

Eignung von additiven Fertigungsverfahren für die Herstellung dynamischer Dichtungen

Suitability of additive manufacturing methods for the production of
dynamic seals

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Thomas Paul Ebel M.Eng.

2024

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Poll
2. Referent: Prof. Dr. U. Giese
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H.-J. Endres
Tag der Promotion: 14.02.2024

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit als wiss. Mitarbeiter an der Hochschule Emden-Leer, an der ich hauptsächlich CAD lehre und seit 2002 für den praktischen Betrieb des Labors für Additive Fertigung zuständig bin.

Möglich war dies zunächst durch eine zweijährige, hochschulintern finanzierte, Forschungsstelle und im Anschluss durch ein dreijähriges, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Forschungsprojekt (Projektnr. 447009134). Für die Unterstützung möchte ich der Hochschule Emden-Leer sowie der DFG herzlich danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll, Leiter des Instituts für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) der Leibniz Universität Hannover, der dieses Vorhaben überhaupt erst möglich gemacht und der mich jederzeit dabei unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr. U. Giese danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Endres für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin möchte ich mich bedanken bei Frau Prof. Dr.-Ing. K. Ottink, Leiterin des Labors für Additive Fertigung der Hochschule Emden/Leer, die mich in meiner Forschungsarbeit sehr unterstützt und inspiriert hat.

Den Studierenden, sowie Kolleginnen und Kollegen, allen voran Tobias Lankenau, die für diese Arbeit wichtige Vorarbeiten geleistet haben, gebühren ebenfalls Worte des Dankes.

Ein weiterer ganz besonderer Dank geht an meine Frau Nerea, die mich bei dem, in diesem Lebensabschnitt nicht gerade normalen, Unterfangen jederzeit unterstützt hat.

Leer, im März 2024

Thomas Ebel

Eignung von additiven Fertigungsverfahren für die Herstellung dynamischer Dichtungen

Stangendichtungen in Hydraulikanwendungen sind Maschinenelemente, die in sehr großer Menge produziert und genutzt werden. Ihre Aufgabe besteht im Wesentlichen darin, das Hydraulikfluid am Austritt zu hindern und somit den Betriebsdruck zu halten. Aufgrund der dynamischen Belastungen, denen diese Art von Dichtungen ausgesetzt ist, bestehen hohe Anforderungen bezüglich der Verschleißfestigkeit. Bei der Vielzahl an Bauformen und -größen sowie Herstellern kann es im Falle eines Schadens schwierig sein, zeitnah ein Ersatzteil zu beschaffen. Die Lieferzeiten können im Bereich von Wochen oder gar Monaten liegen.

In dem Zusammenhang stellte sich die Frage, ob mit Methoden der additiven Fertigung, die in weiten Bereichen der Technik in den letzten Jahren Einzug gehalten haben, in kurzer Zeit und auch dezentral funktionsfähige, dynamische Dichtungen hergestellt werden können. Da zu dem Themengebiet keine Forschungsergebnisse vorlagen, wurde diese Möglichkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Diese zentrale Frage konnte positiv beantwortet werden. Auf dem hier dokumentierten Weg hin zur Beantwortung der Frage galt es zu klären, welche Verfahren geeignet sind und worin Unterschiede zwischen konventionell und additiv gefertigten Bauteilen bestehen. Hierzu wurden auch eine Reihe von Funktionstests mit Testteilen aus verschiedenen Materialien durchgeführt und dokumentiert.

Darüber hinaus wird aufgezeigt, dass die zudem gestellte Frage, ob neben dem ökonomischen Nutzen, der sich aus einer potentiellen Vermeidung von Stillstandszeiten einer Maschine oder Anlage ergibt, auch ein ökologischer Nutzen stehen könnte, verneint werden muss.

Abschließend werden, basierend auf dem positiven Ergebnis der Untersuchungen, Empfehlungen gegeben, wie diese Arbeit sinnvoll ergänzt und fortgeführt werden kann.

Schlagworte: Stangendichtungen, Hydraulikdichtungen, Additive Fertigung, Dezentrale Fertigung

Suitability of additive manufacturing methods for the production of dynamic seals

Rod seals in hydraulic applications are machine parts, that are produced and used in large numbers. Their main purpose is to avoid leakage of hydraulic fluid and to maintain the system pressure. Because of their exposure to dynamic loads rod seals have to show a high wear resistance. Due to the high number of variants, sizes and manufacturers it can be challenging to have spare parts available on time in case of a damage. Delivery times can be up to weeks or even months.

In that context the question came up, whether it might be possible to use additive manufacturing methods, that have found their way into various technical fields in the past years, to produce functioning dynamic seals in a short amount of time.

Because there were no pertinent research results to be found, this work was started to examine the possibility of producing working dynamic seals this way. This pivotal question could be answered in the affirmative. Questions about the most suitable production method and possible differences between conventionally and additively produced parts raised and were answered. For that purpose, a series of functional tests with a variety of test parts made from different materials, were carried out and documented.

Another question was whether there is also an ecological benefit in addition to the clear economic one the avoidance or reduction of machine downtimes has. This question was answered in the negative.

Finally, this thesis is giving recommendation on how to continue and to extend the work, based on the positive result of the investigation.

Keywords: Rod seals, hydraulic seals, additive manufacturing, local production

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Acryl Butadien Styrol
AM	Additive Manufacturing
AU	Polyester-Urethan-Kautschuk
DLP®	Digital Light Processing
EF	Extrusionsfaktor
EHD	Elastohydrodynamik
FDM®	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FKM	Fluorkautschuk
FM	Füllmuster
HNBR	Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
LCA	Life Cycle Assessment
MJF	Multijet Fusion
NBR	Nitrile Butadiene Rubber (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)
OCT	Optical Coherence Tomography
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenphtalat
PETG	Polyethylenphtalat Glykol
PLA	Polylactic Acid (Polymilchsäuren)
PK	Polyketon
PTFE	Polytetrafluorethylen
SEBS	Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol
SLA	Stereolithographie
TPE	Thermoplastische Elastomere
TPU	Thermoplastische Urethane
TTS	Tribotechnisches System
UHMW-PE	Ultra-high-molecular-weight-polyethylene

Symbol	Einheit	Bezeichnung
d_i	mm	Innendurchmesser
F_N	N	Normalkraft
F_{Reib}	N	Reibkraft
F_R	N	Radialkraft, bezogen auf den Gesamtumfang
F_S	N	Radialkraft, bezogen auf ein 120°-Segment
m	g	Masse
μ		Reibungskoeffizient
R	mm	Retract
s	mm	Schichtstärke
T_B	°C	Druckbetttemperatur
T_D	°C	Düsentemperatur
v_D	mm/s	Druckgeschwindigkeit
v_V	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	5
2.1	Zielsetzung	5
2.2	Vorgehensweise	6
3	STAND DER TECHNIK	7
3.1	Grundlagen der Dichtungstechnik	7
3.1.1	Tribologische Grundbegriffe	8
3.1.2	Reibung und Schmierung	10
3.1.3	Verschleiß	12
3.1.4	Stangendichtungen	13
3.1.5	Dichtwirkung bei Stangendichtungen	15
3.2	Werkstofftechnische Grundlagen	17
3.2.1	Werkstoffe für Stangendichtungen	17
3.2.2	Thermoplastische Urethane	18
3.2.3	Polytetrafluorethylen	18
3.2.4	Acrylnitril-Butadien-Elastomer	19
3.2.5	Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Elastomer	20
3.2.6	Fluor-Kautschuk	20
3.2.7	Polyester-Urethan-Kautschuk	20
3.3	Additive Fertigungsverfahren	22
3.3.1	Klassifizierung von AM-Verfahren	24
3.3.2	Selektives Lasersintern	25
3.3.3	3D-Printing / Binderjetting	26
3.3.4	Multi Jet Fusion	27
3.3.5	Fused Deposition Modeling	28
3.3.6	Stereolithographie	30
3.3.7	Polyjetting	31
3.3.8	Digital Light Processing	32
3.3.9	Mehrstufige Verfahren	33
3.4	Tribologische Untersuchungen additiv verarbeiteter Werkstoffe	35
3.5	Life Cycle Assessment - Ökobilanz	36
3.5.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	38
3.5.2	Sachbilanz	39
3.5.3	Wirkungsabschätzung	39
3.5.4	Auswertung	40
3.6	Additive Fertigung und Nachhaltigkeit	41
4	EXPERIMENTELLE METHODIK	43
4.1	Versuchseinrichtungen	43
4.1.1	Modellversuche: Tribometer	43
4.1.2	Charakterisierung: Radialkraftmessgerät	45
4.1.3	Bauteilversuche: Stangendichtungsprüfstand	47
5	ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN	49
5.1	Verfahrensscreening	49

5.2	Modellversuche und Charakterisierung	53
5.2.1	Dynamische Reibwerte (trocken)	54
5.2.2	Radialkraft	56
5.2.3	Auswertung	56
5.3	Erste Phase der Funktionstests	57
5.3.1	Versuchsplan	58
5.3.2	Arbeiten im Vorfeld der Prüfstandsversuche . .	59
5.3.3	Dynamische Reibwerte (geschmiert)	61
5.3.4	Ergebnisse der ersten Prüfstandsversuchsreihe	61
5.3.5	Auswertung	70
5.4	Zweite Phase der Funktionstests	72
5.4.1	Versuchsplan	73
5.4.2	Ergebnisse der zweiten Prüfstandsversuchsreihe	73
5.4.3	Ergebnis eines Dauertests	78
5.4.4	Auswertung	80
5.5	Ergebnisse der Prozessoptimierung	82
5.5.1	Anfangswerte und Vorgehensweise	82
5.5.2	Finale Parameter	86
5.5.3	Vorgehensweise bei Erprobung neuer Filamente	86
6	ERGEBNISSE DES LIFE CYCLE ASSESSMENTS	87
6.1	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	87
6.2	Erstellung der Sachbilanz	88
6.3	Wirkungsabschätzung	90
6.4	Auswertung	95
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	97
8	STUDENTISCHE ARBEITEN	101
A	ANHANG	103
A.1	Vorversuche	103
A.2	Erste Prüfstandsversuchsreihe	104
A.3	Zweite Prüfstandsversuchsreihe	107
A.4	Life Cycle Assessment	108
	LITERATURVERZEICHNIS	113

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Nachdem in den 1980er Jahren die ersten Verfahren zur additiven Fertigung (im Weiteren auch kurz als „AM“ für „Additive Manufacturing“ bezeichnet) von Bauteilen entwickelt wurden, werden sie weiterentwickelt und zum anderen durch neue Verfahren ergänzt bzw. ersetzt. In vielen Bereichen werden solche additiven Fertigungsverfahren zunehmend eingesetzt. Das kann unter anderem weiterhin, wie zu Beginn der Entwicklung, zur Herstellung von Prototypen sein (Rapid Prototyping), aber auch zur Herstellung von Funktionsteilen (Rapid Manufacturing), oder von Werkzeugen (Rapid Tooling). Die Gründe für die Entscheidung, Teile additiv zu fertigen bzw. fertigen zu wollen, können hierbei variieren: ein Vorteil kann die Zeitersparnis durch die direkte Fertigung ohne bauteilspezifische Werkzeuge, basierend auf CAD-Daten sein, ein anderer auch die dezentrale, rohstoffsparende Fertigung. Vielfach ist der Einsatz eines additiven Fertigungsverfahrens auch dadurch begründet, dass es Gestaltungsfreiheiten ermöglicht, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht denkbar sind.

Dichtungen für hydraulische Antriebe, wie die im vorliegenden Fall betrachteten Stangendichtungen, sind sehr häufig verwendete Maschinenelemente, welche zudem in einer Vielzahl von Bauformen und -größen anzutreffen sind. Abbildung 1.1 zeigt eine kleine Auswahl an unterschiedlichen Stangendichtungen für den Stangendurchmesser 50 mm. Alleine im Onlineshop des Anbieters Trelleborg® gibt es für diesen Stangendurchmesser 174 Positionen (Stand 21.09.2023).



Abbildung 1.1: Kleine Auswahl unterschiedlicher Stangendichtungen für den Stangendurchmesser 50 mm

Außerdem ist festzustellen, dass ein Versagen einer solchen Dichtung einen Schaden zur Folge haben kann, der mit Kosten einhergeht, die die Kosten der Dichtung um ein Vielfaches überschreiten.

Betriebsfluide, deren Austritt eine Stangendichtung verhindern soll, sind in der Regel umweltschädlich. So sind mehrheitlich Mineralöle im Einsatz [GW20]. Ein Austritt kann somit größere Umweltschäden zur Folge haben. Auch kann ein Austritt des Betriebsfluids unter hohem Druck schwere Verletzungen von Personen im direkten Umfeld der Hydraulikzylinder verursachen. In speziellen Anwendungsbereichen, in denen Brand- und Explosionsgefahr besteht (Beispiel: Bergbau), oder es zum Kontakt mit Lebensmitteln kommen kann, wird auch Wasser als Betriebsfluid eingesetzt. Der Anteil ist allerdings mit 3 % eher gering [GW20].

Viele konventionell gefertigte Dichtungen sind nicht ab Lager verfügbar, was ebenfalls mit der sehr hohen Zahl an Varianten zusammenhängt. In vielen Fällen werden sie erst nach Eingang einer Bestellung gefertigt, was mit einer Lieferzeit im Bereich von mehreren Monaten einhergehen kann, verbunden mit einer Mindestbestellmenge¹.

Die Versorgung mit Ersatzteilen kann zudem dadurch erschwert sein, dass solche Stangendichtungen auch an sehr entlegenen Orten wie zum Beispiel auf Offshore-Bohrplattformen, in Offshore-Windparks oder in Bergwerken Verwendung finden. Abbildung 1.2 zeigt beispielhaft eine Anwendung hydraulischer Komponenten im Bergbau und Abbildung 1.3 eine im Bereich Offshore-Windenergie.



Abbildung 1.2: Hydraulikanwendung (Schildausbau) im Bergbau (Quelle: EEP Elektro-Elektronik Pranjic GmbH)

¹ Beispiel Trelleborg RU2100750-Z20: Lieferzeit 13-14 Wo., Abnahmemenge 250 St.; <https://www.seals-shop.com/eu/de/stangendichtungen/zurcon-u-cup-ru2>; abgerufen am 25.01.2023



Abbildung 1.3: Hydraulikanwendung beim Ausbau von Offshore-Windparks
(Quelle: Montanhydraulik GmbH)

An dieser Stelle entstand die Idee die additive Fertigung einzusetzen, um flexibel und in kurzer Zeit Stangendichtungen zu produzieren, die ein abgängiges Bauteil kurzfristig und bestenfalls vor einem vollständigen Versagen ersetzen können.

Beim Einsatz von vielen Bauformen und -größen an einem Einsatzort könnte zudem die aufwendige Lagerhaltung unterschiedlicher Dichtungsgrößen und -bauformen entfallen. Auch eine Anwendung additiver Fertigungsmethoden im klassischen Anwendungsgebiet, der Prototypenfertigung wäre im Falle der funktionalen Eignung denkbar.

Außer für die schnelle Herstellung von Prototypen, z.B. für die Erprobung alternativer Werkstoffe, sind additiv in kleiner Stückzahl gefertigte Dichtungen als Ersatzteile auch ökologisch von großer Bedeutung, weil dadurch umweltschädliche Leckagen schnell unterbunden werden können. Außerdem können lange Stillstandszeiten ökologisch bedeutsamer Anlagen, wie z.B. zur Nutzung regenerativer Energiequellen, vermieden werden.

Gegebenenfalls zeigt sich im Rahmen der Untersuchungen bezüglich der Eignung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung funktionsfähiger Stangendichtungen, dass solche Bauteile nicht die gleichen Eigenschaften haben wie konventionell gefertigte Dichtungen, bezogen auf Nutzungsdauer, maximalen Fluiddruck und maximale Stangengeschwindigkeit. Dennoch könnten sie, vergleichbar mit einem Notreifen bei einem Automobil, als schnell zu fertigende Zwischenlösung bis

zur Lieferung einer konventionellen Dichtung eingesetzt werden, um kostenintensive Stillstandszeiten zu verringern.

ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

2.1 ZIELSETZUNG

Die genannten potentiellen Vorteile der additiven Fertigung von dynamischen Dichtungen sind so vielversprechend, dass eine weitergehende Untersuchung des Potentials solcher Fertigungsmethoden im Rahmen eines Forschungsvorhabens sinnvoll und erstrebenswert erscheint. Im Rahmen dieses Vorhabens, dessen Ergebnisse in dieser Arbeit vorgestellt werden, sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Können mittels bestehender und möglicher neuer Verfahren zur additiven Fertigung funktionsfähige dynamische Dichtungen (im Fokus stehen Stangendichtungen) aus unterschiedlichen in Frage kommenden Werkstoffen hergestellt werden?
- Welche additiv verarbeitbaren Werkstoffe sind für tribologische Anwendungen geeignet?
- Welche Vor- und Nachteile haben additiv gefertigte Dichtungen?
- Ist die additive Fertigung von Dichtungen nachhaltiger als die konventionelle?
- Welchen Einfluss haben einzelne Fertigungsprozessparameter auf die Funktionserfüllung?
- Gibt es Unterschiede zwischen konventionell und additiv gefertigten Bauteilen bezüglich ihrer tribologischen Eigenschaften, zum Beispiel basierend auf unterschiedlicher Benetzbarkeit oder Oberflächenstruktur?

Es sind mehrere unterschiedliche Szenarien des Einsatzes additiver Fertigungsmethoden bei der Herstellung von Stangendichtungen vorstellbar:

- Zum einen könnten größere Hersteller von Stangendichtungen, bei weiterhin zentraler Fertigung, Verfahren nutzen, die zwar aufwendig und auch kostspielig sind, welche aber einen Mehrwert gegenüber der konventionellen Fertigung haben, wie zum Beispiel die lokale Zugabe von Additiven.
- Die gleichen Hersteller könnten einfach anwendbare Verfahren wie Fused Filament Fabrication (kurz FFF, beschrieben im Abschnitt 3.3.5) nutzen, um dezentral an Vertriebsstandorten Dichtungen zu produzieren. Hierfür stellen sie die Geräte, die Fertigungsdaten und Halbzeuge zur Verfügung. Ähnliches existiert

bereits für die spanende Fertigung von Dichtungen (SKF® Seal Jet®¹).

- Ein drittes Szenario ist die Eigenfertigung von Dichtungen durch Endnutzer, welches allerdings insbesondere aus Gründen der Anwendungssicherheit für sehr unrealistisch und nicht wünschenswert erachtet wird.

Um die experimentellen Untersuchungen quantitativ handhabbar zu halten und weil es für realistisch erachtet wird, liegt der Fokus auf dem zweiten Szenario.

Zusammengefasst muss letztlich eine schlüssige Antwort auf die Frage „warum additiv fertigen?“ gegeben werden können, wenn funktionsfähige Dichtungen additiv fertigbar sind. Potentielle Vorteile wurden bereits erwähnt, aber es gilt zu klären, ob diese am Ende auch tatsächlich gegeben sind und nicht eventuelle Nachteile überwiegen.

2.2 VORGEHENSWEISE

Bei den Untersuchungen wird der Schwerpunkt auf vorhandene Verfahren der additiven Fertigung gelegt.

Der Aspekt der Nachhaltigkeit soll durch ein *Life Cycle Assessment* (LCA) untersucht werden. Dieses beschränkt sich auf diejenigen Aspekte, welche bedingt durch die additive Fertigung anders zu bewerten sind als bei konventioneller Fertigung. Bei identischen Werkstoffen ist das in erster Linie die Fertigung selbst und auch der Transport von Bauteilen beziehungsweise Material und Fertigungsanlagen.

Bevor es allerdings um den potentiellen Anwendungsfall Stangendichtung geht, sollen grundsätzliche Untersuchungen der tribologischen Eigenschaften additiv verarbeiteter Werkstoffe im Vergleich mit den gleichen Werkstoffen, allerdings auf konventionelle Art verarbeitet (z.B. Spritzguss oder mit spanabhebenden Verfahren), analysiert, beziehungsweise wenn noch nicht geschehen, selbst durchgeführt werden. Diese Untersuchungen finden unter Nutzung eines Tribometers und des vorhandenen Stangendichtungsprüfstands mit Testdichtungen statt. Erst die bei diesen Voruntersuchungen vielversprechend erscheinenden Varianten sollen dann auf ihre Funktionserfüllung hin geprüft werden.

Gefertigte Prototypen sollen auf geeigneten Prüfständen auf ihre Funktionserfüllung hin untersucht werden. Ein Stangendichtungsprüfstand aus einem abgeschlossenen Industrieforschungsvorhaben ist hierzu bereits vorhanden.

¹ www.skf.com/sealjetdd (abgerufen am 22.09.2023)

3.1 GRUNDLAGEN DER DICHTUNGSTECHNIK

Allgemein formuliert ist die Aufgabe einer Dichtung, den Übergang eines Fluids von einem Raum in einen angrenzenden zu verhindern, oder zumindest zu minimieren.

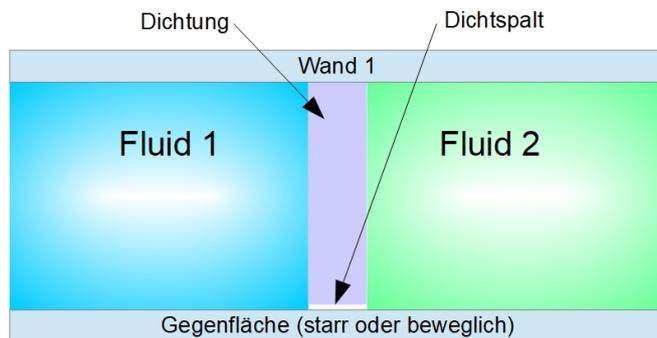


Abbildung 3.1: Grundprinzip Dichtungsproblem nach [Mül90]

In technischen Systemen begegnen einem an vielen Stellen Dichtungen verschiedenster Bauformen. Eine, in Abbildung 3.2 auszugsweise zu sehende, gängige Art der Einteilung geht auf Trutnovsky zurück [Tru68]. Neben der Unterscheidung zwischen berührenden und berührungslosen Dichtungen ist die weitergehende Differenzierung berührender Dichtungen in *starr* und *dynamisch* als sehr grundlegend anzusehen, da sich die Erzielung einer Dichtwirkung in beiden Fällen unterscheidet, wie in Abschnitt 3.1.5 weiter erläutert wird.

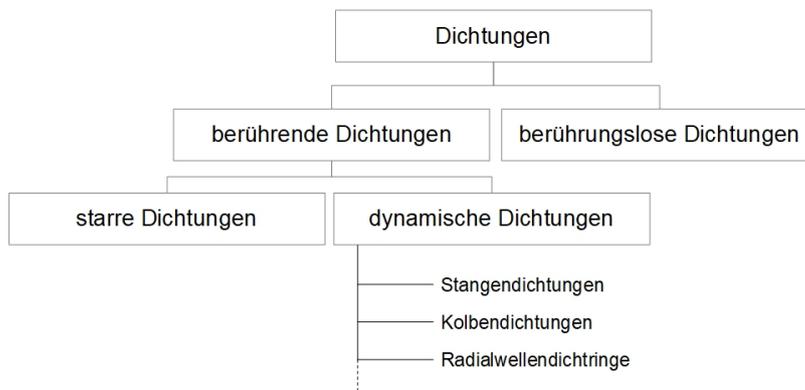


Abbildung 3.2: Differenzierung von Dichtungen nach [Tru68]

Da es im Rahmen dieser Arbeit um Stangendichtungen geht, mithin um dynamische Dichtungen, wird auf die übrigen Arten nicht weiter eingegangen. Wie Müller [Mül90] feststellte, haben dynamische Dichtungen im Gegensatz zu vielen anderen Konstruktionselementen und -prinzipien kein Vorbild in der Natur. Die Notwendigkeit ein Volumen dynamisch, d.h. mit sich relativ zueinander bewegenden Flächen, gegen ein anderes abzudichten, besteht nicht. Es mussten also grundlegend neue Lösungen gefunden werden.

3.1.1 Tribologische Grundbegriffe

Zu Beginn werden Grundbegriffe der Tribologie beschrieben, die zum Verständnis der darauffolgenden Abschnitte bekannt sein müssen. Hierbei lässt es sich nicht umgehen, bisweilen Begriffe zunächst einzuführen und sie später erst in eigens dafür angelegten Abschnitten zu erklären, da sie einander gegenseitig bedingen.

Hier sei zunächst der Begriff *Tribologie* selbst erwähnt. Er wurde erstmals 1966 von Peter Jost [Jos66] benutzt und wie folgt definiert:

”Tribologie ist die Wissenschaft und die Technologie der aufeinander einwirkenden, in Relativbewegung befindlichen Oberflächen und der damit zusammenhängenden praktischen Vorgänge.”

Eine alternative Definition von Horst Czichos lautet:

”Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.” [CH20, S. 35]

Bezogen auf die Dichtungstechnik bedeutet dies, dass berührende, dynamische Dichtungen in das Themengebiet der Tribologie fallen.

Tribotechnische Systeme

Ein geeignetes und übliches Mittel zur Beschreibung eines technischen Systems besteht in der Abgrenzung zur Umwelt und der Beschreibung von Eingangs-, Ausgangs-, Stör- und Verlustgrößen. Im Falle tribologischer Vorgänge spricht man von einem tribotechnischen System (TTS). In Abbildung 3.3 ist ein TTS in allgemeiner Form nach Deters (in [SSA12]) zu sehen, während Abbildung 3.4 eine detailliertere, auf den Anwendungsfall Stangendichtung angewandte, Darstellung zeigt.

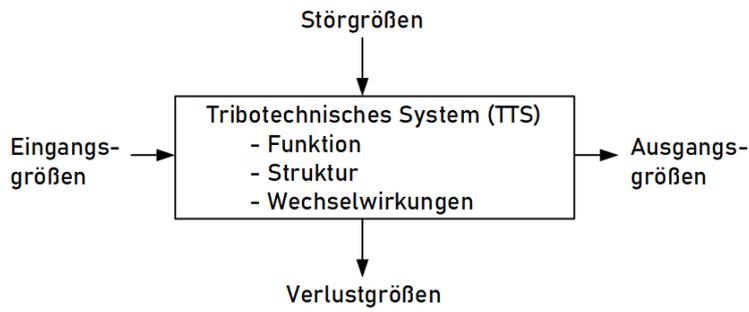


Abbildung 3.3: Allgemeine Darstellung eines TTS nach [SSA12]

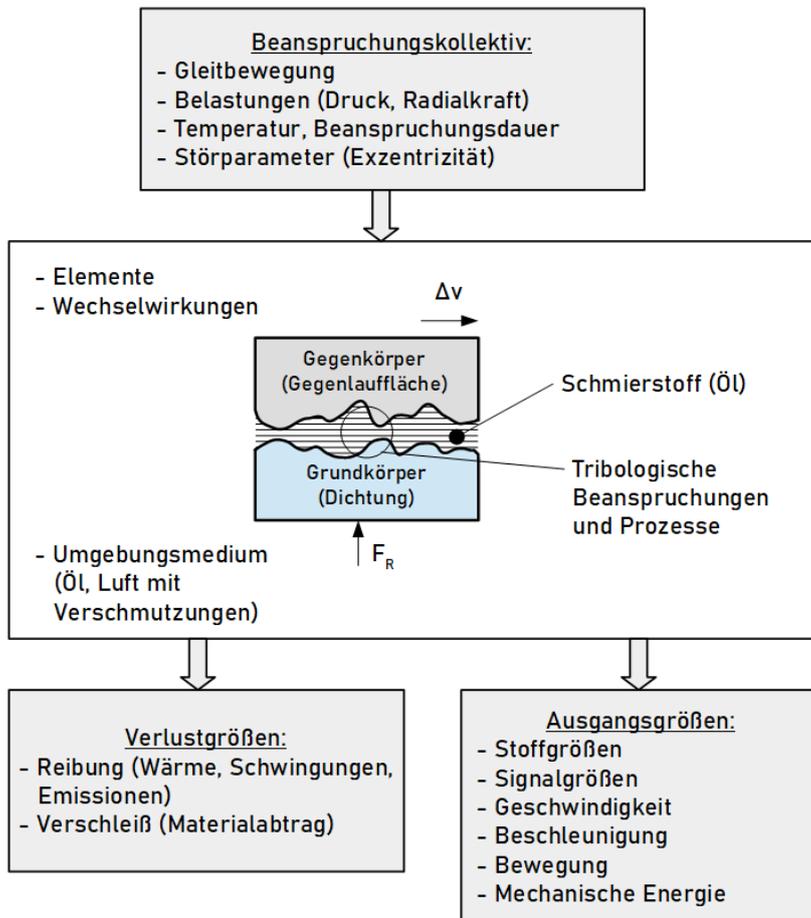


Abbildung 3.4: TTS Stangendichtung nach [CH20] und [Ott14]

3.1.2 Reibung und Schmierung

Nach Czichos [CH20] handelt es sich bei der Reibung um eine System- und nicht um eine Werkstoffeigenschaft. Folglich ist das gesamte TTS zu betrachten, um Aussagen über die Reibung treffen zu können.

Czichos definiert den Begriff Reibung wie folgt:

„Reibung ist ein Bewegungswiderstand. Er äußert sich als Widerstandskraft sich berührender Körper gegen die Einleitung einer Relativbewegung (Ruhreibung, statische Reibung) oder deren Aufrechterhaltung (Bewegungsreibung, dynamische Reibung). Neben dieser „äußeren Reibung“ gibt es die „innere Reibung“ von Stoffen (Viskosität), sie gehört zur Rheologie.“ [CH20, S. 121]

In manchen tribotechnischen Systemen, wie Bremsen und Kupplungen, ist ein solcher Bewegungswiderstand für die Funktion unerlässlich, aber in den meisten TTS, wie auch bei den hier betrachteten Stangendichtungen, ist dieser möglichst weit zu minimieren. Reibungswiderstand bedeutet Energiedissipation und mechanischen Verschleiß (der Begriff wird im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert). Auch nach den Aspekten Energiebedarfsminimierung und Nachhaltigkeit ist dieser Widerstand folglich nachteilig.

Es gibt folgende vier Arten von Reibungsmechanismen (siehe Abbildung 3.5):

- Adhäsion und Scherung
- Plastische Deformation
- Furchung
- Elastische Hysterese und Dämpfung

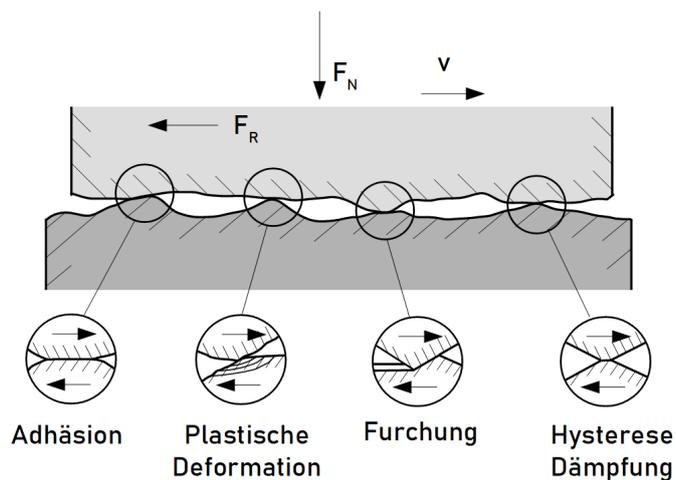


Abbildung 3.5: Mechanismen der Festkörperreibung (nach [CH20])

Diese Mechanismen hängen also alle mit der direkten Berührung von Grund- und Gegenkörper zusammen. Abhängig vom Grad der Berührung kann noch in mehrere Reibungszustände unterschieden werden, zu deren Verdeutlichung die nach Richard Stribeck benannte Kurve, die er erstmals im Jahre 1903 in einer Veröffentlichung [Stro3] verwendete, geeignet ist (siehe Abbildung 3.6).

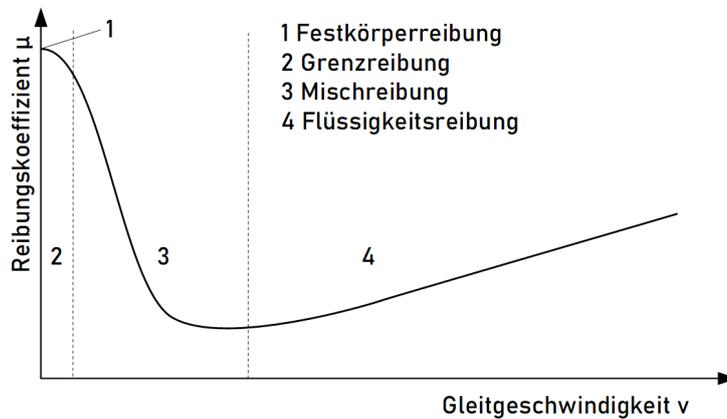


Abbildung 3.6: Stribeckkurve (nach [Stro3])

Der Reibungskoeffizient μ (alternativ Reibungszahl f genannt) ist hierbei das Verhältnis von Reibkraft zur Normalkraft:

$$\mu = \frac{F_{Reib}}{F_N} \quad (3.1)$$

Bei der *Festkörperreibung* liegt ein direkter Kontakt der Körper ohne trennenden Schmierstoff vor, mit der Folge, dass es hohen Verschleiß gibt.

Bei der *Grenzreibung* liegt ein sehr dünner, nicht die Rauheit überdeckender, Schmierfilm vor. Die Reibung ist folglich immer noch hoch.

Mischreibung liegt vor, wenn es noch in Teilen zu Berührungen von Rauheitsspitzen der Körper kommt.

Von *Flüssigkeitsreibung* wird gesprochen, wenn Grund- und Gegenkörper gänzlich durch einen Schmierfilm voneinander getrennt sind, sodass keine direkte Berührung mehr stattfindet. Bezogen auf die Minimierung von Verschleiß ist dies der anzustrebende Zustand.

Diese Reibungszustände korrelieren mit Schmierzuständen:

- Festkörperreibung - Trockenlauf
- Grenzreibung - Grenzschmierung
- Mischreibung - Teilschmierung
- Flüssigkeitsreibung - Vollschrnung

In Abschnitt 3.1.5 wird auf die Entstehung eines Schmierfilms bei Stangendichtungen näher eingegangen.

3.1.3 Verschleiß

Unter Verschleiß versteht man den zunehmenden Abtrag von Material bei einem Körper infolge von einwirkenden, tribologischen Belastungen [Ges02].

Abbildung 3.7 zeigt, bezogen auf das Beispiel Stangendichtung, die verschiedenen Verschleißmechanismen und Abbildung 3.8 die Verschleißarten und -mechanismen.

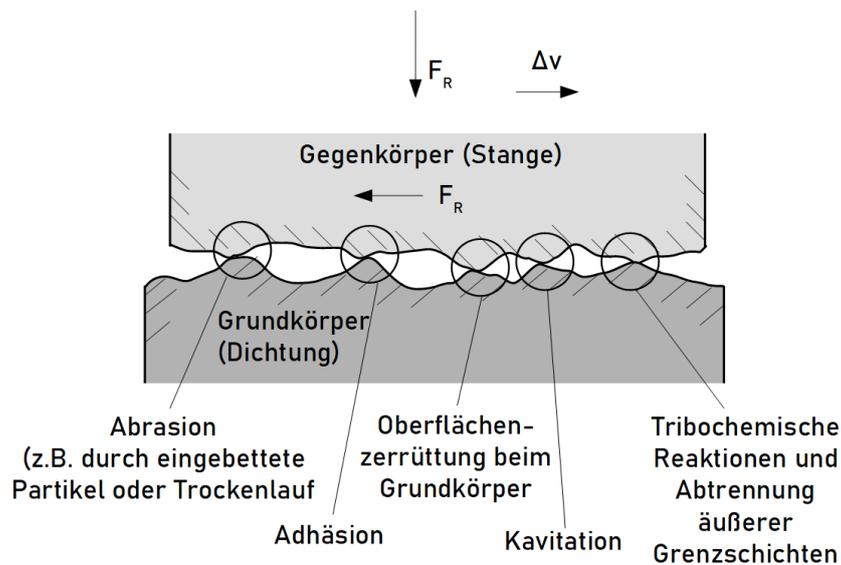


Abbildung 3.7: Verschleißmechanismen am Beispiel Stangendichtung (nach [SSA12] und [Ott14])

Verschleiß lässt sich nicht vermeiden, kann aber andersherum durch ungünstige Betriebsbedingungen sowie Fehler bei der Auswahl und Auslegung über das unvermeidbare Maß hinaus verstärkt werden. Eine Übersicht über spezifische Verschleißmechanismen und mögliche Schadensbilder bei Stangendichtungen bietet in dem Zusammenhang Rossmann in [Ros10].

Beispiele für konkrete Verschleißformen und -ursachen bei Stangendichtungen sind unter anderem folgende:

- Abrasiver Verschleiß durch Partikel oder Fremdkörper, die in den Dichtkontakt dringen
- Abrasiver Verschleiß durch unzureichend tragfähigen Schmierfilm (Festkörper- oder Grenzreibung)
- Tribochemische Reaktionen aufgrund von ungünstiger Dichtungswerkstoff- und Fluidkombination
- Kavitation und/oder Dieseleffekt durch Gaseinschlüsse im Fluid
- Zu hohe Anpressung der Dichtfläche mit der Folge des Eintritts des Gough-Joule-Effekts

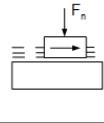
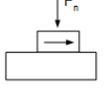
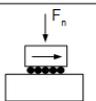
Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung (Bewegungsart & Symbol)	Verschleißart	Wirkende Verschleißmechanismen (einzeln oder kombiniert)			
			Oberflächen-zerrüttung	Abrasion	Adhäsion	Tribochem. Reaktionen
Festkörper 1 - Zwischenstoff (vollst. Festkörper-trennung) - Festkörper 2	Gleiten Rollen Wälzen Prallen Stoßen 	_____	X			X
Festkörper 1 - Festkörper 2 (Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung)	Gleiten 	Gleitverschleiß	X	X	X	X
Festkörper 1 - Festkörper 2 und Partikel	Furchen 	Furchungsverschleiß		X		X
	Gleiten 	Korngleitverschleiß	X	X	X	
Festkörper 1 - Flüssigkeit	Strömen Schwingen 	Werkstoffkavitation (Kavitationserosion)	X			X
Festkörper 1 - Flüssigkeit mit Partikeln	Strömen 	Spülverschleiß (Erosionsverschleiß)	X	X		X

Abbildung 3.8: Verschleißarten und -mechanismen nach [Ges02] am Beispiel Stangendichtung

Zur vertiefenden Betrachtung der Bereiche Reibung, Schmierung und Verschleiß eignen sich [CH20], [SSA12] und [KDK83].

3.1.4 Stangendichtungen

Stangendichtungen finden sich in Pneumatik- und Hydraulikzylindern. Hier beschränkt sich die Betrachtung auf Hydraulikanwendungen.

Stangendichtungen dienen dazu, einen Austritt des unter hohem Druck stehenden Hydraulikfluids aus dem Zylinder zu verhindern. Das Dichtsystem eines solchen Zylinders kann, wie in Abbildung 3.9 zu sehen, aufgebaut sein.

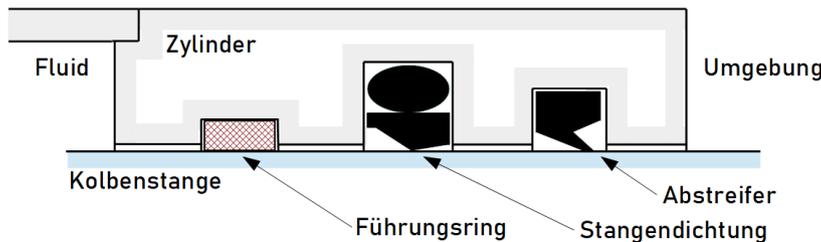


Abbildung 3.9: Dichtsystem in einem Hydraulikzylinder

Neben der Stangendichtung gibt es also weitere Elemente, die zur Führung der Kolbenstange oder zur Vermeidung des Eindringens von Partikeln von außen in den Dichtspalt dienen. Es können auch mehrere Dichtungen hintereinander angeordnet sein, zum Beispiel ein Gleit-Dichtsatz als Primärdichtung und ein Nutring als Sekundärdichtung. Nicht dargestellt sind die im Inneren des Zylinders befindlichen und hier nicht näher betrachteten Elemente Kolbendichtung und -führung.

Es gibt unterschiedliche Bauformen von Stangendichtungen, deren Bezeichnungen allerdings nicht immer konsistent in der Literatur und bei Herstellern verwendet werden. So werden zum Beispiel Gleitring-Dichtungssätze auch als Dichtkantenringe bezeichnet [Haa09]. Abbildung 3.10 zeigt einige gebräuchliche Bauarten.

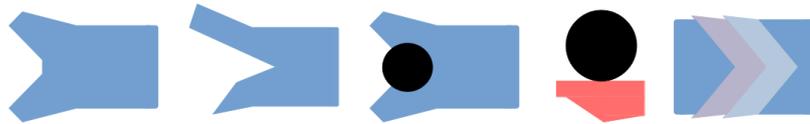


Abbildung 3.10: Gebräuchliche StangendichtungsbaufORMen (von links nach rechts): Nutring, Lippenring, Kompaktdichtung auf Nutringbasis, Gleitring-Dichtungssatz und Dachmanschetten-Dichtungssatz.

Abbildung 3.11 zeigt eine Stangendichtung und die von ihr zu erfüllenden Dichtfunktionen und -bereiche und verdeutlicht zudem, dass auch dynamische Dichtungen an mehreren Positionen eine statische Nebenabdichtungsfunktion erfüllen müssen.

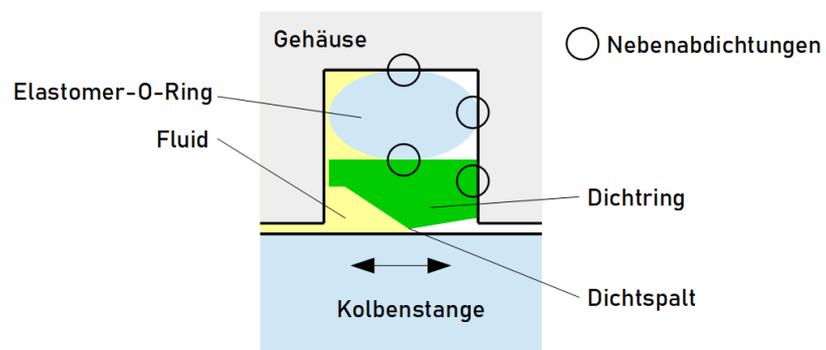


Abbildung 3.11: Dichtbereiche bei einem Gleitring-Stangendichtsatz

3.1.5 Dichtwirkung bei Stangendichtungen

Es handelt sich bei Stangendichtungen zwar um Bewegungsdichtungen, aber wie in Abbildung 3.11 gezeigt, gibt es zudem auch statische (Neben-)Dichtfunktionen. Diese erfordern eine Vorpressung der Dichtung. Wie Müller in [Mül90] aus den Grundgleichungen eines dreiachsigigen Spannungsverlaufs hergeleitet hat, kann man annehmen, dass die Gesamtpressung einer statischen Dichtstelle mit einem Elastomer-Dichtring näherungsweise der Summe aus Vorpressung und Fluiddruck entspricht. Das bedeutet, dass sich die Gesamtpressung automatisch einem steigenden oder fallenden Fluiddruck anpasst.

Damit eine Leckage durch Verschließen von Leckkapillaren verhindert werden kann, müssen zusätzlich zum Anpressdruck noch ausreichend kleine Rauheits- und Formabweichungen und, daraus resultierend, eine ausreichend große Kontaktfläche vorliegen (Poll in [SSA12]). Vor dem Hintergrund erscheint es denkbar, dass die spezielle Oberflächenstruktur additiv gefertigter Bauteile sogar vorteilhaft sein kann.

Liegt eine Relativbewegung zwischen Kolbenstange und Dichtung vor und ein sich verengender Dichtspalt, dann entsteht ein Schmierfilm und Fluid wird aus dem Zylinder heraus- und wieder zurück gefördert. Diese Entstehung eines Schmierfilms, die nachfolgend noch näher erklärt wird, ist zunächst identisch mit der in einem hydrodynamischen Gleitlager. Allerdings unterscheidet sich der Vorgang in einem Punkt: bei hydrodynamischen Gleitlagern hat man es mit den als starr betrachtbaren Elementen Welle und Lagerschale zu tun. Der entstehende Schmierfilm bildet sich also zwischen zwei sich voneinander entfernenden Körpern. Bei der Stangendichtung ist das nicht der Fall. Sie umfasst die Stange und kann sich folglich nicht entfernen. Anders als bei dem hydrodynamischen Schmierfilmaufbau findet hier eine elastische Verformung vom weicheren Körper, also der Dichtung, statt, wodurch sich die Dichtkante von der Welle entfernt und ein Schmierpalt entsteht. Deshalb spricht man in diesem Fall von einem Schmierfilmaufbau nach der Theorie der Elastohydrodynamik (EHD), oder genauer von »weicher« EHD. Generell spricht man von EHD, wenn die elastische Verformung größer oder gleich der Schmierfilmdicke ist [SL95].

Es wird auch angenommen, dass diese elastische Verformung auch im Bereich der Rauheitsspitzen stattfindet, was eine Mischreibung verhindern würde. Dieser Vorgang wird als mikroelastohydrodynamische Schmierung bezeichnet (Poll in [SSA12] sowie Wennehorst und Poll [WP17]).

Es gibt auch eine sogenannte »harte« EHD, bei der beide Partner des TTS vergleichbar hart sind, wie z.B. Lagerschalen und Wälzkörper in Wälzlagern oder Stirnräder in einem Getriebe. Wenn es in solchen Fällen Hertz'sche Pressung, also Punkt- oder Linienkontakt, zwischen den Tribopartnern gibt, dann entstehen sehr hohe Drücke, die eine elastische Verformung der Tribopartner und einen starken Anstieg der Viskosität zur Folge haben. Bei der harten EHD erreicht der Druck bis

zu 4 GPa, während er bei der weichen EHD lediglich im Bereich 1 MPa liegt [SSA12].

Hydrodynamischer Schmierfilmaufbau:

Bei dem erwähnten Szenario - Relativbewegung zwischen zwei Tribopartnern, einem sich verengenden Spalt zwischen ihnen sowie dem Vorhandensein eines viskosen, den Spalt ausfüllenden Schmierstoffs - entstehen sich überlagernde, laminare Druck- und Schleppströmungen, wie in Abbildung 3.12 zu sehen. Der Schmierpalt trennt somit die Tribopartner, sodass der Begriff „berührende Dichtung“ eigentlich teilweise unzutreffend ist.

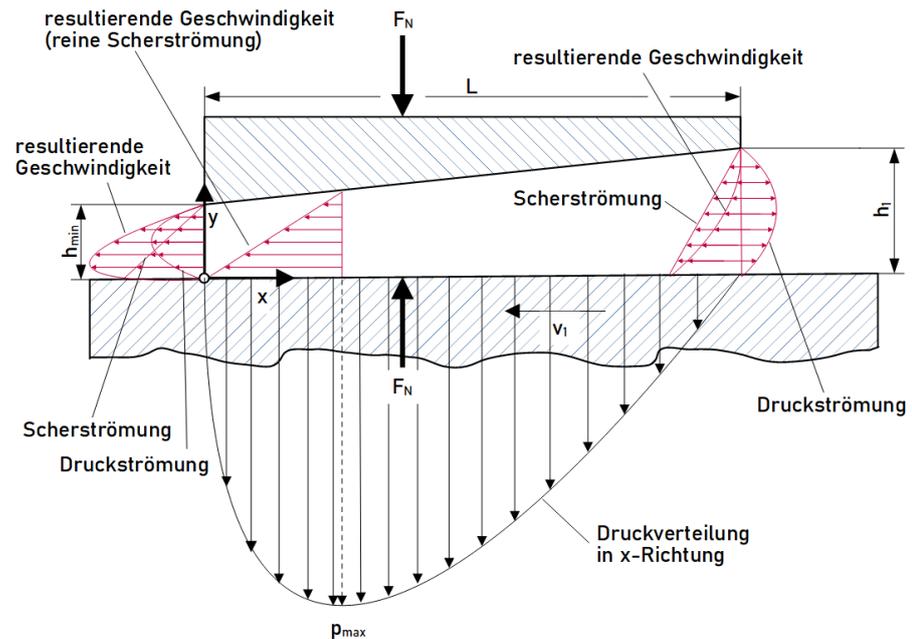


Abbildung 3.12: Geschwindigkeits- und Druckverteilungen am Beispiel eines Gleitschuhs (nach [SSA12])

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Stange und dem direkt anhaftenden Fluid (Adhäsion) ist Null (Stoke'sche Haftbedingung). Das bedeutet, dass Schmierstoff in den Schmierpalt geschleppt wird. Da an der Dichtung haftender Schmierstoff die Geschwindigkeit Null hat, muss die Strömung der durch Kohäsion mitgeschleppten Schmierstoffmoleküle über die Höhe des Schmierfilms abnehmen. Bei reiner Scherströmung ist diese Änderung linear, unter Annahme, dass der Schmierstoff ein Newton'sches Fluid ist.

Die Schmierfilmdicke ist hierbei abhängig von der Viskosität η , der Geschwindigkeit v und der Pressungsverteilung in Bewegungsrichtung.

3.2 WERKSTOFFTECHNISCHE GRUNDLAGEN

3.2.1 *Werkstoffe für Stangendichtungen*

Die gebräuchlichsten Grundwerkstoffe von Stangendichtungen hängen wesentlich von der Bauart und der Anwendung ab. Nutringe bestehen in der Regel aus TPU (thermoplastisches Polyurethan). Es gibt aber auch Nutringe aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR). Diese sind allerdings nur für geringere Drücke geeignet. Dichtungen aus TPU werden abhängig von Hersteller und Bauform mit einem maximalen Druck von 30-40 MPa angegeben, während es bei NBR nur 10 MPa sind.

Bei Gleitring-Dichtungssätzen besteht der O-Ring aus einem Kautschuk-basierten Material wie NBR, HNBR (hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk) oder FKM (Fluor-Kautschuk), während der Gleitring zumeist aus PTFE gefertigt ist. Es gibt in sehr seltenen Fällen abweichende Werkstoffe, wie zum Beispiel UHMW-PE (Ultrahigh molecular weight Polyethylene) für die Gleitringe.

Gleitring-Dichtsätze mit Gleitringen aus PTFE unterscheiden sich von den TPU-basierten Nut- und Kompaktringen insbesondere durch höhere mögliche Drücke (bis 80 MPa) und höhere Geschwindigkeiten: bis zu 15 m/s im Gegensatz zu 0,5 m/s bei TPU.

Bei den Werkstoffen für die eigentliche Dichtung handelt es sich in vielen Fällen um Kunststoff-Compoundierungen, da ihnen verschiedenartige Additive zugesetzt sind. [Kai16].

Nachfolgend sind einige Beispiele für Additive gelistet, sowie der Eigenschaft, die durch den Zusatz verbessert werden soll:

Bronze	▷ Verschleißfestigkeit, thermische Leitfähigkeit und Spaltextrusion
Carbon	▷ Verschleißfestigkeit, Kriechbeständigkeit und thermische Leitfähigkeit
Graphit	▷ Verschleißfestigkeit und thermische Leitfähigkeit
Glasfaser	▷ Verschleißfestigkeit und Kriechbeständigkeit
Molybdändisulfit	▷ Gleiteigenschaften

Bei Molybdändisulfit und Graphit beruht der positive Einfluss auf der Einlagerung in die Oberfläche des Tribopartners, d.h. im Fall einer Stangendichtung der Kolbenstange, welche dadurch „geglättet“ wird.

3.2.2 *Thermoplastische Urethane*

Nut- und Lippenringe sowie Kompaktringe werden in der Regel aus Thermoplastischen Polyurethanen (TPU) gefertigt. Thermoplastische Polyurethane, die eine Untergruppe der Thermoplastischen Elastomere (TPE) darstellen, lassen sich, wie der Name schon vermuten lässt, mit allen Verfahren verarbeiten, die für Thermoplaste zum Einsatz kommen, wie Spritzguss und Extrusion. Daher sind sie grundsätzlich auch für die additive Fertigung einsetzbar, da einige Verfahren, die im Abschnitt 3.3 beschrieben sind, mit Thermoplasten arbeiten.

Thermoplastische Elastomere, somit auch Thermoplastische Urethane, verbinden die thermoplastische Verarbeitbarkeit mit der Gummielastizität von vernetzten Elastomeren [Bau+22]. Anders als letztere sind TPU auch recycelbar. Der Umstand, dass sie durch Wärme erneut aufgeschmolzen werden können, resultiert allerdings auch in einer geringeren thermischen Belastbarkeit als Elastomere.

Vorteile von TPU sind unter anderem:

- Thermoplastische Verarbeitbarkeit
- Schweißbarkeit
- Recycelbarkeit
- Beständigkeit u.a. gegen Öle und Fette
- UV-Beständigkeit
- Hohe Flexibilität auch bei tiefen Temperaturen
- Hohe Abriebfestigkeit

Zu den Nachteilen zählen:

- geringere Dauergebrauchstemperatur als PTFE (je nach Typ bis ca. 150 °C)
- geringere Dehnbarkeit als Elastomere

3.2.3 *Polytetrafluorethylen*

Polytetrafluorethylen (PTFE) gehört zur Gruppe der Fluorpolymere. Stoffe dieser Gruppe sind dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen Wasserstoffatome teilweise oder ganz durch Fluoratome ersetzt sind. Die Summenformeln von PTFE (C_2F_4) und Polyethylen (C_2H_4) unterscheiden sich nur dadurch, dass bei PTFE alle Wasserstoffatome durch Fluoratome ersetzt sind [Bonzo].

Zu den Vorteilen von PTFE zählen:

- hohe thermische Belastbarkeit (dauerhaft bis 250 °C)
- sehr reaktionsträge

- hohe chemische Beständigkeit u.a. gegen Lösemittel, Öle, Fette etc.
- witterungsbeständig
- sehr geringer Reibungskoeffizient und quasi kein Stick-Slip-Effekt

Dem stehen unter anderem die folgenden Nachteile entgegen:

- vergleichsweise geringe Steifigkeit und Festigkeit
- Verschleißverhalten

Zu den genannten Nachteilen kommt hinzu, dass die bei der Herstellung entstehenden perfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) Gegenstand aktueller umweltpolitischer Diskussionen sind. Es ist zumindest eine Einschränkung bei der Verwendung von PTFE denkbar, sodass es ratsam erscheint, sich auch im Bereich der Stangendichtungen Gedanken über eine Substituierung zu machen.

Auch wenn PTFE zur Gruppe der Thermoplaste gezählt wird, ist aufgrund der im geschmolzenen Zustand sehr hohen Viskosität eine Verarbeitung im Spritzgussverfahren wie bei üblichen Thermoplasten nicht möglich. Halbzeuge werden per Pulver- oder Pastenextrusion, Pressformen sowie Strangpressen (Pultrusion) hergestellt. Weiterverarbeitet werden die Halbzeuge durch spanende Verfahren.

3.2.4 Acrylnitril-Butadien-Elastomer

Acrylnitril-Butadien-Elastomer (NBR) wird auch als Werkstoff für Stangendichtungen verwendet, wenn Drücke und Geschwindigkeiten niedrig sind. Insbesondere ist NBR allerdings als Werkstoff für O-Ringe und anders geformte Vorspann-Elemente (engl. *energizer*) anzutreffen. Die als Vorspannelement bei Gleitring-Dichtsätzen verwendeten O-Ringe können per Spritzguss und Formpressen hergestellt werden.

NBR basiert auf einem Synthetikkautschuk. Als Kautschuk werden makromolekulare Stoffe bezeichnet, die vernetzbar sind. Solange diese Stoffe noch nicht vernetzt sind, haben sie thermoplastische Eigenschaften und können entsprechend verarbeitet werden. Nach Durchlaufen eines der als Vulkanisation bezeichneten Verfahren, zum Beispiel durch Zugabe von Schwefel und Erwärmung, wird aus thermoplastischem Natur- oder Synthetikkautschuk ein Elastomer.

Umgangssprachlich sowie auch in der Literatur ist vielfach von Acrylnitril-Butadien-Kautschuk die Rede. Nach der Vulkanisation ist es aber eigentlich nicht mehr als Kautschuk, sondern als Elastomer zu bezeichnen.

Zu den Vorteilen von NBR zählen:

- Beständigkeit gegen Öle, Fette und Treibstoffe
- geringe Gasdurchlässigkeit

- hoher Abriebwiderstand
- hohe Zug- und Reißfestigkeit

Dem gegenüber stehen die Nachteile:

- Dauer-Einsatztemperatur bis 120 °C [Abt19]
- geringe Ozonbeständigkeit

Einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des NBR hat der Acrylnitrilgehalt. Er liegt zwischen 18 und 50 Prozent. Mit steigendem Gehalt erhöht sich die Temperatur-, Öl-, Abrieb- und Verschleißbeständigkeit, während die Elastizität, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, abnimmt [Bau+22]. Auch sinkt die Gasdurchlässigkeit mit steigendem Acrylnitrilanteil.

3.2.5 *Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Elastomer*

Durch Hydrierung, d.h. durch Reaktion mit Wasserstoff, werden aus den Doppelverbindungen im NBR Einfachverbindungen. Die Doppelverbindungen ermöglichen auf der einen Seite ein Vernetzen mit Schwefel, aber auf der anderen Seite können dadurch auch Sauerstoff und Ozon angreifen. Hydrierter NBR-Elastomer (HNBR) ist somit witterungs-, ozon- und temperaturbeständiger als NBR. Nachteil dieses aufwendigen Verfahrens der Hydrierung sind die hohen Kosten, die dazu führen, dass HNBR deutlich teurer ist als NBR [Abt19].

3.2.6 *Fluor-Kautschuk*

Fluor-Kautschuk (FKM) kommt zum Einsatz, wenn besonders hohe Wärmebeständigkeit gefordert ist. FKM ist dauerhaft bis 200 °C einsetzbar. Auch gegenüber Witterungseinflüssen und Ozon ist die Beständigkeit sehr hoch. Die mechanischen Eigenschaften bleiben dafür, insbesondere bei tieferen Temperaturen, hinter anderen Materialien wie NBR und HNBR zurück. Zu den weiteren Nachteilen gehört die kostenintensive Herstellung.

3.2.7 *Polyester-Urethan-Kautschuk*

Diese Werkstoffe gehören zur Gruppe der Polyurethane wie auch TPU. Herstellung und Verarbeitung von Polyurethan-Elastomeren wie Polyester-Urethan-Kautschuk (AU) und thermoplastischen Urethanen unterscheiden sich jedoch stark voneinander [BR20].

Polyurethan-Elastomere zeichnen sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften, wie eine hohe Festigkeit und Härte sowie eine ebenfalls hohe Verschleißfestigkeit aus. Die Wärmebeständigkeit übersteigt jedoch nicht die von NBR. Ein Nachteil ist die Hydrolyse-Neigung,

d.h. eine Reaktion mit Wasser [BR20]. Bekannt ist Polyester-Urethan-Kautschuk unter anderem unter dem Handelsnamen Vulkollan[®] der Bayer AG.

3.3 ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN

Außerhalb des deutschen Sprachraums werden Fertigungsverfahren in drei Bereiche aufgeteilt [Geb16]:

- Subtraktive Verfahren
- Formative Verfahren
- Additive Verfahren

Diese einfache Einteilung, anders als die im deutschen Sprachraum übliche, feinere gemäß DIN 8580, bietet sich für eine Einführung in die additive Fertigung an, da sie das grundlegende Unterscheidungsmerkmal herausstellt:

Bei additiven Verfahren wird schrittweise der Werkstoff hinzugefügt, während bei subtraktiven Verfahren wie Drehen oder Fräsen sukzessive Werkstoff von einem Halbzeug entfernt und bei formativen Verfahren das vorhandene Halbzeug umgeformt wird, ohne dass sich das Werkstoffvolumen ändert.

Ein weiteres Merkmal additiver Verfahren ist der schichtweise Aufbau des Bauteils. Die CAD-Datei wird mit einer Software, dem sogenannten *Slicer*, in Z-Schichten konstanter Stärke aufgeteilt, die der Schichthöhe des jeweiligen Verfahrens entspricht. Diese liegt, abhängig vom Verfahren, typischerweise zwischen 30 µm und 0,2 mm.

Bei ungünstigen Winkeln zwischen Bauteilflächen und der Horizontalen kann sich ein Treppungseffekt zeigen, der bei der Anordnung der Teile im Bauraum berücksichtigt werden muss. Abbildung 3.13 zeigt die Auswirkung einer solchen Anordnung. Das Bauteil befand sich in der gleichen Orientierung wie abgebildet in der Anlage.

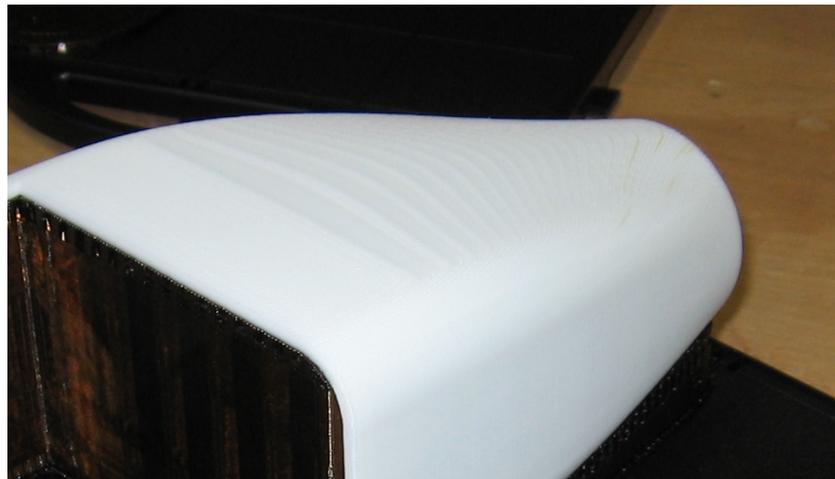


Abbildung 3.13: Ausgeprägter Treppungseffekt bei einem FDM-Teil

Nachfolgend werden nur diejenigen Verfahren im Detail vorgestellt, die für die Fertigung von Stangendichtungen grundsätzlich in Frage kommen. Es müssen somit Werkstoffe verarbeitbar sein, die für einen

solchen Anwendungsfall bereits eingesetzt werden bzw. die potentiell einsetzbar erscheinen.

Für eine umfassende Darstellung aller derzeit eingesetzten AM-Verfahren sei zum Beispiel auf [Geb16] verwiesen.

Additive Fertigungsverfahren bieten eine Reihe von verfahrensübergreifenden Vor- und auch Nachteilen gegenüber anderen Verfahren, die sonst üblicherweise für die Herstellung von Bauteilen angewendet werden.

Die Vorteile können unter anderem sein:

- Hohe konstruktive Freiheit
- Dezentrale Fertigung
- Losgröße 1 ist sinnvoll möglich
- Werkzeuglose Fertigung
- *Time to market* sehr kurz

Mögliche Nachteile von AM-Verfahren:

- *Oberflächenqualität*: Mit AM-Verfahren können nicht die Oberflächenqualitäten erzeugt werden, die bei konventionellen Fertigungsverfahren, wie zum Beispiel Spritzguss oder Drehen, möglich sind. Es gilt zu ermitteln, ob die erreichbare Oberflächengüte eine Funktionserfüllung zulässt. Im vorliegenden Fall ist auch denkbar, dass die spezielle Oberflächenbeschaffenheit additiv gefertigter Bauteile sogar einen positiven Effekt auf die Schmierstoffbenetzung hat.
- *Werkstoffauswahl*: Auch wenn es mittlerweile eine ganze Reihe von Werkstoffen gibt, die bei den verschiedenen Methoden der additiven Fertigung verwendet werden können, sind die Möglichkeiten doch noch eingeschränkt. Insbesondere im Bereich der Elastomere gibt es nur eine beschränkte Auswahl. Da im Dichtungsbereich in der Regel auch verschiedene Additive verwendet werden, müsste deren Eignung zudem, separat zur Eignung des Grundwerkstoffs, auch noch untersucht werden.
- *Maßhaltigkeit ist geringer und Toleranzen sind gröber als bei spanender Verarbeitung oder Spritzguss*: Bei den Punkten Maßhaltigkeit und Toleranzen gilt das Gleiche wie bei der Oberflächenqualität. Man muss generell im Vorfeld feststellen, ob die erreichbaren Qualitäten den Anforderungen genügen, oder ob eine spanende Weiterbearbeitung erforderlich ist. In dem Fall muss man entscheiden, ob eine additive Fertigung dann überhaupt noch sinnvoll ist, oder ob man nicht besser gleich eine konventionelle Fertigung vorziehen sollte.
- *Werkstoffeigenschaften*: Diese weichen von denen bei konventioneller Verarbeitung ab.

- *Porosität:* Bei einigen Verfahren sind die Bauteile nicht zu 100 % gefüllt.
- *Wirtschaftlichkeit:* Diese ist bei größeren Stückzahlen nicht gegeben.

Viele Vor- und Nachteile sind verfahrensabhängig. Spezifische Eigenschaften werden daher in den nachfolgenden Erläuterungen der einzelnen Verfahren aufgeführt.

Einige Verfahren, wie z.B. Multijet-Fusion von Hewlett-Packard (beschrieben in Abschnitt 3.3.4), bieten theoretisch zudem die Möglichkeit an ausgewählten Stellen eines Bauteils binderlösliche Additive hinzuzufügen. Das würde es im Sinne der Nachhaltigkeit ermöglichen, ein im Wesentlichen aus einem gut recycelbaren Grundwerkstoff bestehendes Bauteil zu fertigen und nur gezielt in den Regionen, in denen Zusätze notwendig oder hilfreich sind, diese hinzuzufügen. In Falle einer solchen partiellen Zugabe von Additiven muss eine Trennung der Anteile mit und ohne Additive möglich sein, zum Beispiel durch konstruktive Maßnahmen wie Sollbruchstellen.

3.3.1 Klassifizierung von AM-Verfahren

Die AM-Verfahren lassen sich gemäß Abbildung 3.14 klassifizieren. Aufgrund der rasanten Entwicklung auf dem Gebiet der additiven Fertigung erhebt die Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Aggregatzustand	Ausgangsmaterial	Verfahren	Kunststoff	Metall	Sonstiges	1-stufig	mehr-stufig	Stützen erforderlich
fest	Pulver	Selektives Lasersintern (SLS)	X			X		
		Multijet Fusion (MJF)	X			X		
		Selektives Laserschmelzen (SLM)		X	X	X		X
		Elektronenstrahlschmelzen (EBM)		X		X		X
		3D-Printing / Binderjetting (3DP)	X	X	X	X	X	
		Laserauftragschweißen		X				
	Strang, Block, Granulat	Fused Deposition Modelling (FDM)	X	X		X	X	X
		ARBURG Kunststoff Freiformen	X			X		X
	Folie	Laminated Object Manufacturing (LOM)			X	X		
flüssig	Flüssigkeit	Stereolithographie (SLA)	X			X		X
		Polyjetting	X			X		X
		Digital Light Processing (DLP)	X			X		X

Abbildung 3.14: Klassifizierung von AM-Verfahren

3.3.2 Selektives Lasersintern

Das Verfahren des Selektiven Lasersinterns (SLS) wurde 1987 von Carl R. Deckard zum Patent angemeldet [Dec87]. In einem geschlossenen und beheizten Bauraum wird eine Schicht eines pulverförmigen, thermoplastischen Materials mittels eines Beschichters auf einer in z-Richtung beweglichen Arbeitsplattform aufgebracht bzw. nachfolgend auf der darunter liegenden Schicht. Bei der Verarbeitung von Polyamid kann der Bauraum z.B. auf 170 °C^1 aufgeheizt sein, sodass der Strahl eines CO_2 -Lasers noch soviel Energie einbringen muss, damit der Schmelzpunkt des Werkstoffs (176 °C gemäß Datenblatt²) erreicht wird. Dabei verbinden sich die Partikel untereinander und mit der darunter liegenden Schicht. Der Prozess wird Schicht für Schicht wiederholt.

Beim SLS-Verfahren sind keine Stützen konstruktiv vorzusehen. Die Teile liegen im nicht versinterten Pulver.

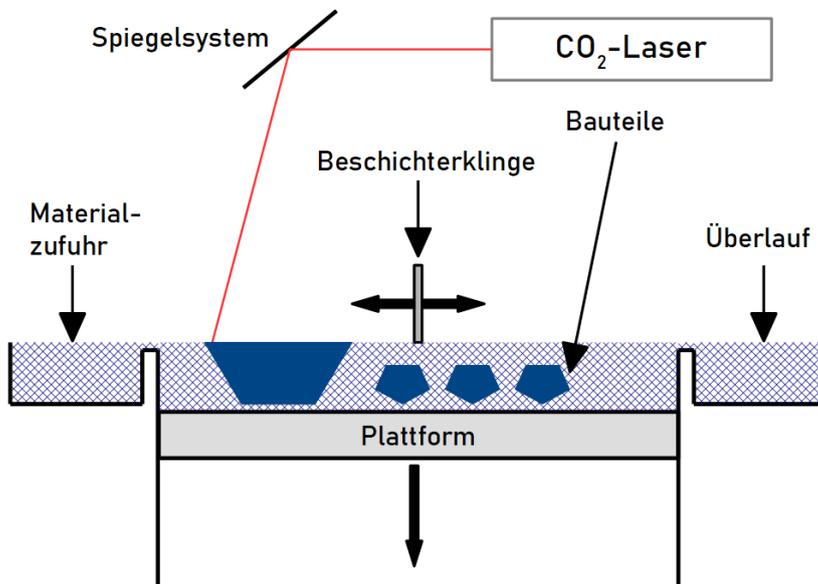


Abbildung 3.15: Schematische Darstellung SLS

Vorteile:

- gute Stabilität der Teile
- keine Stützkonstruktion erforderlich
- hohe Genauigkeit

Nachteile:

- Materialwechsel ist sehr aufwendig

¹ Bei der Anlage Formiga P110 des Münchener Herstellers EOS ist das die Standard-einstellung

² Datenblatt EOS PA 2220 Balance 1.0 - <https://www.materialdatacenter.com/mb/material/pdf/422876/422876/PA2200Balance1.0>

- Teile müssen aufwändig gereinigt werden (Glasperlstrahlen)
- Pulver verunreinigt Maschinenumgebung
- große Maschinenabmessungen
- hohe Anschaffungskosten
- kaum Materialauswahl
- raue Oberfläche, insbesondere bei TPU (siehe Abbildung 5.4 in Abschnitt 5.1)

3.3.3 3D-Printing / Binderjetting

Die ursprüngliche Bezeichnung 3D-Printing (3DP) wird mittlerweile synonym zu den Begriffen *Additive Fertigung* oder *Generative Fertigung* als Oberbegriff für alle Verfahren verwendet. Daher wird heute für dieses Anfang der 1990er-Jahre am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelte Verfahren [Sac+93] der Begriff Binder-Jetting benutzt.

Der Materialauftrag erfolgt wie beim SLS-Verfahren. Beim Binderjetting wird die Verbindung der Partikel jedoch durch Auftrag eines flüssigen Binders per Druckkopf (analog Tintenstrahldrucker, entwickelt von Hewlett Packard) erreicht. Das Grundmaterial kann Gipspulver³ oder PMMA⁴ sein. Das Bindemittel kann mit Farbstoffen oder anderen Substanzen gemischt werden. Nach Fertigstellung eines Layers wird die Plattform abgesenkt und der nächste Layer wird gefertigt.

Vorteile:

- kostengünstiges Material
- überschüssiges Pulver wiederverwendbar
- keine Stützkonstruktion erforderlich
- Binderlösliche Additive, wie z.B. Farben, können beigegeben werden

Nachteile:

- nicht als Funktionsteile einsetzbar (geringe Festigkeit)
- kaum Materialauswahl
- mäßige Oberflächenqualität
- Pulver verunreinigt Maschinenumgebung

³ Datenblatt 3DP Polymergips - https://www.rapidobject.com/resdb/download/1/de/119/125/datenblatt_3d_druck_material_polymergips-m-3dp-verfahren_34.pdf

⁴ Materialdatenblatt Voxeljet - https://www.voxeljet.com/fileadmin/user_upload/PDFs/-Materialdatenblatt_PPB-PPC_090318_web.pdf

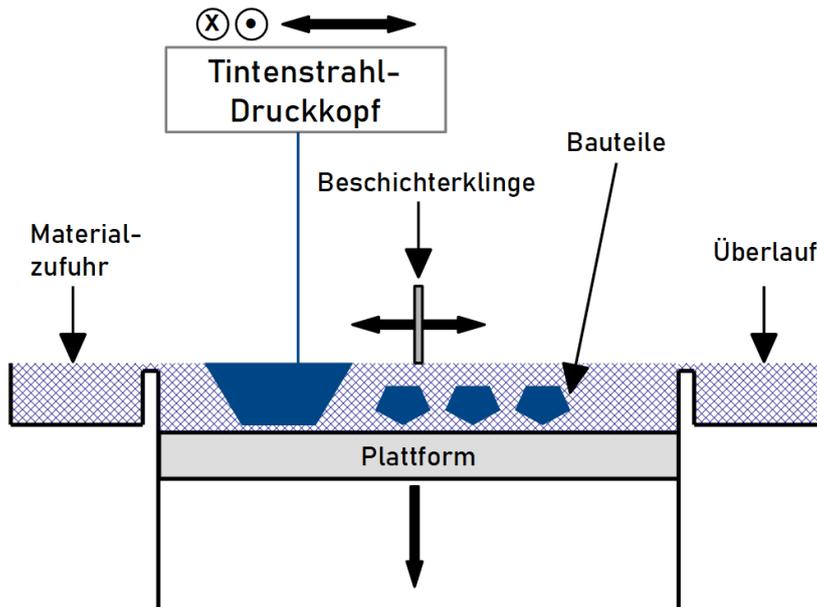


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung Binderjetting

3.3.4 Multi Jet Fusion

Das US-amerikanische Unternehmen Hewlett-Packard hat ein von ihnen Multi Jet Fusion (MJF) genanntes Verfahren entwickelt, das eine Art Mischung von SLS und Binderjetting ist:

Es wird in erster Linie mit Polyamidpulver gearbeitet. Der grundsätzliche Aufbau der Anlage entspricht hierbei dem Binderjetting-Verfahren. Wie dort wird auch bei Multi Jet Fusion mittels eines Druckkopfes, der die Tintenstrahltechnologie nutzt, Flüssigkeit auf das Pulverbett aufgebracht. Es gibt zum einen ein sogenanntes „Fusing agent“, welches dort aufgebracht wird, wo sich Bauteile befinden, sowie zum anderen ein „Detailing agent“ direkt um die Bauteilkontur herum.

Nach dem Beschichten erfolgt ein Belichten mit einem Infrarotstrahler. Dort, wo das „Fusing agent“ aufgetragen wurde, wird das Pulver so heiß, dass es aufschmilzt. Das „Detailing agent“ soll hierbei für eine bessere Abgrenzung und für eine bessere Oberflächenqualität der Teile sorgen.

Die Vorteile sind folgende:

- Isotrope Werkstoffeigenschaften
- Binderlösliche Additive können beigegeben werden
- Für höhere Losgrößen geeignet
- Bauteile sind gas-, wasser- und öldicht
- keine Stützkonstruktion erforderlich

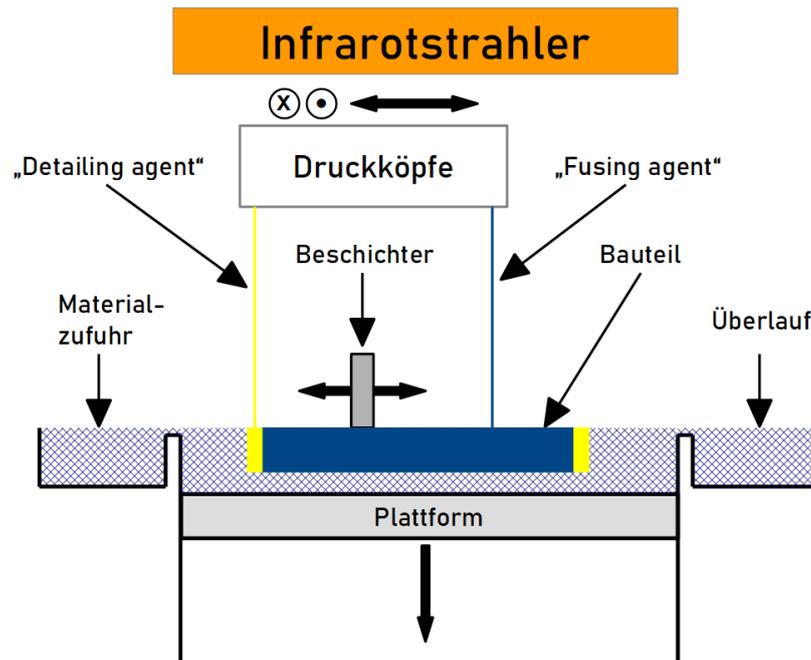


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung MJF

Nachteile:

- Materialkosten höher als bei SLS durch zusätzliche Agents
- kaum Materialauswahl
- TPU-Bauteile haben eine sehr schlechte Oberflächenqualität (siehe Abbildung 5.5 in Abschnitt 5.1)
- aufwendiges Postprocessing (manuelle Reinigung und Glasperlstrahlen)
- zeitaufwendige Vorbereitung und anschließende Reinigung der Anlage

3.3.5 Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling[®] (FDM[®]) ist eines der ältesten, auch heute noch auf dem Markt befindlichen Verfahren. Es wurde Ende der 1980er Jahre entwickelt und von der US-amerikanischen Firma STRATASYS bekannt gemacht. Die Firma STRATASYS besitzt auch die Markenrechte an den Bezeichnungen *FDM* und *Fused Deposition Modeling*. In der Open-Source-Gemeinde wird auch der alternative, nichtgeschützte Begriff *Fused Filament Fabrication* (FFF) verwendet. Gebhardt [Geb16] verwendet den Begriff *Fused Layer Modeling* (FLM). Zudem findet sich in der Literatur auch ein anderer Neutralbegriff: *Material Extrusion Additive Manufacturing* (MEAM), zum Beispiel in [Par+14].

Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass ein drahtförmiger, thermoplastischer Werkstoff aufgeschmolzen und in pastösem Zustand

bahnförmig auf einer Plattform oder der darunterliegenden Bauteilschicht abgelegt wird (3.18). Für die Bauteilstützen wird zumindest bei professionellen Anlagen ein zweites Material verwendet, welches sich in einem Natronlaugebad auflöst. Einfache Geräte verwenden nur ein Material, aus dem dann auch die Stützen aufgebaut werden. Diese müssen anschließend manuell mit geeigneten Werkzeugen entfernt werden. Materialien liegen als auf einer Spule aufgewickeltes Filament vor.

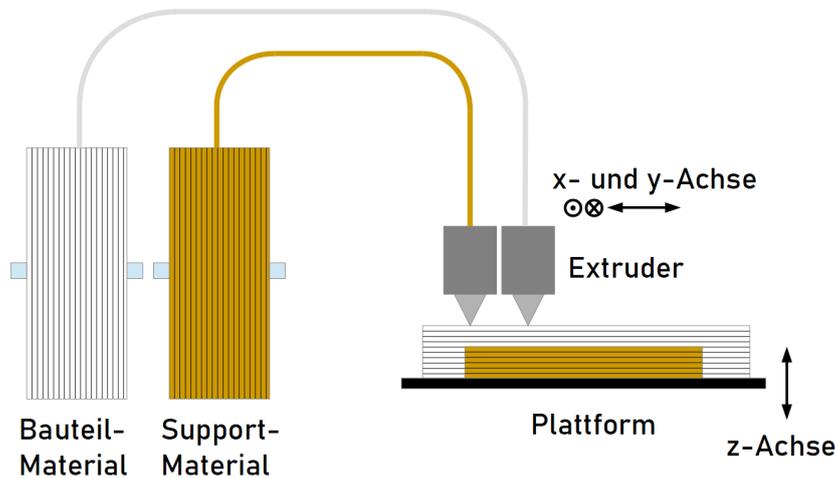


Abbildung 3.18: Prinzipdarstellung FDM

Anlagen, die nach diesem Prinzip arbeiten, haben sich rasant verbreitet, nachdem gegen Ende der 2000er-Jahre das RepRap-Projekt⁵ (Replicating Rapid-prototyper) aufkam. Es handelte sich hierbei um ein Open-Source-Projekt zum Eigenbau von 3D-Druckern. Alle Daten einschließlich der Software sind also frei verfügbar. Hardwarekomponenten, wie beispielsweise die komplette Steuerung können günstig erworben werden. Auf der Basis dieses Projektes sind auch eine Vielzahl kommerzieller, aber preiswerter Geräte entstanden, wie unter anderem Ultimaker oder Prusa.

Zu den Werkstoffen, welche mit FDM-Anlagen verarbeitet werden, zählen ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere), PLA (Polylactide), PC (Polycarbonat), PA (Polyamid), PET (Polyethylenterephthalat), PETG (Polyethylenterephthalat Glykol), TPE (Thermoplastische Elastomere) und PEEK (Polyetheretherketon).

Die Vorteile des FDM- bzw. FFF-Verfahrens sind:

- Günstige RepRap-basierte Anlagen
- Frei anpassbare Parameter bei den RepRap-basierten Geräten
- Große Auswahl an Materialien
- Sehr einfache Handhabung der Anlagen
- keine umweltschädlichen Abfälle

⁵ siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/RepRap>

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Oberflächengüte und Genauigkeit sind geringer als bei vielen anderen Verfahren, wie zum Beispiel SLA oder SLS
- Anisotropie der Festigkeit (geringere Festigkeit in Z-Richtung)
- Abhängig von der Bauteilgeometrie sind Stützen erforderlich
- Druckköpfe müssen regelmäßig gewartet werden, um die Bauteilqualität zu halten.

3.3.6 Stereolithographie

Stereolithographie (SLA) gilt als das erste, kommerzialisierte AM-Verfahren. Es wurde 1986 durch Charles M. Hull zum Patent angemeldet [Hul86].

Bei der klassischen Anordnung, wie in Abbildung 3.19 zu sehen, ist ein Behälter mit einem flüssigen Fotopolymer gefüllt. Durch ein Rakel wird auf einer bis kurz unter die Oberfläche bewegten Plattform eine definierte Schicht aufgebracht. Mit einem Laser wird dann die Kontur des Bauteils bzw. der Bauteile abgescannt. Der Lichteinfluss härtet so partiell das Polymer zu einem Duromer aus [Bon20].

Bei neueren Anlagen ist häufig eine „upside-down“-Anordnung anzutreffen. Am Boden befindet sich eine Scheibe mit einer darunterliegenden Belichtungseinheit. Die Plattform wird dann zunächst in die Nähe der Scheibe gefahren und nach Belichtung einer Schicht jeweils um eine Schichtstärke angehoben. Der wesentliche Unterschied ist somit die wesentlich geringere Menge an Fotopolymer, die im Behälter sein muss. Bauteile werden somit sukzessive aus dem Bad herausgezogen.

Die Vorteile des Verfahrens sind:

- höhere Genauigkeit als z.B. FDM oder Binderjetting
- es stehen (herstellerabhängig) viele Materialien zur Verfügung: transparent, unterschiedliche Härten, elastisch, für (zahn-)medizinische Zwecke geeignet usw.
- Gute Oberflächenqualität

Dem gegenüber stehen folgende Nachteile:

- Teile müssen von Stützen befreit und mit Isopropanol gereinigt werden: aufwendige Nacharbeit
- Es sind enge Stützen notwendig, sodass die Gestaltungsspielräume eingeschränkt sind.
- Nicht ausgehärtetes Fotopolymer ist nur begrenzt verwendbar und muss als Sondermüll entsorgt werden: hohe Kosten und wenig umweltfreundlich

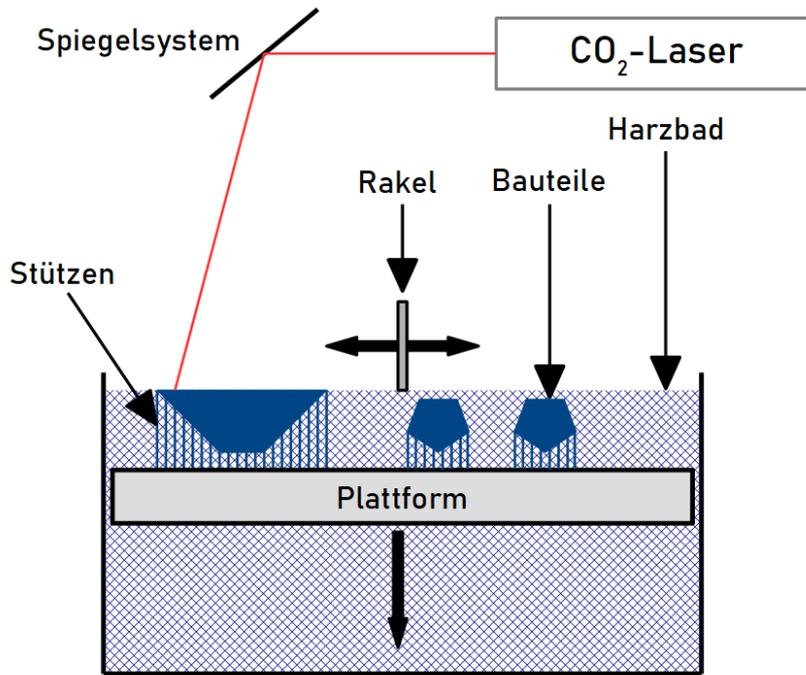


Abbildung 3.19: Schematische Darstellung SLA

Der letztgenannte Nachteil ist bei den neueren „upside-down“-Anlagen weniger ausgeprägt. Die begrenzte Haltbarkeit des Harzes sorgt aber auch hier für eine gewisse Menge an aufkommendem Sondermüll.

3.3.7 Polyjetting

Polyjetting-Anlagen arbeiten ebenso wie Stereolithographie-Anlagen mit Fotopolymeren. Bei Polyjetting-Anlagen wird eine dünne Schicht des Bauteil- und des Supportmaterials, wie bei einem Tintenstrahldrucker, entsprechend der Bauteilkonturen auf einer Plattform bzw. der vorherigen Bauteilschicht abgelegt. Im gleichen Zug fährt eine rotierende Metallrolle mit, die überschüssiges Material mitnimmt und über einen Abstreifer in einen Abfallcontainer befördert. Anschließend wird die gesamte Schicht mit einer UV-Lampe ausgehärtet. Das Material für die Stützen härtet nicht ganz aus, sondern es nimmt eine wachsähnliche Konsistenz an. Die Stützen können anschließend in einer Reinigungsstation mit normalem Wasser unter Hochdruck entfernt werden.

Vorteile:

- hohe Genauigkeit
- sehr gute Oberflächenqualität
- einfaches Entfernen von Stützmaterial

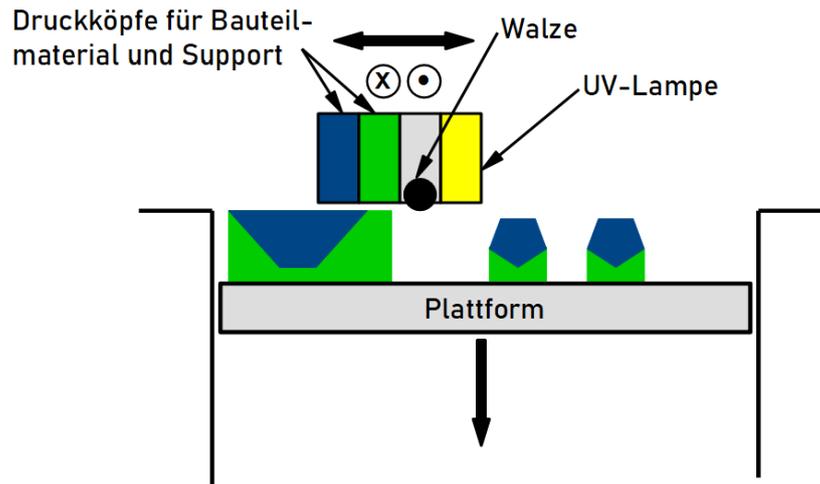


Abbildung 3.20: Schematische Darstellung Polyjet-Modeling

Nachteile:

- kaum Materialien für Funktionsteile verfügbar -> eher für Prototypenbau
- Stützmaterial muss vom Wasserstrahl erreichbar sein
- Feine Strukturen werden durch die Hochdruckreinigung leicht zerstört
- teures Material
- ca. ein Drittel des Materials endet durch das Abstreifen und regelmäßige Spülung der Druckköpfe als Müll
- nicht ausgehärtetes Material ist Sondermüll

3.3.8 Digital Light Processing

Auch beim Verfahren Digital Light Processing (DLP®) sind Fotopolymere die Ausgangs-Werkstoffe. Es ist am ehesten mit Stereolithographie vergleichbar. Der Unterschied liegt im Wesentlichen in der Art der Belichtung. Beim DLP-Verfahren wird eine ganze Schicht mit einem Projektor („Beamer“) belichtet. Ein weiterer Unterschied liegt in der Anordnung: die Teile „hängen“ generell unter der Plattform und werden sukzessive nach oben aus dem Harzbad gezogen, wie bei neueren SLA-Anlagen.

DLP (Digital Light Processing) ist ein Markenzeichen von Texas Instruments. Die Vor- und Nachteile sind bei allen Photopolymer-Anlagen mehr oder weniger identisch.

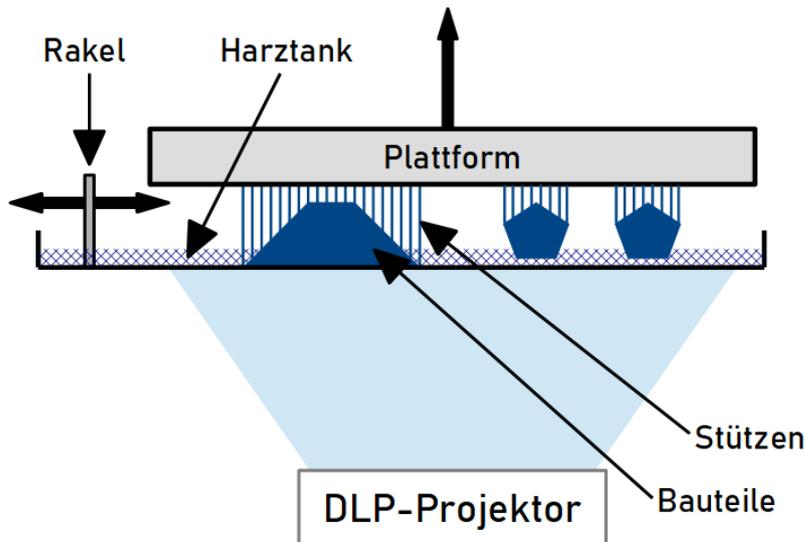


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung DLP

3.3.9 Mehrstufige Verfahren

Viele Verfahren aus dem Bereich der additiven Fertigung sind einstufig, d.h. die Bauteile werden direkt gefertigt. In der jüngsten Vergangenheit werden aber vermehrt mehrstufige Verfahren entwickelt und eingesetzt, insbesondere bei der Fertigung von metallischen Bauteilen. Diese mehrstufigen Verfahren basieren auf Erfahrungen aus dem Bereich Metallspritzguss (MIM = Metal-Injection-Molding). Dort wird Metallpulver mit einem thermoplastischen Binder zu Granulat verarbeitet, aus welchem dann im Spritzgussverfahren Bauteile, sogenannte Grünlinge, hergestellt werden, die dann in zwei Schritten zum endgültigen, einsetzbaren Produkt werden. Zunächst wird, abhängig vom verwendeten Bindersystem, der Binder chemisch weitgehend entfernt und anschließend muss das, in dem Zustand Bräunling genannte, Bauteil in einem Ofen gesintert werden. Die dabei auftretende Schrumpfung ist gut kalkulierbar und kann bei der Dimensionierung des Ausgangsteils berücksichtigt werden. Näheres zum Thema MIM findet sich unter anderem bei Burkhardt [Bur13] und Risse [Ris12, S. 69]. Die Adaptationen in der additiven Fertigung sehen derzeit wie folgt aus: Zum einen kann man wie beim MIM direkt aus dem Granulat, oder mittels daraus gefertigter Halbzeuge (Filamente, Stangen) mit dem Verfahren *Fused Filament Fabrication* (beschrieben im Abschnitt 3.3.5) Grünlinge herstellen. Die Ausgangsstoffe werden, unabhängig von der Form, Feedstock genannt. Den Grünlingen wird dann in einem zweiten Schritt, dem Debinding, das Bindemittel wieder entzogen. Das findet je nach Bindersystem entweder mit einem flüssigen, heißen Lösemittel, oder mit Oxal- bzw. Salpetersäure statt. Einige Hersteller bieten mittlerweile alle Komponenten (Printer, Debinder-Station und Sinterofen) an. Abbildung 3.22 zeigt ein Beispiel.



Abbildung 3.22: Desktop Metal Studio-System: Printer, Debinder, Sinterofen
(Quelle: www.desktopmetal.com)

Nachteilig bei diesem Verfahren sind der größere Prozessaufwand und etwas schlechtere Materialkennndaten aufgrund von Einschlüssen (die fertigen Teile liegen im Bereich von ca. 98 bis 99,7% Füllgrad).

Ein weiterer Ansatz geht über das Binderjetting-Verfahren. Dieses Verfahren verwendet pulverförmiges Ausgangsmaterial, welches mittels eines flüssigen Binders, der wie bei einem Tintenstrahldrucker aufgetragen wird, schichtweise zu einem Bauteil verbunden wird (im Detail beschrieben in Abschnitt 3.3.3). Der weitere Prozessablauf ist dann wie beim Metallspritzgießen. Dieses Verfahren wird von der französischen Firma Cetin verwendet, und auch Hewlett-Packard hat eine solche Anlage für Metallpulver entwickelt. Beim HP Metal Jet ist kein Debinding erforderlich. Die Grünlinge können direkt gesintert werden ⁶.

Im Laborstadium ist eine Entwicklung der 3M-Tochter Dyneon, bei der es um die Fertigung von Teilen aus PTFE geht [Bar+17]. Details sind noch nicht verfügbar, da Dyneon nur als Dienstleister Teile fertigt, nicht aber das System vermarktet. Bekannt ist allerdings, dass die Fertigung des Grünlings im DLP-Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.8) stattfindet. Es wird also ein Fotopolymer als Binder verwendet, welches anschließend thermisch entfernt wird.

Nachteile solcher mehrstufiger Verfahren sind der hohe Fertigungsaufwand und die umfangreiche notwendige Anlagentechnik. Da dieses mit dem im Fokus stehenden Anwendungsszenario nicht vereinbar ist, wird auf solche Möglichkeiten nicht weiter eingegangen.

⁶ <https://www.hp.com/de-de/printers/3d-printers/products/metal-jet.html> (abgerufen am 22.09.2023)

3.4 TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ADDITIV VERARBEITETER WERKSTOFFE

Es wurde in den vergangenen Jahren umfangreich zu tribologischen Untersuchungen von additiv gefertigten Bauteilen publiziert. In vielen dieser Publikationen geht es um die Ermittlung von Reibkoeffizienten und Verschleiß von Bauteilen, die im FDM-Verfahren erzeugt wurden.

Giemza et al. [Gie+18] haben sich auf die Ermittlung der Reibkoeffizienten von Bauteilen aus verschiedenen Thermoplasten beschränkt (PA, ABS, PLA) und hierbei den Einfluss der Ausrichtung der Bauteile bei der Fertigung untersucht, ebenso wie Perepelkina et al. [Per+17], die sich allerdings auf den Werkstoff PLA beschränkt haben, sowie Hanon et al. [HMZ20], bei denen zusätzlich zu PLA auch PETG betrachtet wurde.

Dawoud et al. [DTE15], Sood et al. [Soo+12] und Equbal et al. [Equ+10] haben Bauteile aus ABS mit und ohne Graphitpartikel in verschiedenen Anteilen untersucht und dabei den Einfluss von Fertigungsprozessparametern betrachtet und zusätzlich zum Reibkoeffizienten auch das Verschleißverhalten untersucht. Maries et al. [Mar+20] haben ähnliche Untersuchungen, allerdings ohne Betrachtung von Prozessparametern, für die Werkstoffe ABS, PLA und PETG durchgeführt. Ebenso Gurralla und Regalla [GR17], in ihrem Fall aber nur für ABS.

Bai et al. [Bai+15] haben Polyamid-Bauteile untersucht, die im SLS-Verfahren hergestellt wurden. Tsouknidas [Tso11] hat Reibkoeffizienten sowie Verschleiß und den Einfluss von Prozessparametern für die Verfahren FDM und SLS betrachtet.

Tey et al. [TCZ21] haben Polyamid- und TPU-Bauteile untersucht, welche im MJF-Verfahren gefertigt wurden. Hierbei hatten sie sowohl die mechanischen als auch die tribologischen Eigenschaften im Fokus. Für TPU ergaben sich ein Reibkoeffizient von 0,55, eine Verschleißrate von $0,012 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ und ein Mittenrauwert R_a zwischen 40 und 44, abhängig von der Orientierung.

Die Untersuchungen wurden in den meisten Fällen mit Pin-on-disc-Prüfständen vorgenommen. In den aufgeführten Untersuchungen sind zumeist Werkstoffe betrachtet worden, die nicht oder nur selten für die Herstellung von dynamischen Dichtungen Verwendung finden. Es zeigen sich Lücken für einige Werkstoff-/Verfahrenskombinationen.

Eine generelle, nicht ausschließlich auf additive Fertigung begrenzte, Übersicht über Einsetzbarkeit, Verarbeitung und Konstruktionsrichtlinien bezogen auf Polymere für tribologische Anwendungen bietet Friedrich [Fri18].

Für PEEK haben Wu et al. [Wu+15] die Festigkeitseigenschaften von im FDM-Verfahren gefertigten Bauteilen untersucht und mit denen von auf die gleiche Art gefertigten Teilen aus ABS verglichen. Molitch-Hou [Mol17] hat die Verarbeitbarkeit von PEEK und PEI (Ultem™) und die

Möglichkeiten in der Anwendung beschrieben. Beide haben aber nicht die tribologischen Eigenschaften betrachtet.

Es sind auch noch keine anwendungsbezogenen Untersuchungen durchgeführt worden, die einen Hinweis auf die Verwendbarkeit bestimmter Werkstoffe und insbesondere Fertigungsmethoden für die Herstellung von dynamischen Dichtungen, wie Stangendichtungen oder Radialwellendichtringen, geben könnten.

Hier soll das in dieser Arbeit dokumentierte Forschungsvorhaben ansetzen und Antworten auf die offenen Fragen liefern.

3.5 LIFE CYCLE ASSESSMENT - ÖKOBILANZ

Mit steigendem Umweltbewusstsein und gesetzlichen Umweltauflagen ist auch das Interesse gestiegen, Produkte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt über den gesamten Produktlebenszyklus von der Wiege bis zum Grab („*from cradle to grave*“) zu betrachten. Abbildung 3.23 zeigt die Zyklen über den gesamten Lebenszyklus.

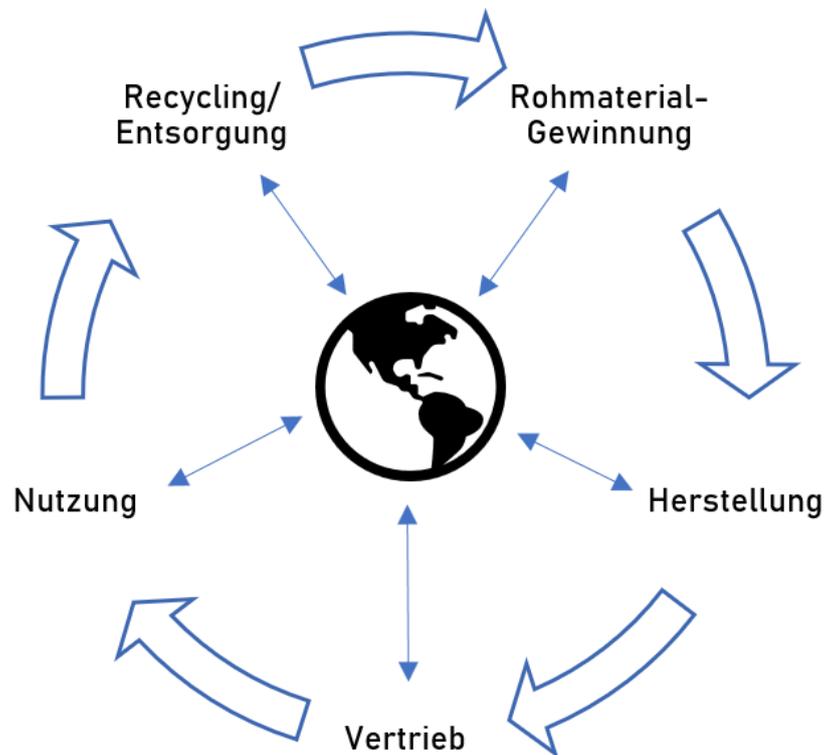


Abbildung 3.23: Die fünf Phasen des Produktlebenszyklus gemäß PRé Sima-Pro

Ein Life Cycle Assessment (LCA) ist eine Methode, diese Auswirkungen über den gesamten Lebensweg eines Produktes zu untersuchen. Den Rahmen dafür liefern im Wesentlichen zwei Normen:

- DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen
- DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen

Gemäß dieser Normen besteht ein Life Cycle Assessment aus vier Phasen [Deu21b]:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Erstellung einer Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

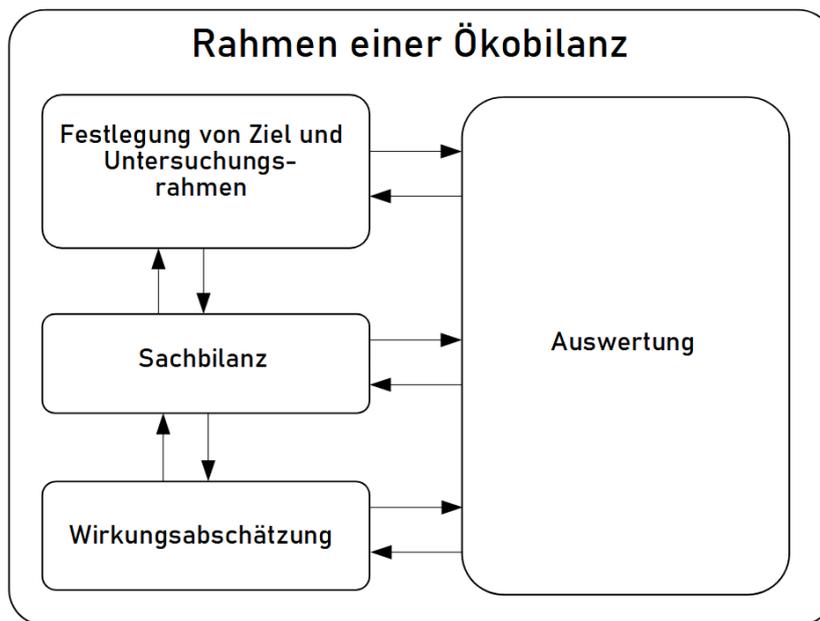


Abbildung 3.24: Die Phasen einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040

Die grundsätzliche Motivation für die Durchführung eines LCA kann sehr unterschiedlich sein. So kann es die Basis für umweltbezogene Produktdeklarationen sein, oder für die Feststellung, in welchem Produktzyklus das größte Potenzial für Verbesserungen liegt. Auch für Marketingzwecke können die Ergebnisse eingesetzt werden. Oder es können, wie im vorliegenden Fall, mehrere Szenarien vorliegen, die miteinander verglichen werden sollen bezüglich ihrer Umwelteigenschaften.

Die Motivation hat hierbei auch Auswirkungen auf die genannten Phasen. Speziell das Ziel und der Untersuchungsrahmen sind stark beeinflusst durch die hinter dem LCA stehenden Motive.

Aufgrund der Komplexität und der Menge an Daten wird ein Life Cycle Assessment mit entsprechender Software durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit ist dies *SimaPro* vom niederländischen Unternehmen PRè.

3.5.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ein Life Cycle Assessment ist eine modellhafte Betrachtung eines Produktes über den Lebenszyklus. Es geht zwar generell um den gesamten Zyklus. Allerdings kann, abhängig vom Ziel der Untersuchung, auch nur eine Phase des Lebenszyklus betrachtet werden. Wie bei anderen Arten von Simulationen und Kalkulationen, wie zum Beispiel einer Finite Elemente Analyse, ist auch hier die Sorgfalt bei der Modellierung und damit einhergehenden Vereinfachung von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Ergebnisse. Somit ist es unerlässlich, der ersten Phase der Erstellung der Ökobilanz besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Im ersten Schritt müssen das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert werden. Hierbei gilt, dass es im Verlauf des Assessments durchaus noch zu Anpassungen kommen kann und darf. Ein LCA ist als iterativer Prozess zu betrachten.

Folgende Punkte sollten bei der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens berücksichtigt werden:

- Für wen wird die Ökobilanz erstellt? Ist sie zum Beispiel für das interne Marketing bestimmt, oder für Kunden?
- Was ist die Absicht hinter dem LCA?
- Das Produkt und der Lebenszyklus müssen genau beschrieben sein.
- Bei komplexeren Produkten oder Prozessen sind die Systemgrenzen genau zu definieren.
- Die zu verwendenden Datenbanken müssen in Abhängigkeit von Zielen und Zielgruppe festgelegt werden. So müssen keine US-Daten verwendet werden, wenn der Fokus auf der Europäischen Union liegt.
- Falls erforderlich, muss ein Peer Review definiert werden.

Die Abbildung 3.25 zeigt, welche In- und Outputs bei einem solchen, durch eine genau definierte Systemgrenze abgegrenzten, Produktsystem zu berücksichtigen sind.

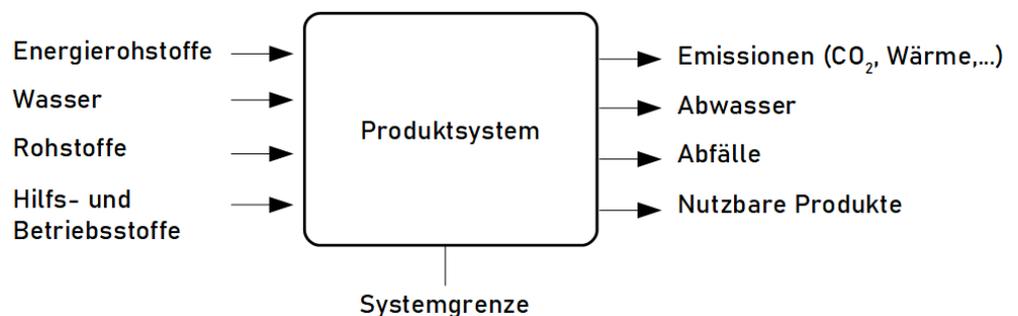


Abbildung 3.25: Produktsystem nach [WAA00]

Ein Peer Review ist gemäß Norm notwendig, wenn eine vergleichende LCA durchgeführt werden soll, dessen Ergebnisse für eine Veröffentlichung bestimmt sind. Da viele der aufgeführten Festlegungen subjektiver Natur sind, kann auch in anderen Fällen ein Peer Review sehr sinnvoll sein.

3.5.2 Sachbilanz

Der in der Regel zeitaufwendigste Teil eines Life Cycle Assessments ist die Sachbilanz, in der Daten zusammenzutragen sind. Man kann hierbei zwischen zwei Kategorien von Daten unterscheiden: Vordergrunddaten und Hintergrunddaten. Die Vordergrunddaten sind Produkt- oder Prozessspezifische Daten wie zum Beispiel Energie- oder Wasserverbrauch, Transportstrecken, Emissionen oder Abfälle.

Die Hintergrunddaten sind Daten, die aus Datenbanken oder aus der Literatur entnommen werden können. So sind in Programmen wie SimaPro für viele Prozesse und Materialien in Datenbanken Daten hinterlegt, die für das LCA genutzt werden können. Hierbei ist auf Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen zu achten. Wenn in einem LCA zum Beispiel die Daten für einen Fertigungsprozess zusammengetragen werden, welcher in Deutschland stattfindet, so ist für die elektrische Energie der Datenbankeintrag zu wählen, der auf dem in Deutschland anzunehmenden Strommix basiert.

In *SimaPro* stehen mehrere Datenbanken zur Auswahl. Eine wichtige Standard-Bibliothek ist *Ecoinvent 3*. Diese wurde an mehreren Schweizer Institutionen, unter anderem der ETH Zürich, dem Paul Scherrer Institut, der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt und der EPFL Lausanne entwickelt und wird laufend gepflegt.

Für das Zusammentragen der Daten ist die Nutzung von Formblättern sinnvoll, wie sie auch als Beispiele in den genannten Normen zu finden sind.

Wenn man für ein LCA auf Daten angewiesen ist, die nur ein Unternehmen, dem man selbst nicht angehört, als Hersteller oder Dienstleister bereitstellen könnte, kann dieses Zusammentragen schwer bis unmöglich sein. Für tiefgehende und detaillierte Ökobilanzen ist eine entsprechend breite und genaue Datenbasis notwendig. Sollte es nicht möglich sein, solchermaßen detaillierte Daten zu bekommen, kann eine generelle Aussage eines LCA durchaus trotzdem zutreffend sein, lediglich die quantitativen Ergebnisse sind entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

3.5.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung ist die eigentliche Berechnung der Stoffströme und der Umweltauswirkungen. Hierzu ist zunächst eine Methode

festzulegen. Auch hier stehen mehrere Methoden, abhängig vom Ziel und Gegenstand des LCA, zur Verfügung. Standard ist *CMA-IL baseline*. Sie wurde an der Universität Leiden am *Center for Environmental Sciences* (CML) entwickelt.

Unabhängig von der Nutzung einer Software obliegt es dem Durchführenden, die Qualität und Quantität der zur Verfügung stehenden, im Rahmen der Sachbilanz zusammengetragenen, Daten mit Hinblick auf das Ziel der Untersuchung zu beurteilen.

In der Phase der Wirkungsabschätzung kann es hilfreich oder im Falle von vergleichenden, für die Veröffentlichung vorgesehenen, Untersuchungen sogar obligatorisch, sein, eine Sensitivitätsanalyse vorzunehmen, um die Auswirkung von geänderten Daten auf das Ergebnis beurteilen zu können.

In der Wirkungsabschätzung kann der Fokus auf einem oder mehreren Wirkungsindikatoren liegen. Ein gebräuchlicher Indikator ist zum Beispiel die Auswirkung auf das Klima, welche als kg CO_2 -Äquivalent angegeben wird.

3.5.4 *Auswertung*

In der abschließenden Phase des Life Cycle Assessments, der Auswertung, werden die Ergebnisse in Tabellen- und Grafikform dargestellt und interpretiert. Bei der Beurteilung gehen zusätzliche Aspekte der Wirkungsabschätzung, wie etwa Sensitivitätsanalysen, mit ein.

Darstellung und Interpretation der Ergebnisse spiegeln dabei das festgelegte Ziel und den Untersuchungsrahmen wieder.

3.6 ADDITIVE FERTIGUNG UND NACHHALTIGKEIT

In den letzten Jahren hat es einige Arbeiten zu dem Thema gegeben, die gezeigt haben, dass die Additive Fertigung bei näherer Betrachtung keineswegs immer die bessere Wahl ist, wenn die Nachhaltigkeit im Blickpunkt steht. Hier seien exemplarisch die Arbeiten von Faludi et al. [Fal+15], Baumers et al. [Bau+11], Bierdel et al. [Bie+19], Ford und Despeisse [FD16], Garcia et al. [Gar+21], Kellens et al. [Kel+10], Luo et al. [Luo+99], Telenko und Seepersad [TS12] sowie Gebler et al. [GSV14] genannt. Hierbei haben sich nur Faludi et al., Garcia et al. sowie Luo et al. mit dem Thema *Lifecycle Assessment* beschäftigt. Die anderen Arbeiten beschränken sich auf den energetischen Aspekt der Produktionsmethoden. Kellens et al. haben zusätzlich noch Prozessgasverbräuche und anfallende Abfälle in ihre Studie einbezogen.

Die Betrachtungen bezogen sich auf verschiedene Werkstoffe, nicht jedoch solche, die auch für die Fertigung von Stangendichtungen eingesetzt werden.

EXPERIMENTELLE METHODIK

4.1 VERSUCHSEINRICHTUNGEN

4.1.1 Modellversuche: Tribometer

Die Reibwertuntersuchungen der Werkstoffe wurden mit einem Tribometer des Typs TRB³ vom Hersteller Anton Paar durchgeführt.

Der dynamische Reibwert wurde zunächst trocken und später mit einer im Hause konstruierten Vorrichtung und dem Linearmodul des Tribometers auch mit Schmierung ermittelt.



Abbildung 4.1: Tribometer Anton Paar TRB³ der HS Emden-Leer

Die Messung des dynamischen Reibwerts ohne Schmierung wurde wie folgt durchgeführt: Der Pin war mit einer 6 mm-Kugel aus 100Cr6 bestückt, welche auf einem Radius von 25,4 mm mit einer Last von 5 N auf dem Testteil auflag. Das Testteil rotierte, wobei die resultierende Geschwindigkeit bei 20 mm/s lag. Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau.

Für die Messungen mit Schmierung wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit eine Vorrichtung entwickelt, die es erlaubt, Dichtungen des betrachteten Typs RU zu untersuchen. Die Dichtung wird wie in Abbildung 4.3 zu sehen, innerhalb einer Wanne eingespannt.

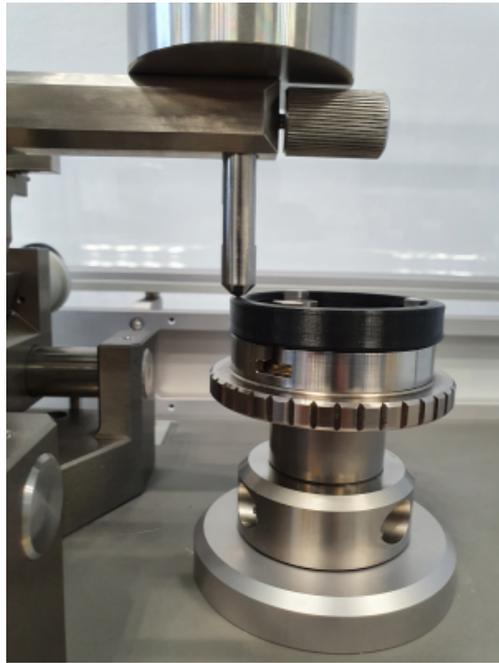


Abbildung 4.2: Messung des Reibwerts unter trockenen Bedingungen

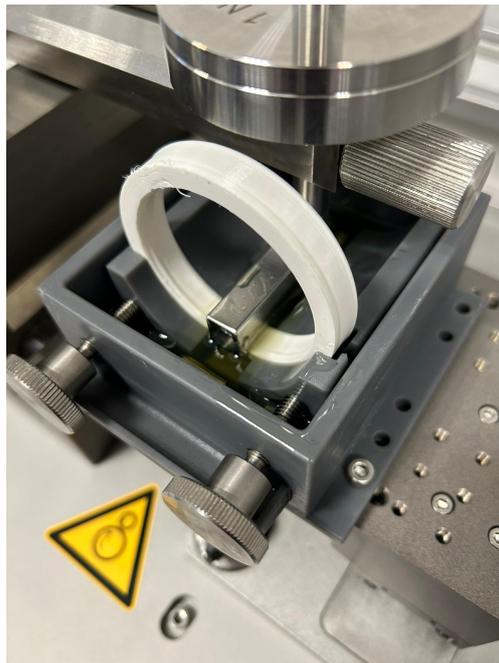


Abbildung 4.3: Vorrichtung zur Messung des Reibwerts mit Schmierung

Am Arm des Tribometers ist ein geschliffener und polierter Ausleger montiert, der im Auflagebereich den Radius von 25 mm hat und eine Breite von 10 mm. Dieser Ausleger liegt auf der Dichtkante der Dichtung auf und wird translatorisch mit einer Amplitude von 26 mm hin- und herbewegt. Geschwindigkeit und Auflagekraft sind variabel.

4.1.2 Charakterisierung: Radialkraftmessgerät

Um die Materialien mechanisch charakterisieren und mit Referenzen vergleichen zu können, soll die Radialkraft von Bauteilen ermittelt werden. Zur dieser Messung wird ein an der Hochschule Emden-Leer im Rahmen einiger studentischer Projekte entwickeltes Gerät mit einem geteilten Messdorn verwendet, wie in Abbildung 4.4 zu sehen.

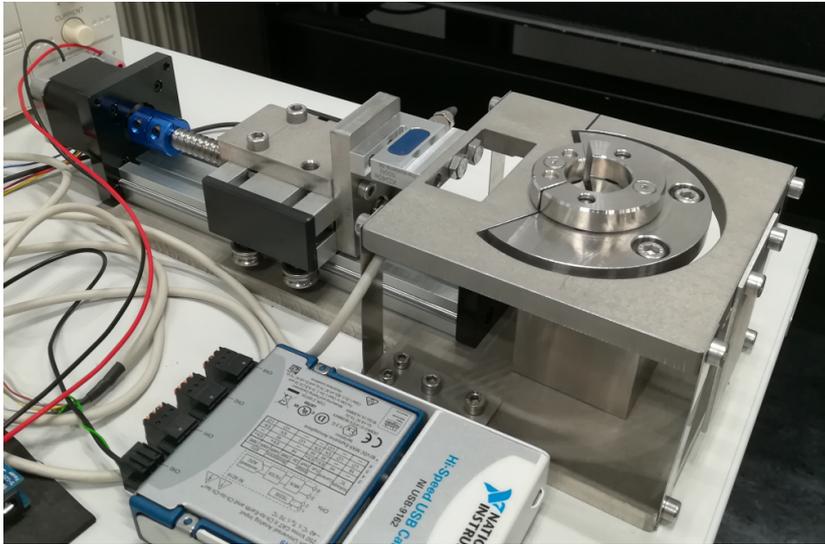


Abbildung 4.4: Radialkraftmessgerät der HS Emden-Leer

Messprinzip:

Neben dem feststehenden größeren Segment gibt es ein bewegliches Segment, welches über Blattfedern mit dem Sockel verbunden ist. Der hier verwendete Segmentwinkel von 120° ($= 2\varphi_{max}$) wurde in [GZ85] bereits 1986 als bevorzugter Wert für Radialkraftmessungen genannt und auch in den Arbeiten von Debler [Deb05] und Engelke [Eng11] aufgenommen. Das gelagerte Segment ist mit einem Kraftsensor und einem Linearantrieb verbunden. Mittels eines Kalibrierringes wird die Position in Nulllage festgestellt. Nach dem Austausch des Kalibrierringes gegen das Messobjekt, also einer Stangendichtung oder eines Radialwellendichtringes, wird das Segment wieder in die Nulllage gebracht und dann die Kraft gemessen. Diese Messung wird über mehrere Stunden durchgeführt und die Ergebnisse in einstellbaren Intervallen gespeichert. Das Ergebnis ist ein Kraftverlauf, wie in Abbildung 4.5 zu sehen. Die Sprünge sind durch die Positionsregelung bedingt.

Es ist zu erkennen, dass sich die Radialkraft nach einiger Zeit auf einen Wert einstellt. Da nur der an einem 120° -Segment anliegende Anteil der Radialkraft gemessen wird, muss mit diesem noch die Gesamtradialkraft ermittelt werden gemäß [Deb05]:

$$F_S = \int_{-\varphi_{max}}^{\varphi_{max}} f_R \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot d\varphi = \int_{-\varphi_{max}}^{\varphi_{max}} \frac{F_R}{2\pi R} \cos \varphi \cdot R \cdot d\varphi \quad (4.1)$$

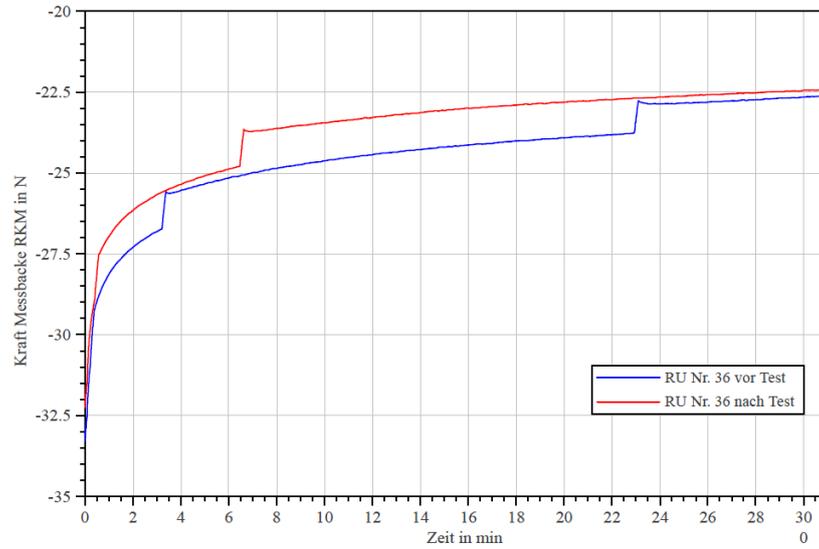


Abbildung 4.5: Rohdaten einer Radialkraftmessung

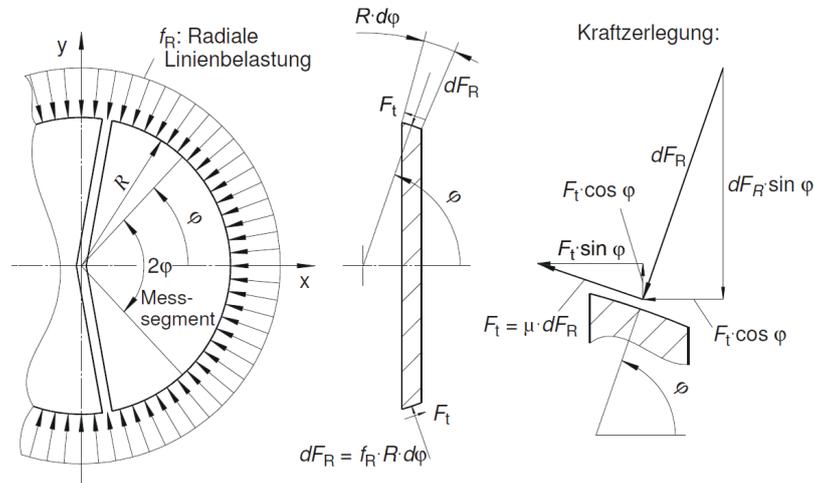


Abbildung 4.6: Kraftzerlegung am Messzapfen (aus [Debo5])

Mit $2\varphi_{max} = 120^\circ$ gilt somit:

$$F_R = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot F_S = 3,628 \cdot F_S \tag{4.2}$$

Die Messungen an Stangendichtungen liefern Werte, die zwar einen Vergleich zwischen konventionell und additiv gefertigten Exemplaren gleicher Geometrie und Abmessung erlauben, nicht aber die Radialkräfte abbilden, die bei eingebauten Dichtungen vorliegen. Dafür müssten die Dichtungen in einem Ring montiert sein, der eine Nut mit den für die jeweilige Dichtung geforderten Abmessungen aufweist.

4.1.3 Bauteilversuche: Stangendichtungsprüfstand

Der Stangendichtungsprüfstand wurde ursprünglich entwickelt und realisiert durch Engelke, Ottink, Wennehorst und Poll [OWP10].

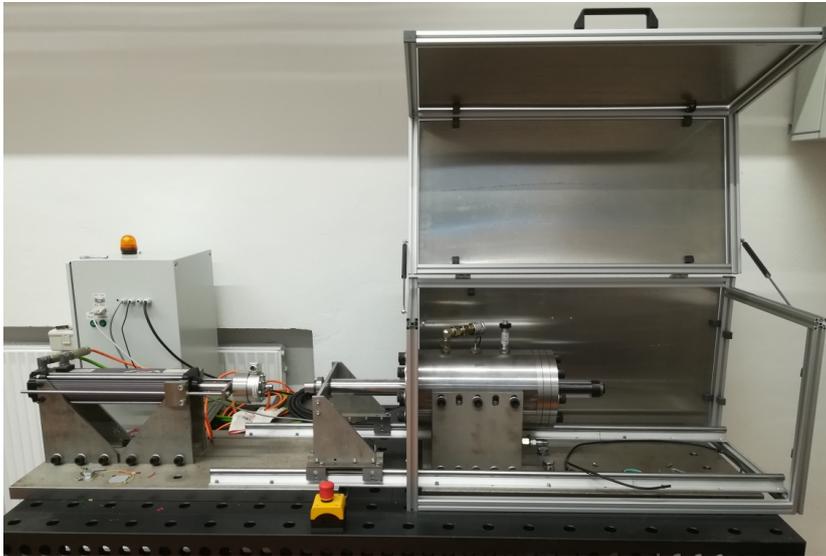


Abbildung 4.7: Stangendichtungsprüfstand

Er verfügt als Hauptkomponenten über einen elektrischen Linearantrieb, einen Druckbehälter, eine Kolbenstange und eine manuelle Hydraulikpumpe. Die ursprünglich entwickelte und realisierte Version in Hannover war noch mit einem Hydraulikaggregat ausgestattet. Abbildung 4.8 zeigt schematisch den aktuellen Aufbau.

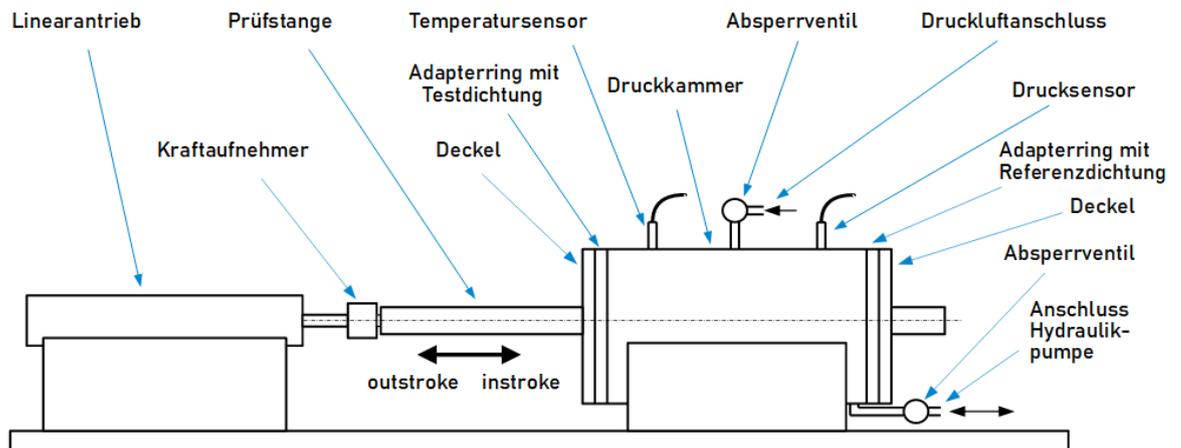


Abbildung 4.8: Schematischer Aufbau des Stangendichtungsprüfstands

Die Kolbenstange ist über eine Kraftmessdose mit einem Messbereich von ± 5 kN mit dem Antrieb gekoppelt. Der Druckbehälter ist auf beiden Seiten mit Adapterdeckeln versehen, in die verschiedene Stangendichtungen eingebaut werden können. Es sind auch mehrstufige Dichtungen realisierbar. Der Druckbehälter verfügt über einen Druck- und einen

Temperatursensor. Der Druckbehälter kann mittels der Hydraulikpumpe unter Druck gesetzt werden. Nach dem Ablassen des Drucks kann das Hydraulikfluid per Druckluft wieder zurück in den Behälter der Pumpe transportiert werden. In Tabelle 4.1 finden sich die technischen Daten des Prüfstands.

Stangendurchmesser	:	50 bis 80 mm
Max. Stangengeschwindigkeit	:	0,25 m/s
Max. Fluiddruck	:	15 MPa
Verwendetes Fluid	:	Mineralöl Mannol Hydro ISO 32 HLP
Kraftmessbereich	:	± 5 kN

Tabelle 4.1: Technische Daten des Stangendichtungsprüfstands

In der ursprünglichen Form diente der Prüfstand auch zur optischen Untersuchung von Vorgängen im Schmier-spalt, wie in [OWP10] im Detail beschrieben. Der Prüfstand wurde 2017 vom Labor für Maschinenelemente der Hochschule Emden-Leer übernommen und dort vollständig neu aufgebaut. Die Ansteuerung und die Aufzeichnung der Messdaten ist mit dem Programm LabView[®] von National Instruments realisiert worden, wobei derzeit noch keine optischen Untersuchungen durchführbar sind, da die gesamte Optik ebenfalls neu aufgebaut wird. Zukünftig soll die Auswertung über das *Full Field Optical Coherence Tomography*-Verfahren (Full Field OCT) stattfinden.

Eine gebräuchliche Norm für die Untersuchung von Stangendichtungen für industrielle Anwendungen ist die ISO 7986 [ISO97]. Eine Reihe von Anforderungen dieser Norm sind bei dem vorhandenen Prüfstand nicht gegeben. Das betrifft unter anderem die maximal mögliche Geschwindigkeit und den maximalen Betriebsdruck. Zudem ist es auch nicht möglich, Leckagen zu quantifizieren. Dazu wäre eine andere Gestaltung der Adapter notwendig, um das ausgetretene Fluid abstreifen und sammeln zu können.

Da im hier dokumentierten Forschungsvorhaben aber keine Produkte für den Markt entwickelt, sondern nur Grundlagen dafür geschaffen werden sollen, ist eine Einhaltung der Norm hier auch nicht notwendig.

Die Messungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beschränken sich auf die Reibkraft und insbesondere auf qualitative Aspekte. Es soll zunächst die Frage beantwortet werden, ob additiv gefertigte Dichtungen ihren Zweck erfüllen.

- Dichten sie statisch und dynamisch ab?
- Bis zu welcher Belastung ist die Dichtfunktion gegeben?
- Wie viele Bewegungszyklen sind möglich, bevor die Dichtungen einen kritischen Verschleiß aufweisen?
- Welche Qualitätskriterien entscheiden über die Funktionsfähigkeit?

ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN

Zu Beginn der experimentellen Untersuchungen stand die Festlegung auf ein Fertigungsverfahren und, damit verbunden, auf eines der Anwendungsszenarios, wie sie in Abschnitt 2.1 beschrieben sind. Als nahelegendstes Szenario wird die Fertigung von Dichtungen an dezentralen Vertriebsstützpunkten durch Dichtungshersteller mittels einfacher Fertigungstechnik und vom Hersteller bereitgestellten Halbzeugen und Daten erachtet.

5.1 VERFAHRENSSCREENING

Thermoplastische Urethane sind die gebräuchlichsten Materialien für Stangendichtungen, welche auch mit Verfahren der additiven Fertigung verarbeitbar sind. PTFE als ebenfalls weit verbreitetes Material ist, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, nicht mit einem kommerziell verfügbaren Verfahren verarbeitbar. Und für das gewünschte Szenario wäre das von Dyneon entwickelte Verfahren auch zu kostenintensiv und komplex. Somit wurde der Ansatz über TPU bereits in einem frühen Stadium der Arbeit gewählt.

Diese Festlegung führte zu einer Vorauswahl von Verfahren der additiven Fertigung, die im ersten Schritt einem Screening unterzogen werden sollten, um ein Verfahren zu finden, welches am hoffnungsvollsten erscheint, um damit funktionierende Stangendichtungen herstellen zu können. Dabei wurde auch wiederum berücksichtigt, in welchem Rahmen eine solche Fertigung stattfinden könnte.

Grundsätzlich für die Verarbeitung von TPU kommen folgende Verfahren in Frage:

- Fused Filament Fabrication (FFF)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Multi Jet Fusion (MJF)

Somit wurde mit diesen Verfahren zunächst Bauteile gefertigt, um die generelle Fertigungsqualität beurteilen zu können.

Fused Filament Fabrication (FFF)

Filamente aus TPU sind anspruchsvoller in der Verarbeitung bei FFF-Geräten als viele nicht-flexible Materialien wie zum Beispiel PLA oder PETG. Zum einen empfiehlt sich bei flexiblen Filamenten der Einsatz

von Direkt-Extrudern, die das Filament in unmittelbarer Nähe der Düse mittels Schrittmotor und zwei gezahnten Scheiben in die beheizte Düse transportieren. Eine andere, häufig verwendete, Bauweise ist der Bowden-Extruder, bei dem der Vorschubmechanismus nicht am beweglichen Druckkopf, sondern am Gestell des Geräts platziert ist und das Filament durch einen Schlauch zum Kopf und somit zur beheizten Düse bewegt wird. Der Grund für den Einsatz von Bowden-Extrudern ist die geringere bewegte Masse. Bei flexiblen Filamenten ist der Vorschub mit Direkt-Extrudern präziser zu realisieren als mit Bowden-Extrudern.

Eine generell bei den TPU-Filamenten zu beobachtende Eigenschaft ist die große Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit. Die Filamente müssen durchgängig vor der Verarbeitung getrocknet werden, um Effekte wie Blasenbildung oder *Stringing* zu eliminieren. Unter *Stringing* versteht man das im Bild 5.1 zu erkennende Ziehen von feinen Fäden zwischen Ab- und Ansetzen des Druckkopfes. Auch neues, noch vakuumverpacktes Filament, muss zum Teil vor der Verwendung getrocknet werden, weshalb die Trocknung generell als erster Prozessschritt durchgeführt werden sollte. Bei der Vorstellung der Ergebnisse der Prozessoptimierung im weiteren Verlauf dieses Kapitels im Abschnitt 5.5.1 wird detailliert auf Wege eingegangen, wie man verschiedenen möglichen Fertigungsproblemen begegnen kann.

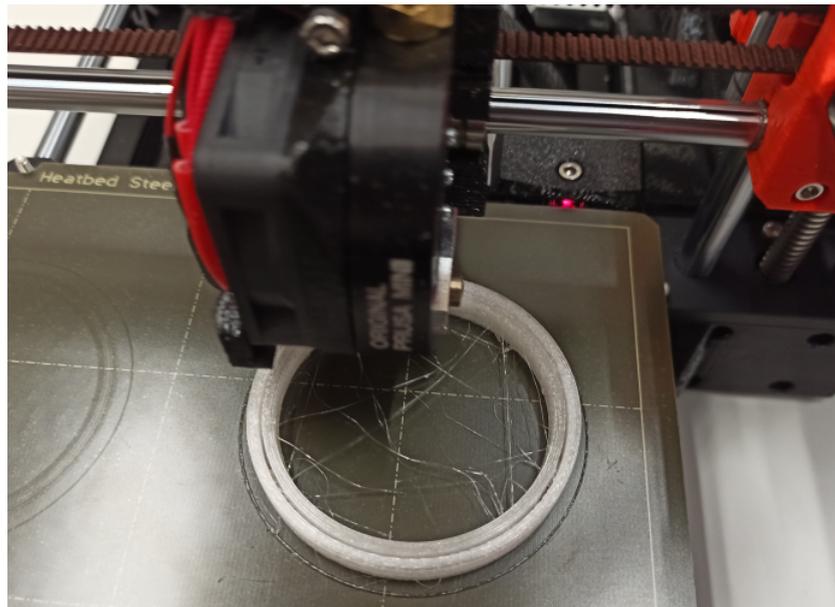


Abbildung 5.1: Stringing

Bei der Mehrzahl der Filamente waren mehrere Anpassungs-Iterationen der Parameter notwendig, um eine optisch und haptisch brauchbar erscheinende Qualität zu erzielen. In Abbildung 5.2 ist beispielhaft zu sehen, dass dies aber grundsätzlich mit einer Reihe von untersuchten Filamenten möglich war.

Wie exemplarisch das Schlibbild eines der zu Beginn gefertigten Bauteile (Abbildung 5.3) zeigt, war zu dem Zeitpunkt noch fraglich, ob damit Funktionstests durchgeführt werden können. Erkennbar ist, dass die

Stränge in einigen Bereichen Lücken aufweisen. Das bedeutet, dass das Bauteil nicht vollständig dicht ist und eine Delamination unter Last die Folge sein kann. Auch ist die für das Fertigungsverfahren typische Oberflächenstruktur erkennbar, die sich aus dem Auftrag von Materialsträngen ergibt.



Abbildung 5.2: Erste Vorversuche: Testteil aus dem Filament Fillamentum Flexfill TPU98A

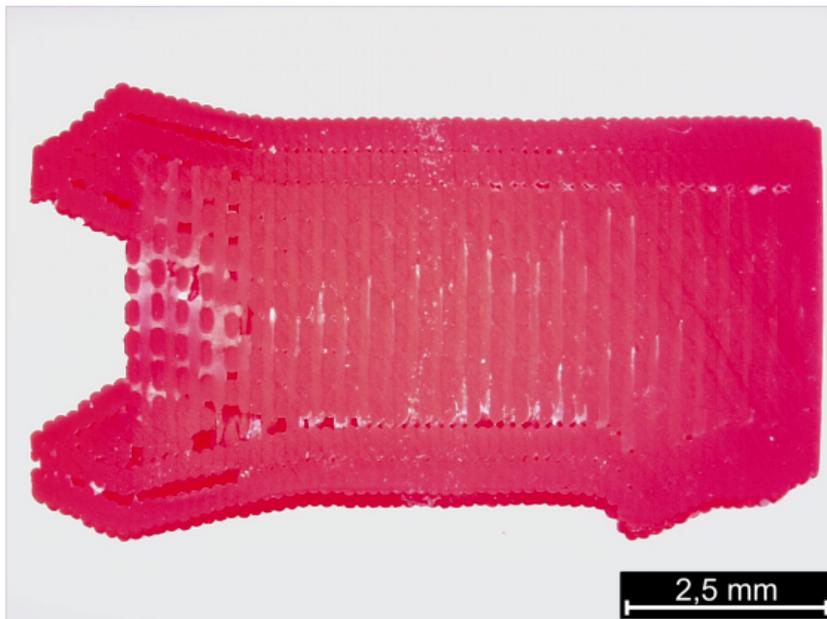


Abbildung 5.3: Erste Vorversuche: Schliffbild eines frühen Testteils aus dem Filament Polymaker TPU 95

Selective Laser Sintering (SLS)

Abbildung 5.4 zeigt ein Testteil, welches auf einer Anlage des Herstellers EOS gefertigt wurde. Neben der bereits bei der Vorstellung der Verfahren genannten rauen Oberfläche ist im Bild auch Porosität erkennbar. Diese Qualitätsprobleme sind verfahrensimmanent. Anlagen dieser Art lassen zudem in der Regel keine Änderungen an den werksseitig definierten Parametern zu.

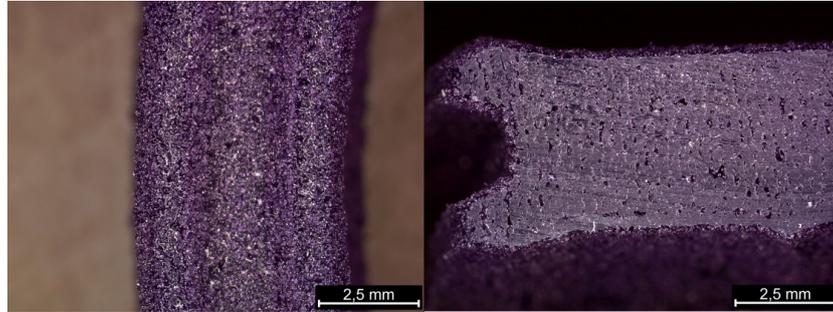


Abbildung 5.4: Im SLS-Verfahren gefertigtes TPU-Bauteil: links die Oberfläche, rechts im Schnitt

Aufgrund der eingeschränkten Qualität der Bauteile sowie des hohen Anlagenaufwands erscheint das Verfahren des Lasersinterns (SLS) als ungeeignet für den gewünschten Anwendungsfall.

Multi Jet Fusion (MJF)

Das Gleiche kann über das Multi Jet Fusion-Verfahren (MJF) gesagt werden. Auch hier ist eine sehr schlechte Oberflächenqualität erkennbar (Abbildung 5.5). Bei MJF liegt es auch an den zwei verschiedenen „Agents“, die auf das Pulverbett aufgetragen werden. Im Inneren des Bauteils wird *Fusing Agent* verwendet, um unter Einfluss des IR-Strahlers das Pulver aufzuschmelzen und im Randbereich wird *Detailing Agent* benutzt, um die Konturen genau abzugrenzen.

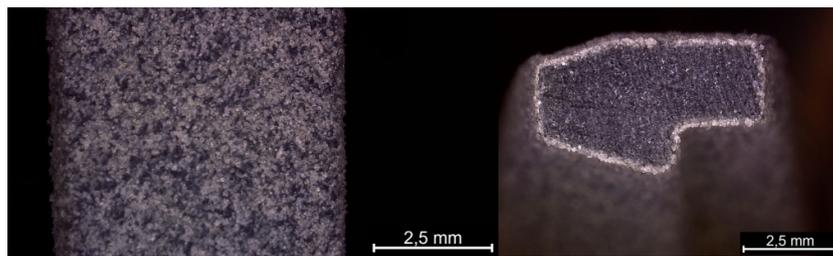


Abbildung 5.5: Im MJF-Verfahren gefertigtes TPU-Bauteil: links die Oberfläche, rechts im Schnitt

Somit fiel die Entscheidung darauf, sich für die weiteren experimentellen Untersuchungen auf die Fertigung mit dem FFF-Verfahren zu konzentrieren. In diese Entscheidung ging neben dem gewünschten Szenario maßgeblich ein, dass mit den Verfahren MJF und SLS wie dargelegt keine ausreichende Bauteilqualität erzielt werden kann und zudem kaum Auswahl bei den Materialien zur Verfügung steht.

5.2 MODELLVERSUCHE UND CHARAKTERISIERUNG

Den Anfang machen Modellversuche und eine Charakterisierung, mittels derer geklärt werden soll, mit welchen handelsüblichen flexiblen Filamenten, welche in den meisten Fällen aus thermoplastischen Urethanen bestehen, potentiell brauchbare Ergebnisse erzielbar erscheinen [Gra+22]. Die Versuche werden auf Printern des Typs PRUSA i3Mk3S und i3Mk3S+ durchgeführt. Zur Datenaufbereitung und Variation von Fertigungsparametern wird PRUSA Slicer verwendet. Es werden Testbauteile, welche in Form und Abmessungen an die Stangendichtung Trelleborg® RU2100500 angelehnt waren, gefertigt.

Als Kriterien für die Beurteilung der Filamente wurden folgende gewählt:

- Verarbeitbarkeit
- Radialkraft
- Schmelztemperatur
- Reibwert (trocken)
- Shore-A-Härte¹

Ziel war es insgesamt, möglichst nahe an den Werten einer ebenfalls untersuchten, konventionell gefertigten, Referenzdichtung zu liegen, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu haben. Daher wurden die Kriterien Radialkraft, Reibwert und Shorehärte gewählt.

Die Verarbeitbarkeit wurde betrachtet, da der Prozess bei dem im Fokus stehenden Anwendungsszenario möglichst einfach und unkritisch sein sollte.

Die Schmelztemperatur wurde als Kriterium hinzugenommen, da das im Vorwort erwähnte DFG-Vorhaben, für welches die hier beschriebenen Untersuchungen einen Teil der Basis liefern, die parallele Verarbeitung einer TPU- und einer NBR-Komponente zum Ziel hat. Da das so gefertigte zK-Bauteil komplett vulkanisiert werden soll, muss die TPU-Komponente eine ausreichend hohe Schmelztemperatur aufweisen, um den Vulkanisationsprozess unbeschadet zu überstehen.

Um eine Wertung durchführen zu können, wurde eine Bewertungstabelle, angelehnt an die VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3, erstellt (Tabelle 5.1).

¹ Das Filament Extrudr Hard D58 liegt außerhalb der Shore-A-Skala und ist deshalb mit einer Shore-D-Härte ausgeführt

Tabelle 5.1: Erste Vorversuche: Bewertungstabelle

Punkte	Verarbeitbarkeit	Segmentradialkraft in N	Schmelztemperatur in °C	Reibwert	Shore A-Härte
0	nicht gegeben	Abweichung >8	<130 oder n.b.	>0,59	Abweichung >8
1	nur sehr schlechte Qualität realisierbar	±6,1-8	130-140	0,50-0,59	±6,1-8
2	mit größeren Einschränkungen	±4,1-6	141-150	0,40-0,49	±4,1-6
3	mit Einschränkungen	±2,1-4	151-160	0,29-0,39	±2,1-4
4	gut	±2	>160	>0,29	±2

5.2.1 Dynamische Reibwerte (trocken)

In einem ersten Schritt wurden die Trocken-Reibwerte gemäß der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Die Resultate dieser Messungen sind in der Tabelle 5.2 zusammengefasst. Die Filamente sind der besseren Übersicht halber in der Regel nur nummeriert. Die Zuordnung lässt sich der Tabelle 5.2 entnehmen.

Die Untersuchung mit dem Tribometer dient nicht nur der Messung der Reibwerte, sondern hat sich auch noch in einer anderen Hinsicht als hilfreich gezeigt. So hat sowohl das Filament BASF TPS 90A, welches nicht aus TPU besteht, sondern aus SEBS (Styrol-Ethylen-Butadien-Styrol), als auch ein nachträglich untersuchtes und hier daher nicht aufgeführtes TPU-Filament, einen sehr hohen, kontinuierlichen Verschleiß aufgezeigt (siehe Abbildung 5.6). Diese Filamente sind daher nicht geeignet für die Herstellung dynamischer Dichtungen.

Auf die Aussagekraft der Trocken-Reibwerte wird im Abschnitt 5.3.4 noch näher eingegangen im Zusammenhang mit den ersten Funktionstests und den zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführten Reibwertmessungen unter geschmierten Bedingungen.

Tabelle 5.2: Trocken-Reibwerte der Referenzdichtung sowie 14 Testteilen aus unterschiedlichen Filamenten, ermittelt mit einem Tribometer Anton Paar TRB³

<i>Material</i>	<i>Bezeichnung</i>	μ
Referenz	:	0,29
Filament 01	: Polymaker Polyflex TPU 95	0,21
Filament 02	: Extrudr TPU Medium A98	0,22
Filament 03	: Extrudr TPU Semisoft A85	0,27
Filament 04	: Bendlay A96	0,46
Filament 05	: Extrudr TPU Hard D58	0,15
Filament 06	: Copper 3D MDFlex 98A	0,15
Filament 07	: Recreus Filaflex 82A	0,63
Filament 08	: BASF Ultrafuse TPU 85A	0,68
Filament 09	: BASF Ultrafuse TPU 95A	0,51
Filament 10	: BASF Ultrafuse TPS 90A	0,51
Filament 11	: Kimya TPC 91A	0,55
Filament 12	: Kimya TPU-R	0,34
Filament 13	: Fillamentum Flexfill 98A	0,12
Filament 14	: TreeD Flexmark 9 93A	0,31

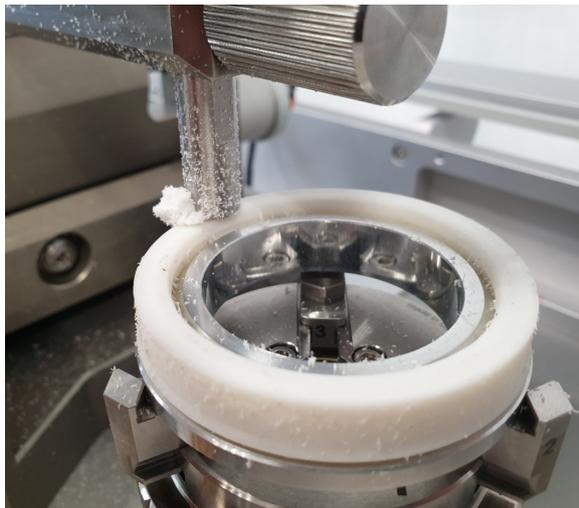


Abbildung 5.6: Sehr hoher kontinuierlicher Verschleiß beim Filament BASF TPS 90A

5.2.2 Radialkraft

Die Tabelle 5.3 zeigt die gemessenen Radialkräfte aus den Voruntersuchungen, bereits gemäß Formel 4.2 umgerechnet auf den Umfang. Die Lücken in der Tabelle sind dadurch bedingt, dass es nicht mit allen Filamenten gelang, brauchbare Bauteile herzustellen. Einige waren auch außerhalb des Messbereichs des Sensors (50 N), was einer Gesamtradialkraft von ca. 180 N entspricht.

Tabelle 5.3: Radialkräfte F_R der Test- und Referenzteile der Vorversuche in N

	<i>Exemplar 1</i>	<i>Exemplar 2</i>	<i>Exemplar 3</i>
Referenz :	38,5	43,5	43,2
Filament 01 :	72,2	4,0	65,3
Filament 02 :	102,3	88,9	130,2
Filament 03 :	74,7	-	-
Filament 04 :	>180	>180	-
Filament 05 :	132,4	-	-
Filament 06 :	-	-	-
Filament 07 :	25,8	21,0	24,3
Filament 08 :	25,4	27,2	28,3
Filament 09 :	53,3	57,3	50,8
Filament 10 :	165,4	164,0	161,1
Filament 11 :	97,2	109,6	97,2
Filament 12 :	94,7	92,2	88,2
Filament 13 :	>180	>180	>180
Filament 14 :	63,5	70,0	-

5.2.3 Auswertung

Mit den Daten wurde eine gewichtete Wertungstabelle angelegt (Abbildung a.1 im Anhang). Die sechs Filamente, die am besten abschnitten, wurden für die weiteren Untersuchungen, die auch Funktionstests auf dem Stangendichtungsprüfstand beinhalteten, ausgewählt. Es handelt sich um folgende:

- Extrudr Medium A98
- Extrudr TPU Hard D58
- BASF Ultrafuse TPU 95A
- Extrudr Semisoft A85
- Polymaker Polyflex TPU 95

- TreeD Flexmark 9 93A

5.3 ERSTE PHASE DER FUNKTIONSTESTS

Die ersten Untersuchungen additiv gefertigter Dichtungen auf dem Stangendichtungsprüfstand wurden gemäß dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Plan durchgeführt. Wenn in einem der Schritte eine signifikante Leckage, das heißt mehr als nur wenige Tropfen, wie in Abbildung 5.7 zu sehen, erkennbar war, wurde die weitere Untersuchung für das Testexemplar abgebrochen.

Wie bereits in der Beschreibung des Prüfstands erwähnt, ist eine Quantifizierung des ausgetretenen Fluids derzeit aufgrund der baulichen Ausführung der Adapterdeckel nicht möglich.



Abbildung 5.7: Leichter Fluidaustritt (optisch erkennbar unterhalb des Stangenaustritts aus der Druckkammer)

Generell wurden zunächst Nachbauten des Typs Trelleborg RU2100500-M12 getestet. Um Referenzdaten zu haben, wurde zunächst ein Paar Originaldichtungen verbaut und damit wurden die Testzyklen unter den unten beschriebenen Bedingungen durchgeführt.

Vor dem Einbau eines Testexemplars wurden folgende Daten ermittelt und dokumentiert: Innendurchmesser, Radialkraft, Shorehärte und Masse. Im Anschluss an die Messungen sind Masse, Innendurchmesser und Shorehärte erneut gemessen worden.

Die Testzyklen wurden mit folgenden Parametern gefahren: $s=100$ mm, $v=0,05$ m/s und $a=0,8$ m/s². Während des Abfahrens der Zyklen wurden per LabView die Kraft- und Temperaturdaten aufgezeichnet.

Bei den ersten Versuchen mit additiv gefertigten Dichtungen wurde nur links, d. h. antriebsseitig, eine solche Dichtung verbaut. Rechts blieb die konventionelle eingebaut.

5.3.1 *Versuchsplan*

Die ersten Tests auf dem Stangendichtungsprüfstand waren hauptsächlich qualitativer Natur, beinhalteten aber auch Messungen der Axialkraft und der Temperatur. Es ging zunächst darum festzustellen, ob additiv gefertigte Dichtungen ihre Hauptfunktion erfüllen können: die Verhinderung von Leckage. Hierzu wurde in Inkrementen von 1 MPa der Betriebsdruck vom Umgebungsdruck bis auf 5 MPa erhöht. Untersucht wurden jeweils drei Testteile, gefertigt aus den sechs Filamenten, die als Favoriten aus den Vorversuchen hervorgegangen sind.

Nach dem Befüllen und später dem Erhöhen des Betriebsdrucks wurde jeweils eine 10-minütige Wartezeit eingehalten, um eventuell auftretende Leckagen erkennen zu können. Wenn keine Leckage erkennbar war, schlossen sich an die Wartezeit jeweils 10 Testzyklen der oben beschriebenen Art an. Insgesamt lag der Stangenweg für alle Zyklen zusammen bei 12 m, womit in der ersten Phase der Prüfstandsuntersuchungen noch keine Aussagen zum Verschleißverhalten möglich waren.

Die in den nachfolgenden Diagrammen dokumentierten Axialkräfte sind die Mittelwerte nebst Fehlerindikatoren der bei den sechs mittleren von insgesamt zehn „instrokes“ gemessenen Kräfte. Mit „instroke“ ist hierbei gemäß Abbildung 4.8 das Einfahren der Stange in den Druckbehälter aus Sicht des Linearantriebs gemeint. In Tabellen wird diese Bewegung auch mit „rechts“ bezeichnet, da sich die Stange, wie in Abbildung 4.8 zu sehen, nach rechts bewegt.

Die Testteile wurden beim Einbau in den Prüfstand, wie in Abbildung 5.8 zu sehen, immer mit der ersten Markierung nach unten orientiert.

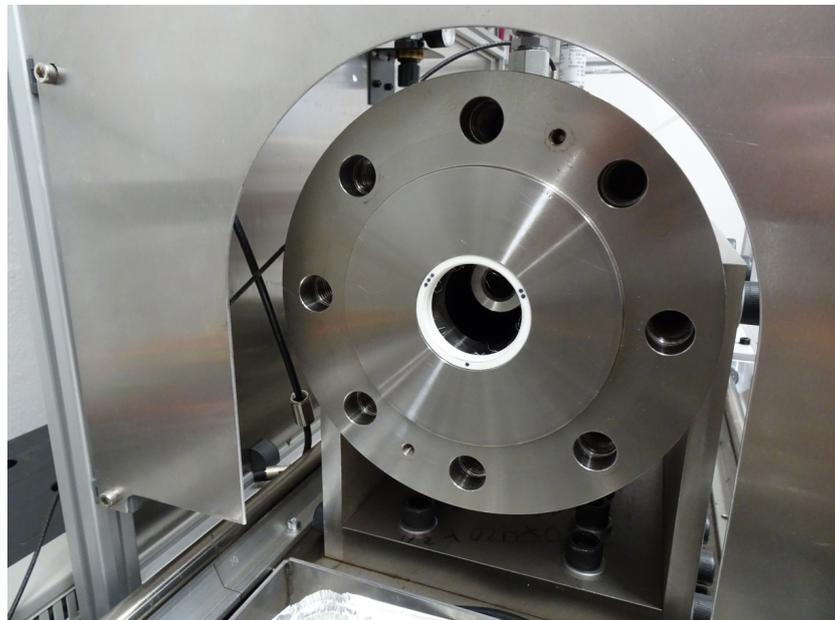


Abbildung 5.8: Eingesetztes Testteil im Adapter vor der Deckelmontage

Tabelle a.1 zeigt die Liste der Testexemplare. In den weiteren Abschnitten werden die Teile über die laufenden Nummern referenziert.

5.3.2 Arbeiten im Vorfeld der Prüfstandsversuche

Im Vorfeld der Untersuchungen auf dem Prüfstand sowie im Anschluss wurden von allen Testteilen Radialkräfte, Innendurchmesser und Masse gemessen, sowie Fotos unter dem Mikroskop in mehreren Orientierungen angefertigt. Die Tabelle 5.4 zeigt die gemessenen Radialkräfte vor den Untersuchungen, umgerechnet auf den gesamten Umfang.

Tabelle 5.4: Radialkräfte F_R der Test- und Referenzteile der ersten Versuchsreihe in N

	Exemplar 1	Exemplar 2	Exemplar 3
Referenz :	38,5	43,5	43,2
Filament 01 :	92,5	55,5	51,2
Filament 02 :	112,1	99,8	96,1
Filament 03 :	38,5	42,8	34,8
Filament 05 :	132,4	117,2	91,1
Filament 09 :	128,4	119,7	123,4
Filament 14 :	37,0	35,9	37,0

Die Teile wurden mit Markierungen im 120° -Winkel versehen. Für jede der drei Positionen wurden Bilder unter dem Mikroskop (Digitalmikroskop Leica DVM-6) angefertigt. Hierfür wurden zwei Vorrichtungen verwendet. Eine erlaubt Aufnahmen im Winkel von 30° , die andere mit Hilfe eines rechtwinkligen Spiegels den Blick von innen auf die Dichtkante. Die Abbildungen 5.9 und 5.11 zeigen diese Vorrichtungen und die Abbildungen 5.10 und 5.12 Beispiele für die damit angefertigten Fotos.

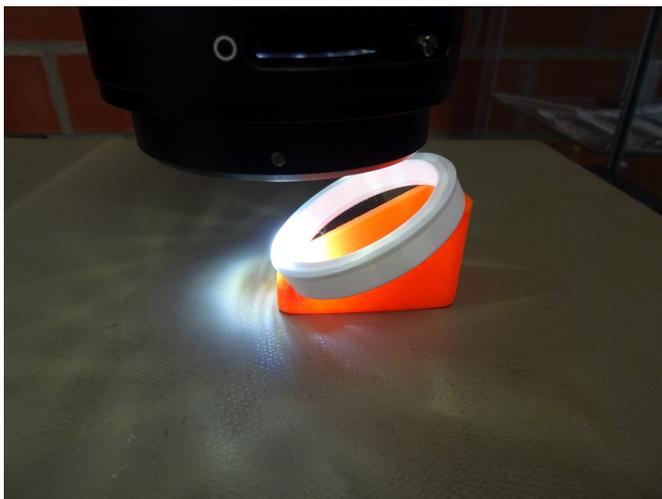


Abbildung 5.9: Mikroskop-Vorrichtung: Auflage im 30° -Winkel

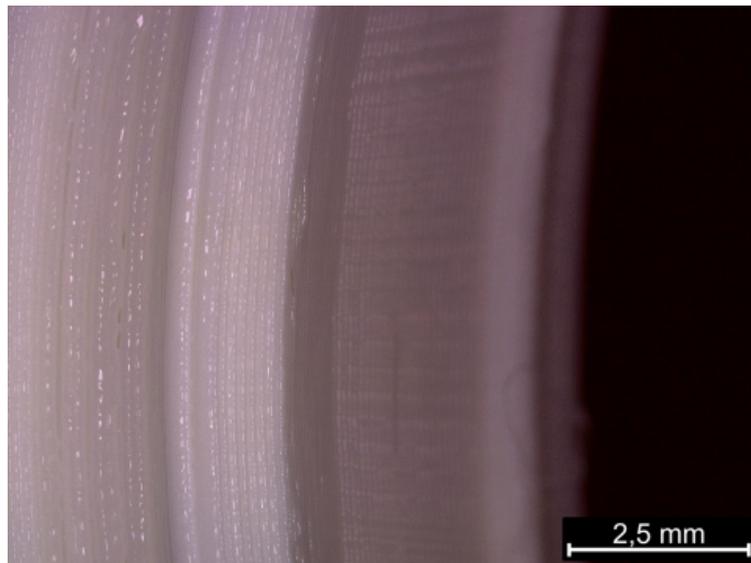


Abbildung 5.10: Beispielbild im 30°-Winkel, Druckseite oben

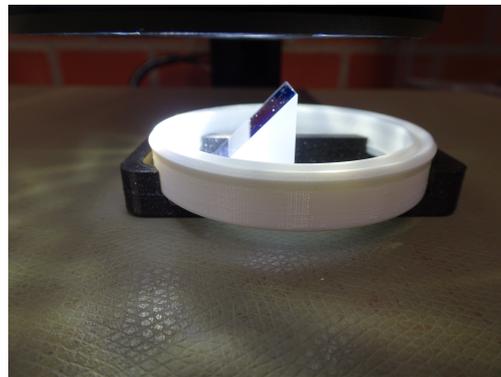


Abbildung 5.11: Mikroskop-Vorrichtung: Auflage mit Umlenk-Spiegel

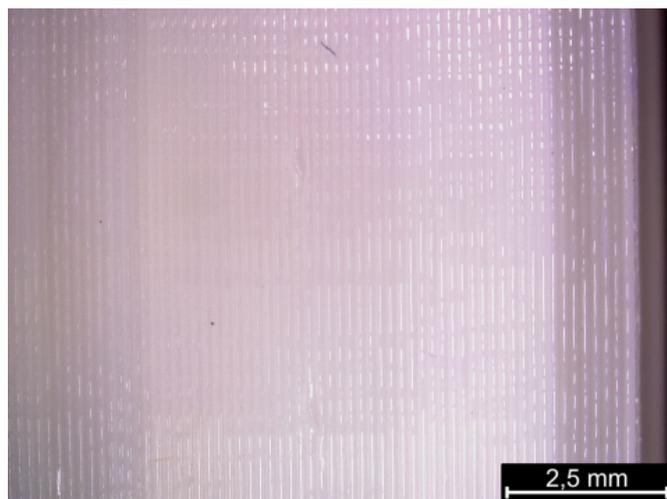


Abbildung 5.12: Beispielbild mit Spiegel

5.3.3 Dynamische Reibwerte (geschmiert)

Für die sechs, zunächst für die weitere Untersuchung auserkorenen, Filamente wurde auch der dynamische Reibwert unter geschmierten Bedingungen gemessen. Die Auflagekraft von 3 N wurde entsprechend der durchschnittlichen Radialkraft der Referenzdichtung gewählt, umgerechnet auf die Auflagebreite von 10 mm. Die Messungen wurden jeweils 30 Minuten lang durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt, wobei je Material zwei Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgten: 0,01 m/s und 0,05 m/s. Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5.5: Reibwerte mit Schmierung (Fluid: Mineralöl Mannol Hydro ISO 32 HLP)

Material	mittl. Reibwert	mittl. Reibwert
	v = 0,01 m/s	v = 0,05 m/s
Referenz Trelleborg® Zurcon® Z20	0,18	0,12
Polymaker Polyflex TPU 95	0,15	0,07
Extrudr TPU Medium A98	0,15	0,06
Extrudr TPU Semisoft A85	0,10	0,04
Extrudr TPU Hard D58	0,17	0,08
BASF Ultrafuse TPU 95A	0,07	0,03
TreeD Flexmark 9 93A	0,07	0,04

Es zeigt sich, dass die im Rahmen der Vorversuche gemessenen Trocken-Reibwerte keine Aussagekraft für die späteren Funktionstests haben. So lag dort das BASF-Filament mit Werten von 0,51 und 0,68 deutlich oberhalb des Referenzteils mit 0,29. Bei den Werten unter geschmierten Bedingungen liegt die Referenz mit einem Wert von 0,12 deutlich oberhalb des Wertes des BASF-Filaments von 0,03. Letzteres bestätigt sich bei den Axialkraftmessungen im Prüfstand. Bei einem Druck von 1 MPa liegt der durchschnittliche Wert für die Axialkraft bei zwei Referenzdichtungen bei ca. 215 N, während er bei einer Referenzdichtung (rechts eingebaut) und einer aus dem BASF-Filament gefertigten Testdichtung (links eingebaut) im Mittel bei ca. 162 N liegt.

5.3.4 Ergebnisse der ersten Prüfstandsversuchsreihe

In den im Anhang befindlichen Tabellen a.2 und a.3 sind die qualitativen Ergebnisse der ersten Funktionstests im Detail zusammengefasst.

In Tabelle a.2 ist erkennbar, dass generell ein Zusammenhang zwischen der Dichte des Bauteils und dem Ergebnis des Tests besteht. Zur Ermittlung des Füllgrads wurde die tatsächliche Masse der theoretischen Masse, die sich aus dem Volumen gemäß CAD-Datei und der

Materialdichte gemäß Datenblatt ergibt, gegenübergestellt. Es ist auch erkennbar, dass sich die Masse der Teile mit einem geringeren Füllgrad nach dem Versuch stärker erhöht hat, d. h. es ist mehr Fluid ins Bauteil eingedrungen.

Das bestätigt sich auch durch am Anschluss angefertigte Schlißproben einiger Bauteile. Abbildung 5.13 zeigt das Schlißbild des Testteils 01, welches einen Füllgrad von 91,1 % aufwies und bei der Beaufschlagung mit 1 MPa versagte.

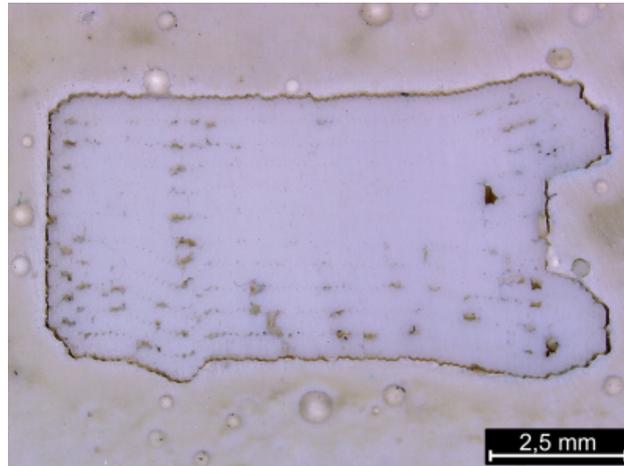


Abbildung 5.13: Schlißbild des Teils 01 nach dem ersten Funktionstest

Der unvollständige Zusammenhalt zwischen den aufgetragenen Strängen ist in einigen Bereichen deutlich sichtbar. Die Aufbaurichtung, d.h. die z-Achse bei der Fertigung, war hierbei von links nach rechts, bezogen auf die Abbildung.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5.14 das Bauteil 02, welches bei einem theoretischen Füllgrad von 103 % den ersten Funktionstest erfolgreich überstand.

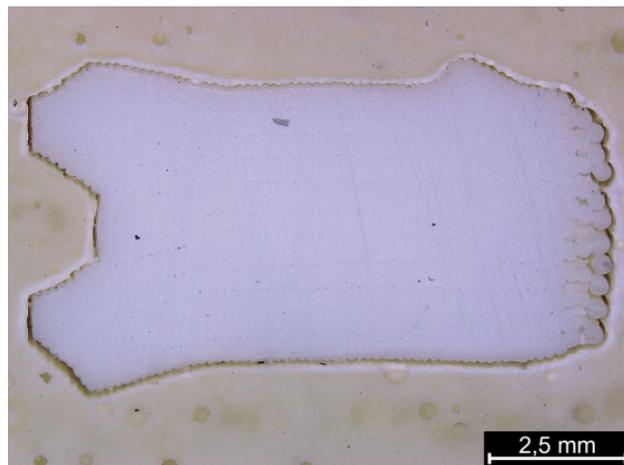


Abbildung 5.14: Schlißbild des Teils 02 nach dem ersten Funktionstest

Theoretische Füllgrade über 100 % können zwei Ursachen haben: zum einen können die Ist-Maße eines Bauteils durch erhöhtes Extrusions-

volumen von den Sollmaßen abweichen und zum anderen kann die tatsächliche Werkstoffdichte höher sein als die im Datenblatt angegebene.

Tabelle a.3 zeigt die Veränderungen der Innendurchmesser und der Radialkräfte. Die Radialkraft F_R ist hierbei bereits auf den Gesamtumfang umgerechnet gemäß Formel 4.2.

Die Innendurchmesser sind in den meisten Fällen nach dem Versuch größer als vorher und auch die Radialkräfte sind bei den meisten Testteilen höher als vor dem Versuch. Die tendenziell eher größeren Innendurchmesser dürften auf eine Aufweitung im Verlauf des Versuchs zurückzuführen sein. Die ebenfalls tendenziell höheren Werte für die Radialkraft können mit dem Eindringen des Fluids in die Testteile erklärt werden. Ein großer Teil der zuvor im Bauteil befindlichen Luft ist während des Versuchs durch eingedrungenes Fluid ersetzt worden, welches im Gegensatz zur Luft nur eine sehr geringe Kompressibilität aufweist.

Um Zusammenhänge besser erkennen zu können, wurde in der Tabelle 5.6 zusammengetragen, in welche Richtung sich Innendurchmesser, Shorehärte und Radialkraft nach den Versuchen entwickelt haben. Dort zeigt sich, dass die Veränderungen je nach Material variieren: bei den Filamenten BASF, Extrudr Medium und Extrudr Semisoft sind die Werte fast durchgängig höher geworden. Bei TreeD und Polymaker ist nur der Innendurchmesser gestiegen, während beim Extrudr Hard trotz Anstiegs der Radialkraft die Härte nur in einem Fall höher, sonst aber geringer war als vor dem Versuch.

Die Messungen der Shorehärte wurde mit analogen Hand-Durometern (Sauter HBA100-0 und HBD-100-0) durchgeführt. Für ideale Testteile wird die Toleranz mit 3 % vom Maximum angegeben. Zudem haben im vorliegenden Fall die Testteile eine ungünstigere Auflagefläche, sodass von einem eher größeren Toleranzbereich auszugehen ist. Die Aussagekraft der gemessenen Werte ist folglich niedriger anzusetzen als die anderen Messdaten.

Nachfolgend wird auf die einzelnen Materialien eingegangen, und es werden auch die mit den Testteilen gemessenen Axialkräfte denen, die mit Referenzbauteilen gemessen wurden, gegenübergestellt. Hierbei zeigen die Abbildungen 5.15 bis 5.20 jeweils den Betrag der mittleren Axialkraft beim Ausfahren des Linearantriebs, ermittelt gemäß der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Vorgehensweise.

Die jeweils links eingebaute Testdichtung erfährt dabei einen Instroke, und die rechts eingebaute, konventionelle Dichtung (Nummer 12) einen Outstroke.

Referenz

In der Abbildung 5.15 sind die Ergebnisse für die Referenzteile (drei Exemplare Trelleborg RU2100500-Z20) zu sehen.

Tabelle 5.6: Änderungen einiger Werte nach Funktionstest

Material	Nr.	d_i	F_R	Shorehärte
TreeD Flexmark 9	01	-	+	-
BASF TPU95	02	+	+	+
BASF TPU95	03	=	+	+
BASF TPU95	04	+	+	+
Extrudr Hard	05	+	+	-
Extrudr Hard	06	+	+	+
Polymaker TPU95	07	+	-	-
Polymaker TPU95	08	+	+	=
Extrudr Semisoft	09	+	+	+
Extrudr Semisoft	10	+	+	+
TreeD Flexmark 9	15	-	+	-
TreeD Flexmark 9	16	=	+	=
Polymaker TPU95	17	+	+	=
Extrudr Semisoft	18	=	+	=
Extrudr Medium	19	+	+	+
Extrudr Medium	20	+	+	+
Extrudr Medium	21	+	+	+
Extrudr Hard	22	=	+	-

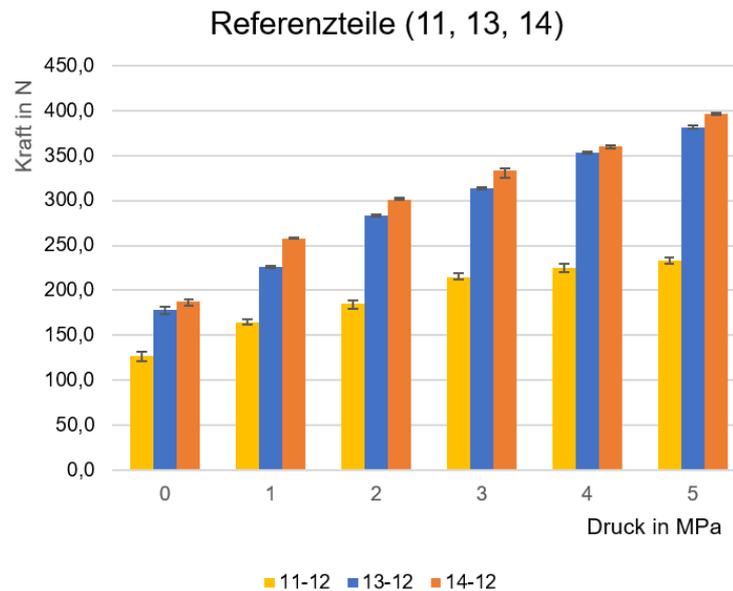


Abbildung 5.15: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20

BASF TPU95

Abbildung 5.16 zeigt die Ergebnisse für die Teile aus dem Filament BASF Ultrafuse TPU 95A und der Referenzteile. Alle drei Testteile konnten ohne erkennbare Leckage bis 5 MPa getestet werden. Die Füllgrade sind bereits mit den für die ersten Versuchsteile verwendeten Werten sehr hoch, sodass für die weiteren Versuche keine signifikanten Änderungen an den Fertigungsparametern vorgenommen werden müssen.

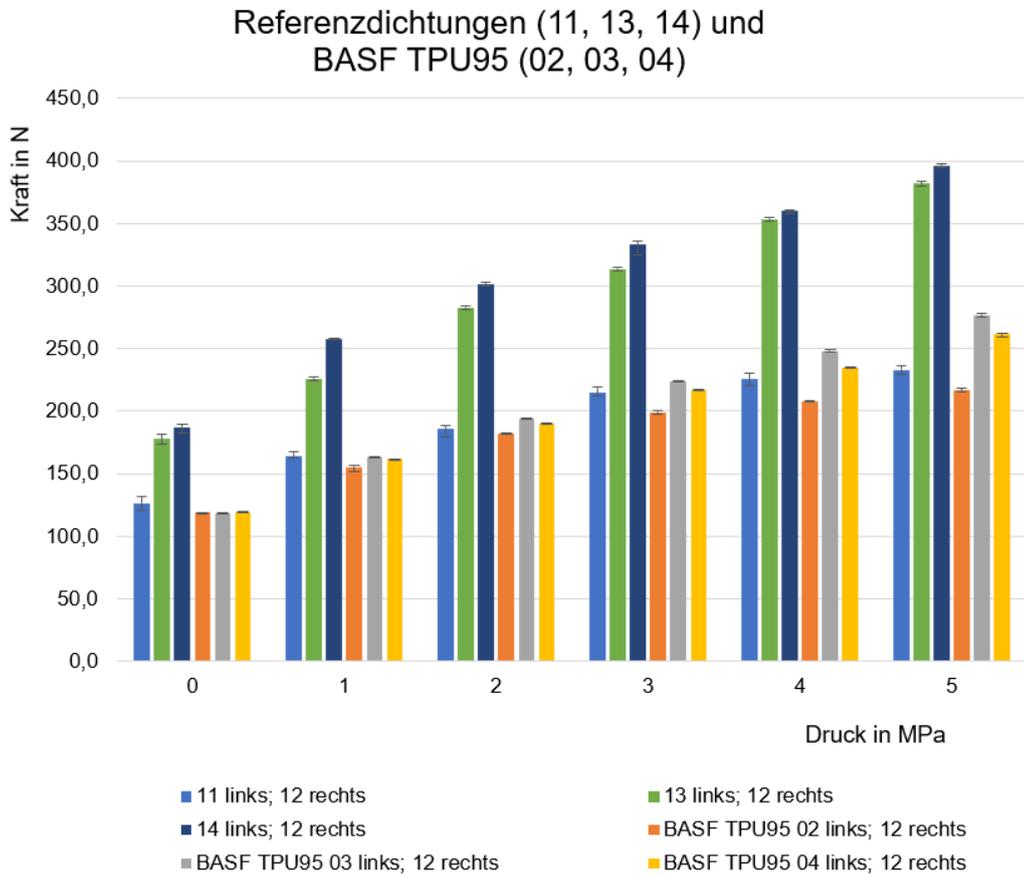


Abbildung 5.16: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus BASF TPU95

Extrudr Hard D58

Abbildung 5.17 zeigt die Ergebnisse für die Teile aus dem Filament Extrudr Hard D58 und der Referenzteile. Zwei der drei Testteile konnten ohne erkennbare Leckage bis 5 MPa getestet werden, während die Untersuchung beim dritten Exemplar bereits bei Umgebungsdruck abgebrochen werden musste. Die Füllgrade waren noch zu gering und trotzdem waren die Radialkräfte bereits deutlich höher als bei der Referenz. Ein optimierter Füllgrad durch Erhöhung des Extrusionsfaktors wird die Radialkräfte noch höher ansteigen lassen.

In im Nachgang durchgeführten Versuchen mit zweiteiligen Kompakt- ringen (Referenz: SKF®PTB) mit einem NBR-Element, welche im Rahmen des im Vorwort erwähnten DFG-Projekts untersucht wurden, waren die Testteile aus diesem Filament bereits mit den ersten Parametern nicht montierbar, da der Einbau dieses Dichtungstyps eine größere elastische Verformung erforderlich macht.

Referenzdichtungen (11, 13, 14) und Extrudr Hard (05, 06; 22: Versagen nach 0 MPa)

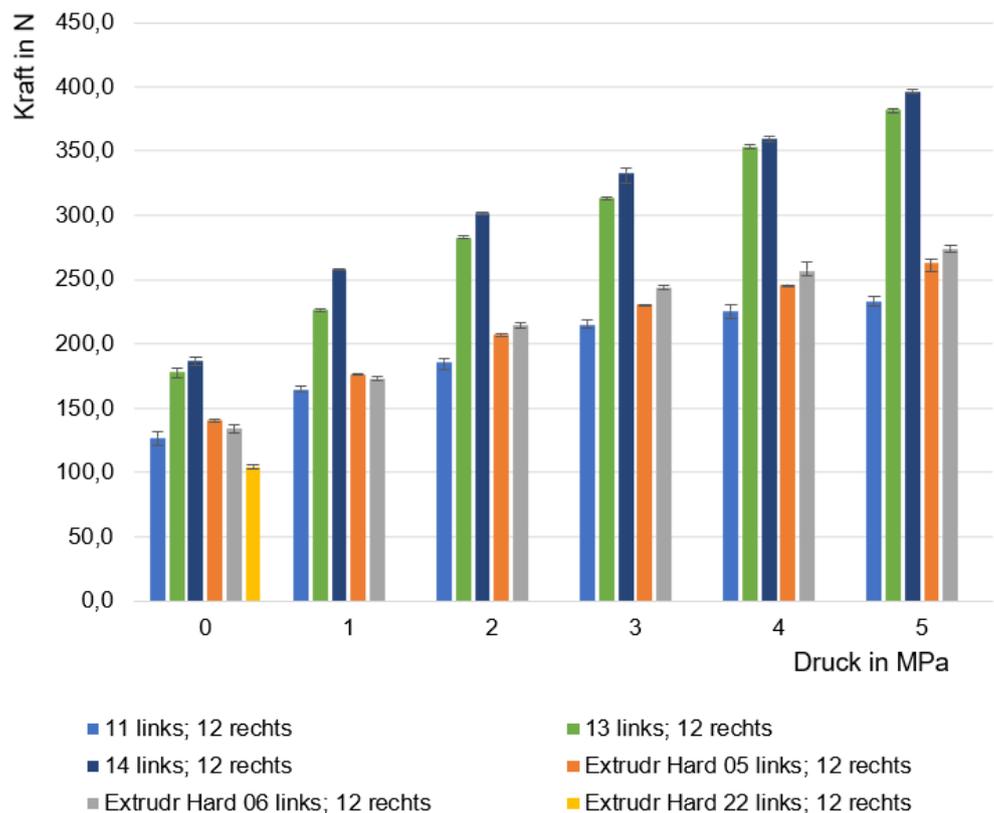


Abbildung 5.17: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus Extrudr Hard D58

Polymaker TPU95

Abbildung 5.18 zeigt die Ergebnisse für die Teile aus dem Filament Polymaker TPU 95A und der Referenzteile. Alle drei Testteile konnten ohne erkennbare Leckage bis 5 MPa getestet werden.

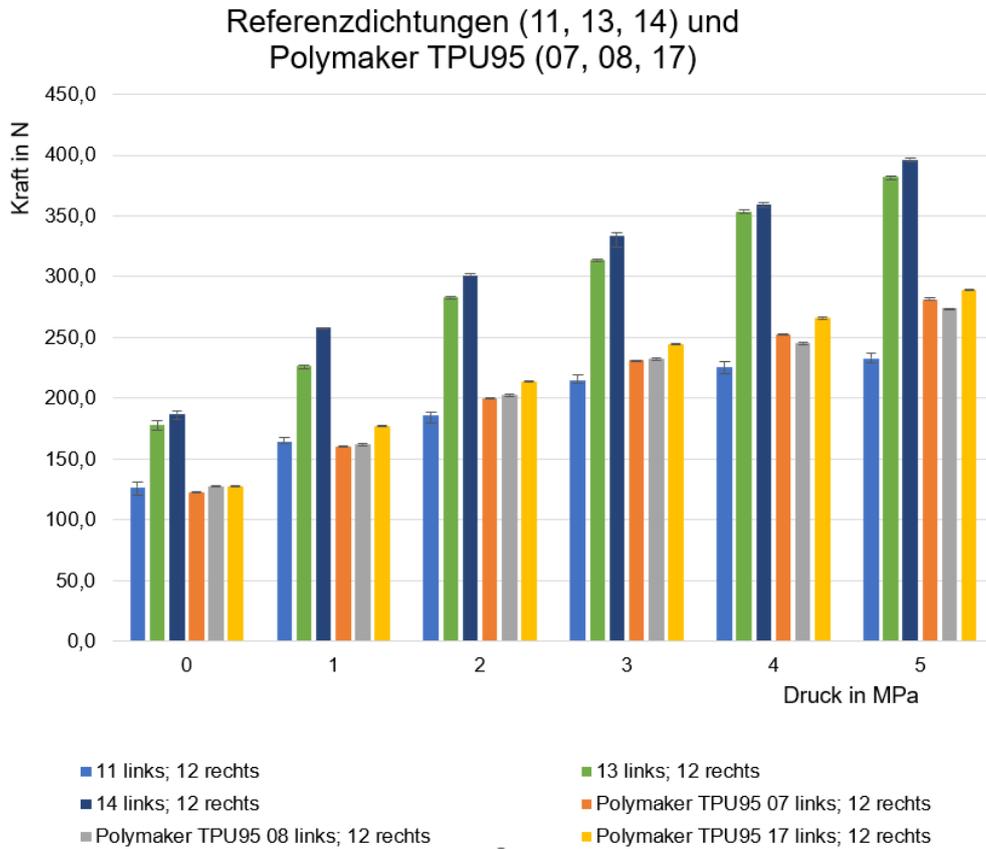


Abbildung 5.18: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus Polymaker TPU 95

Extrudr Semisoft A85

Die Untersuchungen mussten bei allen drei Exemplaren bei 1 MPa abgebrochen werden.

Extrudr Medium A98

Abbildung 5.19 zeigt die Ergebnisse für die Teile aus dem Filament Extrudr Medium und der Referenzteile. Ein Testteil konnten ohne erkennbare Leckage bis 5MPa getestet werden. Bei den beiden anderen musste die Untersuchung bei 2 MPa abgebrochen werden.

Referenzdichtungen (11, 13, 14) und Extrudr Medium
(19; 20: Versagen nach 2 MPa, 21: Versagen nach 1 MPa)

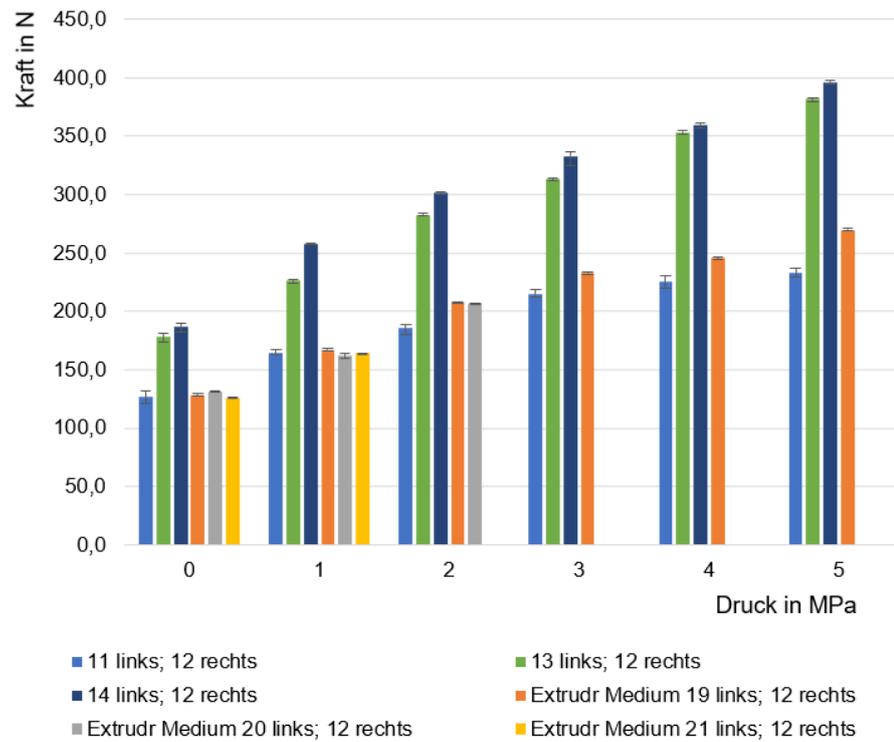


Abbildung 5.19: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus Extrudr Medium

TreeD Flexmark 9 93A

Abbildung 5.20 zeigt die Ergebnisse für die Teile aus dem Filament TreeD Flexmark 9 und der Referenzteile. Bei zwei der drei Testteile musste die Messung bei 1 MPa abgebrochen werden. Das dritte Exemplar konnte ohne erkennbare Leckage bis 5 MPa getestet werden.

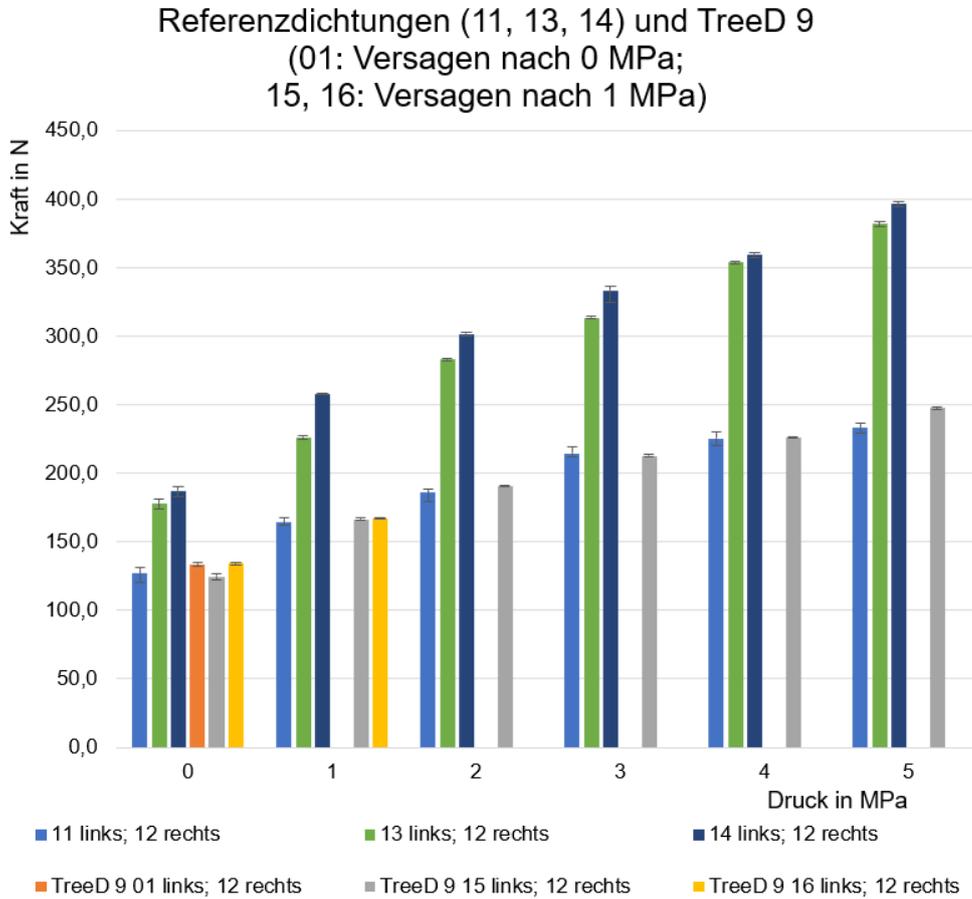


Abbildung 5.20: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus TreeD Flexmark 9

5.3.5 Auswertung

Die erste Testreihe hat insbesondere die Bedeutung des Füllgrades für die Funktionserfüllung deutlich gemacht. Der Vergleich der Bauteilmasse mit der theoretischen Masse bei 100 % Füllgrad ist von nun an ein wichtiges Qualitätskriterium im Vorfeld weiterer Versuche.

Die Testteile aus den Filamenten BASF TPU95 und Polymaker TPU95 haben alle den ersten Funktionstest erfolgreich durchlaufen und werden weiter betrachtet. Beim Polymaker-Filament haben alle Testteile ihre Funktion erfüllt, obwohl der Füllgrad noch deutlich unter 100 % lag. Mit einem besseren Füllgrad sollte also bei den künftigen Versuchen noch ein höherer Betriebsdruck realisierbar sein.

Die beiden Teile aus dem Extruder Medium Filament, die bei 2 MPa versagt haben, hatten einen Füllgrad unter 90 %. Das erfolgreich getestete Exemplar lag bei 93,35 %. Das Filament soll bei weiteren Versuchen mit optimierten Fertigungsparametern weiter getestet werden.

Das Gleiche gilt für die Filamente Extruder Semisoft und TreeD Flexmark 9. Gleichwohl gab es bei Teilen aus beiden Filamenten auch bei Füllgraden von über 90 % Abbrüche, während zum Beispiel ein Testteil aus dem Polymaker Filament bei fast identischem Füllgrad erfolgreich bis 5 MPa getestet werden konnte.

Das Filament Extruder Hard D58 wurde in der zweiten Phase der Versuche nicht mehr berücksichtigt. Es hat sich als zu hart erwiesen, was zu einer sehr hohen Radialkraft und bei anderen Dichtungstypen auch zu nicht gegebener Montierbarkeit führen kann. Wie bereits erwähnt, war dies bei Testteilen, basierend auf der Referenz SKF® PTB, der Fall.

Am Ende wurden somit folgende fünf Filamente für die eingehendere Untersuchung in der zweiten Phase der Funktionstests ausgewählt:

1. Extruder Medium
2. BASF TPU 95
3. Extruder Semisoft
4. Polymaker TPU95
5. TreeD Flexmark 9

Der Vergleich von Mikroskopbildern vor und nach der ersten Testreihe ergab keinen sichtbaren Verschleiß. Abbildung 5.21 zeigt das Testteil 02 vor dem Testlauf (links) und danach (rechts). Abgesehen von Schmutzpartikeln ist kein Unterschied erkennbar.

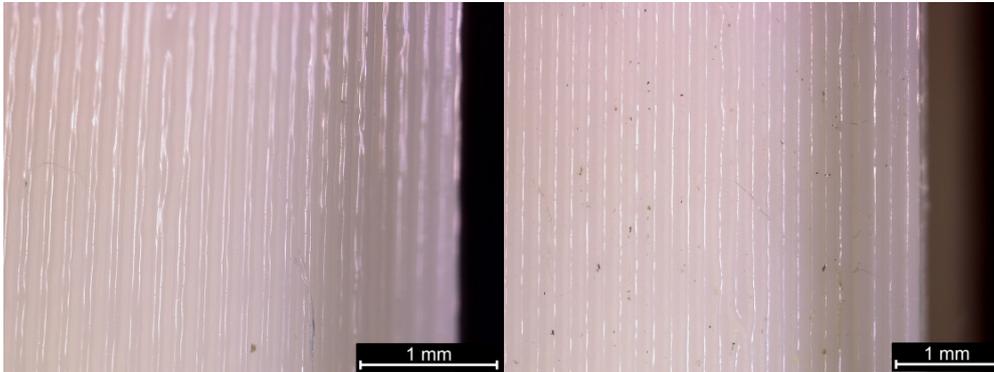


Abbildung 5.21: Mikroskopbild mit Prisma - Testteil 02 vor dem Test (links) und danach (rechts)

5.4 ZWEITE PHASE DER FUNKTIONSTESTS

Für die zweite Phase der Tests auf dem Stangendichtungsprüfstand wurden die Fertigungs-Parameter der Filamente weiter optimiert, insbesondere im Hinblick auf den Füllgrad. Hierzu wurde zusätzlich zu der Dichteangabe aus den Datenblättern bei den fünf weiter betrachteten Filamenten auch noch die Dichte durch Berechnung aus der Masse eines 1000 mm-Teststrangs und dem Volumen ermittelt. Dadurch konnten Abweichungen der tatsächlichen Dichte von den Datenblattangaben beziffert werden, und die Füllgradangaben waren präziser als in der ersten Testphase.

Tabelle 5.7: Liste der Testteile für die zweiten Funktionstests

Material	Nr.	d_i in mm	F_R in N	Masse in g	Füllgrad in %
Extrudr Medium	29	49,44	176,3	9,532	98,11
Extrudr Medium	30	49,44	184,7	9,616	98,97
Extrudr Medium	31	49,44	168,0	9,558	98,37
BASF TPU95	32	49,43	-	9,235	98,65
BASF TPU95	33	49,37	96,9	9,242	98,73
BASF TPU95	34	49,41	92,5	9,272	99,05
Extrudr Semisoft	35	49,47	83,1	9,254	98,86
Extrudr Semisoft	36	49,56	82,4	9,306	99,41
Extrudr Semisoft	37	49,46	79,1	9,355	99,94
Polymaker TPU95	38	49,52	102,7	9,866	102,27
Polymaker TPU95	39	49,49	93,2	9,835	101,95
Polymaker TPU95	40	49,58	84,5	9,803	101,62
TreeD Flexmark 9	44	49,32	90,7	10,142	99,79
TreeD Flexmark 9	45	49,23	95,1	10,232	100,68
TreeD Flexmark 9	46	49,22	89,6	10,231	100,67

Tabelle 5.7 zeigt die Daten der Testteile. Die fehlende Radialkraft bei Teil 32 ist auf ein temporäres Problem mit der Messeinrichtung zurückzuführen, weshalb der in dem Fall gemessene Wert wahrscheinlich fehlerhaft war. Er ist daher nicht mit aufgeführt.

Die Vorarbeiten wurden wie im Vorfeld der ersten Testreihe durchgeführt. Allerdings wurde in der zweiten Phase auf die Anfertigung von Mikroskopbildern und die Messung der Shorehärte verzichtet. Lediglich im Anschluss an erfolgreiche Tests wurden Fotos unter dem Mikroskop angefertigt, um eventuelle Verschleißspuren erkennen und dokumentieren zu können.

5.4.1 *Versuchsplan*

Der Ablauf der Versuche in der zweiten Phase unterschied sich von der ersten Phase insbesondere dadurch, dass bis an die Grenze der Prüfstandsspezifikation, d. h. bis 15 MPa, getestet wurde.

In dieser zweiten Phase wurde der Ablauf in zwei Punkten an der im Kapitel 4 bereits erwähnten Industrie-Testnorm für Stangendichtungen ISO 7986 orientiert: bei der Geschwindigkeit von 0,05 m/s und dem Druck von 6,3 MPa für den längeren Test handelt es sich jeweils um den niedrigsten von drei Vorgabewerten der Norm.

Nach dem Einbau eines Testteils wurde zudem eine Ruhezeit von mindestens acht Stunden eingehalten. Danach war das Vorgehen wie in der ersten Phase, allerdings mit Druckintervallen von 2,5 MPa und jeweils 100 Zyklen bei jedem Druck.

Ein weiterer Unterschied zur ersten Versuchsreihe bestand darin, dass sich bei erfolgreichem Test bis 15 MPa noch ein längerer Testlauf mit 1000 Zyklen bei 6,3 MPa anschloss. Der Gesamtweg betrug somit bei vollständigem Durchlauf des Programms 320 m.

Zudem soll nach Abschluss der Testreihe beispielhaft mit einem Exemplar, welches die Versuchsreihe erfolgreich überstanden hat, ein Langzeittest durchgeführt werden. Zielmarke sollen 25.000 Zyklen bei einem Druck von 6,3 MPa sein, was einer Gleitstrecke von 5 km entspricht. Ziel dieses Dauertests ist es festzustellen, ob eine additiv gefertigte Dichtung auch nach einem längeren Einsatz noch funktionieren kann, oder ob sie zwischenzeitlich versagt.

5.4.2 *Ergebnisse der zweiten Prüfstandsversuchsreihe*

Die Tabelle 5.8 zeigt zusammengefasst die Änderungen der Innendurchmesser, der Radialkräfte sowie der Masse, die nach Versuchsende festgestellt wurden. In der letzten Spalte ist das qualitative Ergebnis der zweiten Testreihe aufgeführt, wobei die Symbole folgende Bedeutung haben:

- ++ Der Versuch endet ohne erkennbaren Fluidaustritt
- + Leichter Fluidaustritt (siehe Abbildung 5.7)
- Der Versuch musste abgebrochen werden

Im Falle eines Versuchsabbruchs ist dann zudem der Druck in MPa angegeben, bei dem abgebrochen werden musste. Die detaillierten Tabellen und Diagramme befinden sich im Anhang.

Abbildung 5.22 zeigt exemplarisch die Auswirkung der Optimierung der Fertigungsparameter am Beispiel der Testteile aus dem Filament Polymaker TPU 95. Bei den Teilen aus der ersten Testreihe lag der

theoretische Füllgrad zwischen 91,24 % und 92,12 %, während es bei denen aus der zweiten Testreihe etwas mehr als 100 % waren.

Die dichteren Bauteile resultieren in einer höheren Radialkraft und folglich auch Axialkraft.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der zweiten Prüfstandsversuchsreihe: Änderungen des Innendurchmessers, der Radialkraft und der Masse nach dem Versuch

Material	Nr.	Δd_i in %	ΔF_R in %	Δm in %	Ergebnis
Extrudr Medium	29	$\pm 0,00$	-6,17	+1,00	+
Extrudr Medium	30	-0,02	-8,25	+0,92	+
Extrudr Medium	31	-0,06	+11,88	+0,54	+
BASF TPU95	32	+0,06	-	+0,69	+
BASF TPU95	33	+0,12	+0,71	+0,68	++
BASF TPU95	34	$\pm 0,00$	-0,78	+0,68	+
Extrudr Semisoft	35	+0,12	-5,68	+1,40	+
Extrudr Semisoft	36	+0,12	-1,32	+1,33	-(5)
Extrudr Semisoft	37	+0,22	+11,47	+1,36	+
Polymaker TPU95	38	+0,02	+0,35	+0,46	++
Polymaker TPU95	39	-0,12	+22,57	+0,34	+
Polymaker TPU95	40	-0,20	+31,33	+0,40	+
TreeD Flexmark 9	44	-0,06	-1,60	+0,46	+
TreeD Flexmark 9	45	+0,04	-3,44	+0,62	+
TreeD Flexmark 9	46	+0,37	-1,62	+0,64	-(10)

Referenzdichtungen (11, 13, 14) und Testteile aus Polymaker TPU95 (07, 08, 17) aus erster Testreihe, sowie (38, 39, 40) aus zweiter Testreihe, alle bei 5 MPa

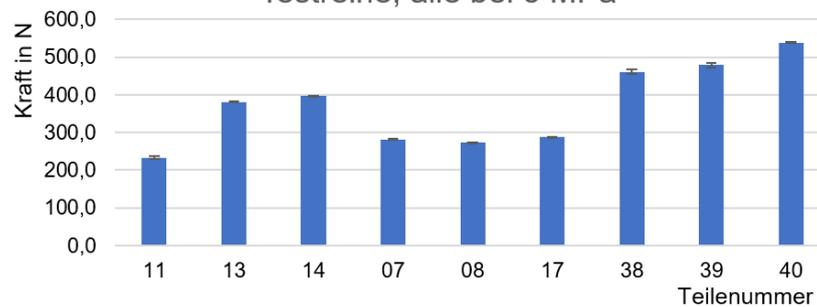


Abbildung 5.22: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Referenzteile Trelleborg RU2100500-Z20 - Testteile aus Polymaker TPU 95 - erste und zweite Testreihe im Vergleich bei 5 MPa

Die Axialkraftverläufe über den Druck kann man in den Abbildungen 5.23 bis 5.27 erkennen. Bei den meisten Testteilen lagen die Kräfte unterhalb der Referenzpaarung (14 links; 13 rechts). Lediglich bei den Teilen aus dem Filament Polymaker Polyflex 95A waren die Werte im gleichen Bereich wie die Referenz.

Auffällig ist, dass insbesondere bei höheren Drücken die Axialkraft bei den meisten Testteilen nicht im gleichen Maße ansteigt wie bei der Referenz. Eine stagnierende Axialkraft könnte auf ein bevorstehendes Versagen im Falle einer weiteren Zunahme des Betriebsdrucks hinweisen. Am Beispiel der Testteile aus dem Filament Extrudr Medium (Abbildung 5.23) ist eine solche Stagnation ab 10 MPa erkennbar.

Auch bei den Teilen aus dem TreeD-Filament ist eine solche Stagnation bei den beiden Exemplaren, die den Test erfolgreich durchlaufen haben, erkennbar. Ein Teil versagte bereits bei 10 MPa, ohne dass vorher ein geringerer Kraftanstieg erkennbar war.

Bei dem Filament BASF TPU95 trat eine Stagnation nur bei einem Testteil (34) auf. Die Teile aus dem Material Extrudr Semisoft weisen ab 10 MPa einen deutlich geringeren Kraftanstieg auf.

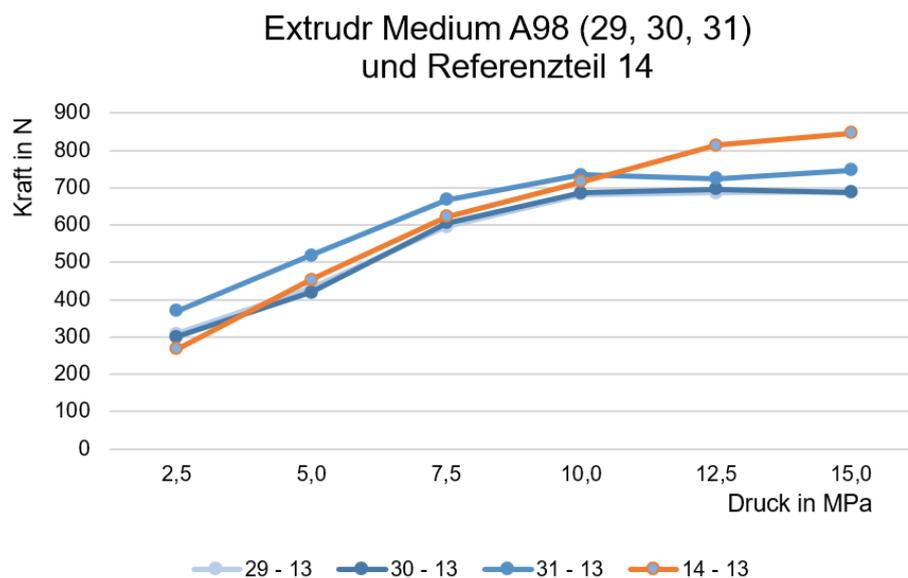


Abbildung 5.23: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Testteile aus Extrudr Medium -zweite Testreihe 2,5 bis 15 MPa

Die in einigen Fällen generell niedrigeren Werte der Axialkräfte bei den Testteilen und die erkennbare Stagnation bei steigendem Betriebsdruck kann mit einer höheren Kompressibilität der FFF-gefertigten Teile und somit einer niedrigeren Radialkraft im eingebauten Zustand zusammenhängen. Wie in Schliffbildern (zum Beispiel Abbildung 5.14) sichtbar, haben die Teile nur in der Theorie einen Füllgrad von ungefähr 100 %. Es ist in jedem Fall noch Porosität erkennbar. Die Versuche haben gezeigt, dass dies der Funktionserfüllung nicht entgegen steht, allerdings kann das bei noch höheren Betriebsdrücken anders sein.

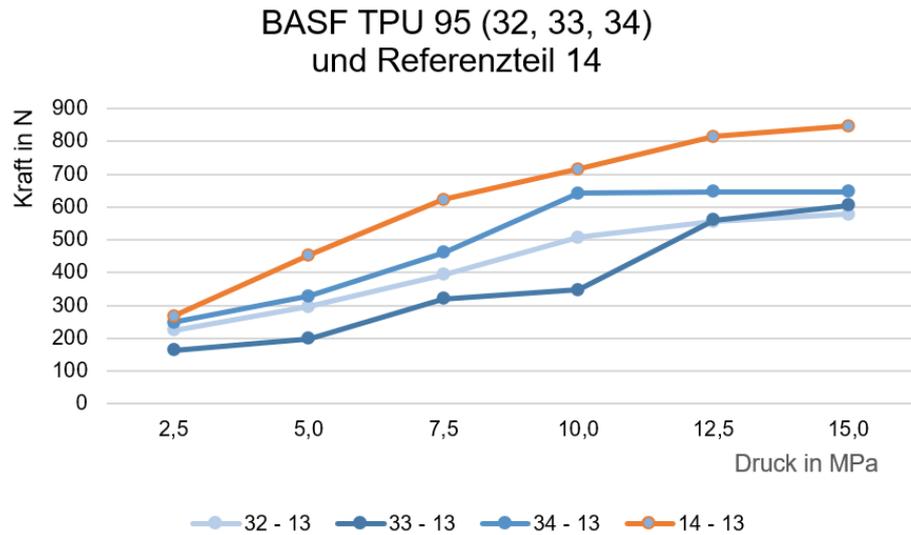


Abbildung 5.24: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Testteile aus BASF TPU95 -zweite Testreihe 2,5 bis 15 MPa

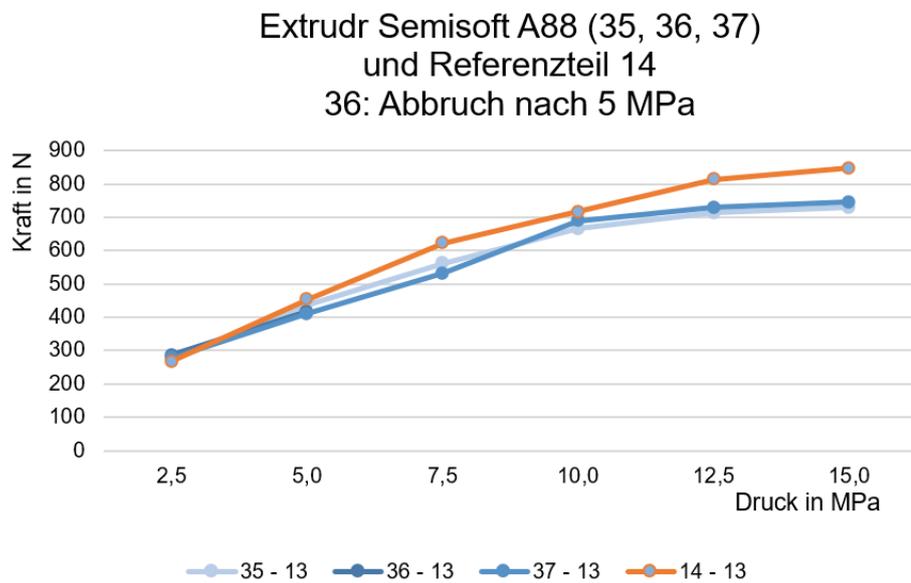


Abbildung 5.25: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Testteile aus Extrudr Semisoft -zweite Testreihe 2,5 bis 15 MPa; das Teil 36 versagte bei 7,5 MPa

Eine weitere mögliche Erklärung der niedrigeren Axialkraftwerte der Testteile im Vergleich mit Referenzteilen ist, dass die besondere Oberflächentextur der FFF-gefertigten Bauteile eine bessere Schmierstoffversorgung im Kontaktbereich verursachen, die zu geringeren Reibwerten und folglich auch Kräften führt.

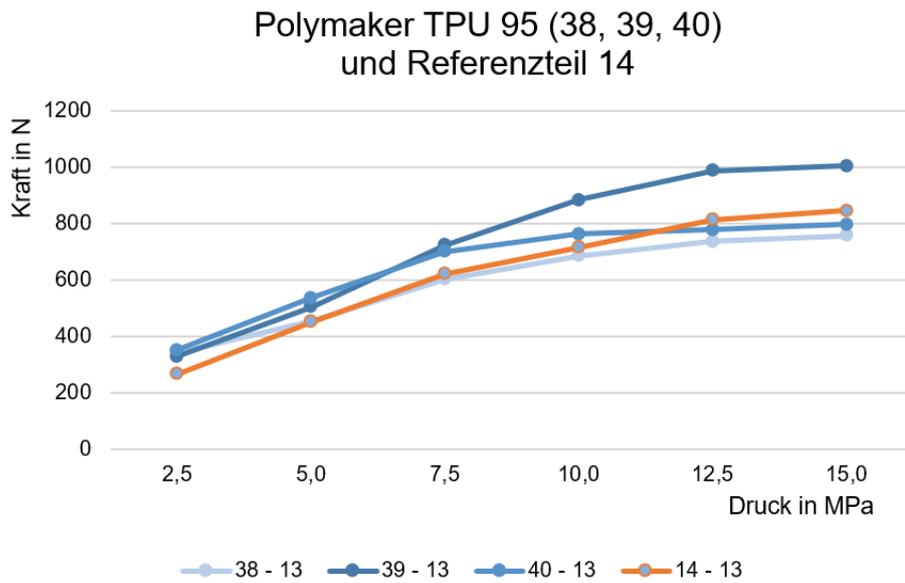


Abbildung 5.26: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Testteile aus Polymaker TPU95 -zweite Testreihe 2,5 bis 15 MPa

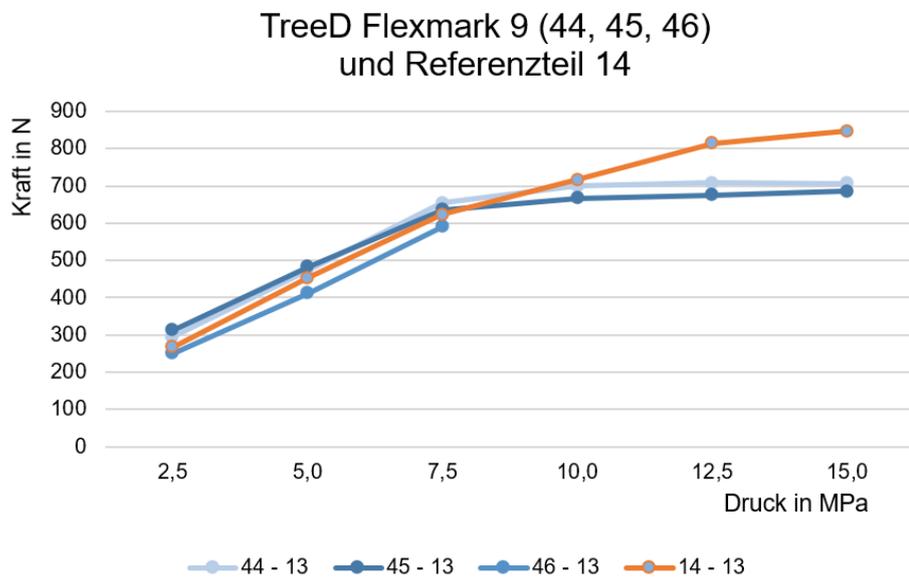


Abbildung 5.27: Axialkraft (Betrag) beim Ausfahren - Testteile aus TreeD Flexmark 9 -zweite Testreihe 2,5 bis 15 MPa; das Teil 46 versagte bei 10 MPa

5.4.3 Ergebnis eines Dauertests

Das Exemplar 33 aus dem Filament BASF TPU 95 wurde für den Test auserkoren. Es hat den Dauertest ohne Versagen überstanden. Es waren lediglich einzelne Tropfen auf der Adapterplatte zu sehen, aber der Druck wurde gehalten.

Zusammen mit dem zuvor durchgeführten Programm der zweiten Testreihe ergibt sich eine Gesamtgleitstrecke von 5.320 m. Abbildung 5.28 zeigt die Dichtungposition 1 vor und nach Absolvierung des Dauertests im 30°-Winkel von der Druckseite betrachtet. Erkennbar ist zunächst, dass sich das Bauteil im Lauf des Tests verfärbt hat.

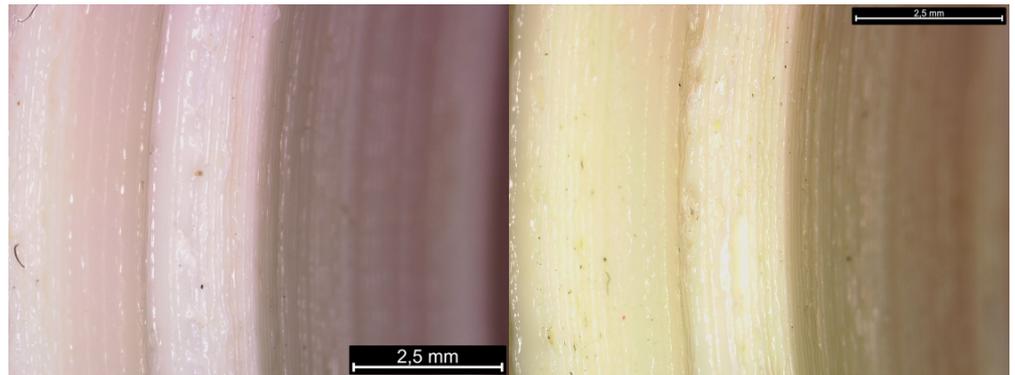


Abbildung 5.28: Mikroskopbilder Teil 033 - vor dem Dauertest (links) und danach (rechts) - 30° Druckseite, Pos. 1

Es sind, wie auch im 30°-Winkel von der Luftseite gesehen, keine Änderungen sichtbar.

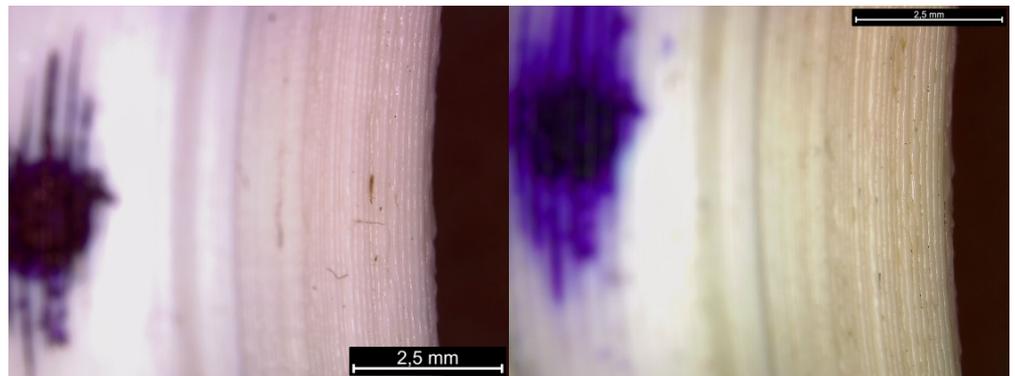


Abbildung 5.29: Mikroskopbilder Teil 033 - vor dem Dauertest (links) und danach (rechts) - 30° Luftseite, Pos. 1

Bei dem stärker vergrößerten Bild, welches mit dem Prisma einen direkten Blick auf die Innenseite erlaubt, ist ebenfalls keine Abrasion oder Oberflächenzerrüttung direkt erkennbar. (Abbildung 5.30).

Das gilt auch für die Bilder, die auf die gleiche Weise in den Positionen 2 und 3 erzeugt wurden (Abbildungen 5.31 und 5.32).

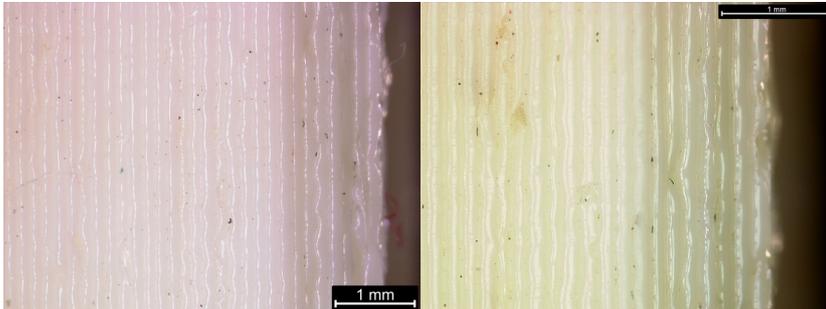


Abbildung 5.30: Mikroskopbilder Teil 033 - vor dem Dauertest (links) und danach (rechts) - Prisma, fein, Pos. 1

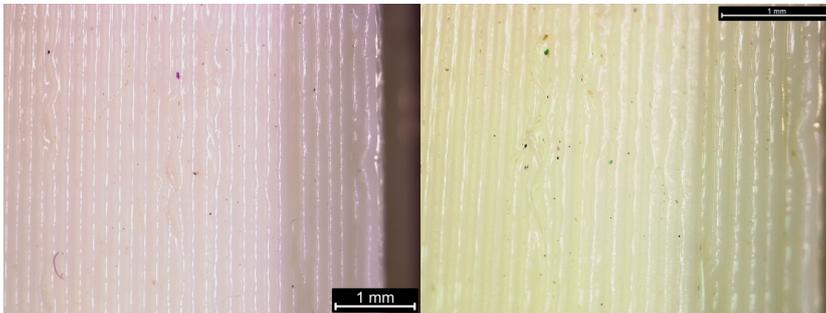


Abbildung 5.31: Mikroskopbilder Teil 033 - vor dem Dauertest (links) und danach (rechts) - Prisma, fein, Pos. 2

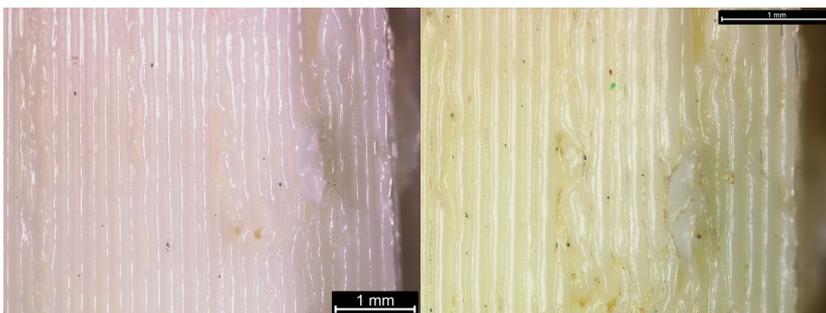


Abbildung 5.32: Mikroskopbilder Teil 033 - vor dem Dauertest (links) und danach (rechts) - Prisma, fein, Pos. 3

Die Belastung der Bauteile wirkt senkrecht zu den Schichten. Eine solche Belastung kann zu Delaminationen führen. Teile, welche mit dem FFF-Verfahren gefertigt werden, haben generell anisotrope Eigenschaften und sind in Z-Richtung (bezogen auf das Druckbett) weniger belastbar als in der XY-Ebene, also innerhalb der Schichten. Eine solche Delamination ist auf den Bildern nicht erkennbar. Die Funktionserfüllung war bis zum Ende des Dauertests gegeben.

Abschließend wurde noch eine Schliiffprobe des Bauteils in der Position 1 erzeugt. Abbildung 5.33 zeigt diese Probe in Gänze neben dem Schliiffbild eines anderen Bauteils aus dem gleichen Werkstoff (Teil 02), während in Abbildung 5.34 die selben Bauteile in einer stärker vergrößerten Detailansicht der Dichtkanten abgebildet sind. Das Bauteil 02 wurde vor der Anfertigung der Schliiffprobe nicht auf dem Prüfstand untersucht.

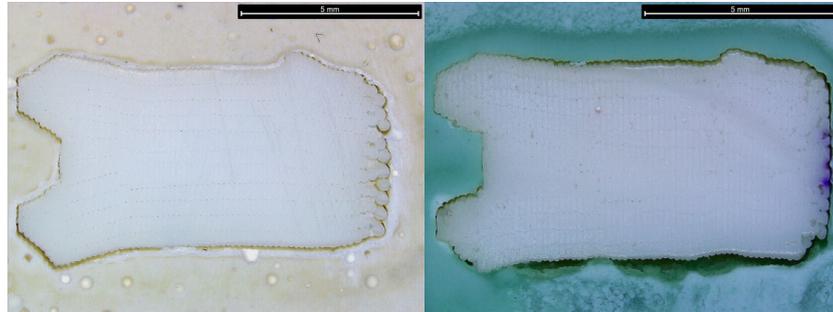


Abbildung 5.33: Schliiffbilder Teil 02 (links) und Teil 033 nach dem Dauertest (rechts)

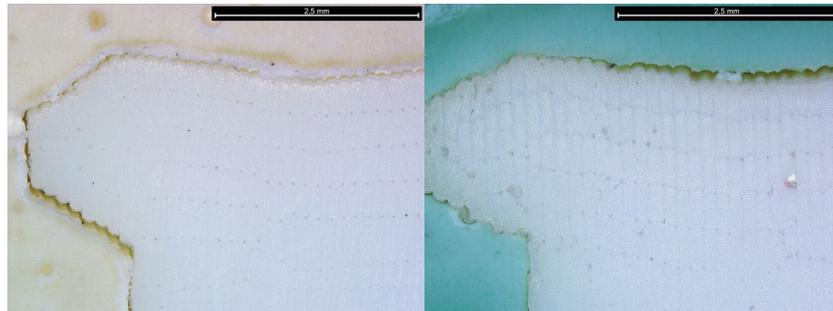


Abbildung 5.34: Schliiffbilder Teil 02 (links) und Teil 033 nach dem Dauertest (rechts) - Detailansicht Dichtkante

5.4.4 Auswertung

Die zweite Versuchsreihe auf dem Stangendichtungsprüfstand, durchgeführt mit Bauteilen, die mit optimierten Parametern gefertigt wurden, sind insgesamt sehr erfolgreich verlaufen, wie in der Tabelle 5.8 zu erkennen.

Mit zwei Ausnahmen konnten alle Testteile bis zum maximalen Betriebsdruck von 15 MPa geprüft werden und haben auch den anschließenden längeren Test ohne Versagen überstanden. Zudem haben sich Annahmen, die nach der ersten Testreihe getroffen wurden, bestätigt. So ist der Massenanstieg bei den jetzt dichteren Bauteilen erwartungsgemäß nur noch gering. Die gemessenen Änderungen könnten auch auf äußerlich anhaftendes Fluid zurückzuführen sein.

Auch die Annahme, dass ein Anstieg der Radialkraft auf eingedrungenes Fluid zurückgeführt werden kann, bestätigt sich durch die deutlich kleineren Änderungen, die nach der zweiten Testreihe festgestellt wurden.

Der mit der Testdichtung 33 aus dem Filament BASF Ultrafuse TPU 95A durchgeführte Dauertest mit einer Gesamt-Gleitstrecke von 5,32 km hat zudem gezeigt, dass auch ein längerer Einsatz solcher additiv gefertigter Dichtung realistisch ist. Somit könnte die im Vorfeld angedachte, temporäre Nutzung von in kurzer Zeit mit einfachen Mitteln gefertigten Dichtungen zur Überbrückung von langen Lieferzeiten konventionell gefertigter Dichtungen erfolgreich möglich sein.

Am Ende des Dauertests zeigte sich noch kein Bauteilversagen. Es waren auch keine augenscheinlichen Veränderungen zu sehen. Die im Vorfeld vermuteten Verschleißarten Abrasion und Oberflächenzerrüttung waren nicht erkennbar.

Bei alledem ist immer zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser grundlegenden Untersuchung der Möglichkeiten des Einsatzes von Additiver Fertigung bei der Produktion von dynamischen Dichtungen handelsübliche Filamente betrachtet wurden, die nicht speziell für einen solchen Einsatz konzipiert sind.

Es bestand, wie im Abschnitt 2.2 erwähnt, im Vorfeld der Untersuchung die Vermutung, dass die besondere Oberflächenstruktur von Bauteilen, welche im FFF-Verfahren gefertigt werden, einen Einfluss auf die Schmierstoffversorgung im Kontaktbereich haben könnte. Wie in Abbildung 5.35 zu sehen, gibt es zwischen den Schichten im Bauteil „Täler“, in denen sich im eingebauten Zustand Schmierstoff befindet. Der Kontaktbereich wird somit besser mit Schmierstoff versorgt als eine ideal glatte Oberfläche.



Abbildung 5.35: Oberflächenstruktur einer FFF-gefertigten Dichtung im Kontaktbereich

Die insgesamt, trotz zum Teil deutlich höherer Radialkräfte, geringeren Axialkräfte bei den additiv gefertigten Testteilen im Vergleich zu den konventionell gefertigten, werden mit den geringeren mittleren Reibwerten der Werkstoffe der Filamente im geschmierten Zustand in Zusammenhang gebracht. Es erscheint aber auch denkbar, dass die eingangs formulierte Vermutung diesen Effekt verstärkt haben könnte.

So haben sich bei den Modellversuchen mit dem Tribometer die Reibwerte im geschmierten Zustand bei den TPU-Filamenten von der Geschwindigkeit 0,01 m/s zu 0,05 m/s ungefähr halbiert, während bei dem Referenzmaterial der Rückgang lediglich ungefähr ein Drittel betrug.

5.5 ERGEBNISSE DER PROZESSOPTIMIERUNG

5.5.1 Anfangswerte und Vorgehensweise

Nach dem Verfahrensscreening und der Festlegung auf das Fertigungsverfahren Fused Filament Fabrication (FFF) begann ein kontinuierlicher Optimierungsprozess der Fertigungsparameter für jeden der getesteten Werkstoffe. Die Fertigung der Testteile fand, wie in Abschnitt 5.2 bereits erwähnt, auf Printern des Herstellers Prusa statt. In jedem Fall wurde mit den vom jeweiligen Filamenthersteller genannten Parametern begonnen. Tabelle 5.9 zeigt die initialen Werte.

Die folgenden Werte wurden im Rahmen der Parameteroptimierung betrachtet und angepasst:

- Düsen-Temperatur T_D
- Druckbett-Temperatur T_B
- Schichtstärke s
- Druckgeschwindigkeit v_D
- Verfahrensgeschwindigkeit v_V
- Füllmuster (Infill) FM
- Extrusionsfaktor EF
- Retract R

Während die ersten der genannten Parameter als selbsterklärend gesehen werden können, bedürfen die folgenden Werte im Falle von Nicht-Anwendern von FFF-Geräten einer Erläuterung:

Füllmuster (Infill)

Voluminöse Teile, die mit solchen Geräten gefertigt werden, sind in aller Regel nicht massiv. Um Material einzusparen, wird nur die Außenkontur gefertigt und im Inneren ein Füllmuster verschiedener Art angelegt, welches lediglich die Struktur zusammenhält. Wenn die mechanischen Belastungen es erlauben, kann so signifikant Material eingespart werden. Abbildung 5.36 zeigt eine solche Struktur bei einem abgebrochenen Baujob.

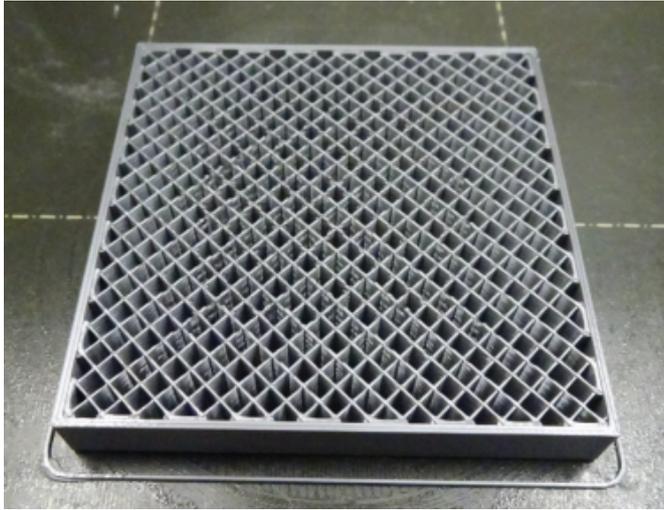


Abbildung 5.36: Bauteil mit geradlinigem Infill; Füllgrad 20 %

Im Falle der Dichtungen soll eine möglichst vollständige Füllung erreicht werden, sodass der Wert für den Füllgrad immer bei 100 % liegt. Beim Muster wurde zunächst die Voreinstellung „geradlinig“ beibehalten. Später wurde zur Einstellung „konzentrisch“ gewechselt, um über den Umfang eine gleichmäßige Struktur und somit Radialkraft zu erreichen. Das ist auch realisierbar durch die Festlegung einer größeren Anzahl von Außenkonturen. Die ergeben im Falle der Geometrie der Dichtungen dann ebenfalls einen konzentrischen Aufbau.

Extrusionsfaktor

Über den Extrusionsfaktor kann die Menge an Filament, die in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit durch die Düse extrudiert wird, feinreguliert werden. Eine nicht vollständige Füllung kann somit über eine Erhöhung des Faktors korrigiert werden. Eine zu große Austrittsmenge führt zum sogenannten *elephant foot*-Effekt, bei dem auf dem Druckbett schon eine nach außen überstehende Kontur erkennbar ist.

Retract

Wenn der Druckkopf abgehoben wird, um eine andere Position anzufahren, kann ein Retract, also ein Einzug des Filaments, aktiviert werden. Anzugeben ist der Weg in Millimetern, um den das Filament eingezogen werden soll. Diese Maßnahme kann unter anderem beim Auftreten von Stringing (wie in Abbildung 5.1 zu sehen) verwendet werden.

Die Nahtposition ist die Stelle, an der der Druckkopf die Kontur der jeweiligen Schicht beginnt. Als generelle Einstellung bei der Druckjobherzeugung wurde diese Position auf „zufällig“ gesetzt, um keine sichtbare Naht am Rand der Bauteile zu haben, wie sie bei Beibehaltung der Standardeinstellung entstehen kann.

Zunächst war das Ziel Bauteile zu erzeugen, dessen augenscheinlich erkennbare Fertigungsqualität Hoffnung gab, das sie ihre Hauptfunktion erfüllen können: den Austritt von Fluid zu verhindern. Das bedeutet,

Tabelle 5.9: Anfangswerte der Druckparameter (für FM gilt: g = geradlinig; k = konzentrisch)

Material	T_D °C	T_B °C	s mm	v_D mm/s	v_V mm/s	FM	EF	R mm
Polymaker Polyflex TPU95	215	45	0,1	30	80	g	1	2
Extrudr TPU Medium A98	220	60	0,15	25	100	g	1	0
Extrudr TPU Semisoft A85	220	60	0,1	20	100	g	1	0
Bendlay A96	230	45	0,1	20	80	g	1	0
Extrudr TPU Hard D58	220	60	0,1	70	130	k	1	0
Copper 3D MDFlex 98A	235	-	0,1	30	130	k	1	2
Recreus Filaflex 82A	235	-	0,1	20	100	k	1	2
BASF Ultrafuse TPU 85A	210	40	0,15	15	130	k	1	2
BASF Ultrafuse TPU 95A	225	40	0,15	20	130	g	1	2
BASF Ultrafuse TPS 90A	280	75	0,15	15	130	g	1	2
Kimya TPC 91A	240	60	0,15	30	130	g	1	2
Kimya TPU-R	215	70	0,15	20	130	g	1	2
Fillamentum Flexfill 98A	220	50	0,15	20	100	g	1	2
TreeD Flexmark 9 93A	230	45	0,15	20	60	k	1,05	0

die Konzentration lag auf der Fertigbarkeit und noch nicht auf irgendwelchen Eigenschaften, die die Funktion beeinflussen könnten, wie zum Beispiel die Dichte. Fertigungsprobleme, die speziell bei flexiblen Filamenten auftauchen können, sind hierbei:

- Stringing
- Ablösung vom Druckbett
- Materialstau im Extruder
- Blasenbildung beim Austritt aus der Düse

Abhängig von der Art des Problems wurden entsprechende Parameter angepasst. Hierzu waren in der Regel mehrere Iterationsschritte erforderlich. Am Beispiel des Filaments BASF Ultrafuse TPU 95A waren dies folgende Anpassungen:

- V2: Extrusionsfaktor 1,05
- V3: Extrusionsfaktor 1,1
- V4: Extrusionsfaktor 1,15
- V5: Infill konzentrisch; Düsentemperatur 220 °C
- V2.0: Düsentemperatur 225 °C
- V2.1: Düsentemperatur 227 °C; Extrusionsfaktor 1,16

Ein Hinweis zu den Versionsnummern:

Bei der ersten Parameteroptimierung im Vorfeld der ersten Versuchsreihe auf dem Prüfstand, wurden die Versionen mit 1, 2 usw. nummeriert. Im Vorfeld der zweiten Testreihe fand die beschriebene weitere Optimierung statt. Die zu dem Zeitpunkt bereits erreichte Versionsnummer, im Fall vom Filament BASF Ultrafuse TPU 95A war das V6, wurde dann umbenannt in V2.0. Darauf basierend wurde dann bei einer weiteren Parameteränderung die erste Nachkommastelle erhöht.

Maßnahmen zur Beseitigung bestimmter Probleme

Abhängig von der Art auftretender Fertigungsschwierigkeiten sind unterschiedliche Änderungen an den Parametern vorzunehmen, die durchaus auch gegensätzlicher Natur sein können.

Stringing kann man unter anderem mit Filamenttrocknung, Einführung beziehungsweise Erhöhung eines Retracts und einer Verringerung der Düsentemperatur begegnen. Eine weitere Ursache für Stringing können in der Düse zurückgebliebene Anhaftungen anderen Druckmaterials sein. Eine Reinigung oder ein Austausch der Düse sind somit ebenso ratsam. Auch die Schichtstärke hat Einfluss auf das Auftreten von Stringing. So wurden auch Tests mit Schichtstärken von weniger als 0,15 mm durchgeführt, die aber nicht erfolgreich waren.

Einer *Ablösung vom Druckbett* kann einfach durch Verwendung eines Haftsprays oder -stifts begegnet werden. Eine regelmäßige gründliche Reinigung des Druckbetts ist dann notwendig.

Materialstau im Extruder kann auftreten, wenn das Filament so flexibel ist, dass es von den Vorschubrollen nicht in das PTFE-Röhrchen transportiert wird, welches zur Düse führt, sondern daran vorbeiläuft. Dem wurde begegnet durch Herstellung eines verlängerten PTFE-Röhrchens, welches der Kontur der Vorschubrollen angepasst wurde (siehe Abbildung 5.37).

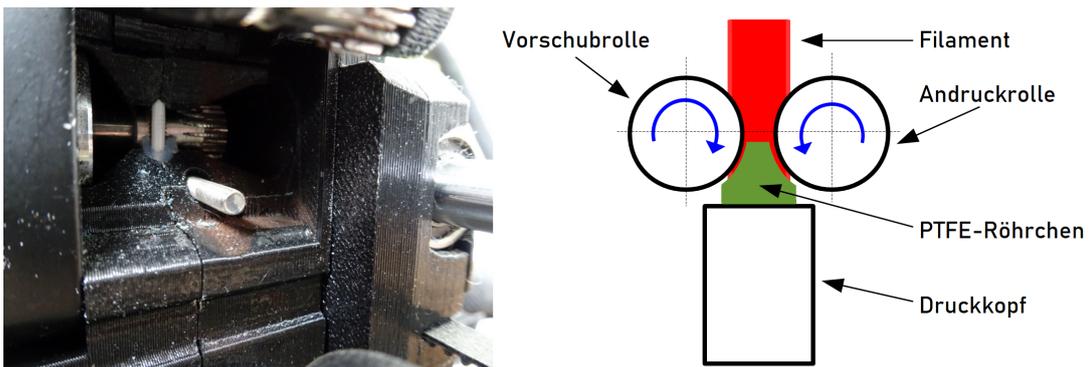


Abbildung 5.37: Angepasstes PTFE-Röhrchen im Druckkopf

Blasenbildung beim Austritt aus der Düse, welche auch akustisch wahrnehmbar ist, sollte mit gründlicher Trocknung des Filaments begegnet werden. Auch eine Verringerung der Düsentemperatur kann notwendig und zielführend sein.

5.5.2 *Finale Parameter*

In der Tabelle 5.10 sind die wesentlichen, finalen Parameter der fünf Werkstoffe der zweiten Phase der Funktionstests aufgeführt.

Tabelle 5.10: Finale Werte der Druckparameter

Material	T_D °C	T_B °C	EF
Extrudr TPU Medium A98	230	50	1,16
BASF Ultrafuse TPU 95A	227	40	1,15
Extrudr TPU Semisoft A85	230	60	1,18
Polymaker Polyflex TPU95	218	45	1,17
TreeD Flexmark 9 93A	232	30	1,14

Bei allen Filamenten wurde am Ende mit einer Druckgeschwindigkeit von 20 mm/s, einer Eilgangsgeschwindigkeit von 100 mm/s, der Schichtstärke 0,15 mm und einem Retract von 2 mm gearbeitet.

5.5.3 *Vorgehensweise bei Erprobung neuer Filamente*

Aus den Erfahrungen bei der Erprobung der Filamente kann eine Methodik abgeleitet werden, die zukünftig ein zügiges und zielgerichtetes Vorgehen ermöglicht. Nachfolgend sind die Schritte aufgeführt:

- Im ersten Schritt ist das Filament gründlich mit einem Filamenttrockner oder in einem Wärmeschrank zu trocknen. Die Materialien, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, sind im Vorfeld 5 Stunden bei 55 °C in einem Filamenttrockner behandelt worden.
- Durch Fertigung eines ersten Testteils mit den vom Filamenthersteller angegebenen Parametern werden diese überprüft. Sollten sich Fertigungsprobleme zeigen, sind Anpassungen an den Werten Düsen- und Druckbetttemperatur, Retract und/oder Vorschubgeschwindigkeit vorzunehmen. Ziel ist ein optisch und haptisch einwandfreies und maßhaltiges Teil.
- Mittels eines Teststrangs des Filaments und des Soll-Volumens des Testteils ist die Soll-Masse zu ermitteln und mit der Ist-Masse abzugleichen. Im Falle einer Abweichung ist der Extrusionfaktor entsprechend anzupassen.
- Ein Testteil ist mit dem Tribometer zu untersuchen. Ziel ist nicht nur die Feststellung des Reibwertes, sondern insbesondere auch des Verschleißverhaltens. Wie im Abschnitt 5.2.1 bereits dargestellt, gibt es Filamente, die einen kontinuierlichen und sehr starken Verschleiß aufweisen, die sie für den gewünschten Einsatz disqualifizieren.

In den folgenden Abschnitten werden der Ablauf und die Ergebnisse des durchgeführten Life Cycle Assessments beschrieben. Bei der Durchführung wurde die den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 ([Deu21a] und [Deu21b]) beschriebenen Anforderungen und Anleitungen berücksichtigt. Als Werkzeug für das LCA wurde die Software SimaPro von der Firma PRé verwendet.

6.1 ZIELSETZUNG UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Grundsätzliches Ziel bei dem LCA ist der Vergleich zwischen zwei möglichen Fertigungsmethoden für eine Stangendichtung aus TPU:

- Additive Fertigung aus Filament
- Spritzgießen aus Granulat

Bei einem LCA wird im Grundsatz der gesamte Produktlebenszyklus von der Herstellung des Ausgangsmaterials, der Produktion des Produkts, der Nutzung bis hin zum Recycling und zur endgültigen Entsorgung betrachtet. Abhängig von dem Ziel kann aber auch nur ein Ausschnitt des gesamten Lebenszyklus im Fokus stehen. Im vorliegenden Fall reduziert sich der Vergleich auf nur einen Aspekt: die Fertigung der Dichtung. Da die unterschiedlich gefertigten Dichtungen aus dem gleichen Material in der gleichen Menge bestehen, kann der letzte Abschnitt des Lebenszyklus ausgeblendet werden. Bei der Entsorgung gibt es keinen Unterschied.

Da die Daten bei der Fertigung im Spritzgussverfahren aus der Datenbank entnommen sind, geht es hier im Wesentlichen um eine Abschätzung, wie die zwei möglichen Fertigungsarten mit Bezug auf ihre Auswirkungen einzuordnen sind. Im Fall der additiven Fertigung sind genaue Daten der Energieverbräuche vorhanden und es kann auch hinreichend gut abgeschätzt werden, mit wie viel Abfall zu rechnen ist.

Für eine genaue Analyse wären im Fall der Serienfertigung im Spritzgussverfahren Daten des Herstellers der Referenzdichtung erforderlich, im Fall der spanenden Fertigung Daten eines Anbieters, der zum Beispiel mit dem bereits erwähnten SKF SealJet® arbeitet. Da keine entsprechenden Auskünfte zu erwarten wären, wurde von vornherein auf eine Anfrage verzichtet und das Szenario der dezentralen spanenden Fertigung nicht betrachtet.

Eine exakte Aussage hierzu wird allerdings auch nicht für relevant erachtet, da die bereits erwähnte zentrale Frage auch mit den Annahmen

hinreichend genau zu beantworten sein sollte: welche Rangfolge im Hinblick auf die Umweltwirkung kann angenommen werden?

Da hier ein Vergleich vorgenommen wird und es aufgrund vieler subjektiver Annahmen generell sinnvoll erschien, fand ein Review statt. An dieser Stelle möchte ich meinen Dank hierfür Ion Cosmin Gruescu von der Universität Lille/F aussprechen, der die Prüfung freundlicherweise übernommen und eine Reihe hilfreicher Impulse eingebracht hat.

6.2 ERSTELLUNG DER SACHBILANZ

Die Reduktion auf zwei Phasen des Lebenszyklus und die Verwendung von Datenbankwerten für die Fertigung im Spritzgussverfahren reduziert auch die Menge an Daten, die für die Durchführung der Berechnung erforderlich ist.

Für beide betrachteten Fälle gilt:

- Die Masse einer Dichtung beträgt 10 g.
- Da das verwendete Material TPU in der internen Datenbank von SimaPro nicht vorhanden ist, wird Polyurethan angenommen. Auch wenn es gewisse Unterschiede geben sollte bei den Berechnungsergebnissen, so wären sie dann in beiden betrachteten Fällen identisch und werden somit als vernachlässigbar betrachtet.

Im Fall der Fertigung im FFF-Verfahren sind folgende, weitere Daten ermittelt worden, die in die Sachbilanz einfließen:

- Der Stromverbrauch für die Trocknung einer Rolle Filament beträgt 0,612 kWh. Es wird angenommen, dass die Rolle fortan passiv in einem Behälter mit Silikagel trocken gehalten werden kann und dass mit einer Rolle im Durchschnitt 50 Dichtungen gefertigt werden. Das bedeutet, dass die Hälfte des Filaments als Abfall endet durch Fehlteile, Verluste im Druckprozess und durch einen Bedarf, der geringer ist, als die vorhandene Filamentmenge hergeben würde. Somit werden 0,0102 kWh pro Bauteil angesetzt.
- Der Stromverbrauch für die Fertigung einer Dichtung des Referenztyps beträgt 0,178 kWh.

Im Falle der Fertigung im FFF-Verfahren in einem Verkaufsstützpunkt in Vigo direkt wird zuvor der Printer von Prag in Tschechien nach Vigo transportiert (ca. 2.600 km, Bruttomasse 10 kg) und das Filament (Bruttomasse 7,5 kg) von Düsseldorf aus (2.100 km).

Dabei wird davon ausgegangen, dass insgesamt im Laufe der Zeit 250 Teile mit dem Printer gefertigt werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird alternativ mit 400 Teilen gerechnet, um den Einfluss erkennen zu können. Ebenfalls im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird als alternatives Szenario der Einsatz in Dresden betrachtet. Die Transportwege sind dort wie folgt: der Printer wird von Prag nach

Dresden transportiert (ca. 150 km) und das Filament von Düsseldorf nach Dresden (ca. 600 km).

Bei der Serienfertigung wird ein Abfallanteil von 10 % angenommen. Ebenfalls berücksichtigt wurden die unterschiedlichen Erfordernisse bezüglich des Transports. Dazu wurde angenommen, dass es sich um einen in Düsseldorf ansässigen Dichtungshersteller handelt und der Endkunde in Vigo in Spanien ist. Im Falle des Serienteils werden die Dichtungen folglich von Düsseldorf nach Vigo transportiert (ca. 2.100 km). Gerechnet wird bei der Gesamtzahl von 250 Dichtungen mit einem Gesamt-Versandgewicht von 5 kg.

6.3 WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

Sieht man sich zunächst die Netzwerkdarstellung für die additiv gefertigte Variante an (Gesamtstückzahl mit dem Printer: 250 Bauteile), so wird deutlich, dass der größte Anteil der Umweltauswirkung durch die Fertigung selbst entsteht und nicht durch Transportanteile (Abbildung 6.1).

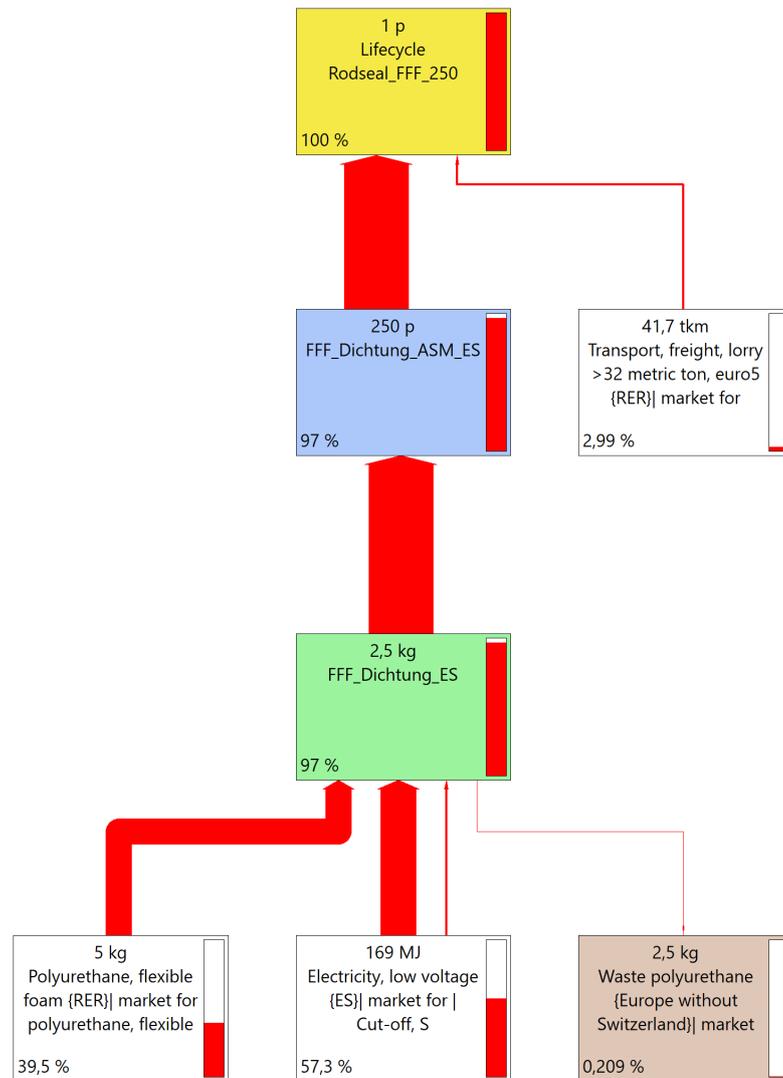


Abbildung 6.1: Netzwerkdarstellung: Additiv gefertigte Dichtung bei einer maximalen Produktionsmenge von 250 Exemplaren mit einem Printer

Auch eine im Rahmen der Sensitivitätsanalyse angenommene Änderung der maximalen Produktionsmenge mit einem Printer auf 400 Exemplare führt nicht zu einer signifikanten Änderung (Abbildung 6.2).

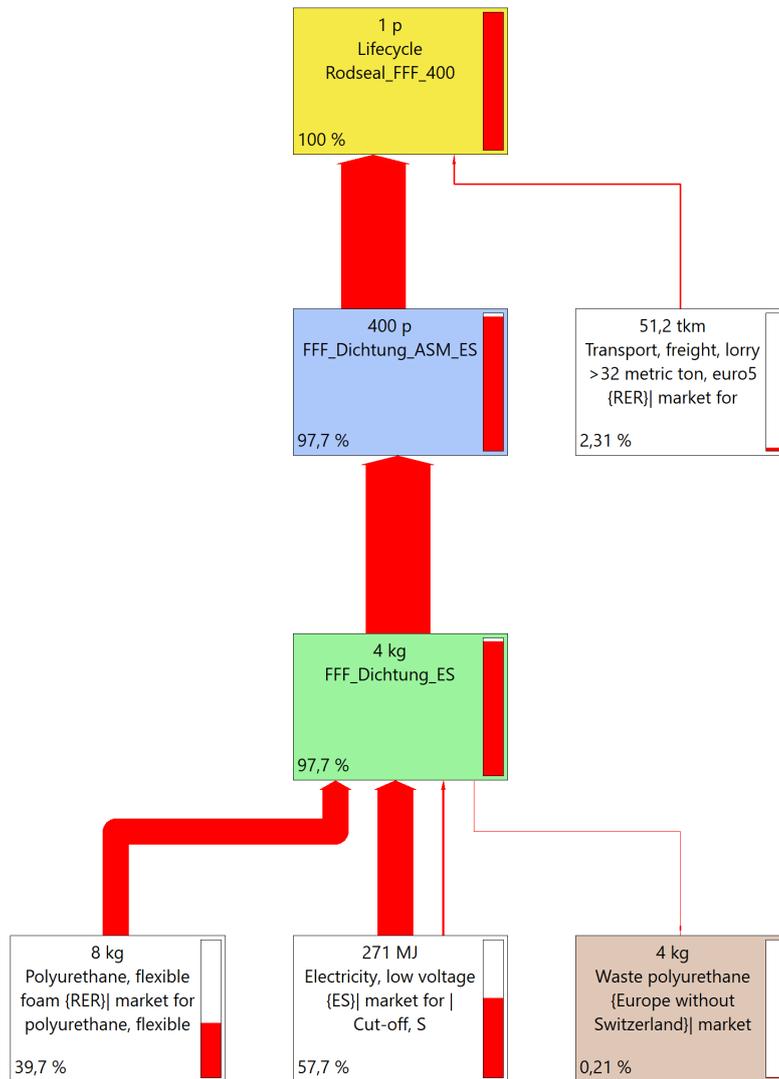


Abbildung 6.2: Netzwerkdarstellung: Additiv gefertigte Dichtung bei einer maximalen Produktionsmenge von 400 Exemplaren mit einem Printer

Bei der im Spritzgussverfahren gefertigten Variante, also dem Serienteil, sieht es grundsätzlich ähnlich aus (Abbildung 6.3).

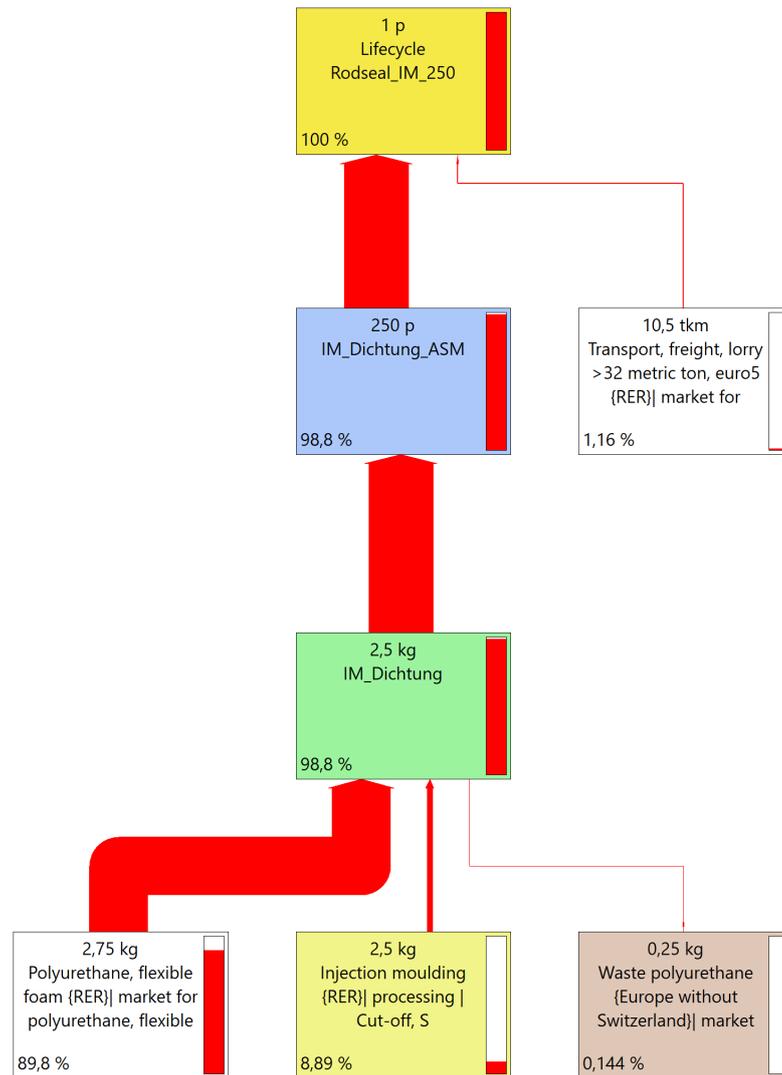


Abbildung 6.3: Netzwerkdarstellung: Im Spritzgussverfahren gefertigte Dichtung

Die normalisierten Darstellungen der Umweltauswirkungen in den einzelnen Wirkungskategorien sind im Anhang zu finden.

Wenn man sich nun die beiden Varianten im Vergleich ansieht, wird deutlich, dass die Serienproduktion im Hinblick auf Umweltwirkung besser abschneidet als die additive Fertigung. Am deutlichsten erkennbar ist die in der Charakterisierungsdarstellung, in der die jeweils maximale Auswirkung in den einzelnen Wirkungskategorien auf 100 % gesetzt wird, wie Abbildung 6.4 zeigt.

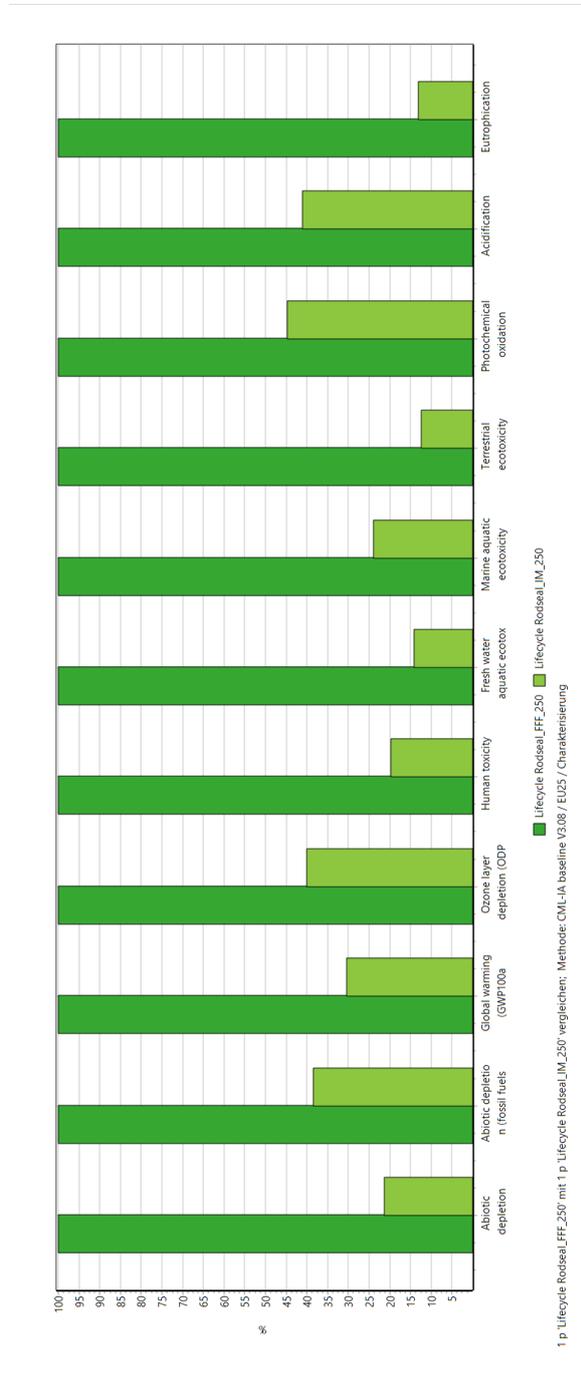


Abbildung 6.4: Charakterisierungsdarstellung: Beide Fertigungsverfahren im Vergleich (links in dunkelgrün: Additive Fertigung; rechts in hellgrün: Spritzguss)

Um die Ergebnisse einordnen zu können: wenn man die Wirkungskategorie *Globale Erwärmung* betrachtet, dessen Indikator ein CO_2 -Äquivalent ist, dann ergibt sich für das gesamte Fertigungsszenario *Additive Fertigung von 250 Dichtungen in Vigo* ein Wert von 47,7 kg CO_2 . Wenn man diesen Wert mit dem durchschnittlichen Ausstoß von einem 2020 neu zugelassenen Pkw vergleicht (139,8 g¹), dann entspricht das einer Fahrstrecke von ca. 340 km.

Auch das im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtete alternative Szenario mit Kunden in Dresden statt in Vigo zeigt keine grundsätzliche Änderung des Gesamtergebnisses im Hinblick auf den Vergleich zwischen den Fertigungsarten. Die Abbildung a.5 im Anhang zeigt jeweils die beiden Fertigungsarten für beide Anwendungsorte.

Bezogen auf die Wirkungskategorie *Globale Erwärmung* zeigt sich allerdings etwas, das im ersten Moment für den Betrachter irritierend wirken kann: die Fertigung in Spanien hat eine geringere Auswirkung als die in Deutschland. Die Erklärung liegt hauptsächlich im durchschnittlichen Strommix, der in Spanien einen höheren Anteil an nuklear erzeugtem Strom hat und folglich mit weniger CO_2 -Emissionen verbunden ist.

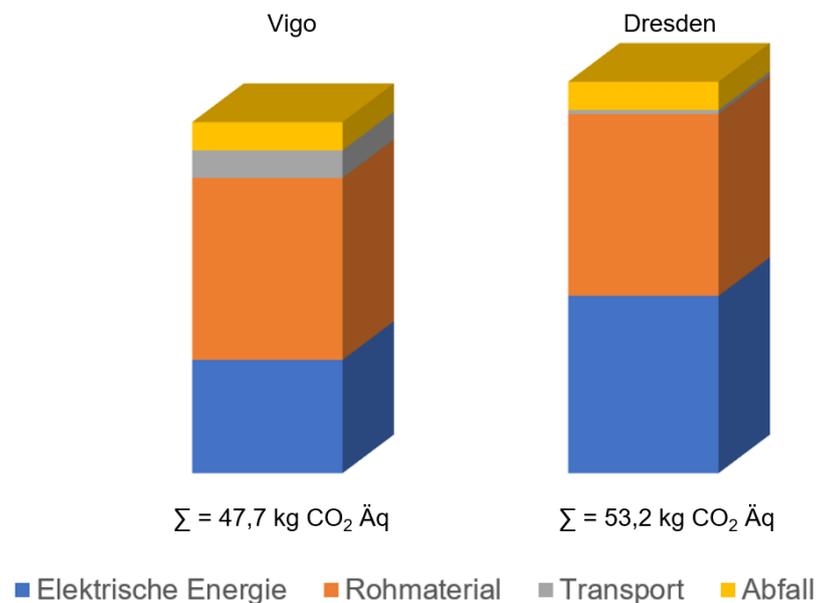


Abbildung 6.5: Anwendungsorte Vigo und Dresden: CO_2 -Äquivalente im Vergleich

Abbildung 6.5 zeigt die CO_2 -Äquivalente für die beiden Orte, aufgeschlüsselt nach Prozess. Es zeigt sich, dass der höhere Ausstoß durch den Strommix in Deutschland nicht durch den, der aus dem Transportaufwand nach Spanien resultiert, aufgewogen wird. In der Summe stehen 53,3 kg durch die Fertigung in Dresden gegenüber 47,7 kg durch die in Vigo gegenüber.

¹ Quelle: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/399048/umfrage/entwicklung-der-co2-emissionen-von-neuwagen-deutschland/> (Wert für 2020)

6.4 AUSWERTUNG

Die Frage, ob für die additive Fertigung auch ökologische Gründe vorgebracht werden können, kann verneint werden. Im Hinblick auf die Umweltauswirkungen ist die zentrale Serienfertigung durch Spritzguss im Vorteil. Das hier aus Gründen der mangelhaften Datenlage nicht betrachtete Szenario der spanenden Fertigung wird mit Sicherheit noch schlechter abschneiden als die additive Fertigung. In dem Falle müssten im hier betrachteten Szenario zunächst die Maschine und Halbzeug zum zentralen Vertriebsstützpunkt nach Madrid transportiert werden (Maschinengewicht gemäß Datenblatt 800 kg). Die dort gefertigte Dichtung muss dann noch zum Einsatzort Vigo transportiert werden.

Bei der Nutzung wird, abhängig vom Ausgang weiterer Langzeittests, womöglich ein Unterschied zu berücksichtigen sein: die Nutzungsdauer einer additiv gefertigten Dichtung gegenüber einer konventionell gefertigten könnte doch noch etwas eingeschränkt sein.

Das grundsätzliche Ergebnis der Untersuchung bestätigt somit die Aussagen der im Abschnitt 3.6 erwähnten Arbeiten, ergänzt durch die Beschreibung der Auswirkung einer Produktion in verschiedenen Ländern.

Methoden der Additiven Fertigung bieten einige Vorteile gegenüber gängigen Verfahren zur Serienfertigung von Bauteilen. Im Vergleich mit dem Spritzguss bei Bauteilen aus thermoplastischen Kunststoffen sind dies beispielsweise die größere Gestaltungsfreiheit und die Produktion ohne bauteilspezifische, kostenintensive Werkzeuge.

Es hat sich die Frage gestellt, ob solche Fertigungsmethoden auch bei der Produktion von dynamischen Dichtungen am Beispiel von Stangendichtungen für Hydraulikzylinder sinnvoll einsetzbar sein können. Als eine mögliche Motivation für die Applikation solcher Methoden wird die Möglichkeit der kurzfristigen Fertigung von Ersatzteilen und Prototypen gesehen. Angesichts von Lieferzeiten von bis zu drei Monaten für seriengefertigte Dichtungen kann dies ein Vorteil sein, da Stillstandszeiten durch nicht lieferbare Ersatzteile signifikant reduziert werden könnten.

Um diese Möglichkeiten untersuchen zu können, wurde zunächst analysiert, aus welchen Materialien Stangendichtungen typischerweise gefertigt werden und welche davon auch mit Verfahren der Additiven Fertigung verarbeitbar sind. Im Anschluss wurden Testteile mit verschiedenen, grundsätzlich in Frage kommenden Verfahren gefertigt und untersucht, um die generelle Eignung für die Anwendung beurteilen zu können. Kriterien waren unter anderem die Oberflächengüte und die Porosität der Bauteile.

Nachdem sich herauskristallisiert hatte, dass es auf thermoplastische Urethane (TPU) als Material und Fused Filament Fabrication (FFF) als Verfahren hinausläuft, wurden erste Untersuchungen von Testbauteilen aus einer Reihe von handelsüblichen TPU-Filamenten durchgeführt. Es handelte sich hierbei um Filamente, die nicht für tribologische Anwendungen optimiert wurden. Ziel war es, eine handhabbare Anzahl an Test-Werkstoffen zu haben, mit denen Bauteile gefertigt werden können, die in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und die erzielbare Bauteilqualität vielversprechend erschienen für den Einsatz in Funktionstests auf einem Stangendichtungsprüfstand.

Aus den daraufhin gewählten Werkstoffen wurden Testbauteile gefertigt und ersten Funktionstests unterzogen. Bei diesen Versuchen lag der maximale angestrebte Fluidruck bei 5 MPa. Die Ergebnisse dieser ersten Tests sowie nachfolgende Analysen der Bauteile zeigten bei einigen Filamenten eine unzureichende Dichte, die zum Versagen geführt hat.

Im Vorfeld der weiteren Untersuchungen wurden daher die Fertigungsparameter insbesondere im Hinblick auf die Dichte optimiert durch sukzessive Erhöhung des Extrusionsfaktors. Einige der in den ersten

Funktionstests untersuchten Filamente wurden aufgrund zu schlechter Ergebnisse nicht weiter betrachtet.

Mit der somit reduzierten Auswahl von Filamenten und den optimierten Parametern wurden dann weitere Testteile für eine zweite Versuchsreihe gefertigt. Dabei wurden die Testdichtungen bis zum maximalen Fluiddruck, für den der Prüfstand derzeit konzipiert ist, getestet: 15 MPa.

Die Mehrzahl der Testteile konnte ohne, oder nur mit geringem, Fluidaustritt bis zum maximalen Druck getestet werden und überstand auch einen anschließenden längeren Test mit einem Druck von 6,3 MPa. Die Ergebnisse erscheinen vielversprechend und geben Hoffnung, dass auf diese Weise erzeugte Dichtungen zumindest temporär bis zum Eintreffen von seriengefertigten Ersatzteilen betrieben werden können. Da auch der Dauertest bis zu einer Gesamt-Gleitstrecke von 5,32 km ohne Bauteilversagen durchgeführt werden konnte, sollte im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens auch ein deutlich längerer Test bis zum Bauteilversagen durchgeführt werden, um eine Aussage über die mögliche Einsatzdauer vornehmen zu können.

In einem noch laufenden Forschungsvorhaben¹ wurden parallel auch noch am Beispiel eines Kompaktrings (Vorlage: SKF®PTB) Versuche gemäß der gleichen Testprogramme durchgeführt. Auch dort konnten Testteile, abhängig vom verwendeten Filament, bis zum maximalen Druck erfolgreich getestet werden. Abbildung 7.1 zeigt eine solche Testdichtung, bei der sowohl die TPU- als auch die NBR-Komponente additiv gefertigt wurden [Sun+23].



Abbildung 7.1: Kompaktring-Testteil mit additiv gefertigter TPU- und NBR-Komponente

¹ "Dynamische 2-Komponenten-Dichtungen aus additiver Fertigung", gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (Projektnr. 447009134)

Die Kernfrage der Arbeit lautete: Ist es möglich, mit Verfahren der additiven Fertigung funktionsfähige dynamische Dichtungen herzustellen? Im Rahmen des Vorhabens konnte diese Frage am Beispiel von Hydraulik-Stangendichtungen positiv beantwortet werden.

Folgende weitere Frage sollte im Rahmen der Arbeit beantwortet werden: Kann man auch Gründe der Nachhaltigkeit und Ökologie anführen für den Einsatz eines Verfahrens der additiven Fertigung?

Die Frage kann durch das durchgeführte, auf die Aspekte Produktion und Transport reduzierte, Life Cycle Assessment zwar bezogen auf diese Aspekte verneint werden. Allerdings können schnell produzierbare Ersatzteile die durch eine defekte Stangendichtung verursachte Leckage beenden und somit indirekt sehr wohl einen ökologischen Vorteil mit sich bringen durch einen verhinderten Fluidaustritt und somit Umweltschaden.

Ein valider ökonomischer Grund für den Einsatz wird außerdem in jedem Fall gesehen: durch die additive Fertigung in dem betrachteten Szenario kann ein kurzfristig zu fertigendes Ersatzteil signifikante Stillstandszeiten einer Maschine oder Anlage verringern, wenn andernfalls Wochen oder gar Monate auf ein industriell gefertigtes Bauteil gewartet werden müsste.

Dieser ökonomische Vorteil kann wiederum auch einen ökologischen mit sich bringen, wenn es um die Erhöhung der Verfügbarkeit von Anlagen geht, die aus ökologischen Gründen als sehr wichtig und wertvoll anzusehen sind, wie zum Beispiel Offshore-Windkraftanlagen oder Gezeitenkraftwerke.

Als eine sinnvolle Fortführung der hier dokumentierten Untersuchung wird die Fertigung mit für den Einsatz als Stangendichtungen optimierten Werkstoffen gesehen. Sehr interessant wäre eine Untersuchung von bereits hierfür eingesetzten Materialien.

Des Weiteren sollten Fertigungs- und Funktionstests mit Stangendichtungen anderer Bauart und Geometrie durchgeführt werden, da die Versuche mit den beiden bislang untersuchten Bauarten größere Unterschiede aufwiesen. So hat ein Filament (Extrudr Hard D58) mit einer Geometrie gut funktioniert (Vorlage: Trelleborg®RU), mit der bereits erwähnten Kompaktring-Geometrie (Vorlage: SKF®PTB) allerdings nicht.

Ebenso sind bauliche Änderungen am Stangendichtungsprüfstand wünschenswert. Zum einen ist es sehr unbefriedigend, dass eine Leckage derzeit nicht quantifiziert werden kann. Eine dahingehende konstruktive Änderung ist notwendig. Auch sollte der Prüfstand befähigt werden für höhere Drücke. Industriell gefertigte Dichtungen aus TPU sind für maximale Drücke von 30-40 MPa ausgelegt. Die bestehende Limitierung auf 15 MPa ist auf den zeitweisen Einsatz von einer Stange mit einem Glaselement zurückzuführen, welches für optische Untersuchungen im Bereich der Dichtkante vorgesehen ist. Für die Art von Untersuchungen, die Gegenstand dieser Arbeit sind, ist eine solche Stange allerdings

nicht erforderlich. Die mechanische Auslegung und der maximale Pumpendruck ermöglichen höhere Drücke.

Final kann festgestellt werden, dass die prinzipielle Möglichkeit der additiven Fertigung funktionsfähiger Stangendichtungen erfolgreich aufgezeigt werden konnte. Die Funktionsfähigkeit ist dabei abhängig vom verwendeten Material, den Fertigungsparametern, der Geometrie der Dichtung und den Anwendungsparametern (maximaler Betriebsdruck, maximale Betriebstemperatur und maximale Gleitgeschwindigkeit).

STUDENTISCHE ARBEITEN

Alle hier aufgeführten Arbeiten sind an der Hochschule Emden-Leer entstanden.

2017 Daniel Kemmerling Projektarbeit	Konzepte zur additiven Fertigung von dynamischen Dichtungen
2018 Daniel Kemmerling Projektarbeit	Elementare Analogien der konventionellen und additiven Fertigung von dynamischen Dichtungselementen
2018 Thomas Relt Projektarbeit	Entwicklung einer Vorrichtung für die Schliffbilderstellung von Radialwellendichtringen und Stangendichtungen
2019 Max Mitjuschow Projektarbeit	Optimierung eines Radialkraftmessgerätes mit Hilfe der Methodischen Konstruktion
2021 Marc Lünemann, Leon Ney Projektarbeit	Überarbeitung des Stangendichtungsprüfstandes
2022 Leonie-Sofie Fluhner Bachelorarbeit	Entwicklung einer Probenaufnahme für tribologische Sonderversuche an Dichtringen

ANHANG

A.1 VORVERSUCHE

Criterion	Weighting	Filament 01	Filament 02	Filament 03	Filament 04	Filament 05	Filament 06	Filament 07
Processability	40%	3	4	3	2	4	1	1
Segmental radial force	20%	1	0	0	0	0	2	2
T _{Wet}	10%	4	4	4	0	4	4	0
Dynamic friction coefficient	20%	4	4	4	2	4	4	0
Shore A hardness	10%	0	4	4	3	2	4	0
Weighted sum:		2,6000	3,2000	2,8000	1,5000	3,0000	2,4000	0,8000
in percent:		65,00%	80,00%	70,00%	37,50%	75,00%	60,00%	20,00%
Rank:		5	1	4	13	2	7	14

Criterion	Weighting	Filament 08	Filament 09	Filament 10	Filament 11	Filament 12	Filament 13	Filament 14
Processability	40%	3	4	3	3	3	3	4
Segmental radial force	20%	3	3	0	0	0	0	1
T _{Wet}	10%	0	2	4	3	0	0	0
Dynamic friction coefficient	20%	0	1	2	2	3	4	3
Shore A hardness	10%	0	3	1	1	1	2	2
Weighted sum:		1,8000	2,9000	2,1000	2,0000	1,9000	2,2000	2,6000
in percent:		45,00%	72,50%	52,50%	50,00%	47,50%	55,00%	65,00%
Rank:		12	3	9	10	11	8	5

Abbildung a.1: Gewichtete Bewertungstabelle

A.2 ERSTE PRÜFSTANDSVERSUCHSREIHE

Tabelle a.1: Liste der Testteile für die ersten Funktionstests

Material	Nr.	d_i in mm	F_R in N	Shorehärte	Masse in g
TreeD Flexmark 9	01	49,75	37,0	A88	9,838
BASF TPU95	02	49,10	128,4	A88	9,280
BASF TPU95	03	49,15	119,7	A87	9,161
BASF TPU95	04	49,15	123,4	A85	9,214
Extrudr Hard	05	49,10	132,4	D55	8,946
Extrudr Hard	06	49,08	117,2	D53	8,964
Polymaker TPU95	07	49,75	92,5	A93	9,034
Polymaker TPU95	08	49,65	55,5	A94	8,991
Extrudr Semisoft	09	49,15	38,5	A88	8,571
Extrudr Semisoft	10	49,20	42,8	A92	8,519
Original	11	49,57	38,5	A94	9,900
Original	12	49,57	38,5	A94	9,890
Original	13	49,65	43,5	A93	9,917
Original	14	49,75	43,2	A93	9,927
TreeD Flexmark 9	15	49,73	35,9	A90	9,087
TreeD Flexmark 9	16	49,65	37,0	A88	9,836
Polymaker TPU95	17	49,65	51,2	A93	8,948
Extrudr Semisoft	18	49,75	34,8	A90	8,036
Extrudr Medium	19	49,50	112,1	A88	8,785
Extrudr Medium	20	49,45	99,8	A88	8,437
Extrudr Medium	21	49,50	96,1	A86	8,408
Extrudr Hard	22	49,70	91,1	D57	8,224

Tabelle a.2: Ergebnisse der ersten Funktionstests - Übersicht 1

Nr.	Masse m vor in g	Masse m nach in g	Δm in %	Füllgrad in %	Ergebnis
01	8,938	9,195	2,88	91,14	Abbruch bei 1 MPa
02	9,280	9,363	0,89	103,02	Versuch durchgelaufen
03	9,161	9,220	0,64	101,70	Versuch durchgelaufen
04	9,214	9,277	0,68	102,29	Versuch durchgelaufen
05	8,946	9,069	1,37	94,26	Versuch durchgelaufen
06	8,964	9,156	2,14	94,45	Versuch durchgelaufen
07	9,034	9,184	1,66	92,12	Versuch durchgelaufen
08	8,991	9,217	2,51	91,68	Versuch durchgelaufen
09	8,571	8,808	2,77	91,84	Abbruch bei 1 MPa
10	8,519	8,846	3,84	91,29	Abbruch bei 1 MPa
15	9,087	9,366	3,07	92,66	Versuch durchgelaufen
16	8,936	9,204	3,00	91,12	Abbruch bei 1 MPa
17	8,948	9,144	2,19	91,24	Versuch durchgelaufen
18	8,036	8,604	7,07	86,11	Abbruch bei 1 MPa
19	8,785	8,933	1,68	93,35	Versuch durchgelaufen
20	8,437	8,933	5,88	89,65	Abbruch bei 2 MPa
21	8,408	8,920	6,06	89,34	Abbruch bei 2 MPa
22	8,224	8,920	8,46	86,66	Abbruch ohne Druck

Tabelle a.3: Ergebnisse der ersten Funktionstests - Übersicht 2

Nr.	d_i	d_i	Δd_i	F_R	F_R	ΔF_R
	vor in mm	nach in mm	in %	vor in N	nach in N	in %
01	49,75	49,70	-0,10	37,0	50,8	37,25
02	49,10	49,25	0,31	128,4	157,8	22,88
03	49,15	49,15	0,00	119,7	127,0	6,97
04	49,15	49,20	0,10	123,4	134,6	9,12
05	49,10	49,20	0,20	132,4	156,0	17,81
06	49,08	49,55	0,96	117,2	229,3	96,59
07	49,75	49,80	0,10	92,5	61,0	-34,12
08	49,65	49,70	0,10	55,5	76,9	38,56
09	49,15	49,20	0,10	38,5	62,8	63,21
10	49,20	49,65	0,91	42,8	61,7	44,07
15	49,73	49,70	-0,06	35,9	50,4	40,40
16	49,65	49,65	0,00	37,0	45,4	22,55
17	49,65	49,75	0,20	51,2	61,7	20,57
18	49,75	49,75	0,00	34,8	41,0	17,71
19	49,50	49,65	0,30	112,1	148,4	32,36
20	49,45	49,50	0,10	99,8	135,7	36,00
21	49,50	49,55	0,10	96,1	128,4	33,58
22	49,70	49,70	0,00	91,1	109,2	19,92

A.3 ZWEITE PRÜFSTANDSVERSUCHSREIHE

Tabelle a.4: Zweite Prüfstandsversuchsreihe: Änderungen d_i und F_{RG}

Nr.	d_i vor in mm	d_i nach in mm	Δd_i in %	F_R vor in N	F_R nach in N	ΔF_R in %
29	49,44	49,44	$\pm 0,00$	176,3	165,4	+1,00
30	49,44	49,43	-0,02	184,7	169,4	+0,20
31	49,44	49,41	-0,06	168,0	187,9	+0,54
32	49,43	49,46	+0,06	-	90,0	+0,69
33	49,37	49,43	+0,02	96,9	102,7	+0,68
34	49,41	49,41	$\pm 0,00$	92,5	91,8	+0,68
35	49,47	49,53	+0,12	83,1	78,4	+1,40
36	49,56	49,62	+0,12	82,4	81,3	+1,33
37	49,46	49,53	+0,22	79,1	88,2	+1,36
38	49,52	49,53	+0,02	102,7	103,0	+0,46
39	49,49	49,43	-0,12	93,2	114,3	+0,34
40	49,58	49,48	-0,20	84,5	111,0	+0,40
44	49,32	49,29	-0,06	90,7	89,2	+0,46
45	49,23	49,25	+0,04	95,1	91,8	+0,62
46	49,22	49,40	+0,37	89,6	88,2	+0,64

A.4 LIFE CYCLE ASSESSMENT

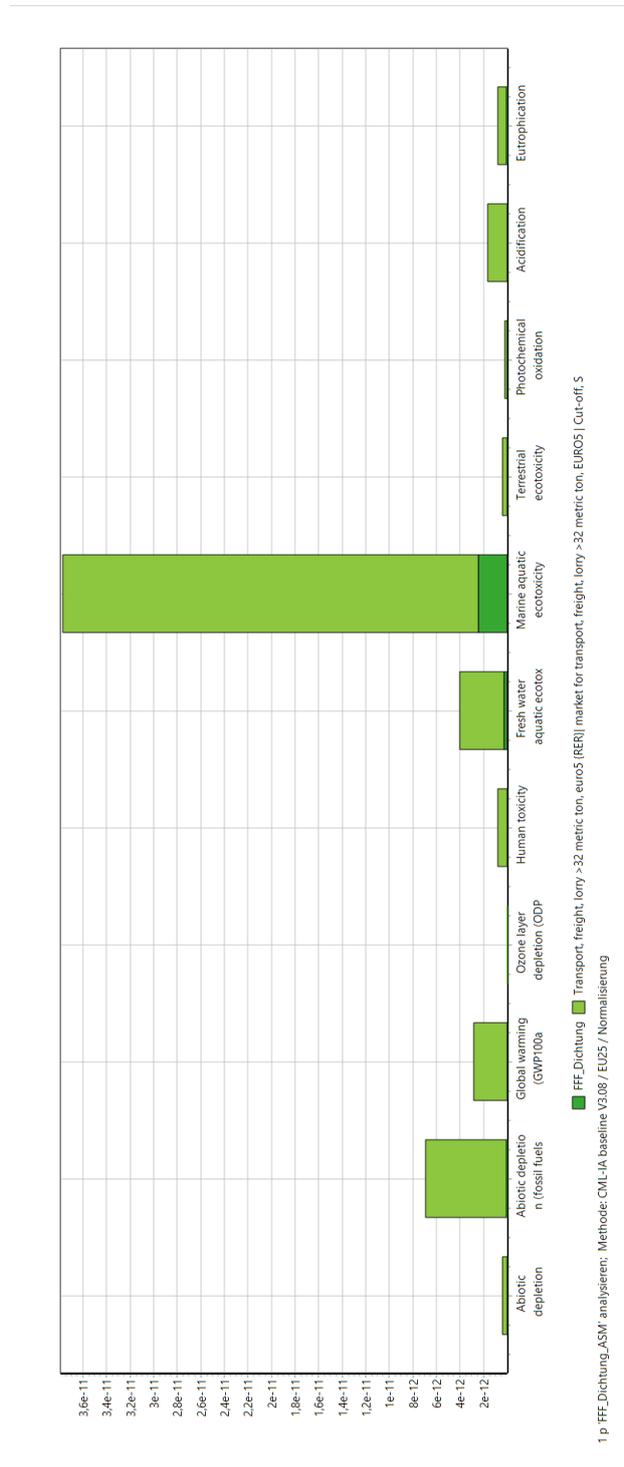


Abbildung a.2: Normalisierte Darstellung der einzelnen Wirkungskategorien: Fertigungsverfahren FFF bei maximaler Produktionsmenge 250 Exemplare

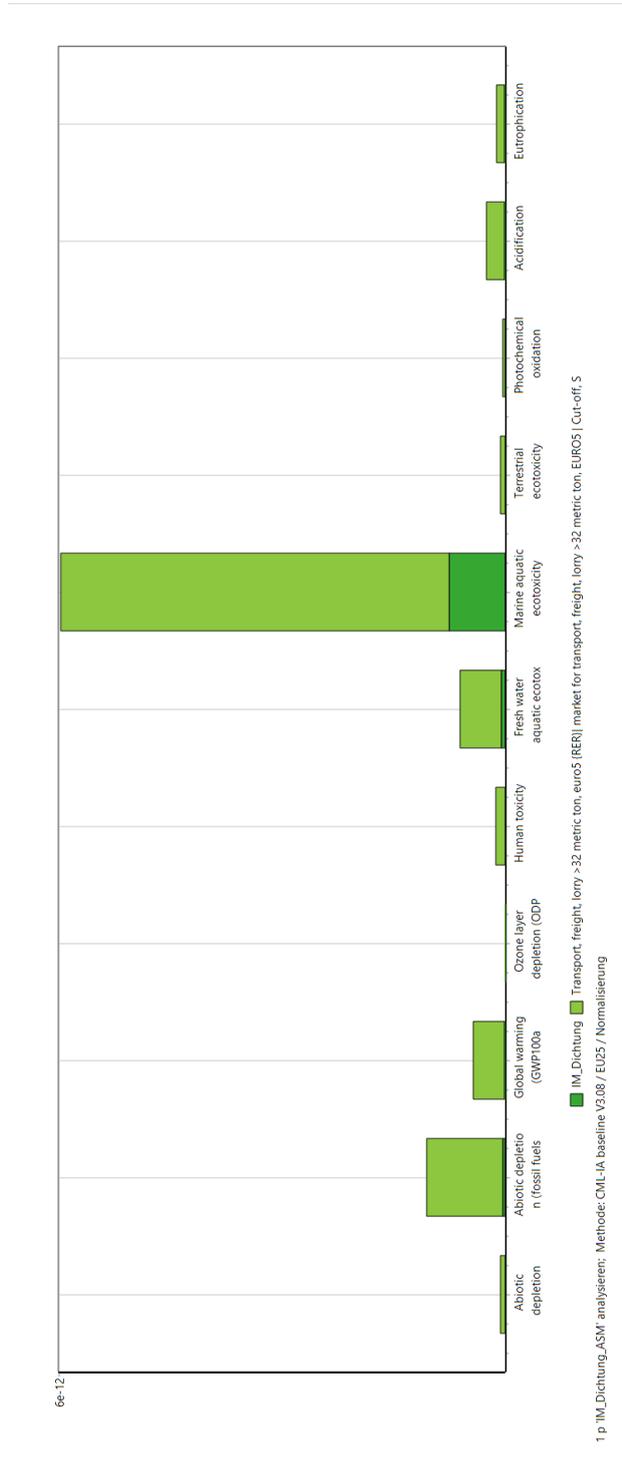


Abbildung a.3: Normalisierte Darstellung der einzelnen Wirkungskategorien: Fertigungsverfahren Spritzguss

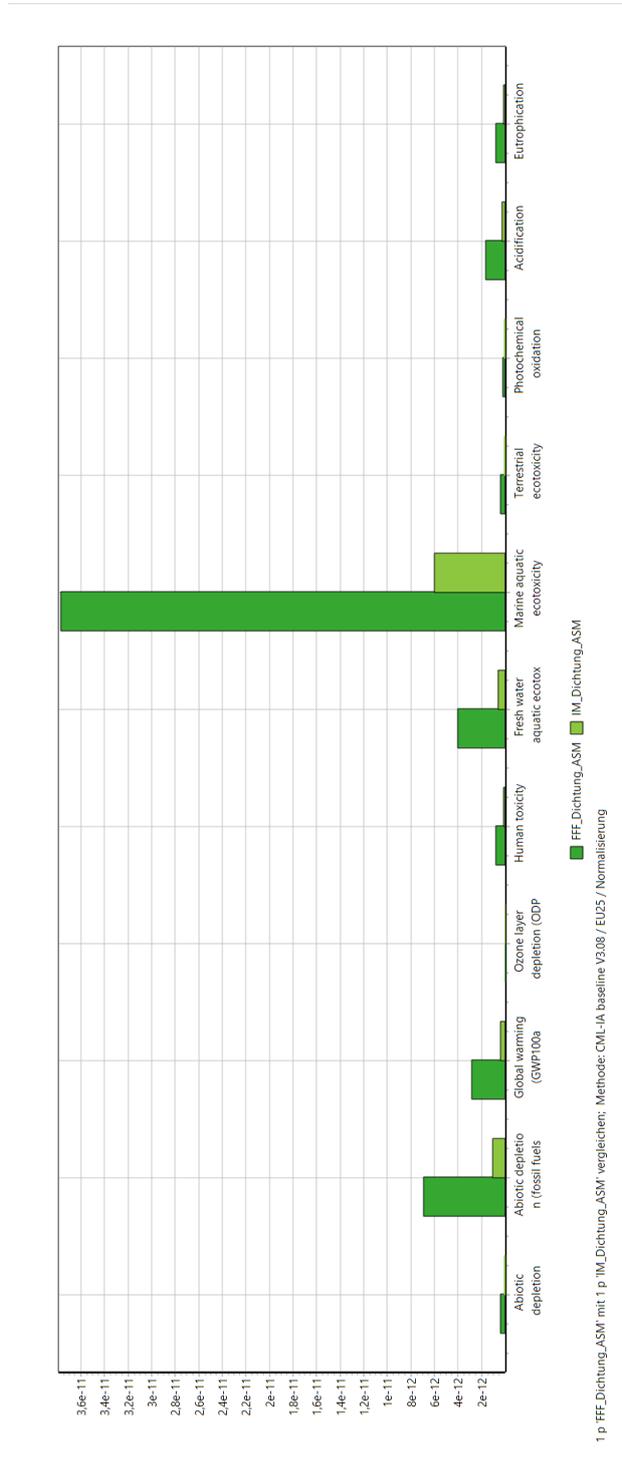


Abbildung a.4: Normalisierte Darstellung der einzelnen Wirkungskategorien: Fertigungsverfahren Spritzguss und FFF

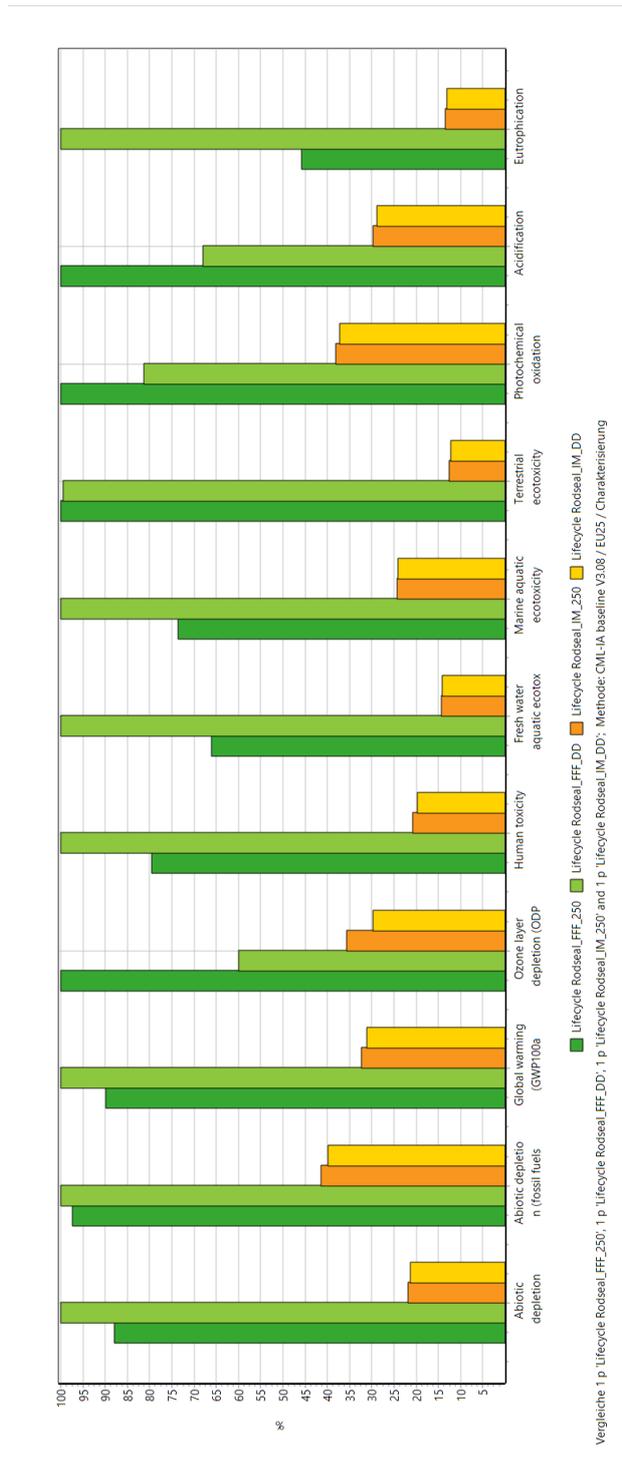


Abbildung a.5: Charakterisierungsdarstellung: Anwendungsorte Vigo und Dresden, jeweils für beide Fertigungsverfahren im Vergleich (links in hell- und dunkelgrün: Additive Fertigung; rechts in orange und gelb: Spritzguss)

LITERATURVERZEICHNIS

- [Abt19] Georg Abts: *Einführung in die Kautschuktechnologie*. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, 2019. DOI: 45461.
- [Bai+15] Jiaming Bai, Shangqin Yuan, Wanlu Chow, Chee Kai Chua, Kun Zhou und Jun Wei: »Effect of surface orientation on the tribological properties of laser sintered polyamide 12«. In: *Polymer Testing* Bd. 48 (2015), S. 111–114. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2015.09.017.
- [Bar+17] Jeffrey N. Bartow, Carsten Franke, Robin E. Wright und Fee Zentis: »Additive Processing of fluoropolymers«. WO 2017/127561 A1. 2017.
- [Bau+11] M. Baumers, C. Tuck, D. L. Bourell, R. Sreenivasan und R. Hague: »Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process«. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Bd. 225, Nr. 12 (2011), S. 2228–2239. DOI: 10.1177/0954405411406044.
- [Bau+22] Erwin Baur, Dietmar Drummer, Tim A. Osswald und Natalie Rudolph: *Saechting Kunststoff-Handbuch*. 32., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2022.
- [Bie+19] Marius Bierdel, Aron Pfaff, Sebastian Kilchert, Andreas Köhler, Yifat Baron und Winfried Bulach: *VDI ZRE Studie: ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion*. Hrsg. von VDI ZRE. Berlin, 2019. URL: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI_ZRE_Studie_Additive_Fertigungsverfahren_bf_1_.pdf (besucht am 22. 09. 2023).
- [BR20] Ulrich Blobner und Bernhard Richter: *Ausfall durch Hydrolyse: Wasser und Dampf – Von Dichtungsanwendern oftmals unterschätzt*. Großbottwar, 2020. URL: https://www.o-ring-prueflabor.de/files/fachwissen_schaden_hydrolyse_10_2020.pdf (besucht am 09. 05. 2023).
- [Bonzo] Christian Bonten: *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen*. 3., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [Bur13] Carlo Burkhardt: *Metallpulverspritzguss: Fertigung komplexer Bauteile in höchster Präzision*. Bd. 359. Die Bibliothek der Technik. Landsberg: Verl. Moderne Industrie, 2013.

- [CH20] Horst Czichos und Karl-Heinz Habig (Hrsg.): *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. 5., überarb. u. erw. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und Springer Vieweg, 2020.
- [DTE15] M. Dawoud, I. Taha und S. J. Ebeid: »Effect of processing parameters and graphite content on the tribological behaviour of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene«. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Bd. 46, Nr. 12 (2015), S. 1185–1195. DOI: 10.1002/mawe.201500450.
- [Deb05] Christoph Debler: »Bestimmung und Vorhersage des Verschleisses für die Auslegung von Dichtungen«. Dissertation. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2005.
- [Dec87] Carl R. Deckard: »Method and apparatus for producing parts by selective sintering«. US Patent 4863538. 1987. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d2/84/74/eaf2b3d455fe5e/US4863538.pdf> (besucht am 22. 09. 2023).
- [Deu21a] Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg.: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. DIN EN ISO 14044:2021-02. Berlin: Beuth-Verlag, 1. Feb. 2021.
- [Deu21b] Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg.: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. DIN EN ISO 14040:2021-02. Berlin: Beuth-Verlag, 1. Feb. 2021.
- [Eng11] Tobias Engelke: »Einfluss der Elastomer-Schmierstoff-Kombination auf das Betriebsverhalten von Radialwellendichtungen«. Dissertation. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2011.
- [Equ+10] A. Equbal, A. K. Sood, V. Toppo, R. K. Ohdar und S. S. Mahapatra: »Prediction and analysis of sliding wear performance of fused deposition modelling-processed ABS plastic parts«. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* Bd. 224, Nr. 12 (2010), S. 1261–1271. DOI: 10.1243/13506501JET835.
- [Fal+15] Jeremy Faludi, Cindy Bayley, Suraj Bhogal und Myles Iribarne: »Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment«. In: *Rapid Prototyping Journal* Bd. 21, Nr. 1 (2015), S. 14–33. DOI: 10.1108/RPJ-07-2013-0067.
- [FD16] Simon Ford und Mélanie Despeisse: »Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges«. In: *Journal of Cleaner Production* Bd. 137 (2016), S. 1573–1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [Fri18] K. Friedrich: »Polymer composites for tribological applications«. In: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* Bd. 1, Nr. 1 (2018), S. 3–39. DOI: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001.

- [GZ85] Antonio Gabelli und Jacobus Zwarts: »Means for measuring a radial force«. EP0182438A1. 1985.
- [Gar+21] Fabricio Leon Garcia, Andréa Oliveira Nunes, Mariane Guerra Martins, Maria Cristina Belli, Yovana M.B. Saavedra, Diogo Aparecido Lopes Silva und Virgínia Aparecida Silva Da Moris: »Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers«. In: *International Journal of Sustainable Engineering* Bd. 14, Nr. 6 (2021), S. 1604–1622. DOI: 10.1080/19397038.2021.1990435.
- [Geb16] Andreas Gebhardt: *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- [GW20] Norbert Gebhardt und Jürgen Weber, Hrsg.: *Hydraulik – Fluid-Mechatronik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-60664-3.
- [GSV14] Malte Gebler, Anton J.M. Schoot Uiterkamp und Cindy Visser: »A global sustainability perspective on 3D printing technologies«. In: *Energy Policy* Bd. 74 (2014), S. 158–167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- [Ges02] Gesellschaft für Tribologie: *GfT-Arbeitsblatt 7:Tribologie - Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung*. 2002.
- [Gie+18] Bolesław Giemza, Marek Domański, Maciej Deliś und Dawid Kapica: »Tribological properties of 3D printed components«. In: *Journal of KONBiN* Bd. 48, Nr. 1 (2018), S. 447–463. DOI: 10.2478/jok-2018-0066.
- [Gra+22] Matthias Graf, Thomas Ebel, Tobias Lanckenau und Kathrin Ottink: »Towards additively manufactured dynamic rod seals«. In: *21st International Sealing Conference (2022)*, S. 47–62.
- [GR17] Pavan K. Gurralla und Srinivasa P. Regalla: »Friction and wear rate characteristics of parts manufactured by fused deposition modelling process«. In: *International Journal of Rapid Manufacturing* Bd. 6, Nr. 4 (2017), S. 245. DOI: 10.1504/IJRAPIDM.2017.087541.
- [Haa09] Werner Haas: *Grundlehrgang Dichtungstechnik*. Hrsg. von Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart. 2009. URL: https://www.ima.uni-stuttgart.de/dokumente/forschung/dichtungstechnik/flyer/skript_dichtungstechnik.pdf (besucht am 22. 09. 2023).
- [HMZ20] Muammel M. Hanon, Róbert Marczis und László Zsidai: »Impact of 3D-printing structure on the tribological properties of polymers«. In: *Industrial Lubrication and Tribology* Bd. 72, Nr. 6 (2020), S. 811–818. DOI: 10.1108/ILT-05-2019-0189.

- [Hul86] Charles W. Hull: »Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography«. US Patent 4575330A. 1986. URL: <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en> (besucht am 22. 09. 2023).
- [ISO97] ISO International Organization for Standardization: *ISO 7986 - Hydraulic fluid power - Sealing devices - Standard test methods to assess the performance of seals used in oil hydraulic reciprocating applications*. 1997.
- [Jos66] Peter Jost, Hrsg.: *Lubrication (Tribology): A report on the present position and Industry's needs*. London: Her Majesty's Stationry Office, 1966.
- [Kai16] Wolfgang Kaiser: *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2016.
- [Kel+10] Karel Kellens, Wim Dewulf, Wim Deprez, Evren Yasa und Joost Duflou: »Environmental analysis of SLM and SLS manufacturing processes«. In: *Conference proceedings / LCE 2010, 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Hrsg. von Hong-chao Zhang, Zhifeng Liu und Guangfu Liu. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2010, S. 423–428. URL: <https://lirias.kuleuven.be/1674846?limo=0>.
- [KDK83] Igor V. Kragelski, Michail Nikolaevič Dobyčĭn und Vjačeslav Sergeevič Kombalov: *Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß*. München: Hanser, 1983.
- [Luo+99] Yanchun Luo, Zhiming Ji, M. C. Leu und R. Caudill: »Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes«. In: (1999), S. 1–6. DOI: 10.1109/ISEE.1999.765837.
- [Mar+20] I-T Maries, C. Vilau, M. S. Pustan, C. Dudescu und H. G. Crisan: »Determining the tribological properties of different 3D printing filaments«. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Bd. 724 (2020), S. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/724/1/012022.
- [Mol17] Michael Molitch-Hou: *3D Printing Filaments: What's the Deal with ULTEM and PEEK?* 2017. URL: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14465/3D-Printing-Filaments-Whats-the-Deal-with-ULTEM-and-PEEK.aspx> (besucht am 22. 09. 2023).
- [Mül90] Heinz Konrad Müller: *Abdichtung bewegter Maschinenteile: Funktion - Gestaltung - Berechnung - Anwendung*. Waiblingen: Medienverl. Müller, 1990.
- [Ott14] Kathrin Ottink: »Betriebsverhalten von Wälzlagerschutzdichtungen - experimentelle Untersuchungen und Berechnungsansätze«. Dissertation. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2014.

- [OWP10] Kathrin Ottink, B. Wennehorst und G. Poll: »Analysis of rod seals by application of the light induced fluorescence method«. In: *16th International Sealing Conference* (2010), S. 101–111.
- [Par+14] Sang-In Park, David W. Rosen, Seung-kyum Choi und Chad E. Duty: »Effective mechanical properties of lattice material fabricated by material extrusion additive manufacturing«. In: *Additive Manufacturing* Bd. 1-4 (2014), S. 12–23. DOI: 10.1016/j.addma.2014.07.002.
- [Per+17] S. Perepelkina, P. Kovalenko, R. Pechenko und K. Makhmudova: »Investigation of Friction Coefficient of Various Polymers Used in Rapid Prototyping Technologies with Different Settings of 3D Printing«. In: *Tribology in Industry* Bd. 39, Nr. 4 (2017), S. 519–526. DOI: 10.24874/ti.2017.39.04.11.
- [Ris12] Andreas Risse: *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. DOI: 10.1007/978-3-8348-8312-4.
- [Ros10] Axel Rossmann: *Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen: Band 2: Versagensformen von Maschinenelementen*. Hrsg. von Turboconsult. Karlsfeld, 2010.
- [Sac+93] Emanuel Sachs, John Haggerty, Michael Cima und Paul Williams: »Three-dimensional printing techniques«. US Patent 5204055. 1993. URL: <https://www.freepatentsonline.com/5204055.html> (besucht am 22.09.2023).
- [SL95] M. J. W. Schouten und Leeuwen, van, H. J., Hrsg.: *Die Elasto-hydrodynamik : Geschichte und Neuentwicklungen: Gleitwälzkontakte : Grundlagen und Stand der Technik bei Wälzlagern, Zahnrädern und Nockenstösseln sowie stufenlos übersetzenden Getrieben (CVT)*. Bd. 1207. VDI-Berichte. 1995. URL: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4273951/603829.pdf> (besucht am 22.09.2023).
- [Soo+12] Anoop Kumar Sood, Asif Equbal, Vijay Toppo, R. K. Ohdar und S. S. Mahapatra: »An investigation on sliding wear of FDM built parts«. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 5, Nr. 1 (2012), S. 48–54. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.08.003. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581711001040>.
- [SSA12] W. Steinhilper, B. Sauer und A. Albers: *Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. 7. Aufl. Bd. / Walde-mar Steinhilper; Bernd Sauer (Hrsg.); 2. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [Stro3] Richard 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.

- [Sun+23] Lion Sundermann, Sebastian Leineweber, Benjamin Klie, Heike Wittek, Thomas Ebel, Birger Reitz, Kathrin Ottink, Matthias Graf, Tobias Lankenau, Ludger Overmeyer und Ulrich Giese: »Tailoring the Curing Kinetics of NBR-Based Rubber Compounds for Additive Manufacturing of Rod Seals«. In: *Advances in Polymer Technology* Bd. 2023 (2023), S. 1–16. DOI: 10.1155/2023/7343194.
- [TS12] Cassandra Telenko und Carolyn Seepersad: »A comparison of the energy efficiency of selective laser sintering and injection molding of nylon parts«. In: *Rapid Prototyping Journal* Bd. 18, Nr. 6 (2012), S. 472–481. DOI: 10.1108/13552541211272018.
- [TCZ21] Wei Shian Tey, Chao Cai und Kun Zhou: »A Comprehensive Investigation on 3D Printing of Polyamide 11 and Thermoplastic Polyurethane via Multi Jet Fusion«. In: *Polymers* Bd. 13, Nr. 13 (2021). DOI: 10.3390/polym13132139.
- [Tru68] Karl Trutnovsky: »Einteilung der Dichtungen - Versuch einer Übersicht«. In: *Konstruktion Band 20* Nr. Heft 6 (1968), S. 201–206.
- [Tso11] A. Tsouknidas: »Friction Induced Wear of Rapid Prototyping Generated Materials: A Review«. In: *Advances in Tribology* Bd. 2011 (2011), S. 1–7. DOI: 10.1155/2011/746270.
- [WP17] Bengt Wennehorst und Gerhard Poll: »Soft micro-elastohydrodynamic lubrication and friction at rough conformal contacts«. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* Bd. 231, Nr. 3 (2017), S. 302–315. DOI: 10.1177/1350650114558322.
- [WAA00] E. Westkämper, Alting und Arndt: »Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing (keynote paper)«. In: *CIRP Annals* Bd. 49, Nr. 2 (2000), S. 501–526. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63453-2.
- [Wu+15] Wenzheng Wu, Peng Geng, Guiwei Li, Di Zhao, Haibo Zhang und Ji Zhao: »Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS«. In: *Materials (Basel, Switzerland)* Bd. 8, Nr. 9 (2015), S. 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Thomas Paul Ebel
Geburtsdatum, Ort: 12.05.1969 in Aurich

Studium

09/2005-03/2007 Studium Technical Management an der FH Oldenburg/
Ostfriesland/Wilhelmshaven
Abschluss: M. Eng.
03/1994-05/1996 Ergänzungsstudium Wirtschaftsingenieurwesen an der
FH Ostfriesland, Emden (abgebrochen wg. Aufnahme einer
Tätigkeit als Ingenieur)
09/1990-12/1993 Rechnerintegrierte Produktionstechnik, Studienschwer-
punkt CAM an der FH Ostfriesland, Emden (Fachbereich
Maschinenbau)
Abschluss: Dipl.-Ing. (FH)

Berufstätigkeit

seit 10/2002 Hochschule Emden-Leer
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
04/1999-09/2002 Atlantique Automatisierungstechnik GmbH, Aurich
Leiter der Abteilung Maschinenbau-Konstruktion
05/1996-03/1999 Metallbau Schulz GmbH, Nienhagen
Konstrukteur und EDV-Betreuer