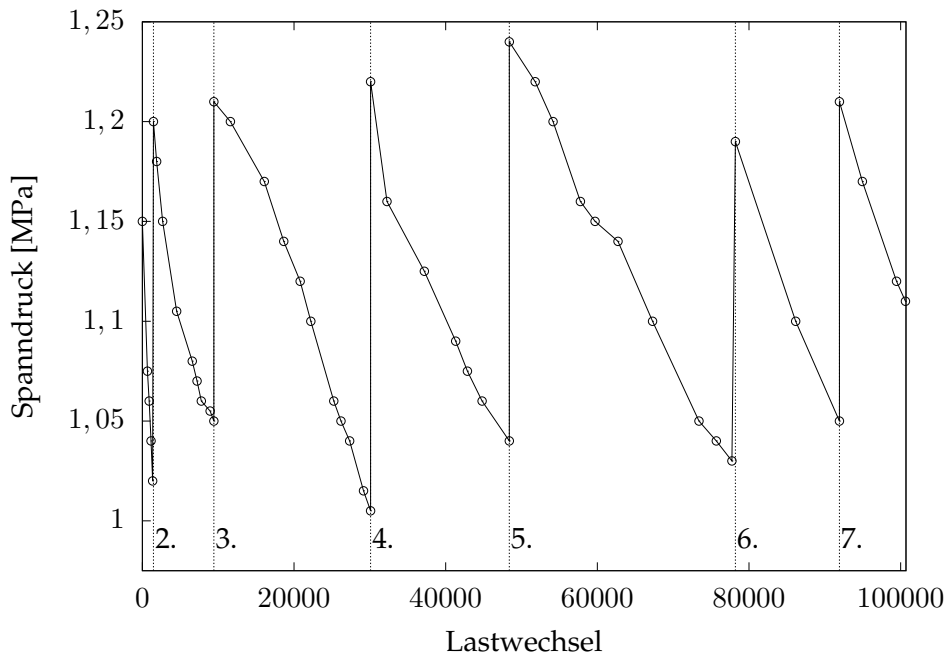


ABBILDUNG 7.8: Verlauf der Untersuchung der Zeitfestigkeit mit $(20 \pm 10) \text{ N m}$

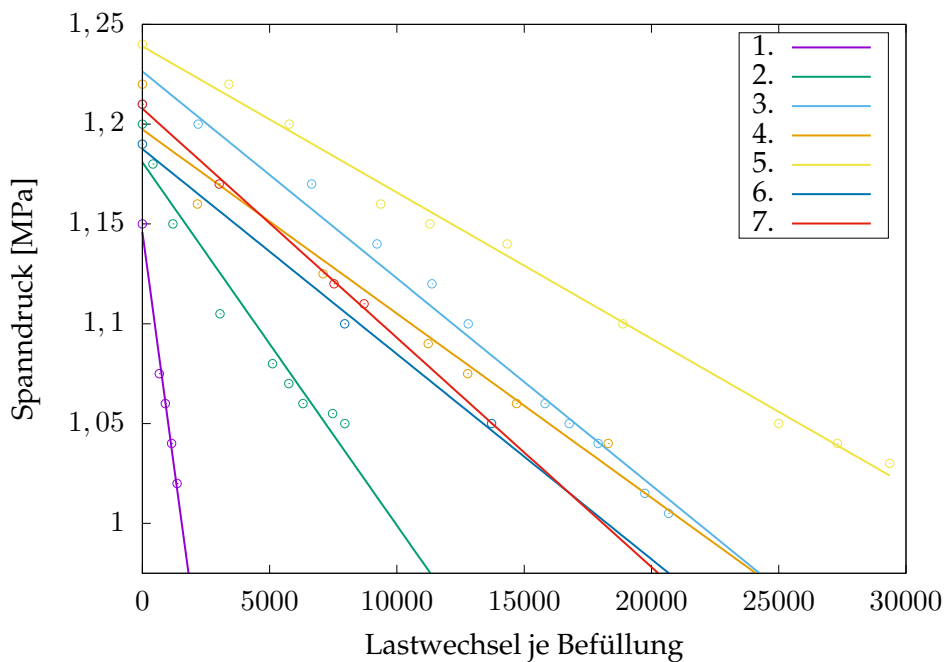


ABBILDUNG 7.9: Druckverlust der Befüllungszyklen des Versuches zur Zeitfestigkeit

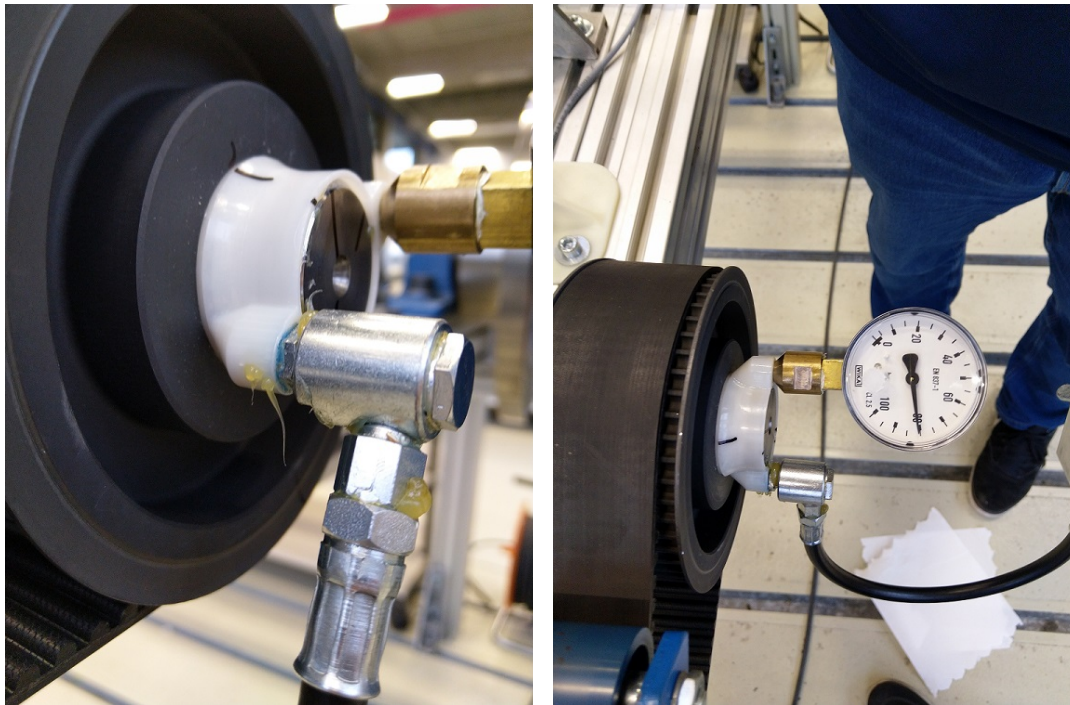
schneller geschieht, als bei den nachfolgenden Messzyklen. Dieses Verhalten wurde bereits in Abschnitt 7.3.2 festgestellt und ist auf das Entweichen von Luft zurückzuführen. Nach dem Versuch konnten keine Rückstände von Fett oder Öl an anderen Stellen als um das Ventil festgestellt werden, was das Verdrängen von Luft bestätigt. Nach Abschluss des Versuches zur Zeitfestigkeit wurde der Buchseninnendruck auf

3 MPa erhöht. Bei diesem Innendruck konnte 30 Minuten lang ein Moment von (72 ± 8) N m übertragen werden. Ein Defekt trat nicht auf. Ein höheres Moment war mit der Prüfstandskonfiguration zu diesem Zeitpunkt nicht prüfbar.

7.3.4 Berstdruck im verbauten Zustand

Nach Abschluss des Versuches zur Zeitschwingfestigkeit wurde mit der gleichen Buchse ein Berstversuch durchgeführt. Hierfür wurde der Druck in Schritten von 1 MPa mit einer Haltezeit von ca. 30 Sekunden bis zum Versagen erhöht. Für den Versuch wurde das üblicherweise verwendete Manometer mit einem Messbereich bis 1,6 MPa gegen eines mit 10 MPa getauscht.

Das Versagen der Buchse trat beim Erhöhen des Drucks von 8 MPa auf 9 MPa auf. Die Abbildungen 7.10a und 7.10b zeigen den Druck zum Zeitpunkt des Versagens und den Defekt. Der Defekt trat am Einlassbereich der Buchse auf. Es entstand ein Riss von ca. 5 mm, aus dem Fett austrat. Andere Schäden waren nicht feststellbar.



(a) Defekt am Einlass der Buchse

(b) Spanndruck beim Bersten der Buchse

ABBILDUNG 7.10: Berstversuch an Buchse 3.10.11

7.4 Vergleich von Berechnung und Messung

Wie im Abschnitt 7.3.1 beschrieben und in Darstellung 7.5 zu sehen, wurde bei den Versuchen ein Druck von 0,33 MPa ermittelt, der bei den geprüften Buchsen notwendig ist, um ein Moment zu übertragen.

In Abschnitt 5.3 wurden die Ergebnisse der FE-Analyse präsentiert. Anhand Abbildung 5.10 bzw. Gleichung 5.8 wurde gezeigt, dass der Reibungskoeffizient keinen Einfluss auf den initialen Kontakt zwischen Buchse und Welle bzw. Nabe, und damit auf den nötigen Spanndruck hat, um den Spalt zu schließen.

Aus diesem Grund kann die Gleichung 5.9 verwendet werden, um den Spalt zwischen der Buchse und den umgebenden Bauteilen am Prüfstand zu errechnen. Der Schnittpunkt dieser Gleichung mit der Ebene bei 0 N m bei einem Spanndruck von 0,33 MPa ergibt einen Spalt von 0,0477 mm.

Mit der Kenntnis dieses Wertes ist es nun möglich, die Simulation mit konstantem Spalt und variablem Spanndruck und Reibungskoeffizienten zu wiederholen.

Das Ergebnis ist in Abbildung 7.11 zu sehen.

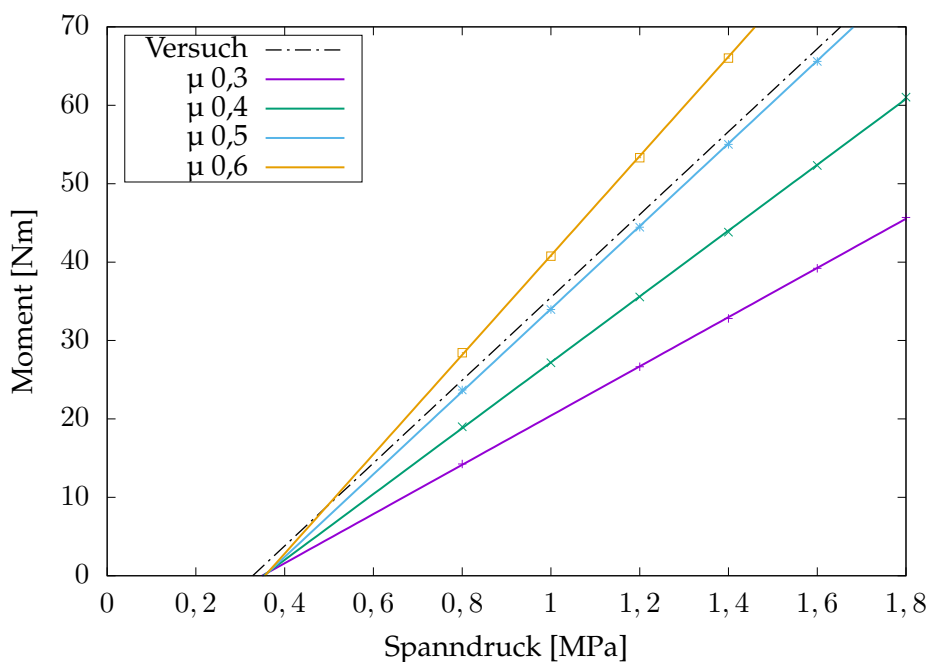


ABBILDUNG 7.11: übertragenes Moment bei einem Spalt von 0,0477 mm in Abhängigkeit vom Spanndruck. Vergleich der Simulation mit dem Versuch

Das übertragene Moment wird hier in Abhängigkeit vom Spanndruck für die Reibungskoeffizienten 0,3; 0,4; 0,5 und 0,6 dargestellt. Zusätzlich ist die Regressionsgerade (Gleichung 7.1) aus dem Versuch zum übertragbaren Moment abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die Regression der Versuchsmesswerte zwischen denen der errechneten Werte mit einem Reibkoeffizienten von 0,5 und 0,6 liegt. Über die Betrachtung des Anstiegs der Geraden kann ein Reibkoeffizient von 0,501 für die am Prüfstand vermessene Buchsen ermittelt werden.

Damit liegt der errechnete Wert im Bereich der in Abschnitt 4.3 gemessenen Werte. Bei den Versuchen mit zunehmendem Buchseninnendruck, der zu einer höheren Flächenpressung führt, konnte keine Zunahme des Reibkoeffizienten beobachtet werden. In Abschnitt 4.3 konnte die Zunahme auf den Einfluss der Furchungsarbeit zurückgeführt werden.

Es wird daher zunächst vermutet, dass die Welle vom Prüfstand eine geringere Rauigkeit aufweist, was zu einer geringeren, in diesem Fall nicht messbaren, Furchung führt. Entsprechend DIN 4288 wurde die Messung der Rauigkeit der Reibklötze in Abschnitt 4.3 senkrecht zur Rillung durchgeführt. Die am Prüfstand verbauten Wellen wurden jedoch gedreht und weisen eine Rillung in Umfangsrichtung auf. Somit wirkt sich die Rillung durch die Fertigungsweise nicht auf die Rauigkeitskomponente, die für die Übertragung von Momenten wirksam ist, aus.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurde die Oberfläche der Welle vermessen. Für einen Abdruck der Oberflächenstruktur kam das RepliSet F1 der Struers GmbH zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um ein Zweikomponenten-Silikongummi zur Herstellung hochauflösender Abdrücke. Mit der Abformmasse kann die Oberfläche mit bis zu $0,1\ \mu\text{m}$ Genauigkeit abgebildet werden [180]. Die abgeformte Oberfläche ist im Anhang in der Abbildung A.13 gezeigt.

Die Messung der Rauheit in Umfangsrichtung wurde an zwölf Messreihen durchgeführt und ergab ein $Ra_{Welle\parallel}$ von $(0,076 \pm 0,021)\ \mu\text{m}$. Im gleichen Messabschnitt wurde die Rauheit quer zur Rillung an zehn Messbereichen bestimmt. Ein $Ra_{Welle\perp}$ von $(0,874 \pm 0,072)\ \mu\text{m}$ konnte hier ermittelt werden. Damit ist die ermittelte Rauheit der Welle in Wirkrichtung zwei Zehnerpotenzen geringer, als die der Reibklötze (vergl. Reibklotz A $(1,78 \pm 0,33)\ \mu\text{m}$ - Abschnitt 4.3). Die Annahme, dass der Einfluss der Furchung aufgrund der verringerten Rauheit reduziert ist, ist damit plausibel.

Kapitel 8

Ausblick und Zusammenfassung

8.1 Ausblick

In dieser Arbeit wurde besonders auf das FDM-Verfahren eingegangen. Daneben sind auch viele andere AM-Verfahren für die Herstellung von Spannbuchsen denkbar. Jedoch besitzt jedes spezifische Vor- und Nachteile, die zu betrachten sind. Als Beispiel sind hier Verfahren mit niedrig viskosen Baumaterialien zu nennen, wie das in Abschnitt 2.2.1 genannte Verfahren der Stereolithographie, welches porenfreie Bauteile erzeugt, jedoch keine Übergänge ohne Stützmaterial herstellen kann. Mit der Kenntnis, dass hydraulische Spannbuchsen mittels 3D-Druck herstellbar sind, ist es nun möglich, andere/bessere Druckverfahren zu qualifizieren.

Neben einem anderen Druckverfahren sind auch andere Materialien denkbar. In Abschnitt 2.3.1 und besonders in 2.3.7 wurden verschiedene Alternativen genannt. Eine interessante Alternative ist der Einsatz von metallischen Werkstoffen.



ABBILDUNG 8.1: 3D-gedruckte hydraulische Spannbuchse aus Metall, unbearbeitet

In Kooperation mit der Firma AIM3D GmbH mit dem Sitz in Rostock wurde ein erster Prototyp einer metallischen 3D-gedruckten hydraulischen Spannbuchse hergestellt. Dieser wird in Abbildung 8.1 gezeigt. Der Prototyp wurde mit dem in Abschnitt 2.3.7 beschriebenen Verfahren des Composite Extrusion Modeling (CEM) hergestellt. Die Erprobung dieser Buchsen steht noch aus. Die gezeigte Buchse ist für einen Wellendurchmesser von 50 mm hergestellt und wurde mit dem CAD-Modell, welches in Abschnitt 5.1.1 vorgestellt wurde, modelliert. Aufgrund der Ähnlichkeit des verwendeten AM-Verfahrens zum FDM konnte das Verhalten der Buchse vorab mit der in dieser Arbeit vorgestellten Simulation berechnet werden.

Für den Einsatz der Buchse sind neben dem verwendeten Füllmittel auch andere Medien möglich. In [105] wurden bereits einige betrachtet und Befüllmechanismen untersucht. Einsetzbar sind auch Polymere wie z.B. Polyethylenglycol, welches chemisch inert, durch eine einstellbare Molekülkettenlänge an die Einsatzbedingungen anpassbar ist, und bereits in der pharmazeutischen Industrie Anwendung findet [89].

Das in Abschnitt 6.3 angesprochene und verwendete Ventil ist für den industriellen Einsatz aufgrund ungenügender Dichtigkeit nicht geeignet. Eine andere Lösung muss daher gefunden werden. In diesem Zusammenhang ist es zweckmäßig, die Geometrie im Bereich des Bundes zu optimieren, was nicht Gegenstand dieser Untersuchung war.

Die durchgeführten Prüfstandversuche können verwendet werden, um eine Aussage über die generelle Funktionsfähigkeit zu geben. Allerdings ist eine Einschätzung der Dauerfestigkeit nicht möglich. Hierfür sind weitere Versuche mit Variation der Lastwechsel, des Lastniveaus und des Spanndrucks erforderlich. Das zusätzliche Einbringen von Quer- und Längskräften während der Versuche sorgt für realitätsnahe Bedingungen. Bei der Ermittlung von Einsatzgrenzen des verwendeten Kunststoffes unter statischer Belastung muss neben der Spannungs- und Temperaturabhängigkeit auch die Zeitabhängigkeit der Verformung berücksichtigt werden [56].

Mit dem eingesetzten Prüfstand können nicht alle der im letzten Absatz genannten Untersuchungen durchgeführt werden. Besonders ist hier das Einbringen von Quer- und Längskräften zu nennen, für das umfangreiche Umbauten notwendig sind. Mit dem derzeitigen Aufbau sind Drehrichtungswechsel im Antriebsstrang nicht möglich, da die verwendeten Biegebalken eine Vorzugsmessrichtung besitzen. Durch den Austausch dieser kann diese Einschränkung umgangen werden. Um die Regelung zu verbessern, sollte ein echtzeitfähiges System und ein speziell auf den Prüfstand abgestimmter Regler verwendet werden. Hierfür ist eine Modellbildung notwendig, wie sie in der Arbeit von [203] in Ansätzen erfolgte.

Das vorliegende Reibungsmodell konnte auf einen Parameter reduziert werden. Es wurde allerdings gezeigt, dass dieses nur bei geringer Oberflächenrauheit anwendbar ist. Für umfangreichere Simulationen sollte das Modell erweitert und die Oberflächenrauheit betrachtet werden.

Ein weiterer Bereich, der in dieser Arbeit nicht betrachtet wurde, ist der Einsatz von

Lösungen für die Industrie 4.0. AM erlaubt es, Sensoren direkt in Bauteile zu drucken [116, 131]. Mit dieser Technik ist es möglich, Betriebsparameter, wie den Spanndruck, Schlupf und Temperatur direkt am bzw. im Bauteil zu überwachen und Aussagen über die Lebensdauer bzw. Wartungsintervalle zu tätigen.

8.2 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine hydraulische Spannbuchse mit dem additiven Fertigungsverfahren *Fused Deposition Modeling (FDM)* hergestellt. Der Einsatz des Hochleistungskunststoffes ABS-P430 ermöglicht es, die gedruckte Buchse direkt als Maschinenelement einzusetzen. Somit gehört diese Fertigung in den Bereich des *Rapid Manufacturing*.

Die nähere Betrachtung des Fertigungsverfahrens FDM hat gezeigt, dass gedruckte Bauteile Fehlstellen besitzen und damit keinen dichten Druckkörper bilden können. Weiterhin besitzt die Oberfläche eine Welligkeit, die zusammen mit der Inhomogenität des Materials eine Nachbearbeitung erforderlich macht. Es wurde entschieden, diese Nachbehandlung chemisch mit dem Lösungsmittel *Aceton* durchzuführen und so die Welligkeit der Oberfläche stark zu reduzieren. Zusätzlich konnten mit diesem Verfahren die Fehlstellen an der Bauteiloberfläche entfernt und so druckdichte Körper erzeugt werden. Für die Nachbehandlung wurden Parameter bestimmt und die veränderten Materialkennwerte aufgenommen. Hierfür wurde eine geeignete Probengeometrie hergeleitet.

Es wurde betrachtet, wie sich der gesamte Fertigungsprozess auf die Maßhaltigkeit der Bauteile auswirkt. Als Haupteinflussfaktor konnte der Schrumpfung aufgrund der Wärmedehnung identifiziert werden. Als weiterer Faktor wurde der lösungsmittelbedingte Materialabtrag erkannt. Es konnte gezeigt werden, wie dieser Fehler durch Anpassung der CAD-Daten korrigierbar werden kann und diese Korrekturen ebenso auf vergleichbare Geometrien anwendbar sind.

Die Haftreibung wurde für Aceton-behandeltes und unbehandeltes ABS-P430 gegenüber Stahl ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass der Haftreibungskoeffizient von der Flächenpressung zusammen mit der Rauheit der Reibseite aus Stahl abhängig ist. Als Ursache hierfür wurde die Furchungsarbeit bei Reibpartnern unterschiedlicher Härte erkannt.

Es wurde ein parametrisch-assoziatives CAD-Modell mittels Adapter- und IPO-Modellierung erstellt, um in allen Phasen der Entwicklung auf Grundlage des gleichen Modells arbeiten zu können.

Die ermittelten Materialparameter wurden in einem Finite-Elemente-Modell verwendet, welches besonders den Reibkontakt der Welle-Nabe-Verbindung betrachtet. Hierfür wurde die Problematik der numerischen Modellierung des Kontaktes beschrieben und in einer Simulation angewandt. Mittels dieser Simulation wurden Rechnungen durchgeführt, um das übertragbare Moment in Abhängigkeit der

Parameter Spaltbreite, Reibkoeffizient und Spanndruck zu ermitteln. Der Zusammenhang dieser Parameter konnte gezeigt werden.

Ein funktionsfähiger Prototyp wurde auf Basis der Erkenntnisse aus den Simulationen und der Versuche zur chemischen Nachbehandlung hergestellt.

Eine Patentanmeldung erfolgte unter der Nummer DE 102018123980.

Mit dem Ziel, die Simulation mit Messwerten zu validieren und die gedruckten Buchsen zu testen, wurde ein Prüfstand aufgebaut. Mit diesem ist es möglich, konstante oder schwelende Momentenbeanspruchung auf den zu prüfenden Prototypen wirken zu lassen und das Verhalten zu dokumentieren. Die Auswertung dieser Versuche hat gezeigt, dass die Annahmen der Simulation zutreffend sind. Es können mit der Simulation Aussagen über das zu übertragene Moment in Abhängigkeit der untersuchten Parameter gemacht werden.

Die Versuche an den 3D-gedruckten Prototypen mit chemisch behandelter Oberfläche haben ergeben, dass es möglich ist, dieses Fertigungsverfahren für die Herstellung von hydraulischen Spannbuchsen zu verwenden.

Im Ausblick wird die Möglichkeit gezeigt, das erstellte CAD-Modell und die Simulation auch bei Verwendung anderer Materialien als ABS-P430 einzusetzen.

Literatur

- [1] Mohamed Adel u. a. „Polishing of fused deposition modeling products by hot air jet: Evaluation of surface roughness“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 251 (2018), S. 73–82. ISSN: 09240136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2017.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.019).
- [2] Adi Adumitroaie u. a. „Novel Continuous Fiber Bi-Matrix Composite 3-D Printing Technology“. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 12.18 (2019). ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma12183011](https://doi.org/10.3390/ma12183011).
- [3] Kumkum Ahmed u. a. „Extremely Soft, Conductive, and Transparent Ionic Gels by 3D Optical Printing“. In: *Macromolecular Chemistry and Physics* 219.24 (2018), S. 1800216. ISSN: 1022-1352. DOI: [10.1002/macp.201800216](https://doi.org/10.1002/macp.201800216).
- [4] Sung-Hoon Ahn u. a. „Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS“. In: *Rapid Prototyping Journal* 8.4 (2002), S. 248–257. ISSN: 1355-2546. DOI: [10.1108/13552540210441166](https://doi.org/10.1108/13552540210441166).
- [5] ANSYS Inc. *ANSYS Help: Dokumentationen, Gebrauchsanleitungen und Videos zu ANSYS Produkten*. Hrsg. von ANSYS Inc. 2019.
- [6] ANSYS Inc. *Customer Training Material: Lecture 3 - Introduction to Contact*. 2010. URL: http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab6_lecture.pdf (besucht am 01.03.2019).
- [7] ASTM D 3039 / D 3039M:2017. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
- [8] ASTM D1623 - 17. *Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics*. 2017.
- [9] ASTM D3574 - 17. *Test Methods for Flexible Cellular Materials Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams*. 2017.
- [10] ASTM D3822 / D3822M - 14. *Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers*. 2014.
- [11] ASTM D412 - 16. *Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers Tension*. 2016.
- [12] ASTM D638 - 14. *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. 2014.
- [13] ASTM E21 - 17e1. *Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*. 2017.

- [14] ASTM E8 / E8M - 16a. *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2016.
- [15] Oliver Baier. „Optimierung von FLM-Bauteilen durch chemische Nachbearbeitung sowie deren Einsatz in der Galvanik“. Dissertation. Duisburg und Essen: Universität Duisburg-Essen, 2016.
- [16] Dominik Bauer u. a. *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*. 1. Auflage. VDI-Handlungsfelder. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2016. ISBN: 9783931384821.
- [17] Franziska Bendig, Klaus Brökel und Enrico Kloß. „Konzeption und Versuch an hydraulischen Spannbuchsen für Anwendungsbereiche unter geringer Last: Tagungsband“. In: *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 14* (2016).
- [18] Franziska Bendig, Klaus Brökel und Enrico Kloß. „Konzeptuelle Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für low-power Anwendungen: Tagungsband“. In: *VDI- Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 7* (2016).
- [19] Hans Beyer und Wolfgang Walter. *Lehrbuch der organischen Chemie*. 22., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1991. ISBN: 3777604852.
- [20] Philippe Block u. a., Hrsg. *Advances in Architectural Geometry 2014*. Cham: Springer, 2015. ISBN: 9783319114170.
- [21] Elisabeth Brandes und Wolfgang Möller. *Brennbare Flüssigkeiten und Gase*. Bd. / PTB; BAM ; Bd. 1. Sicherheitstechnische Kenngrößen. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 2003. ISBN: 9783897017450.
- [22] Klaus Brökel u. a., Hrsg. *Vernetzte Produktentwicklung: Methoden und Werkzeugkopplung ; Tagungsband ; 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2009 am 8. und 9.10.2009 in Bayreuth*. Bayreuth, 2009. ISBN: 9783000282225.
- [23] Donald H. Buckley. *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*. Bd. 5. Tribology series. Amsterdam, New York und New York: Elsevier Scientific Pub. Co, 2010. ISBN: 9780080875699.
- [24] Ralf Bürgel, Hans Albert Richard und Andre Riemer. *Werkstoffmechanik: Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 9783658039349.
- [25] Marshall Burns. *Automated fabrication: Improving productivity in manufacturing*. Englewood Cliffs, N.J.: PTR Prenrice Hall, 1993. ISBN: 9780131194625.
- [26] Jens Butzke. „Verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Fused Layer Manufacturing zur Reduzierung der Anisotropie im Bauteil“. Dissertation. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2019.
- [27] Charles Augustin Coulomb. *Théorie des machines simples: En ayant égard au frottement de leurs parties et a la roideur des cordages*. Paris: Bachelier, 1821.

- [28] Dario Croccolo, Massimiliano de Agostinis und Giorgio Olmi. „Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30“. In: *Computational Materials Science* 79 (2013), S. 506–518. ISSN: 09270256. DOI: [10.1016/j.commatsci.2013.06.041](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041).
- [29] S. Scott Crump. „Apparatus and method for creating three-dimensional objects: Patentschrift“. US5121329. 30.10.1989.
- [30] Horst Czichos, Hrsg. *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. 31. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Hütte. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2000. ISBN: 9783662066522.
- [31] Horst Czichos und Karl-Heinz Habig. *Tribologie-Handbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 9783834818102.
- [32] Horst Czichos, Birgit Skrotzki und Franz-Georg Simon. *Das Ingenieurwissen: Werkstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 9783642411250.
- [33] Jan Danielsen. „Hydraulisk bussning: Patentschrift“. SE 504380. 25.04.1994.
- [34] Herbert Depping. „Kupplung zwischen einer Welle und einer Nabe: Patentschrift“. DE 3543672 C2. 11.12.1985.
- [35] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. *GESTIS-Stoffdatenbank*. URL: <http://gestis.itrust.de> (besucht am 09.02.2019).
- [36] DIN 16888:1991-08. *Bewertung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Rohren aus Thermoplasten; Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid*.
- [37] DIN 4760:1982-06. *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*.
- [38] DIN 50154:2019-09. *Zugversuch an Folien und Bändern aus Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen mit einer Nenndicke kleiner 0,200 mm*.
- [39] DIN 53504:2017-03. *Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch*.
- [40] DIN 8580:2003-09. *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilungen*.
- [41] DIN EN 2561:1995-11. *Luft- und Raumfahrt - Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe - Unidirektionale Lamine: Zugprüfung parallel zur Faserrichtung*.
- [42] DIN EN 2597:1998-08. *Luft- und Raumfahrt - Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe; unidirektionale Lamine: Zugversuch senkrecht zur Faserrichtung*.
- [43] DIN EN ISO 14129:1998-02. *Faserverstärkte Kunststoffe: Zugversuch an 45 Grad-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene*.
- [44] DIN EN ISO 1798:2008-04. *Weich-elastische polymere Schaumstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung*.

- [45] DIN EN ISO 4288:1998-04. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.*
- [46] DIN EN ISO 5079:1996-02. *Textilien - Fasern - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an Spinnfasern.*
- [47] DIN EN ISO 527-1:2012-06. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze.*
- [48] DIN EN ISO 527-2:2012-06. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften: Teil 2: Prüfbedingungen für Form und Extrusionsmassen.*
- [49] DIN EN ISO 527-3:2019-02. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln.*
- [50] DIN EN ISO 527-4:1997-07. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe.*
- [51] DIN EN ISO 527-5:2010-01. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe.*
- [52] DIN EN ISO 6892-1:2017-02. *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.*
- [53] DIN EN ISO/ASTM 52900:2017-06. *Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie.*
- [54] DIN EN ISO/ASTM 52921:2017-01. *Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung - Koordinatensystem und Prüfmethodologien.*
- [55] Sarah Dramm. „Entwicklung eines experimentellen Verfahrens zur Herstellung zylindrischer Hohlmantelspannbuchsen mit spiralförmiger Wirkraumgeometrie“. Studienarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2017.
- [56] Gottfried W. Ehrenstein, Hrsg. *Thermische Einsatzgrenzen von Kunststoffen in Verarbeitung und Anwendung.* Bd. Sonderpubl. Ingenieur-Werkstoffe. Düsseldorf: Springer-VDI-Verl., 2000. ISBN: 3980628698.
- [57] Gottfried W. Ehrenstein und Sonja Pongratz. *Beständigkeit von Kunststoffen.* eibis e-Bib Projekt. München, Bern und Bonn: Hanser und eibis, 2007. ISBN: 9783446411494.
- [58] Stefan Einbock und Florian Mailänder. *Betriebsfestigkeit mit FEM: Schnell verstehen & anwenden.* 1. Auflage. Norderstedt: Books on Demand, 2018. ISBN: 9783752809930.
- [59] ETP Transmission AB. *ETP Product Catalogue GER: Hydraulische Welle-Nabe Verbindungen.* 2015. URL: https://etp-gmbh.com/sites/default/files_two/Etp%20broschyr%20transmission%20GER%202015_05_low.pdf (besucht am 22. 11. 2018).

- [60] Leonhard Euler, Wenceslaus Johann Gustav Karsten und Anton Ferdinand Rösse. *Theoria Motus Corporum Solidorum Sev Rigidorum : Ex Primis Nostrae Cognitionis Principiis Stabilita Et Ad Omnes Motus, Qvi In Hovismodi Corpora Cadere Possvnt, Accomodata*. Rostock, Greifswald: Röse, 1765.
- [61] Peter Eyerer, Peter Elsner und Thomas Hirth. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 1. Aufl. VDI-Buch. s.l.: Springer-Verlag, 2005. ISBN: 9783540264330.
- [62] Peter Eyerer, Peter Elsner und Thomas Hirth. *Polymer Engineering: Technologien und Praxis*. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 9783540724193.
- [63] Brian Feeny u. a. „A Historical Review on Dry Friction and Stick-Slip Phenomena“. In: *Applied Mechanics Reviews* 51.5 (1998), S. 321–341. ISSN: 0003-6900. DOI: [10.1115/1.3099008](https://doi.org/10.1115/1.3099008).
- [64] Festo AG & Co. KG. *Produktdatenblatt für den Kurzhubzylinder ADVC/AEVC*. 2018.
- [65] Clemens Fichtner, Georg Hausner und Gunnar Oldenburg. „Entwicklung eines Getriebeversuchsstandes“. Projekt Maschinenbau. Rostock: Universität Rostock, 2012.
- [66] Andreas Fischer, Stefan Gebauer und Evgeniy Khavkin. *3D-Druck im Unternehmen: Entscheidungsmodelle, Best Practices und Anwendungsbeispiele. Am Beispiel Fused Layer Modeling (FLM)*. München: Hanser, 2018. ISBN: 9783446441248.
- [67] Heinrich Fischer. „Kraftschlüssige lösbare Welle-Nabe-Verbindung: Patentschrift“. DE 3148676 C2. 9.12.1981.
- [68] Ulrich Fischer. *Tabellenbuch Metall*. 43. Aufl. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel Verlag, 2005. ISBN: 3808517239.
- [69] Jakob Flodell und Niklas Engbåge. „Effektivisering av layout i produktionshallen på ETP Transmission AB: Layoutoptimering“. Bachelorarbeit. Linköping: Linköping Universität, 2019.
- [70] L. M. Galantucci, F. Lavecchia und G. Percoco. „Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts“. In: *CIRP Annals* 58.1 (2009), S. 189–192. ISSN: 00078506. DOI: [10.1016/j.cirp.2009.03.071](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.071).
- [71] Ashu Garg, Anirban Bhattacharya und Ajay Batish. „Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.5-8 (2017), S. 2175–2191. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-016-9257-1](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9257-1).
- [72] Bence Gávay Pál. „Investigation and optimization of 3D printers setting and surface treatment“. Masterarbeit. Girona: Universitat de Girona, 2016.

- [73] Andreas Gebhardt. *Additive Fertigungsverfahren*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN: 9783446444010.
- [74] Andreas Gebhardt. *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping ; Tooling ; Produktion*. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2013. ISBN: 9783446436510.
- [75] Christof Gebhardt. *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. Mit 30 Übungsbeispielen*. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018. ISBN: 9783446459298.
- [76] Thomas Geike. „Theoretische Grundlagen eines schnellen Berechnungsverfahrens für den Kontakt rauher Oberflächen“. Dissertation. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2007.
- [77] ÖKOPOL GmbH. *Additive Fertigung: 3D-Druck, Rapid Prototyping, Additive Manufacturing*. Hamburg, 2016. URL: <http://www.hamburg.de/contentblob/6127140/90d4805b51420673388e03ae827bbf30/data/additive-fertigung.pdf> (besucht am 04.01.2019).
- [78] Fernanda C. Godoi, Sangeeta Prakash und Bhesh R. Bhandari. „3d printing technologies applied for food design: Status and prospects“. In: *Journal of Food Engineering* 179 (2016), S. 44–54. ISSN: 02608774. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025).
- [79] Katharina Griegel. „Spannring für Welle - Nabe - Verbindung: Offenlegungsschrift“. DE 3816173 A1. 11.05.1988.
- [80] C. A. Griffiths u. a. „Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling“. In: *Procedia CIRP* 49 (2016), S. 28–32. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2015.07.024](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.024).
- [81] Karl-Heinrich Grote, Beate Bender und Dietmar Göhlich, Hrsg. *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 9783662548059.
- [82] Ludwig Gümbel. *Reibung und Schmierung im Maschinenbau*. Berlin: M. Krayn, 1925.
- [83] Handelskammer Hamburg. *3D-DRUCK: Potenziale und Herausforderungen für die Hamburger Wirtschaft*. Hamburg, 18. Jan. 2017. URL: <https://www.hk24.de/blob/hhik24/produktmarken/downloads/3623902/125eed6aa0d0740528bb76b1753cebf8/analysepapier-3d-druck-data.pdf> (besucht am 28.09.2019).
- [84] Carsten Haugwitz. „Konstruktionsmethodik zur Strukturoptimierung generativ zu fertiger Kunststoff-Bauteile“. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2017. DOI: [10.25673/5201](https://doi.org/10.25673/5201).

- [85] Eberhard Heldt. *Oberflächenparameter: Informationsblatt*. Hrsg. von Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. 2017. URL: http://pages.zeiss.com/rs/896-XMS-794/images/DE_60_050_004I_Oberflaeche_A0.pdf (besucht am 06.10.2019).
- [86] Hirschmann GmbH. „Hydraulikspannvorrichtung: Patentschrift“. DE 3820513 C1. 16.06.1988.
- [87] Alistair Ho u. a. „On the origin of microstructural banding in Ti-6Al4V wire-arc based high deposition rate additive manufacturing“. In: *Acta Materialia* 166 (2019), S. 306–323. ISSN: 13596454. DOI: [10.1016/j.actamat.2018.12.038](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.038).
- [88] Dirk Hoffmann. „Das Augmented-Lagrange-Verfahren bei Reibkontaktproblemen unter transients Beanspruchung“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2003.
- [89] Martha Holtfreter. „Schistosoma mansoni Sambon, 1907 (Plathelminthes, Digenea)“. Dissertation. Rostock: Universität Rostock, 2010. DOI: [10.18453/rosdok_id00000894](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00000894).
- [90] Michael Horbelt, Thomas Iglar und Paul Janischewski. „Förfarande och anordning för övervakning av en strömförbrukares funktionsduglighet: Patentschrift“. SE 9600076. 9.01.1996.
- [91] HP inc. *HP Launches World's Most Advanced Metals 3D Printing Technology for Mass Production to Accelerate 4th Industrial Revolution*. Pressemitteilung. 10.09.2018. URL: <https://press.ext.hp.com/us/en/press-releases/2018/hp-launches-worlds-most-advanced-metals-3d-printing-technology.html> (besucht am 24.12.2018).
- [92] ISO 1926:2009-12. *Harte Schaumstoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*.
- [93] ISO 37:2017-11. *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Zugfestigkeitseigenschaften*.
- [94] ISO 4433-1:1997-12. *Thermoplastische Rohre - Widerstand gegen chemische Fluide - Klassifizierung*.
- [95] ISO/TC 261. *Standards catalogue - ISO/TC 261: Additive manufacturing*. 2019.
- [96] N. Jayanth, P. Senthil und C. Prakash. „Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process“. In: *Virtual and Physical Prototyping* 13.3 (2018), S. 155–163. ISSN: 1745-2759. DOI: [10.1080/17452759.2018.1449565](https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1449565).
- [97] Yijie Jiang, Lucia M. Korpas und Jordan R. Raney. „Bifurcation-based embodied logic and autonomous actuation“. In: *Nature Communications* 10.1 (2019), S. 128. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/s41467-018-08055-3](https://doi.org/10.1038/s41467-018-08055-3).
- [98] Kai Müller. „Alles für alle und am besten schnell: 3D-Drucker für jedermann“. In: *Tagesspiegel* 2014 (22.03.2014), S. 3.

- [99] Wolfgang Kaiser. *Kunststoffchemie für Ingenieure*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015. ISBN: 9783446446380.
- [100] Antreas Kantaros und Dimitris Karalekas. „Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process“. In: *Materials & Design* 50 (2013), S. 44–50. ISSN: 02613069. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.02.067](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.067).
- [101] Imke Nora Kellner. „Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2012.
- [102] Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH, Hrsg. *Gewinde-Einsätze für Kunststoffe und Holz*. Nr. 30. 2016.
- [103] Hans B. Kief, Helmut A. Roschiwal und Karsten Schwarz. *CNC-Handbuch: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis*. 30. Aufl. München: Hanser, 2017. ISBN: 9783446452657.
- [104] Fritz Klocke. *Fertigungsverfahren 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 9783662542064.
- [105] Enrico Kloß. *Abschlußbericht zum FuE-Projekt „Entwicklung einer Hohlmantelspannhülse“: Förderkennzeichen: KP 0123 302 BN 6B*. 2008.
- [106] Enrico Kloß. „Entwicklung einer innovativen reibschlüssigen Spannelement-Verbindung mit zylindrisch, spiralförmiger Wirkraumgeometrie: Tagungsband“. In: *VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen* 5.2176 (2012).
- [107] Enrico Kloß. „Entwicklung einer kostengünstigen Alternativen für ETP-Spannbuchsen zur Fixierung von Zahnriemenscheiben auf Wellen“. Diplomarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012.
- [108] Enrico Kloß. „Experimentelle Untersuchung zum maximal übertragbaren Drehmoment von hydraulischen Spannelementen in Verwendung als reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung: Tagungsband“. In: *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik* 9 (2011).
- [109] Sabina Kolbeck. *CAD-Daten_Turm der voxeljet AG: E-Mail*. Hrsg. von Pascal Schmitt. 30.01.2019.
- [110] Normann Koldrack. „Einsatz von 3D-Drucktechnik bei der Herstellung hydraulischer Spannbuchsen: Eine kostengünstige und flexible Alternative zu konventionellen hydraulischen Spannbuchsen“. In: *8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen*. Bd. 2337. 2018, S. 263–266.
- [111] Normann Koldrack und Klaus Brökel. „Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für das Rapid Manufacturing“. In: *KT-Kolloquium*. Bd. 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. 2019.

- [112] Normann Koldrack und Pascal Schmitt. „Über den Einfluss von Aceton auf die Zugfestigkeit und Welligkeit von 3D-gedrucktem ABS-P430“. In: *KT-Kolloquium*. Bd. 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. 2018.
- [113] Otto Kraemer und Georg Jungbluth. *Bau und Berechnung von Verbrennungsmotoren: Hubkolben- und Rotationskolbenmotoren*. Fünfte, völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983. ISBN: 9783540120261.
- [114] Jimin Kwon u. a. „Three-dimensional monolithic integration in flexible printed organic transistors“. In: *Nature Communications* 10.1 (2019), S. 54. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/s41467-018-07904-5](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07904-5).
- [115] Neil Leach und Behnaz Farahi. *3-D Printed Body Architecture*. Architectural Design Ser. Newark: John Wiley & Sons Incorporated, 2018. ISBN: 9781119340171.
- [116] Simon J. Leigh u. a. „A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors“. In: *PloS one* 7.11 (2012). DOI: [10.1371/journal.pone.0049365](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365).
- [117] Sven Lemon und Niclas Rosberg. „Förfarande för framställning av en hydraulisk spännbussning samt bussning framställd enligt förfarandet: Patentskrift“. SE 518401. 11.04.1997.
- [118] Lenze Verbindungstechnik GmbH, Gerda Fürst. *Angebot 2 ETP-Express: E-Mail*. Hrsg. von Normann Koldrack. 16.11.2018.
- [119] Lenze Verbindungstechnik GmbH, Petra Neundlinger. *Angebot ETP-Express: E-Mail*. Hrsg. von Normann Koldrack. 10.10.2019.
- [120] Nanya Li, Yingguang Li und Shuting Liu. „Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 238 (2016), S. 218–225. ISSN: 09240136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025).
- [121] Clemens Lieberwirth, Arne Harder und Hermann Seitz. „Extrusion Based Additive Manufacturing of Metal Parts“. In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 7.2 (2017). ISSN: 21595275. DOI: [10.17265/2159-5275/2017.02.004](https://doi.org/10.17265/2159-5275/2017.02.004).
- [122] Clemens Lieberwirth und Hermann Seitz. „Additive Fertigung mit Metallspritzguss-Granulaten“. In: *Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing*. Hrsg. von Wieland Kniffka, Michael Eichmann und Gerd Witt. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 262–269. ISBN: 9783446450172.
- [123] Stefan Lindström, Björn Olsson und Anders Samelius. „Vorrichtung zum Einspannen eines Werkzeugs oder eines Werkstücks: Offenlegungsschrift“. DE 4409603 A1. 21.03.1994.

- [124] Jeffrey I. Lipton u. a. „Additive manufacturing for the food industry“. In: *Trends in Food Science & Technology* 43.1 (2015), S. 114–123. ISSN: 09242244. DOI: [10.1016/j.tifs.2015.02.004](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.004).
- [125] MAN Roland Druckmaschinen AG. „Hydraulische oder pneumatische Spannbuchse: Gebrauchsmuster“. G 9420239.7. 14.04.1998.
- [126] Henrietta Meinke. *Anleitung für das Praktikum: Oberflächenmesstechnik*. Hrsg. von Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Fachbereich 2 / Ingenieurwissenschaften II, Labor Messtechnik. 2007. URL: https://master.htw-berlin.de/files/Stg/MB/Versuchsanleitungen_Messtechnik/Oberflaeche.pdf (besucht am 28.09.2019).
- [127] Felix Meyer. „Entwurf eines Teststands zur Ermittlung des maximal übertragbaren Dehmoments von reibschlüssigen Wellen-Naben-Verbindungen“. Projektarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2007.
- [128] Jacek Mieloszyk u. a. „Preliminary design of 3D printed fittings for UAV“. In: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* (2019). ISSN: 0002-2667. DOI: [10.1108/AEAT-07-2018-0182](https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2018-0182).
- [129] Vladimir Mironov u. a. „Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering“. In: *Trends in Biotechnology* 21.4 (2003), S. 157–161. ISSN: 01677799. DOI: [10.1016/S0167-7799\(03\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(03)00033-7).
- [130] Günter Müller und Clemens Groth. *FEM für Praktiker*. 8. Aufl. Bd. 23. Edition expertsoft. Renningen: Expert-Verl., 2007. ISBN: 9783816926856.
- [131] Joseph T. Muth u. a. „Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers“. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 26.36 (2014), S. 6307–6312. DOI: [10.1002/adma.201400334](https://doi.org/10.1002/adma.201400334).
- [132] Clare Naden. *ISO and ASTM International unveil framework for creating global additive manufacturing standards*. Pressemitteilung. 7.10.2016. URL: <https://www.iso.org/news/2016/10/Ref2124.html> (besucht am 23.01.2019).
- [133] Hubert Nawrath. „Durch Druckmittel spannbare Kupplungsverbindung: Patentschrift“. DE 2639320. 1978.
- [134] Liz Nickels. „AM and aerospace: an ideal combination“. In: *Metal Powder Report* 70.6 (2015), S. 300–303. ISSN: 00260657. DOI: [10.1016/j.mprp.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.mprp.2015.06.005).
- [135] Mathias Obergrießer, Hrsg. *Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 9783658167813.
- [136] Rudolf Och. „Spannhülse: Patentschrift“. DE 3931138 C2. 19.09.1989.
- [137] Anne Peijan. „Systematische Untersuchung von Forschungsergebnissen als Beitrag zur Entwicklung alternativer Spannelemente“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012.

- [138] Valentin L. Popov und Markus Heß. *Methode der Dimensionsreduktion in Kontaktmechanik und Reibung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642326721.
- [139] Elena Popova und Valentin L. Popov. „The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction“. In: *Friction* 3.2 (2015), S. 183–190. ISSN: 2223-7690. DOI: [10.1007/s40544-015-0074-6](https://doi.org/10.1007/s40544-015-0074-6).
- [140] Rasmus Pötke. „Überarbeitung und Skalierung des Hüllendesigns eines Shell-Eco-Wettbewerbsfahrzeuges bezüglich aktueller Platz- und Regelanforderungen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018.
- [141] Peter Prof. Scott. *Intermediate Lab manual: Chi-Square: Testing for goodness of fit*. Hrsg. von University of California, Santa Cruz. 2000. URL: <http://maxwell.ucsc.edu/~drip/133/ch4.pdf> (besucht am 28.09.2019).
- [142] Christian Reichardt. „Der Lösungsmiteleinfluß auf chemische Reaktionen“. In: *Chemie in unserer Zeit* 15.5 (1981), S. 139–148. ISSN: 00092851. DOI: [10.1002/ciuz.19810150503](https://doi.org/10.1002/ciuz.19810150503).
- [143] Rainer Renz, Johannes Krämer und Günter Haag. „Spannwerkzeug zum kraftschlüssigen und hochpräzisten Spannen von Werkstücken: Patentschrift“. DE 3909630 C2. 23.03.1989.
- [144] Hannes Richter. „Entwicklung von eines parametrischen CAD-Modells für numerische Berechnungen von spiralförmigen Hohlmantelspannbuchsen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012.
- [145] Frank Rieg und Rolf Steinhilper. *Handbuch Konstruktion*. München: Hanser, 2012. ISBN: 9783446430006.
- [146] Ringspann GmbH. *Lieferzeit und Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110*. 2019. URL: <https://www.ringspann.de/de/produkte/welle-nabe-verbindungen/konus-spannelemente/zentriert-die-nabe-zur-welle/konus-spannelemente-rlk-110> (besucht am 11.10.2019).
- [147] Ringspann GmbH. *Produktdatenblatt für die Bremszange DH 025 PFM: pneumatisch betätigt – federgelüftet*. 2018.
- [148] John P. Rioux und Roy A.M. Myers. „Methylene chloride poisoning: a paradigmatic review“. In: *The Journal of Emergency Medicine* 6.3 (1988), S. 227–238. ISSN: 07364679. DOI: [10.1016/0736-4679\(88\)90330-7](https://doi.org/10.1016/0736-4679(88)90330-7).
- [149] Robin Buck. *Filamentworld*. 2019. URL: <https://www.filamentworld.de/produkt-kategorie/special-filament/metall-filament/> (besucht am 10.09.2019).
- [150] Günter Horst Röhm. „Spanndorn mit elastischem, hydraulischen dehnbaren Spannhülse: Patentschrift“. DE 3116289 C2. 24.04.1981.
- [151] Niclas Rosberg und Sven Lemon. „Hydraulic clamp bushung having reduced sleeve thickness: Patentschrift“. WO 98/46896. 14.04.1998.

- [152] Mohammad S. Alsoufi u. a. „Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+“. In: *American Journal of Mechanical Engineering* 7.2 (2019), S. 45–60. ISSN: 2328-4102. DOI: [10.12691/ajme-7-2-1](https://doi.org/10.12691/ajme-7-2-1).
- [153] Sabine Güttler. „Innovative Prinzipfindung und Konstruktion von ETP-Spannbuchsen unter Berücksichtigung verschiedener Fertigungsverfahren, Werkstoffe und des Druckmediums“. Projektarbeit. Rostock: Universität Rostock, 1994.
- [154] Emanuel M. Sachs u. a. „Three-dimensional printing techniques: Patentschrift“. US 5340656. 9.04.1993.
- [155] Jiri Safka, Michal Ackermann und David Martis. „Chemical resistance of materials used in additive manufacturing“. In: *MM Science Journal* 2016.06 (2016), S. 1573–1578. ISSN: 18031269. DOI: [10.17973/MMSJ.2016_2016185](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_2016185).
- [156] Anders Samelius. „Machine spindle or tool holder having an integrated chuck and method of manufacturing same: Patentschrift“. WO 93/10928. 3.11.1991.
- [157] Bernd Sauer. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 9783642395000.
- [158] Pascal Schmitt. „Untersuchung der Werkstoffparameter 3D-gedruckter Prüfkörper mit Oberflächenbehandlung“. Studienarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018.
- [159] Dietmar Schorr. „Rauheitsmessung zur Oberflächencharakterisierung – aber richtig“. In: *WOMag : Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche* 4 (2018), S. 24–25.
- [160] Karl Schünemann. „Zentriereinrichtung für rotierende Welle- Nabenverbindung: Patentschrift“. DD 270569 A1. 13.04.1988.
- [161] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 9783540721901.
- [162] Hermann Seitz. „Dreidimensionales Drucken von patientenindividuellem Knochenersatz“. In: *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie* 5 (2008). ISSN: 1614-0923.
- [163] Pshtiwan Shakor u. a. „Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D Printing of Cementitious Materials in the Construction Industry“. In: *Frontiers in Built Environment* 4 (2019), S. 2740. DOI: [10.3389/fbui.2018.00085](https://doi.org/10.3389/fbui.2018.00085).
- [164] Mohammad Shojib Hossain u. a. „Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136.6 (2014), S. 061002. ISSN: 1087-1357. DOI: [10.1115/1.4028538](https://doi.org/10.1115/1.4028538).

- [165] Siemens AG. *Produktdatenblatt des Frequenzumrichters sinamics G110: Betriebsanleitung, Anwenderdokumentation*. 2005.
- [166] Cetin Morris Sonsino. „Betriebsfestigkeit — Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen“. In: *Materials Testing* 50.1-2 (2008), S. 77–90. ISSN: 0025-5300. DOI: [10.3139/120.100862](https://doi.org/10.3139/120.100862).
- [167] Anoop K. Sood, Raj K. Ohdar und Siba S. Mahapatra. „Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement“. In: *Journal of Advanced Research* 3.1 (2012), S. 81–90. ISSN: 20901232. DOI: [10.1016/j.jare.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001).
- [168] Horst Sorg. *Praxis der Rauheitsmessung und Oberflächenbeurteilung*. München: Hanser, 1995. ISBN: 3446175288.
- [169] Wolfgang Stamm. „Modellierung und Simulation von Mehrkörpersystemen mit flächigen Reibkontakten“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2011.
- [170] Jürgen Stampfl und Robert Liska. „New Materials for Rapid Prototyping Applications“. In: *Macromolecular Chemistry and Physics* 206.13 (2005), S. 1253–1256. ISSN: 1022-1352. DOI: [10.1002/macp.200500199](https://doi.org/10.1002/macp.200500199).
- [171] Statasys Ltd. *Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934: For the fiscal year ended December 31, 2017*. 2018. URL: <http://investors.stratasys.com/static-files/d733259e-a311-4b20-98e2-ee1c29be2cb6> (besucht am 28.09.2019).
- [172] Statasys Ltd. *Fused Deposition Modeling (FDM) Design Guidelines*. 2017. URL: https://www.stratasysdirect.com/-/media/files/direct/design-guidelines/fdm_design_guidelines_2017.pdf (besucht am 24.06.2019).
- [173] Tobias Stefaniak, Kevin Kuhlmann und Karl-Heinrich Grote. „Abweichungsuntersuchung feingegossener Zylinder, deren Gießform mithilfe von additiv gefertigten, hohlen Ausbrennmodellen erstellt wurde“. In: *Produktentwicklung zur Qualitätssicherung: Tagungsband : 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*. 2015, S. 309–319.
- [174] Christoph Stehncken. *Numerische Analyse multistabiler Mehrschichtverbunde: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2010*. 1. Aufl. Apprimus Edition Wissenschaft. Aachen: Apprimus-Verl., 2011. ISBN: 9783863590086.
- [175] Waldemar Steinhilper und Bernd Sauer. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. ISBN: 9783642243028.
- [176] Stratasys. *ABSplus-P430: Production-grade thermoplastic for 3D printers*. Hrsg. von Stratasys. Eden Prairie, 2017. URL: https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_absm30_1117a.pdf (besucht am 28.09.2019).

- [177] Stratasys. *FDM Printers and Materials*. Hrsg. von Stratasys Headquarters. Eden Prairie, 2018. URL: <https://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/fdm-3d-printers-materials-spec-sheet.pdf> (besucht am 04.01.2019).
- [178] Ltd. Stratasys. *GrabCAD Print release notes: GrabCAD Print version 1.33*. 2019. URL: <https://help.grabcad.com/article/213-grabcad-print-release-notes> (besucht am 21.09.2019).
- [179] R. Stribeck. *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager*. Bd. 7. Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen. Berlin: Springer, 1903.
- [180] Struers GmbH. *RepliSet Datenblatt*. Hrsg. von Struers GmbH. 16. Apr. 2018. (Besucht am 10.09.2019).
- [181] Jie Sun u. a. „An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication“. In: *Food and Bioprocess Technology* 8.8 (2015), S. 1605–1615. ISSN: 1935-5130. DOI: [10.1007/s11947-015-1528-6](https://doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6).
- [182] Q. Sun u. a. „Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments“. In: *Rapid Prototyping Journal* 14.2 (2008), S. 72–80. ISSN: 1355-2546. DOI: [10.1108/13552540810862028](https://doi.org/10.1108/13552540810862028).
- [183] Mark D. Symes u. a. „Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis“. In: *Nature Chemistry* 4 (2012). DOI: [10.1038/nchem.1313](https://doi.org/10.1038/nchem.1313).
- [184] tectis GmbH. *Produktdatenblatt Scherstab für Druckkräfte, bis 2.268 kg: Baureihe: F3270*. 2007.
- [185] Xiaoyong Tian u. a. „Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 88 (2016), S. 198–205. ISSN: 1359835X. DOI: [10.1016/j.compositesa.2016.05.032](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032).
- [186] Alyson Vanderploeg, Seung-Eun Lee und Michael Mamp. „The application of 3D printing technology in the fashion industry“. In: *International Journal of Fashion Design, Technology and Education* 10.2 (2017), S. 170–179. ISSN: 1754-3266. DOI: [10.1080/17543266.2016.1223355](https://doi.org/10.1080/17543266.2016.1223355).
- [187] Vinay Kumar Vanjakula. „Analysis of hydraulic clamp in ANSYS“. Software Lab Projekt. Rostock: Universität Rostock, 2017.
- [188] VDI 2209:2009-03. *3-D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis*.
- [189] VDI 3405:2014-12. *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*.

- [190] Volkswagen AG. *Reif für die Serie: Volkswagen setzt auf neuestes 3D-Druck Verfahren für Produktion*. Pressemitteilung. Wolfsburg, 11.09.2018. URL: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/reif-fuer-die-serie-volkswagen-setzt-auf-neuestes-3d-druck-verfahren-fuer-produktion-4173> (besucht am 24. 12. 2018).
- [191] Bing Zi Wang und Ying Chen. „The Effect of 3D Printing Technology on the Future Fashion Design and Manufacturing“. In: *Applied Mechanics and Materials* 496-500 (2014), S. 2687–2691. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.2687](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.2687).
- [192] Tian-Ming Wang, Jun-Tong Xi und Ye Jin. „A model research for prototype warp deformation in the FDM process“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33.11-12 (2007), S. 1087–1096. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-006-0556-9](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0556-9).
- [193] Markus Wegner und Benjamin Klatt. „Konzept für einen Prüfstand für Welle-Nabe-Verbindungen“. Projekt Maschinenbau. Rostock: Universität Rostock, 2011.
- [194] Jeffery A. Weisman u. a. „Antibiotic and chemotherapeutic enhanced three-dimensional printer filaments and constructs for biomedical applications“. In: *International journal of nanomedicine* 10 (2015), S. 357–370. DOI: [10.2147/IJN.S74811](https://doi.org/10.2147/IJN.S74811).
- [195] Wolfgang Weißbach, Michael Dahms und Christoph Jaroschek. *Werkstoffe und ihre Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN: 9783658198916.
- [196] Hannes Wilke. *Positioniergenauigkeit uPrint SE Plus: E-Mail*. Hrsg. von Normann Koldrack. 2019.
- [197] Thomas Williams und Colin Kelley. *gnuplot 5.2: An Interactive Plotting Program*. 2018. URL: http://www.gnuplot.info/docs_5.2/Gnuplot_5.2.pdf (besucht am 24. 05. 2019).
- [198] David Ian Wimpenny, Pulak M. Pandey und L. Jyothish Kumar. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2017. ISBN: 9789811008115.
- [199] Herbert Wittel u. a. *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 9783658090814.
- [200] Terry T. Wohlers. *Wohlers Report: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates, 2018. ISBN: 9780991333240.
- [201] Lutz Wrede. *Rahmenplan beschleunigt Normung für 3D-Druck*. Pressemitteilung. Berlin, 24.10.2019. URL: <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/rahmenplan-beschleunigt-normung-fuer-3d-druck-208220> (besucht am 23. 01. 2019).

- [202] Peng Wu, Jun Wang und Xiangyu Wang. „A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry“. In: *Automation in Construction* 68 (2016), S. 21–31. ISSN: 09265805. DOI: [10.1016/j.autcon.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005).
- [203] Sebastian Wurr. „Vergleich von Reglervarianten an einem Prüfstand für Welle-Nabe-Verbindungen“. Masterarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018.
- [204] Robert Wustmann. „Überarbeitung und Skalierung des Rahmens eines Shell-Eco-Wettbewerbsfahrzeugs bezüglich Platz und Regelanforderungen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018.
- [205] Constance Ziemian, Mala Sharma und Sophia Ziemi. „Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling“. In: *Mechanical Engineering*. Hrsg. von Murat Gokcek. InTech, 2012. ISBN: 9789535105053.
- [206] Stefan Zoller und Markus Kellermeier. *Topologieoptimierung von FDM- Endbauteilen*. Darmstadt, 27.02.2018. URL: https://wissen.cadferm.net/de-de/Mediathek%20Dokumente/2018_DE_Topologieoptimierung%20von%20FDM-Endbauteilen.pdf.
- [207] Stefan Zorn. „Berücksichtigung statischer Oberflächenkenngrößen bei der numerischen Simulation hydrodynamisch wirkender Radialgleitlager im Mischreibungsbetrieb“. Dissertation. Rostock: Universität Rostock, 2019.

Anhang A

Anhang

A.1 Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock in den Jahren 2017 bis 2019 unter wesentlicher fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zum 3D-Drucken, der Simulation und Materialien untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studenten für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- Schmitt, Pascal: studentische Hilfskraft November 2018 bis März 2019
- [140] Rasmus Pötke. „Überarbeitung und Skalierung des Hüllendesigns eines Shell-Eco-Wettbewerbsfahrzeuges bezüglich aktueller Platz- und Regelanforderungen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018
- [204] Robert Wustmann. „Überarbeitung und Skalierung des Rahmens eines Shell-Eco-Wettbewerbsfahrzeugs bezüglich Platz und Regelanforderungen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018
- [158] Pascal Schmitt. „Untersuchung der Werkstoffparameter 3D-gedruckter Prüfkörper mit Oberflächenbehandlung“. Studienarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018
- [203] Sebastian Wurr. „Vergleich von Reglervarianten an einem Prüfstand für Welle-Nabe-Verbindungen“. Masterarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2018
- [187] Vinay Kumar Vanjakula. „Analysis of hydraulic clamp in ANSYS“. Software Lab Projekt. Rostock: Universität Rostock, 2017

A.2 Eigene Veröffentlichungen

- [110] Normann Koldrack. „Einsatz von 3D-Drucktechnik bei der Herstellung hydraulischer Spannbuchsen: Eine kostengünstige und flexible Alternative zu konventionellen hydraulischen Spannbuchsen“. In: *8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen*. Bd. 2337. 2018, S. 263–266
- [111] Normann Koldrack und Klaus Brökel. „Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für das Rapid Manufacturing“. In: *KT-Kolloquium*. Bd. 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. 2019
- [112] Normann Koldrack und Pascal Schmitt. „Über den Einfluss von Aceton auf die Zugfestigkeit und Welligkeit von 3D-gedrucktem ABS-P430“. In: *KT-Kolloquium*. Bd. 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. 2018

A.3 Weitere Veröffentlichungen des Lehrstuhls Konstruktionstechnik/CAD zu hydraulischen Spannbuchsen

- [153] Sabine Güttler. „Innovative Prinzipfindung und Konstruktion von ETP-Spannbuchsen unter Berücksichtigung verschiedener Fertigungsverfahren, Werkstoffe und des Druckmediums“. Projektarbeit. Rostock: Universität Rostock, 1994
- [127] Felix Meyer. „Entwurf eines Teststands zur Ermittlung des maximal übertragbaren Dehmoments von reibschlüssigen Wellen-Naben-Verbindungen“. Projektarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2007
- [108] Enrico Kloß. „Experimentelle Untersuchung zum maximal übertragbaren Drehmoment von hydraulischen Spannelementen in Verwendung als reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung: Tagungsband“. In: *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 9* (2011)
- [193] Markus Wegner und Benjamin Klatt. „Konzept für einen Prüfstand für Welle-Nabe-Verbindungen“. Projekt Maschinenbau. Rostock: Universität Rostock, 2011
- [65] Clemens Fichtner, Georg Hausner und Gunnar Oldenburg. „Entwicklung eines Getriebeversuchsstandes“. Projekt Maschinenbau. Rostock: Universität Rostock, 2012
- [107] Enrico Kloß. „Entwicklung einer kostengünstigen Alternativen für ETP-Spannbuchsen zur Fixierung von Zahnriemenscheiben auf Wellen“. Diplomarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012
- [144] Hannes Richter. „Entwicklung von eines parametrischen CAD-Modells für numerische Berechnungen von spiralförmigen Hohlmantelspannbuchsen“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012

- [137] Anne Peijan. „Systematische Untersuchung von Forschungsergebnissen als Beitrag zur Entwicklung alternativer Spannelemente“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012
- [107] Enrico Kloß. „Entwicklung einer kostengünstigen Alternativen für ETP-Spannbuchsen zur Fixierung von Zahnriemenscheiben auf Wellen“. Diplomarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2012
- [106] Enrico Kloß. „Entwicklung einer innovativen reibschlüssigen Spannelement-Verbindung mit zylindrisch, spiralförmiger Wirkraumgeometrie: Tagungsband“. In: *VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 5.2176* (2012)
- [17] Franziska Bendig, Klaus Brökel und Enrico Kloß. „Konzeption und Versuch an hydraulischen Spannbuchsen für Anwendungsbereiche unter geringer Last: Tagungsband“. In: *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 14* (2016)
- [18] Franziska Bendig, Klaus Brökel und Enrico Kloß. „Konzeptuelle Entwicklung einer hydraulischen Spannbuchse für low-power Anwendungen: Tagungsband“. In: *VDI- Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 7* (2016)
- [55] Sarah Dramm. „Entwicklung eines experimentellen Verfahrens zur Herstellung zylindrischer Hohlmantelspannbuchsen mit spiralförmiger Wirkraumgeometrie“. Studienarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2017

A.4 Anhang der Kapitel

Anhang für Kapitel 1

Wellendurchmesser [mm]	ETP-Express [€]	RLK 110 [€]
6		11,75
8		11,75
9		11,75
10		10,68
11		10,68
12		10,68
14		11,11
15	220	11,55
16		11,55
17		11,63
18		11,63
19	221	11,66
20	226	12,33
22	228	13,60
24	229	13,70
25	236	14,73
28	248	14,95
30	268	15,72
32	269	16,35
35	301	17,54
38	319	19,15
40	333	19,72
42	347	22,23
45	376	25,09
48	400	26,79
50	418	27,69
55	458	31,66
60	497	33,20
65	559	35,79
70	658	53,20
75		55,90
80	1.143	68,80
85		77,10
90	1.519	77,10
95		101,30
100	1.744	115,20
110		216,80
120		264,20

TABELLE A.1: Kosten der Konus-Spannelemente RLK 110 im Vergleich zur ETP-Express. Mit Daten von [118, 119, 146] Stand: 10.2019

Anhang für Kapitel 4

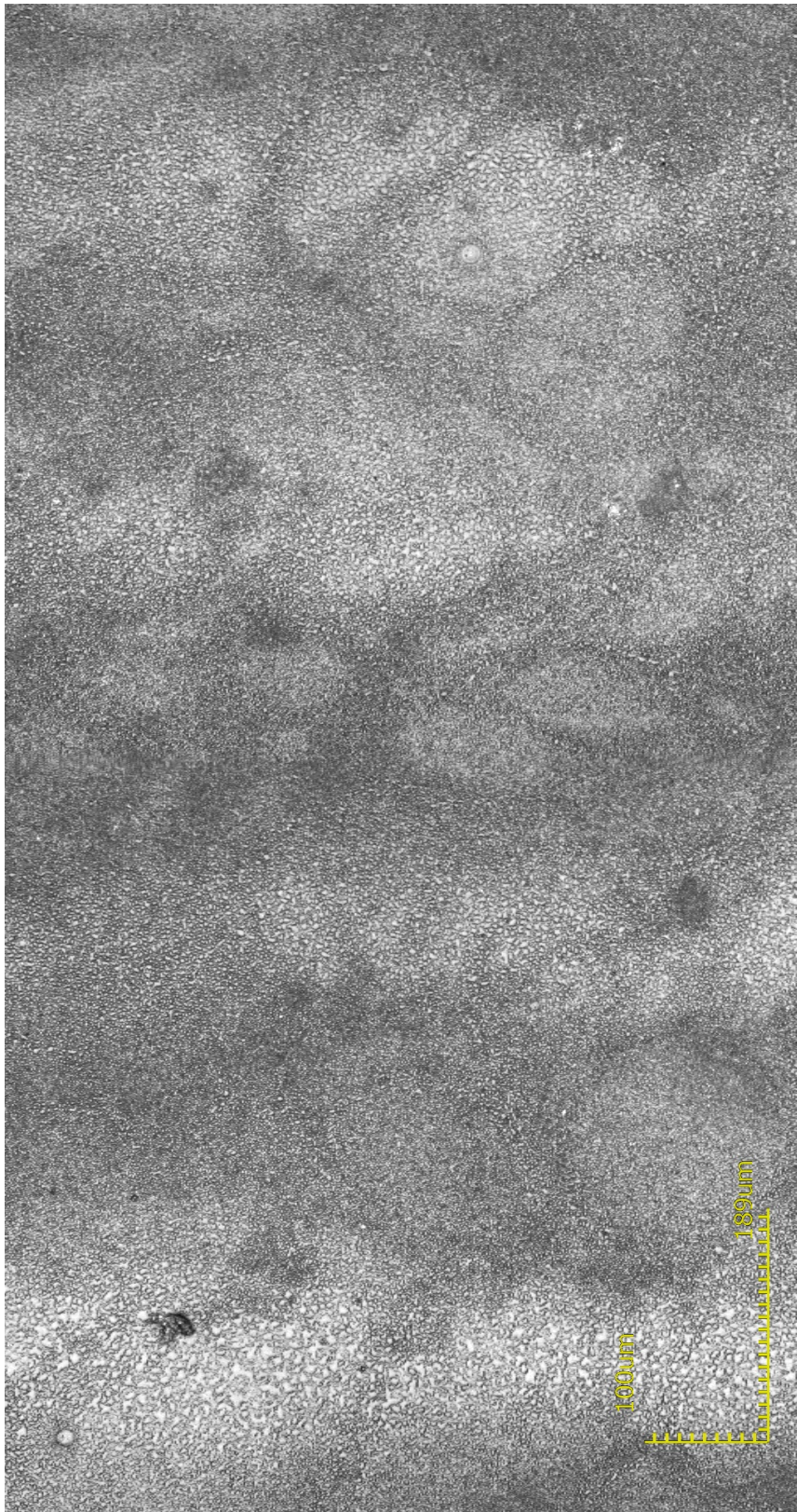


ABBILDUNG A.1: Aufnahme der Oberfläche eines Probekörpers nach 30 Sekunden Acetonbehandlung

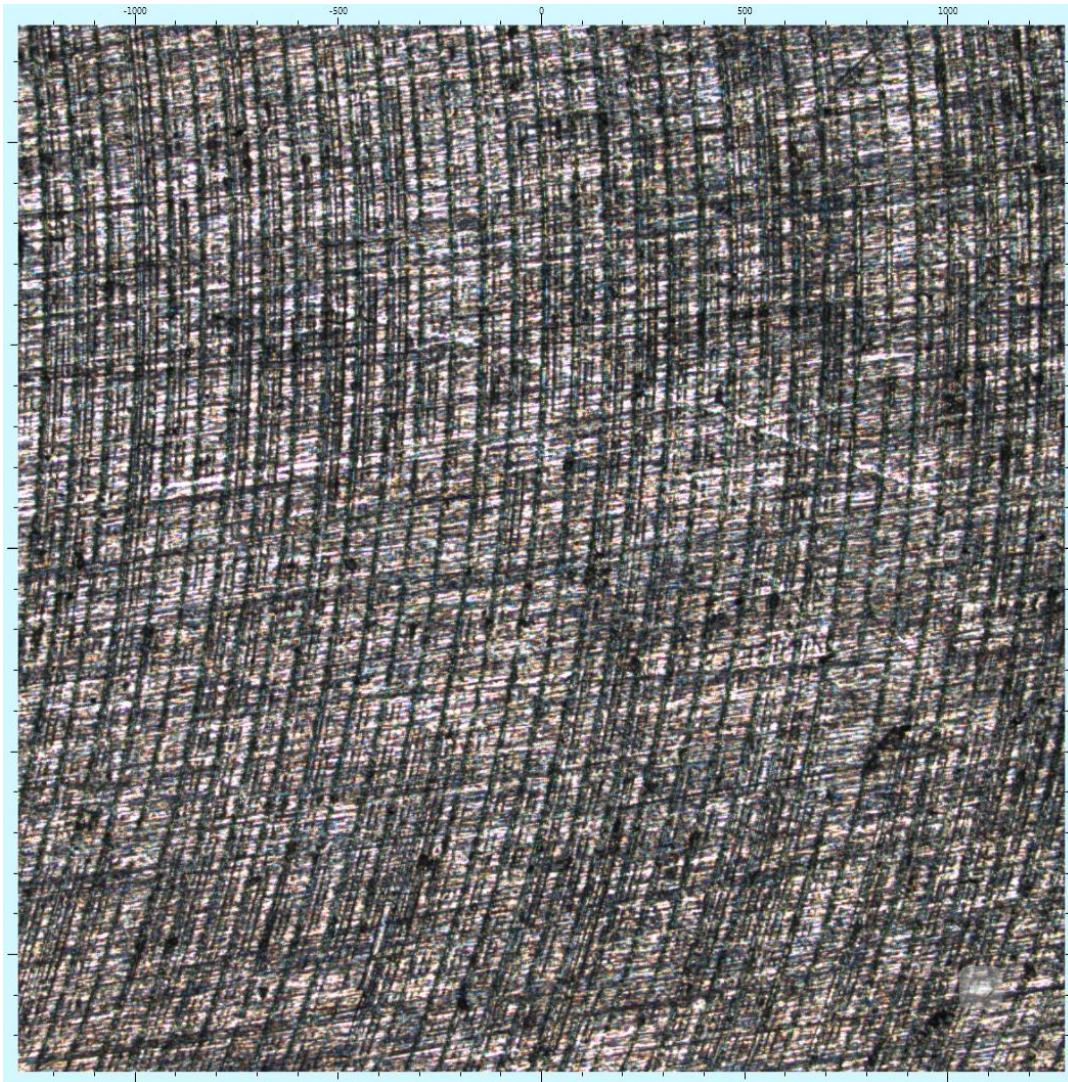


ABBILDUNG A.2: Aufnahme der Oberfläche eines Reibklotzes für die Bestimmung der Haftreibung

Anhang für Kapitel 5

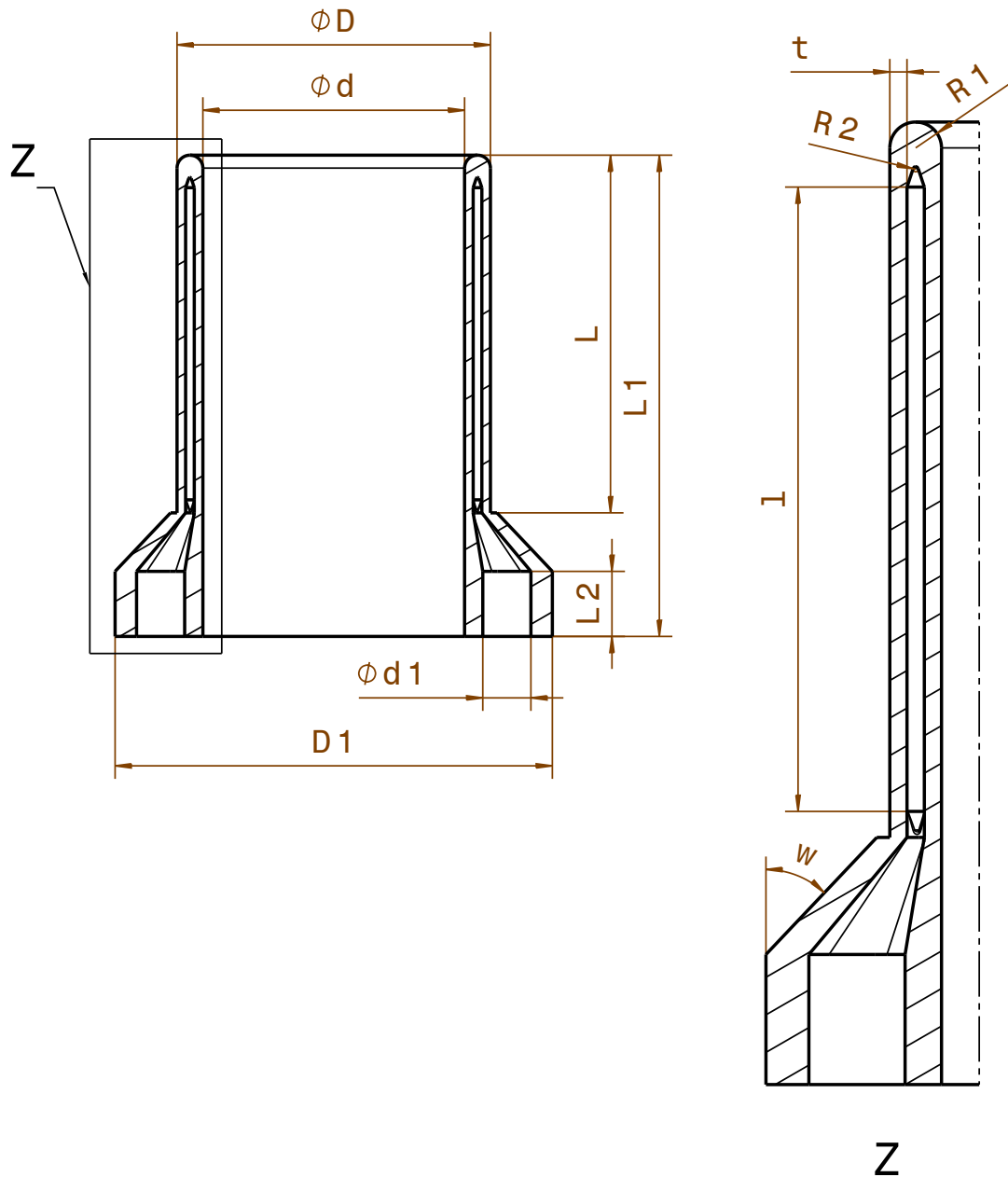


ABBILDUNG A.3: Schnitt durch das Geometriemodell für die FE-Untersuchung. Links Parameter definiert im Adaptermodell. Rechts in der Detaildarstellung Z einige der Parameter definiert im Bauteilmodell

1	_MUSTERTEIL_ 1	01	_ NORM _	01	_ Muster _	_ DIM _	_ 999 _
Position	Benennung	Stk.	Zeichnungsnr., Norm	Index	Werkstoff	Rohmass	Gewicht [kg]
Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-1	Name	Datum		HRO - Hanseatic Racing Organisation Universität Rostock			
f/m/c/v	gezeichnet	Musterstudent	12.02.2011	Zeichnungsname: Musterbauteil			
Projektion	Maßstab	2D-Dateiname	? .CATDrawing	Zeichnungs-Nr.: R000		Index: 01	
	1:1	3D-Dateiname	? .CATPart				

Anhang für Kapitel 6

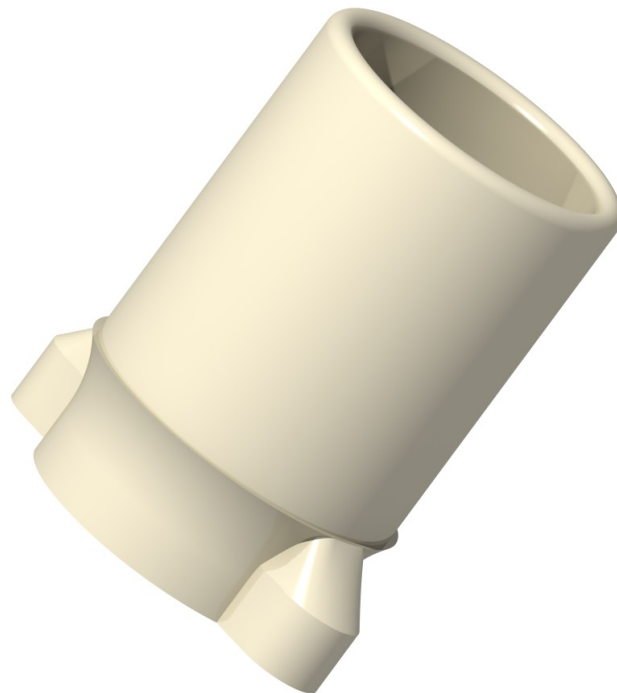
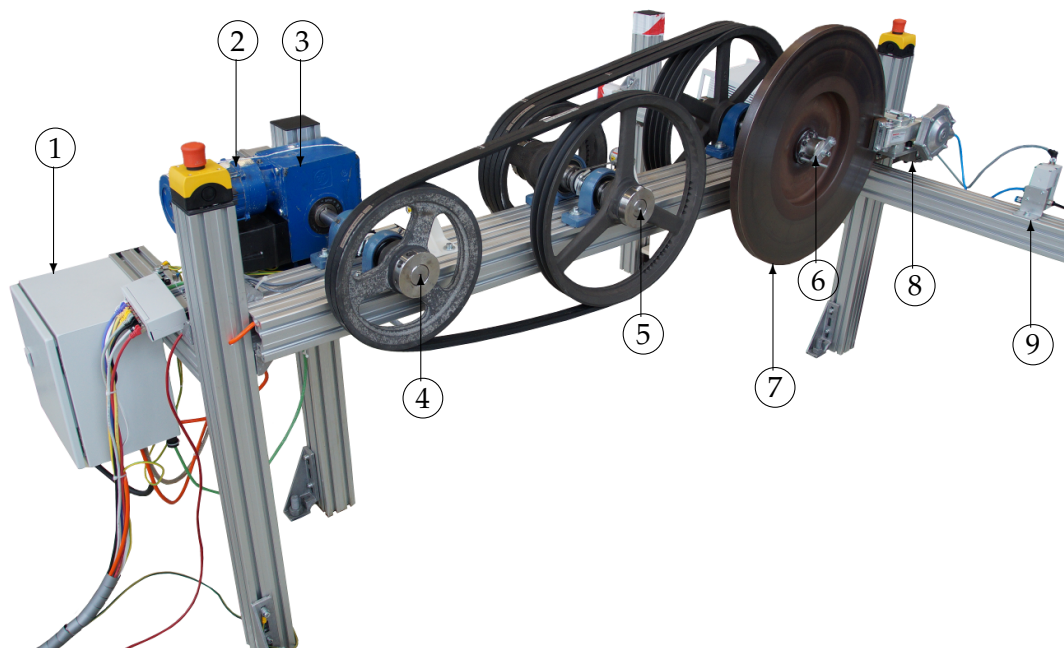


ABBILDUNG A.4: Gerenderte Darstellung der Buchse 3.9.x

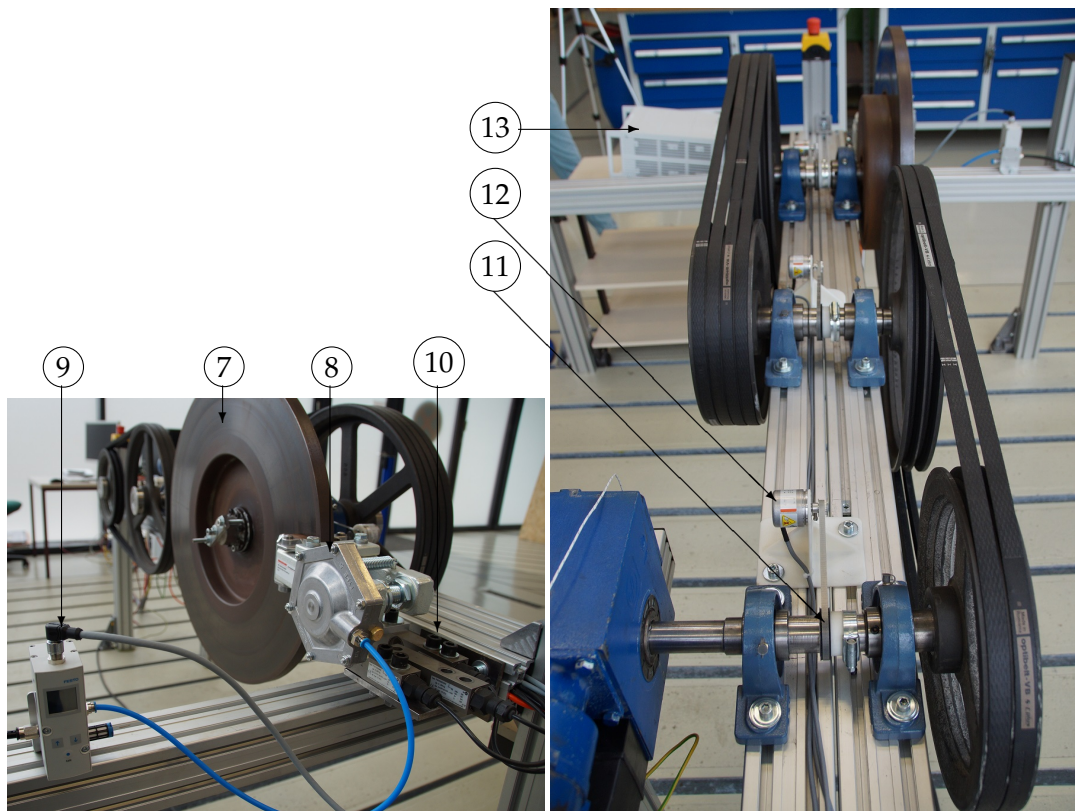


ABBILDUNG A.5: Foto der Buchse 3.9.12 mit Gewindeinserts

Anhang für Kapitel 7**Aufbau des Prüfstands**

- | | |
|---------------------|---|
| ① Frequenzumrichter | ⑥ Welle 3 Adapter zur
Momentenkalibrierung |
| ② Motor | ⑦ Bremsscheibe |
| ③ Winkelgetriebe | ⑧ pneumatisch betätigte Bremse |
| ④ Welle 1 | ⑨ Druckregelventil |
| ⑤ Welle 2 | |

ABBILDUNG A.6: Übersicht über den Prüfstandaufbau vor der Um-
rüstung



- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| ⑦ Bremscheibe | ⑪ Zahnriemen für Inkrementalgeber |
| ⑧ pneumatisch betätigte Bremse | ⑫ Inkrementalgeber |
| ⑨ Druckregelventil | ⑬ Analog/Digitalwandler MGCPlus |
| ⑩ Kraftaufnehmer | |

ABBILDUNG A.7: Detailansichten des Prüfstands vor der Umrüstung

Messergebnisse

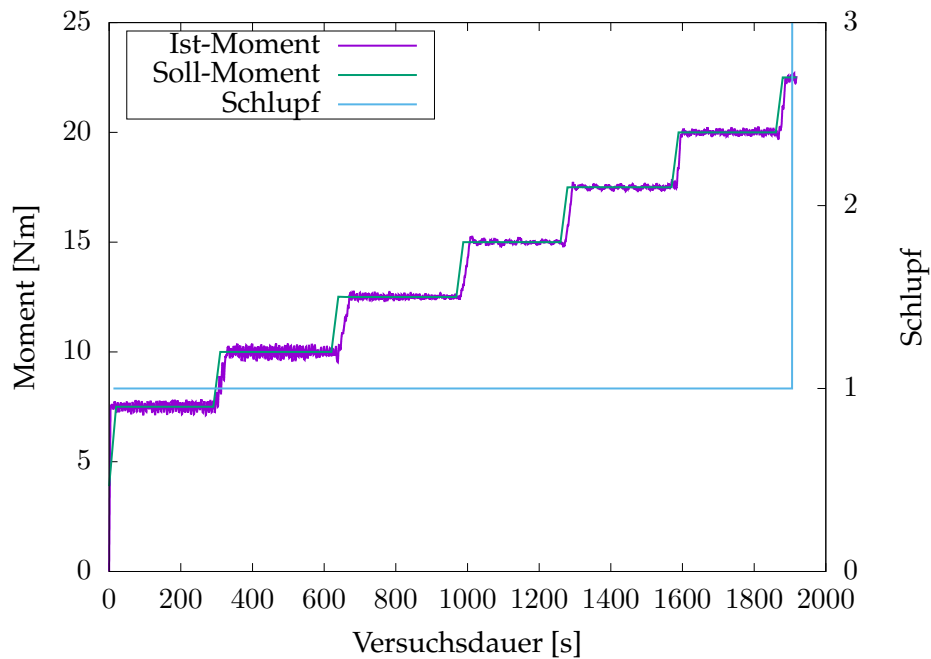


ABBILDUNG A.8: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 0,75 MPa

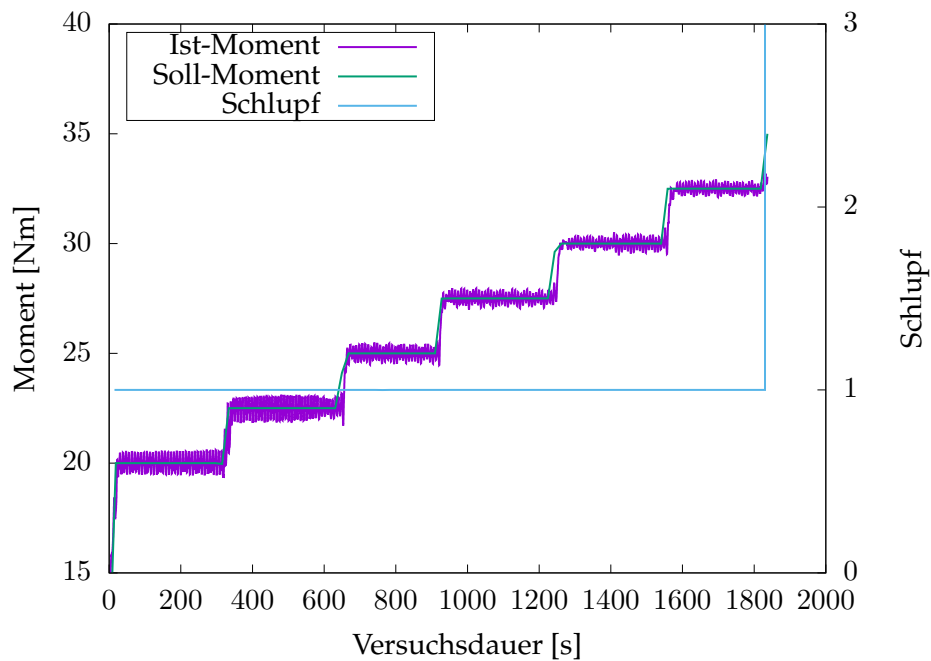


ABBILDUNG A.9: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,0 MPa

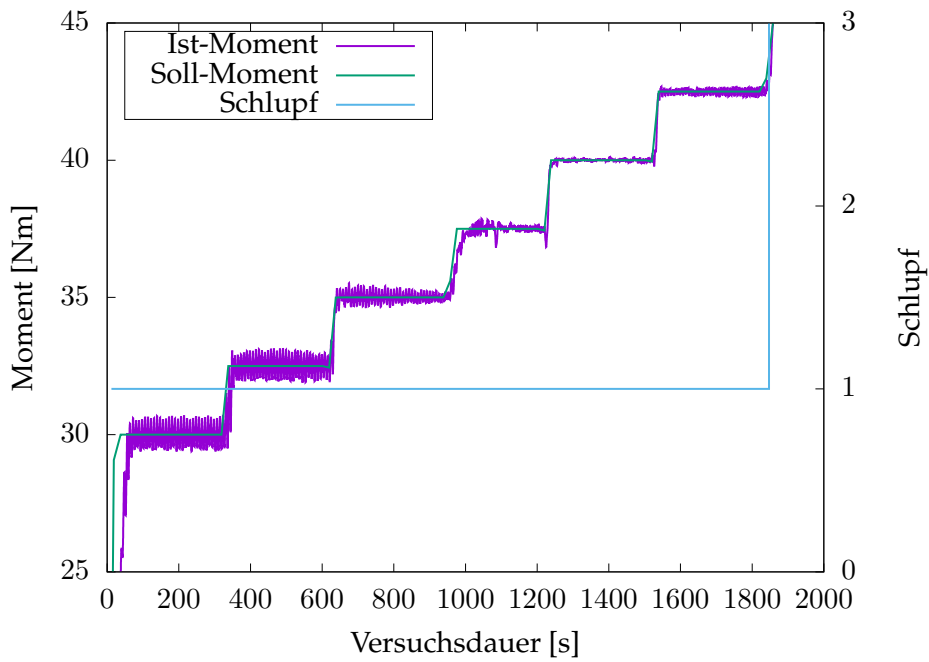


ABBILDUNG A.10: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,25 MPa

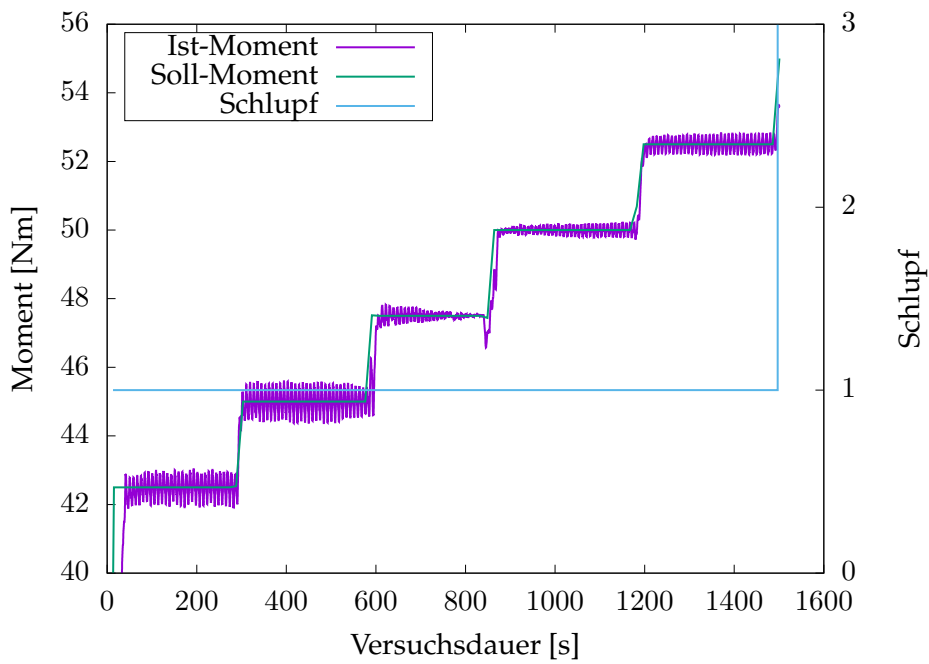


ABBILDUNG A.11: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,5 MPa

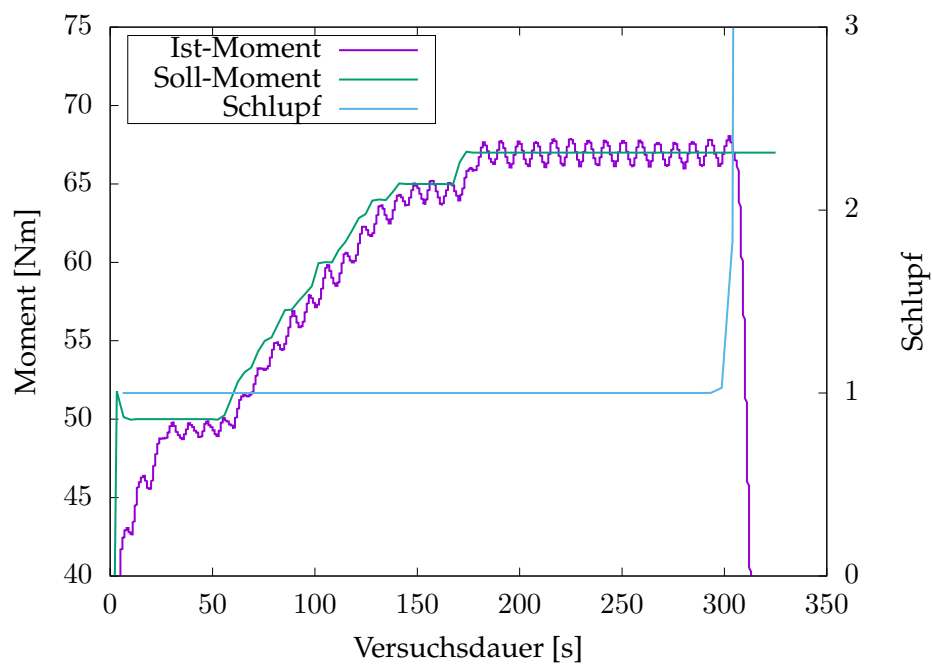


ABBILDUNG A.12: Messzyklus bei einem Buchseninnendruck von 1,6 MPa

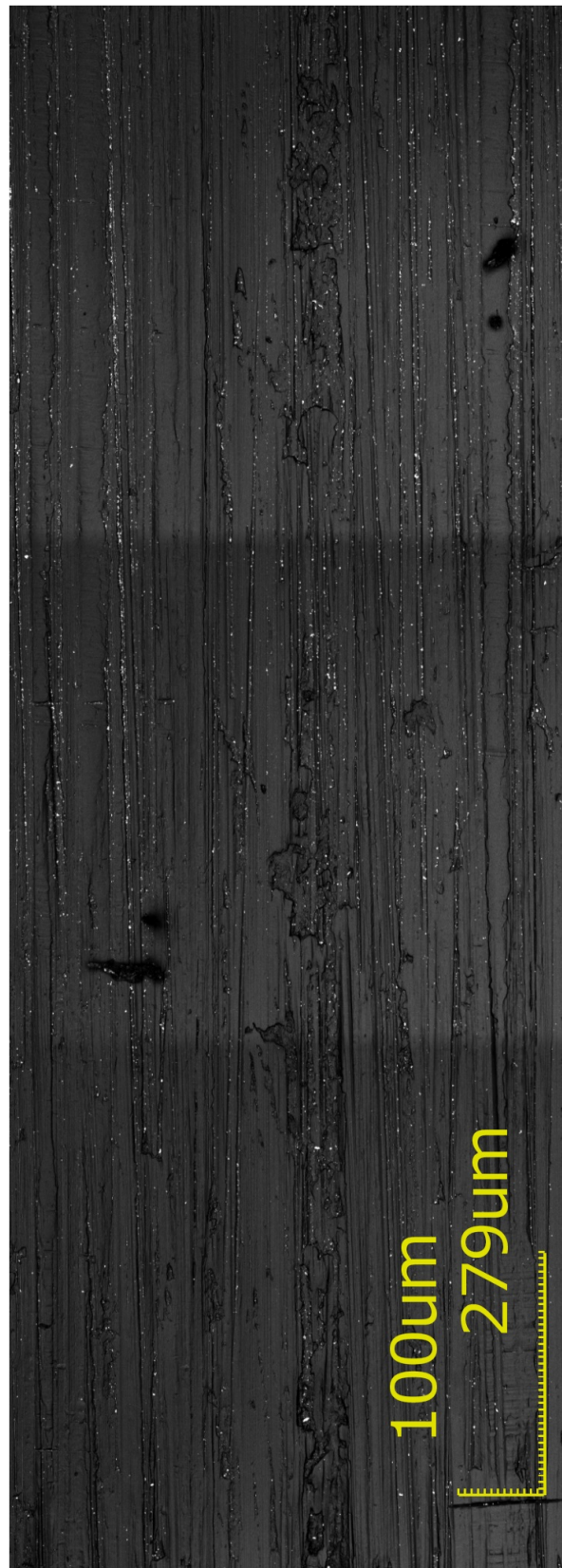


ABBILDUNG A.13: Oberflächenaufnahme der Welle als Negativ in Silikon