



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# Ein Beitrag zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung am Beispiel einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungsmaschine

vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Kay-Eric Werner Heinz Steffan, M.Sc.

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Tag der Einreichung: 30.06.2023  
Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2023

Darmstadt 2023  
D17

Ein Beitrag zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung  
am Beispiel einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungsmaschine

Genehmigte Dissertation von Kay-Eric Werner Heinz Steffan, M.Sc.

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Tag der Einreichung: 30.06.2023  
Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2023

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt - D17  
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

Für dieses Werk gilt das Urheberrecht.

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:  
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-265244  
URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/26524>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUprints,  
E-Publishing-Service der TU Darmstadt  
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>  
[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

---

# Erklärung

---

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, den 30. Juni 2023

---

Kay-Eric Werner Heinz Steffan, M.Sc.

---

# Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt.

Nach meiner fünfjährigen Tätigkeit am Fachgebiet möchte ich mich herzlich an dieser Stelle bei allen Personen für ihre Unterstützung bedanken. Mein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner für die Möglichkeit der Promotion, die wissenschaftliche Betreuung und für das entgegengebrachte Vertrauen. Ihre fachlichen Anregungen und Anmerkungen in unseren gemeinsamen Diskussionen haben wertvolle Denkanstöße geschaffen und zum Gelingen meines Forschungsvorhabens beigetragen. Durch die gemeinsame Arbeit haben Sie meine fachliche und persönliche Weiterentwicklung mit geprägt.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold, Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) für die freundliche Übernahme des Korreferats und das damit verbundene Interesse an meiner Forschung danken. Mit Ihrer wissenschaftlichen Expertise im Bereich der Werkzeugmaschinenentwicklung haben Ihre wertvollen Hinweise in den konstruktiven Diskussionen zur inhaltlichen Schärfung meiner Arbeit beigetragen.

Für die angenehme Zeit am Fachgebiet danke ich allen aktuellen und ehemaligen Kollegen. Diese intensive, gemeinsame Zeit werde ich immer in fröhlicher Erinnerung behalten. Besonders bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei meiner langjährigen Bürokollegin Fiona Schulte sowie Jannik Reichwein, Johannes Geis, Kris Rudolph, Marco Noack, Elias Walch und Moritz Schäfle für die fortwährende Diskussionsbereitschaft und die Ideen im Bereich der additiven Fertigung.

Weiterhin möchte ich Jochen Ott, Volker Rosmann, Uwe Rodenhäuser und Axel Rodenhäuser der Gemeinschaftswerkstatt für die gute Zusammenarbeit danken. Mein Dank gilt ebenso allen Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten außerordentlichen Einsatz gezeigt und so inhaltlich zu meiner Arbeit beigetragen haben.

Abschließend möchte ich meiner Familie, meiner Partnerin und meinen Freunden danken. Ihr habt mir Kraft gegeben, mir den Rücken freigehalten und euer Verständnis hat mich immer motiviert. Ich bin sehr froh, dass ihr bei mir seid.

Darmstadt, den 30. Juni 2023  
Kay-Eric Steffan



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XIV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation dieser Arbeit . . . . .	1
1.2 Ziel und Aufbau dieser Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen im Bereich der additiven Fertigung am Beispiel des Fused Filament Fabrication Verfahrens</b>	<b>5</b>
2.1 Einteilung und Anwendung additiver Fertigungsverfahren . . . . .	5
2.2 Der additive Fertigungsprozess . . . . .	7
2.2.1 Das Fused Filament Fabrication Verfahren . . . . .	7
2.2.2 Prozesskette zur additiven Fertigung . . . . .	8
2.2.3 Prozessparameter des Fused Filament Fabrication Verfahrens . . . . .	11
2.3 Potentiale der additiven Fertigung . . . . .	14
2.3.1 Möglichkeiten durch gestalterische Potentiale . . . . .	15
2.3.2 Möglichkeiten durch organisatorische Potentiale . . . . .	17
2.4 Restriktionen additiver Fertigungsverfahren . . . . .	18
2.4.1 Restriktionen gestalterischer Möglichkeiten . . . . .	18
2.4.2 Restriktionen organisatorischer Möglichkeiten . . . . .	18
2.5 Erweiterung additiver Fertigungsverfahren zu hybriden Fertigungsverfahren . . . . .	19
2.5.1 Hybride Fertigungsverfahren . . . . .	20
2.5.2 Hybride additive Fertigungsverfahren . . . . .	21
2.5.3 Hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren . . . . .	21
<b>3 Methodische Produktentwicklung mit Berücksichtigung der Fertigung</b>	<b>26</b>
3.1 Grundlagen der methodischen Produktentwicklung . . . . .	26
3.1.1 Modelle zur Beschreibung technischer Systeme . . . . .	26

3.1.2	Der Produktentwicklungsprozess . . . . .	29
3.1.3	Aufbau einer Entwicklungsmethode . . . . .	31
3.1.4	Entwicklung von Fertigungsmaschinen . . . . .	31
3.1.5	Die Produktgenerationsentwicklung . . . . .	32
3.2	Verbindung der Produktentwicklung und der Fertigung . . . . .	33
3.2.1	Verknüpfung durch den Produktlebenslauf . . . . .	33
3.2.2	Das Design for X - DfX . . . . .	34
3.2.3	Möglichkeiten der Funktionsintegration . . . . .	36
3.3	Die fertigungsintegrierende Entwicklungsmethodik . . . . .	38
3.3.1	Aufbau der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik . . . . .	38
3.3.2	Beschreibung von Fertigungsverfahren im Kontext der Produktentwicklung .	40
3.3.3	Das Verfahrensprinzipmodell . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Forschungsdesign</b> . . . . .	<b>46</b>
4.1	Forschungsbedarf . . . . .	46
4.2	Zielsetzung und Forschungsfragen . . . . .	48
4.3	Forschungsvorgehen . . . . .	48
<b>5</b>	<b>3DConFil – Verfahrenskonkretisierung und Fertigungsmaschinenentwicklung</b>	<b>50</b>
5.1	Idee und Konkretisierung des 3DConFil-Verfahrens . . . . .	50
5.1.1	Die Produktidee einer funktionsintegrierten Armablage . . . . .	50
5.1.2	Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens . . . . .	52
5.1.3	Leitungsverhalten und Anforderungen an das 3DConFil-Verfahren . . . . .	54
5.1.4	Die initialen Fertigungsschritte . . . . .	58
5.2	Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens auf Basis des experimentellen Leitungsverhaltens ausgewählter Leitungen . . . . .	63
5.2.1	Auswahl der berücksichtigten Leitungen . . . . .	64
5.2.2	Experimentelle Bestimmung der Leitungsverläufe . . . . .	65
5.2.3	Auswertung der experimentell ermittelten Leitungsverläufe . . . . .	69
5.2.4	Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens . . . . .	73
5.3	Wirkgrößen des 3DConFil-Verfahrens . . . . .	76
5.3.1	Integration zwischen zwei Schichten . . . . .	76
5.3.2	Integration über mehrere Schichten . . . . .	77
5.3.3	Fertigungsschritte zum Übergang in und aus den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration . . . . .	79
5.4	Entwicklung einer Fertigungsmaschine für das 3DConFil-Verfahren . . . . .	81
5.4.1	Der physische Entwicklungsumfang . . . . .	81
5.4.2	Konzeption und Gestaltung des Funktionsprototyps . . . . .	82
5.4.3	Teilsystemgestaltung anhand des 3DConFil-Druckkopfs . . . . .	91
5.4.4	Der 3DConFil-Funktionsprototyp . . . . .	95
5.4.5	Der digitale Entwicklungsumfang . . . . .	96
5.4.6	Digitale Komponenten zur Steuerungsbefehlgenerierung . . . . .	98
5.5	Nutzung der gestalterischen Möglichkeiten des 3DConFil-Verfahrens am Beispiel einer Armablage . . . . .	103

<b>6</b>	<b>Die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung</b>	<b>106</b>
6.1	Ziel, Ansatz und Anwendungsrahmen der Methode . . . . .	106
6.1.1	Ziel der Methode . . . . .	106
6.1.2	Ansatz und Anwendungsrahmen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung . . . . .	107
6.2	Modellierung des Zusammenhangs von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften und der Fertigungsmaschinenentwicklung . . . . .	109
6.2.1	Modellierung von Fertigungsverfahren mit einem Fertigungsschritt . . . . .	109
6.2.2	Modellierung von Fertigungsverfahren mit mehreren Verfahrensschritten . . . . .	113
6.2.3	Verknüpfungen innerhalb der Fertigungsmaschine . . . . .	116
6.3	Vorgehen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Anwendung der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung</b>	<b>121</b>
7.1	Initiale Verifikation anhand der Durchmesserreduktion integrierbarer Leitungen . . . . .	121
7.1.1	Beeinflussung während der Grundkörperfertigung . . . . .	122
7.1.2	Beeinflussung während der Integration zwischen zwei Schichten . . . . .	124
7.1.3	Teilsystemzuordnung der Anforderungen . . . . .	126
7.2	Erweiterung nutzbarer Potentiale der Funktionsintegration . . . . .	128
7.2.1	Variantenvielfalt von Endapplikationen . . . . .	129
7.2.2	Integrationsmöglichkeit der Endapplikationen . . . . .	130
7.2.3	Anforderungen an die Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine zur Endapplikationsintegration . . . . .	132
7.2.4	Ableitung eines Integrationskörpers unter Nutzung bestehender Wirkgrößen und Wirkelemente des Funktionsprototyps . . . . .	134
7.2.5	Neue verfahrensinduzierte Eigenschaften durch einen Integrationskörper . . . . .	136
7.3	Nutzung der erweiterten verfahrensinduzierten Eigenschaften im Rahmen einer Gleitlageranwendung . . . . .	137
7.3.1	Einführung und Randbedingungen . . . . .	137
7.3.2	Anforderungsermittlung zur Verbesserung des Experimentalbetriebs . . . . .	138
7.3.3	Konzeption und Gestaltung des hybrid-integrierten additiv gefertigten Gleitlagergehäuses . . . . .	141
7.3.4	Experimentaltest des hybrid-integrierten additiven Gleitlagergehäuses . . . . .	143
7.3.5	Weiterentwicklung des hybrid-integrierten additiven Gleitlagergehäuses . . . . .	145
7.4	Neue verfahrensinduzierte Eigenschaften anhand einer kinematischen Erweiterung . . . . .	147
7.4.1	Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch neue Wirkgrößen . . . . .	147
7.4.2	Verfahrenserweiternde Fertigungsschritte zur Bauteilorientierung . . . . .	148
7.4.3	Anforderungen an die kinematisch erweiterte Fertigungsmaschine . . . . .	149
7.4.4	Gestaltung der kinematischen Erweiterung . . . . .	151
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	155
8.2	Ausblick . . . . .	157

---

<b>A Anhang</b>	<b>158</b>
A.1 In der Literatur dokumentierte Definitionen des Begriffs der Funktionsintegration .	158
A.2 Berücksichtigte Gestaltungslösungen zur Integration zwischen zwei Druckschichten	160
A.3 Prüfaufbau und Durchführung der Messungen . . . . .	164
A.4 Auswahl des Konzepts des Fördersystems . . . . .	166
A.5 Abschätzung der Biegewechselereignisse . . . . .	170
A.6 Gestaltung der weiteren physischen Teilsysteme . . . . .	172
A.6.1 Teilsystem - Riemenextruder . . . . .	172
A.6.2 Teilsystem - Zwischenspeicher . . . . .	173
A.6.3 Weitere Teilsysteme der Leitungsführung . . . . .	175
A.7 Konzeption der digitalen Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens . . . . .	177
A.8 Berücksichtigte kommerzielle Anbieter von Endapplikationen . . . . .	179
A.9 Anforderungsliste der 3DConFil-Fertigungsmaschine . . . . .	180
A.10 Funktionsträger zur Überprüfung des Leitungsverlaufs . . . . .	185
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>195</b>
<b>Literatur</b>	<b>196</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>227</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>228</b>

---

# Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
3DConFil	3DContinuousFilament
3MF	3D Manufacturing Format
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive manufacturing format
ASTM	American Society for Testing and Materials
BF	Bereichsforderungen
CAD	Computer-aided design
CAE	Computer-Aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control
DfA	Design for Assembly
DfAM	Design for additive Manufacturing
DfM	Design for Manufacture
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DPM	Design Pattern Matrix
DW	Direct Writing
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
FDM <sup>®</sup>	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Element Analyse
FF	Festforderung
FFF	Fused Filament Fabrication
FFT	Fast Fourier Transformation
Fn	Anforderung an Fertigungsmaschine
Gn	Anforderung an Gleitlagergehäuse
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
G-Code	Programmiersprache für Steuerungsbefehle
hAM	Hybride additive Fertigung

---

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

---

Abkürzungsverzeichnis – von vorheriger Seite fortgesetzt

Abkürzung	Bedeutung
hiAM	Hybrid-integrierende additive Fertigung
Hotend	Komponenten zur Erwärmung und Extrusion von Kunststoff
IC	Integrated circuit
ISO	International Organization for Standardization
LC	Liquid Crystal
LED	Light-emitting diode
LOM	Laminated object manufacturing
PLA	Polyactide
pmd	Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente
PTFE	Polytetrafluorethylen
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
PU	Polyurethane
RFID	Radio-frequency identification
Scara	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLA	Stereolithografie
SMD	Surface Mounted Device
Sn	Anforderung an Software
STL	Surface tessellation language
TOTE	Test-Operate-Test-Exit
USB-Bussystem	Universal serial bus
UV	Ultraviolett
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
viE	Verfahrensinduzierte Eigenschaft
Vn	Anforderung an Fertigungsverfahren
VP-Modell	Verfahrensprinzipmodell
vprE	Verfahrensprinziprelevante Eigenschaft
W	Wunsch
Wz	Wirkzusammenhang
ZF	Zielforderung

---

# Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
$B_{\text{Klemm}}$	Klemmbreite Horizontalkanal	$m$
$B_{\text{WE}}$	Breite des Einpresswerkzeugs	$m$
$b_{\text{RE}}$	Kantenlänge Rechteck	$m$
$D_{\text{Kanaldurchmesser}}$	Durchmesser des Integrationskanals	$m$
$D_{\text{Leitungsdurchmesser}}$	Durchmesser der integrierten Leitung	$m$
$d_{\text{F}}$	Durchmesser Kunststofffilament	$m$
$d_{\text{Kanal\_geneigt}}$	Kanaldurchmesser geneigter Kanalverlauf	$m$
$d_{\text{Kanal\_vertikal}}$	Kanaldurchmesser vertikal Kanalverlauf	$m$
$d_{\text{Lt}}$	Leitungsdurchmesser	$m$
$d_{\text{Zyl}}$	Durchmesser Zylinder	$m$
$E$	Elastizitätsmodul	$N/m^2$
$F$	Kraft bzw. Last	$N$
$F_{\text{Bauplattform\_X}}$	Kraft in X-Richtung der Bauplattform	$N$
$F_{\text{Bauplattform\_Y}}$	Kraft in Y-Richtung der Bauplattform	$N$
$F_{\text{Bauplattform\_Z}}$	Kraft in Z-Richtung der Bauplattform	$N$
$F_{\text{Einpress}}$	Kraft zum Einpressen der Leitung	$N$
$F_{\text{Endapp\_X}}$	Kraft in X-Richtung auf Endapplikation	$N$
$F_{\text{Endapp\_Y}}$	Kraft in Y-Richtung auf Endapplikation	$N$
$F_{\text{Endapp\_Z}}$	Kraft in Z-Richtung auf Endapplikation	$N$
$F_{\text{FFF\_X}}$	Kraft in X-Richtung zur Positionierung der FFF-Düse	$N$
$F_{\text{FFF\_Y}}$	Kraft in Y-Richtung zur Positionierung der FFF-Düse	$N$
$F_{\text{FFF\_Z}}$	Kraft in Z-Richtung zur Positionierung der FFF-Düse	$N$
$F_{\text{Förderung}}$	Kraft zur Förderung der Leitung	$N$
$F_{\text{Förderung\_KS}}$	Kraft zur Förderung des Kunststofffilaments	$N$
$F_{\text{Klemm\_X}}$	Kraft in X-Richtung zur Einspannung der Leitung	$N$
$F_{\text{Klemm\_Y}}$	Kraft in Y-Richtung zur Einspannung der Leitung	$N$
$F_{\text{Klemm\_Z}}$	Kraft in Z-Richtung zur Einspannung der Leitung	$N$
$F_{\text{Stütz}}$	Kraft zur Abstützung der Trennkraft	$N$
$F_{\text{Trenn}}$	Kraft zur Trennung der Leitung	$N$
$F_{\text{Zug}}$	Zugkraft	$N$

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Symbolverzeichnis – von vorheriger Seite fortgesetzt

Symbol	Bedeutung	Einheit
$F_{\text{Zug}_X}$	Zugkraft in X-Richtung	$N$
$F_{\text{Zug}_Y}$	Zugkraft in Y-Richtung	$N$
$F_{\text{Zug}_Z}$	Zugkraft in Z-Richtung	$N$
$\vec{g}$	Gravitationsvektor	$m/s^2$
$H_{\text{Klemm}}$	Höhe des Klemmbereichs	$m$
$h$	Vertikaler Abstand zwischen Eintritt und Austritt der Leitung	$m$
$h_{\text{EW}_{\text{min}}}$	Minimale Trichterhöhe	$m$
$h_{\text{min}}$	Minimale Schmierfilmdicke	$m$
$h_{\text{RE}}$	Kantenlänge Rechteck	$m$
$h_{\text{S}}$	Schichthöhe des FFF-Verfahrens	$m$
$h_{\text{Zyl}}$	Länge Zylinder	$m$
$I$	Flächenträgheitsmoment	$m^4$
$I_{\text{L}}$	Axiales Flächenträgheitsmoment	$m^4$
$L$	Länge der Leitung	$m$
$l$	Horizontaler Abstand zwischen Eintritt und Austritt der Leitung	$m$
$l_{\text{EW}_{\text{max}}}$	Maximale Trichteröffnung	$m$
$l_{\text{F}}$	Länge Kunststofffilament	$m$
$l_{\text{Lt}}$	Länge der Leitung	$m$
$l_{\text{TR}}$	Breite der Trichterflanke	$m$
$l_{\text{WE}}$	Höhe des Wirkelements	$m$
$\dot{m}_{\text{Leitung}}$	Massenstrom der Leitung	$kg/s$
$M_{\text{Endapp}_X}$	Moment um X-Achse auf Endapplikation	$Nm$
$M_{\text{Endapp}_Y}$	Moment um Y-Achse auf Endapplikation	$Nm$
$M_{\text{Endapp}_Z}$	Moment um Z-Achse auf Endapplikation	$Nm$
$P_{\text{EP}}$	Einpresspunkt	–
$p$	Druck	$N/m^2$
$\dot{Q}_{\text{Heiz}}$	Wärmestrom zur Extrusion des Kunststofffilaments	$W$
$r_{\text{B}}$	Biegeradius	$m$
$S$	Seilkraft	$N$
$S_{\text{B}}$	Biegesteifigkeit	$Nm^2$
$t_{\text{RE}}$	Kantenlänge Rechteck	$m$
$v_{\text{Luft}}$	Geschwindigkeit der Luft zur Kühlung des Hotends	$m/s$
$Y_{\text{KE}}$	Rotatorischer Freiheitsgrad zur kinematischen Erweiterung	$^\circ$
$Z_{\text{KE}}$	Rotatorischer Freiheitsgrad zur kinematischen Erweiterung	$^\circ$
$Z_{\text{min}_{\text{Endapp}}}$	Minimale Höhe der Wirkelemente in Z-Richtung	$m$

Fortsetzung auf der folgenden Seite...



Symbolverzeichnis – von vorheriger Seite fortgesetzt

Symbol	Bedeutung	Einheit
$Z_n$	Zustand des Operanden vor oder nach einem Fertigungsschritt	–
$\alpha$	Umschlingungswinkel	°
$\alpha_{\text{Einsp}}$	Einspannungswinkel	°
$\alpha_{\text{PLE}}$	Winkel der Positioniereinrichtung um den Leitungseintritt	°
$\alpha_{\text{Tr}}$	Trichterwinkel	°
$\beta$	Verlagerungswinkel	°
$\beta_{\text{Einsp}}$	Einspannungswinkel	°
$\gamma$	Kanalwinkel	°
$\delta$	Winkel zwischen Druckkopf und Endapplikation	°
$\Theta$	Zähl-Winkel	°
$\mu$	Reibkoeffizient	–
$\omega_B$	Winkelgeschwindigkeit des Gehäuses	1/s
$\omega_F$	Winkelgeschwindigkeit der Last	1/s
$\omega_{\text{eff}}$	Effektive Winkelgeschwindigkeit	1/s
$\omega_j$	Winkelgeschwindigkeit der Welle	1/s

---

# Kurzfassung

---

Fertigungsverfahren ermöglichen gestalterische Potentiale durch verfahrensspezifische Produkteigenschaften zur Entwicklung neuartiger Produkte. Hybride Fertigungsverfahren, im Besonderen die hybrid-integrierende additive Fertigung, stellen vielfältige verfahrensspezifische Produkteigenschaften in Form der verfahrensinduzierten Eigenschaften bereit. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften werden durch die Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine maßgeblich beeinflusst. Zur umfassenderen Ausschöpfung der gestalterischen Verfahrenspotentiale mangelt es an Ansätzen zur Berücksichtigung der Fertigungsmaschinenentwicklung.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur systematischen Überführung verfahrensinduzierter Eigenschaften in Anforderungen für die Fertigungsmaschinenentwicklung. Das im Rahmen der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung erarbeitete Verfahrensprinzipmodell eignet sich zur Beschreibung der Wechselwirkungen von Fertigungsmaschine und gefertigtem Bauteil und ermöglicht durch die eigenschaftsbasierte Beschreibung die Verknüpfung der verfahrensinduzierten Eigenschaften mit den Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine.

Um einen Einblick in die Verknüpfungen von Fertigungsmaschine und gefertigtem Bauteil aus Sicht der Produktentwicklung zu erhalten, wird das hybrid-integrierende additive 3DConFil-Verfahren entwickelt. Das neue Fertigungsverfahren ermöglicht die Integration kontinuierlicher flexibler Leitungen innerhalb des additiv gefertigten Bauteilvolumens und wird durch eine neu entwickelte Fertigungsmaschine erstmalig bereitgestellt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird die Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung erarbeitet.

Die Methode ermöglicht ausgehend von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften deren systematische Überführung in verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften, die als Anforderungen an die Fertigungsmaschine nutzbar sind. Weiterführend wird die entwickelte Methode durch die systematische Zuordnung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften zu den Teilsystemen der Fertigungsmaschine unter Nutzung der Produktarchitektur erweitert. Mit einem methodischen Vorgehen wird der Ablauf der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung systematisiert.

Abschließend wird die Methode anhand der Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des 3DConFil-Verfahrens in Form der Durchmesserreduktion integrierbarer Leitungen, der Integration zusätzlicher Funktionsträger und der kinematischen Erweiterung der Fertigungsmaschine verifiziert und angewendet. Die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung ermöglicht ausgehend von geforderten verfahrensinduzierten Bauteileigenschaften die systematische Ableitung von Anforderungen an die Fertigungsmaschine in Form von Soll-Eigenschaften.

---

# Abstract

---

Manufacturing technologies enable design potentials through process-specific product properties for the development of new kinds of products. Hybrid manufacturing processes, in particular hybrid-integrating additive manufacturing processes, provide a variety of process-specific properties in the form of manufacturing-induced properties. The manufacturing machine significantly determines the manufacturing-induced properties. To achieve a comprehensive utilisation of the design-related manufacturing process potentials, there is a lack of approaches considering the development of the manufacturing machine.

The aim of this work is the development of a method to obtain the systematic transfer of manufacturing-induced properties into manufacturing machine requirements. The process principle model developed in the context of production-integrated product development is suitable for describing the interactions between the manufacturing machine and the manufactured component. Thus, it enables the linkage of the manufacturing-induced properties with the effective variables and effective elements of the manufacturing machine by means of the property-based description.

In order to gain an insight into the relations between the manufacturing machine and the manufactured component from a product development perspective, the hybrid-integrating additive 3DConFil manufacturing process is developed. The new manufacturing process enables the integration of continuous flexible electrical wires, optical fibres and tubes within the additively manufactured component volume and is provided for the first time by a developed manufacturing machine. Based on the knowledge gained from this, the method for potential-driven manufacturing machine development is developed.

Starting from process-induced target properties, this enables their systematic transfer into target properties relevant to the process principle. These can be used as requirements for the manufacturing machine. The developed method is further extended by the systematic assignment of the process-induced target properties and the subsystems of the manufacturing machine based on the product architecture. With a methodical approach, the process of potential-driven manufacturing machine development is systematised.

Finally, the developed method is verified and applied by expanding the process-induced properties of the 3DConFil process in form of a diameter reduction of integrable wires, cables and tubes, the integration of additional function carriers and kinematic expansion of the manufacturing machine. Starting from the requested process-induced component properties, the method of potential-driven manufacturing machine development enables the systematic derivation of requirements for the manufacturing machine in form of target properties.

---

# 1 Einleitung

---

Die Nachfrage nach zukunftsfähigen und innovativen Produkten führt zu vielfältigen Herausforderungen. Aktuelle weltweite Entwicklungen am Markt sind die ansteigende Zahl eingesetzter Technologien in entwickelten Produkten (Technologiekonvergenz), der Anstieg der Produktvielfalt und die Individualisierung (vgl. Krause et al. 2018, S. 1 bis S. 6). Die Begegnung mit diesen Herausforderungen ist durch Maßnahmen der Beherrschung der Variantenvielfalt möglich, beispielsweise durch Funktionsintegration (vgl. Thiebes et al. 2014, S. 165 f.). Zur Entwicklung der Bereitstellung einer hohen Variantenvielfalt kommen kürzer werdende Produktlebenszyklen hinzu (vgl. Krause et al. 2018, S. 1 bis S. 6).

Mit wachsender Zahl der Produktvarianten und kürzer werdenden Zeiten zur Umstellung der Fertigung von Produkten stellen innovative Fertigungsverfahren eine Möglichkeit zur Erfüllung der neuen Anforderungen dar (vgl. Merklein et al. 2016, S. 557). Diese liegen beispielsweise im Bereich der Flexibilisierung und Adaptierbarkeit durch die hybride Produktion. Hybride Produktionssysteme sind in der Lage, diese Anforderungen zu erfüllen und sind ein möglicher Ansatz. (vgl. Brecher et al. 2010, S. III) Eine Möglichkeit zur Verschiebung technologischer Grenzen ist die Hybridisierung durch Technologieintegration (vgl. Hirt et al. 2011, S. 466). Die Weiterentwicklung weist einen sprunghaften Charakter der Verschiebung fertigungstechnologischer Grenzen auf (vgl. Hirt et al. 2011, S. 468).

## 1.1 Motivation dieser Arbeit

Die additive Fertigung bietet die Potentiale zur Funktionsintegration (vgl. Klahn et al. 2014, S. 139) und der Fertigung individueller Produkte (vgl. Ko et al. 2015, S. 2369 bis S. 2375; Spallek et al. 2016, S. 281 f.). Die bestehenden Verfahrenspotentiale der additiven Fertigung, beispielsweise die geometrische Freiheit, der digitalen Prozesskette und der Funktionsintegration (vgl. Kumke 2018, S. 17 bis S. 22), sind eine gute Voraussetzung zur Kombination mit weiteren Fertigungsverfahren zu einem hybriden Fertigungsverfahren.

Zur Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration bestehen bereits mehrere hybride additive Fertigungsverfahren im Stand der Forschung (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43036 bis S. 43049; Saari et al. 2015, S. 32 bis S. 39) und der kommerziellen Nutzung (vgl. Continuous Composites Inc. 2024; Markforged Inc. 2023), welche die Komponentenintegration in ein additiv gefertigtes Bauteil ermöglichen. Fertigungsverfahren, welche die Integration weiterer Komponenten während eines hybriden additiven Fertigungsverfahrens ermöglichen, werden in dieser Arbeit als hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren (hiAM) bezeichnet (vgl. auch Steffan et al. 2022, S. 1471).

---

Fertigungsverfahren ermöglichen beispielsweise durch ihre Fertigungspotentiale neue gestalterische Möglichkeiten von Bauteilen, die stellvertretend für ungenutzte Möglichkeiten eines Fertigungsverfahrens stehen und die sich auf die Gestaltung von Produkten auswirken (vgl. Roos 2018, S.6, S. 45 und S. 141). Im Folgenden werden diese als gestalterische Potentiale bezeichnet. Im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses, beispielsweise nach der vom Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) ausgegebenen VDI-Richtlinie 2221 (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019), wird das Produkt schrittweise konkretisiert und die Gestalt festgelegt. Während dieser Phase wird eine Vielzahl von Informationen berücksichtigt, beispielsweise zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Produkts und der Fertigbarkeit der gestalteten Bauteile (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 42 bis S. 46). Das Produkt als Ergebnis des Produktentwicklungsprozesses ist im Rahmen des intrinsischen Produktlebenslaufs (vgl. Kirchner et al. 2021, S. 468; Pahl et al. 2007, S. 98 f.) durch die gefertigten Bauteile mit dem Fertigungsverfahren und der Fertigungsmaschine verknüpft.

Die Berücksichtigung der Besonderheiten von Fertigungsverfahren im Rahmen der Konstruktionswissenschaft besteht im engl. *Design for X* (DfX) (vgl. Roos 2018, S. 14). Hierzu zählen die Sicherstellung der Montagefähigkeit des entwickelten Produkts (engl. *Design for Assembly* (DfA)) und dessen Fertigbarkeit (engl. *Design for Manufacture* (DfM)) (vgl. Bralla 1999, S. 1.67; Boothroyd et al. 2010, S. 1). Neben der Sicherstellung der Fertigbarkeit ist die Nutzung neuer Verfahrenspotentiale, beispielsweise für die additive Fertigung im Rahmen des engl. *Design for additive Manufacturing* (DfAM) in Form von Gut-Schlecht-Beispielen (vgl. Adam 2015, S. 56 bis S. 142; Kranz et al. 2015, S. S14001-1 bis S. S14001-16) bis hin zu erweiterten Entwicklungsvorgehen (vgl. Kumke 2018, S. 87 bis S. 95; Pradel et al. 2018, S. 310 bis S. 312; Burton 2005, S. 164 bis S. 171) dokumentiert. Der Einfluss der Fertigungsmaschine wird methodisch in keinem dieser Ansätze berücksichtigt.

Diese Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Fertigungsverfahren werden durch eine fertigungsintegrierende Entwicklungsmethodik erweitert, indem möglichst zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses die gestalterischen Verfahrenspotentiale in der Entwicklung miteinbezogen werden (vgl. Groche et al. 2012, S. 163 f.; Wagner et al. 2017, S. 275 f.). Der fertigungsintegrierende Produktentwicklungsansatz strebt die bestmögliche Nutzung der Verfahrenspotentiale durch deren frühe Berücksichtigung in Form von verfahrensinduzierten Eigenschaften während der Produktentwicklung an (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 1 f.). Eigenschaften werden in vom Entwickler beeinflussbare *Merkmale* und die sich daraus ergebenden, nur indirekt beeinflussbaren *Eigenschaften* unterteilt (vgl. Weber 2012, S. 25 bis S. 62). Im Bereich der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung besteht die gleiche Unterscheidung mittels abhängiger und unabhängiger Eigenschaften (vgl. Roos 2018, S. 21 f.). Zur Verbesserung der Lesbarkeit wird, sofern nicht explizit genannt, nur der Begriff Eigenschaft statt Merkmal und Eigenschaft verwendet.

Der Ansatz der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung wurde für die Zuordnung fertigungstechnologischen Wissens (vgl. Roos 2018) und der Berücksichtigung der Funktionsintegration (vgl. Wagner 2018) erweitert und bietet bereits die Voraussetzung eines Rahmenwerks für eine Erweiterung. Die Verknüpfung zwischen der Fertigungsmaschine und den Produkteigenschaften wird beschrieben, allerdings nur einseitig für die Entwicklung von Produkten methodisch genutzt. Der Rückschluss auf die gezielte Beeinflussung der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch die

---

Fertigungsmaschine, also die Möglichkeiten für gestalterische Verfahrenspotentiale aufgrund der methodischen Berücksichtigung des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses, besteht nicht.

Ein anderer Ansatz nach Jacob et al. zur umfassenderen Potentialnutzung der Fertigungsverfahren besteht in der Erweiterung des Produktentwicklungsprozesses der VDI-Richtlinie 2221 (Im Originaltext wird die VDI 2221 (1993) zitiert) durch die Berücksichtigung und Anpassung der Fertigungsprozesskette parallel zur Produktentwicklung. Mit der iterativen Produktentwicklung und Produktionsplanung zur Nutzung der Potentiale der additiven Fertigung besteht ein an die VDI-Richtlinie 2221 angelehntes Vorgehen, welches nach der prinzipiellen Lösung die Iteration von Produkt- und Technologieanpassung vor dem Produktgesamtentwurf vorsieht. Durch die Iteration von Produktgestaltung und Technologiekette soll die umfassendere Potentialnutzung möglich werden. (vgl. Jacob et al. 2018a, S. 742 f.)

Die Lösungsfindung ist in Form eines Optimierungsproblems beschreibbar (vgl. Jacob et al. 2018b, S. 108 bis S. 113) und wurde beispielsweise um das Funktionsdesign des Produkts und die Auswahl einer geeigneten Fertigungsmaschine erweitert und am Beispiel einer hybriden Fertigungsprozesskette überprüft (vgl. Jacob et al. 2019, S. 226 f.). Bei diesem Ansatz werden die bekannten Potentiale des Fertigungsverfahrens bei der Produktgestaltung berücksichtigt und entsprechend eine vorhandene, geeignete Fertigungsmaschine ausgewählt (vgl. Jacob et al. 2019, S. 224 bis S. 227). Die Verfügbarkeit einer geeigneten Fertigungsmaschine ist nicht zwangsläufig gegeben und die Sicherstellung durch die zielgerichtete Entwicklung einer Fertigungsmaschine wird nicht berücksichtigt.

Die aktuellen Trends für innovative Produkte führen zur Entwicklung von Fertigungsverfahren mit neuen gestalterischen Potentialen. Besonders durch die hybrid-integrierende additive Fertigung wird beispielsweise die Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration möglich. (vgl. Steffan et al. 2022, S. 1471) Zur Berücksichtigung der Fertigungsverfahren bestehen mehrere Ansätze von der Gestaltung der Fertigungsprozesskette bis zur umfassenderen Nutzung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des Bauteils im Rahmen der Produktentwicklung. Die bisherigen Ansätze berücksichtigen die Fertigungsmaschine als notwendiges technisches System zur Bereitstellung der Fertigungsverfahren nicht umfassend oder es wird anhand bestehender Fertigungsmaschinen eine Auswahl getroffen.

Die Fertigungsmaschine als Produkt des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses beeinflusst durch die Wechselwirkungen im Rahmen des Fertigungsprozesses die verfahrensinduzierten Eigenschaften des gefertigten Bauteils. Die Berücksichtigung der Fertigungsmaschine zur Erweiterung der fertigen gestalterischen Potentiale stellt eine Möglichkeit zur Beeinflussung der während der Produktentwicklung nutzbaren Eigenschaften dar. Moderne Werkzeugmaschinen sind komplexe technische Erzeugnisse (vgl. Uhlmann et al. 2010, S. 22), sodass die methodische Förderung der Fertigungsmaschinenentwicklung einen essentiellen Bestandteil zur zielgerichteten Bereitstellung von geeigneten Fertigungsmaschinen darstellt.

---

## 1.2 Ziel und Aufbau dieser Arbeit

Die bisherige Motivation verdeutlicht, dass neue Fertigungsverfahren für die Entwicklung neuer Produkte bekannt sind und entwickelt werden. Die Verfügbarkeit einer entsprechenden Fertigungsmaschine wird hierzu nicht methodisch, beispielsweise durch Weiterentwicklung bestehender Fertigungsmaschinen, berücksichtigt. Der Informationsfluss bestehender Methodiken führt von der Produktentwicklung zu den Fertigungsschritten. Die Informationen stehen allerdings in einer geeigneten Form der Fertigungsmaschinenentwicklung nicht systematisch zur Verfügung. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der methodischen Förderung der Berücksichtigung des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses zur zielgerichteten Bereitstellung gestalterischer Verfahrenspotentiale durch die Fertigungsmaschine. Hierzu wird die Verknüpfung der bestehenden Informationen der gestalterischen Verfahrenspotentiale mit den Eigenschaften der Fertigungsmaschine, die diese beeinflussen, modelliert. Das Modell zielt auf die systematische Überführung der Informationen ausgehend von zu erweiternden verfahrensinduzierten Eigenschaften in für den Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess geeignete Informationen ab. Anhand der Fertigungsmaschine als technisches System wird die Zuordnung der Informationen zu den Teilsystemen der Fertigungsmaschine beschrieben, sodass die zielgerichtete Bereitstellung der gestalterischen Verfahrenspotentiale für die Berücksichtigung im Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess möglich wird.

Ausgangspunkt zur Erreichung des Ziels ist die Aufarbeitung des Stands der Forschung im Bereich der additiven Fertigung und der gestalterischen Verfahrenspotentiale am Beispiel des engl. *Fused Filament Fabrication Verfahrens* (FFF) sowie der hybrid-integrierenden additiven Fertigung in Kapitel 2 und der methodischen Produktentwicklung mit Berücksichtigung der Fertigung in Kapitel 3. Mit diesem Ausgangspunkt wird in Kapitel 4 der Forschungsbedarf und das Forschungsziel dieser Arbeit abgeleitet, mit dem zwei Forschungsfragen verbunden sind. Zur Erarbeitung des Ansatzes und der Berücksichtigung der Einflussmöglichkeiten ist ein tiefgehender Einblick in die kombinierte Verfahrens- und Fertigungsmaschinenentwicklung erforderlich. Aus diesem Grund wird in Kapitel 5 ein hybrid-integrierendes additives Fertigungsverfahren und eine erste Fertigungsmaschine in Form eines Funktionsprototyps entwickelt. Mit den Erkenntnissen über die Verknüpfungen von Bauteileigenschaften und Fertigungsmaschineneigenschaften wird in Kapitel 6 die Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung erarbeitet. Diese wird in Kapitel 7 auf Beispiele zur Erweiterung der fertigbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften im Rahmen des entwickelten Fertigungsverfahrens sowie des Funktionsprototyps angewendet und damit initial verifiziert. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick über weiterführend mögliche Forschungsaktivitäten gegeben. Im Anhang befinden sich die ergänzenden Unterlagen dieser Arbeit.

---

## 2 Grundlagen im Bereich der additiven Fertigung am Beispiel des Fused Filament Fabrication Verfahrens

---

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der additiven Fertigungsverfahren beschrieben. Ausgehend von einer Übersicht und Einordnung additiver Fertigungsverfahren in Abschnitt 2.1 werden das engl. *Fused Filament Fabrication Verfahren* (FFF), die Prozesskette und die Fertigungsparameter in Abschnitt 2.2 beschrieben. Anschließend sind in Abschnitt 2.3 die Potentiale und in Abschnitt 2.4 die Restriktionen der additiven Fertigung aufgeführt. Abschließend wird die Erweiterung additiver Fertigungsverfahren durch die Verbindung mit einem weiteren Verfahren zu einem hybriden Verfahren in Abschnitt 2.5 ausgeführt und zur Erweiterung der Funktionsintegrationsmöglichkeiten bestehende hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren in Abschnitt 2.5.3 beschrieben.

### 2.1 Einteilung und Anwendung additiver Fertigungsverfahren

Die automatisierte, schichtweise und dreidimensionale (3D) Fertigung von physischen Bauteilen durch Materialauftrag wird als additive Fertigung bezeichnet (vgl. Gebhardt et al. 2019a, S. 4). Die additive Fertigung ist im zeitlichen Kontext seit ihrer Erfindung keine neue Fertigungstechnologie. Bereits 1981 wurde von Kodama eine Möglichkeit zur Fertigung von dreidimensionalen Körpern mit Photopolymeren publiziert (vgl. Kodama 1981, S. 1770 f.). Hull reichte 1986 ein Patent in den Vereinigten Staaten von Amerika ein, in welchem eine Maschine zur Fertigung dreidimensionaler Bauteile auf Basis der Stereolithografie (SLA) beschrieben ist (vgl. Hull 1986).

Additive Fertigungsverfahren lassen sich auf verschiedene Arten strukturieren. Eine Möglichkeit der Strukturierung ist nach der deutschen Norm (DIN) DIN 8580 (vgl. DIN 8580 2022). Weiterhin besteht ein Vorschlag zur Terminologie nach der deutschen Norm DIN EN ISO/ASTM 52900 (vgl. DIN EN ISO/ASTM 52900 2022). Nach der DIN EN ISO/ASTM 52900 ist die *additive Fertigung* (engl. *Additive Manufacturing* (AM)) definiert, als die Beschreibung von einem „Prozess, der durch Verbinden von Material *Bauteile* [...] aus 3-D-Modelldaten [...] üblicherweise *Schicht* [...] für Schicht, herstellt“ (DIN EN ISO/ASTM 52900 2022, S. 6).

In DIN 8580 wird die Unterscheidung der Fertigungsverfahren nach Merkmalen der Formänderung wie beispielsweise Form schaffen, Form ändern oder Stoffeigenschaften ändern vorgenommen. Anhand dieser Merkmale sind diese verschiedenen Hauptgruppen zugeordnet. (vgl. DIN 8580 2022, S. 7) Die additive Fertigung ist der Hauptgruppe *Urformen* und der Gruppe *Urformen durch Additive*



Fertigung zugeordnet (vgl. DIN 8580 2022, S. 9). Eine Übersicht der Anordnung mit Fokus auf die additive Fertigung ist in Abbildung 2.1 visualisiert. Die Fertigungsverfahren sind in Untergruppen, beispielsweise der Materialeextrusion, eingeteilt.

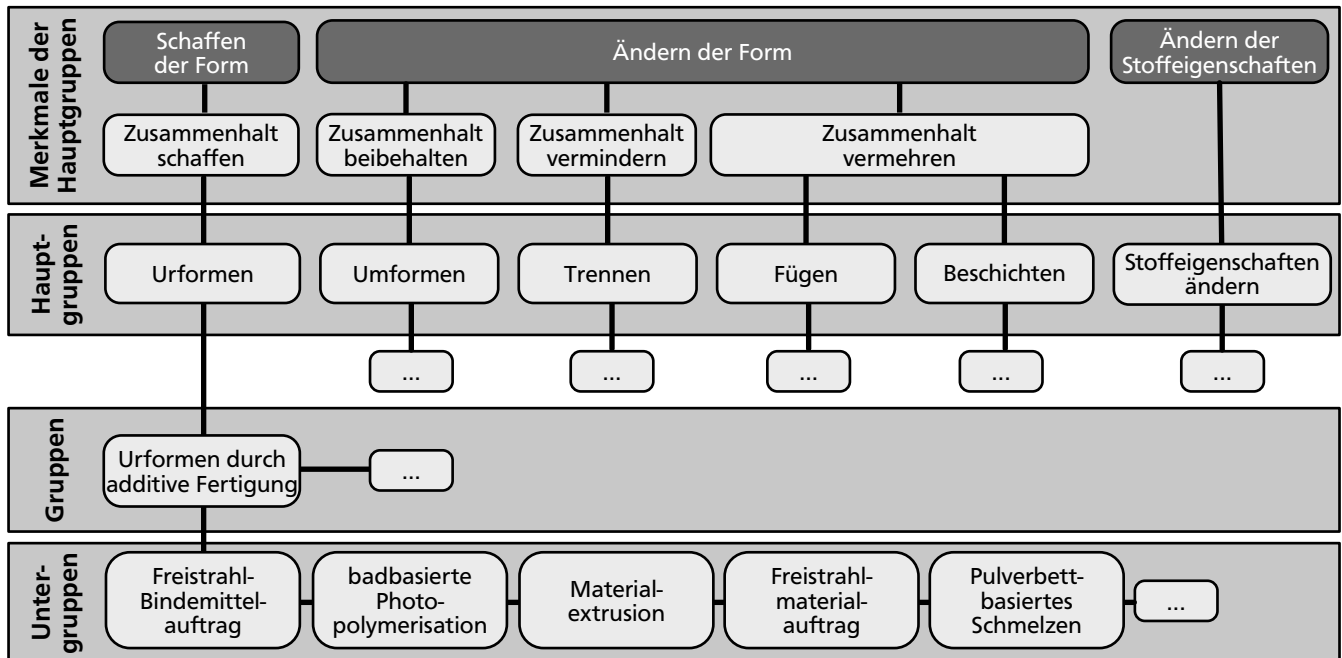


Abbildung 2.1: Einteilung additiver Fertigungsverfahren, eigene Abbildung in Anlehnung an Westkämper et al. (2010, S. 6 bis S. 8), Kumke (2018, S. 9) und DIN 8580 (2022, S. 7 bis S. 9)

Die Bezeichnung der additiven Fertigung steht für die zugrundeliegende Fertigungstechnologie (vgl. Gebhardt 2016, S. 6) und entspricht der Bezeichnung der VDI-Richtlinie 3405 (vgl. VDI 3405 2014, S. 3). Diese lässt sich in die Bereiche des engl. *Rapid Prototyping*, des engl. *Rapid Tooling* und des engl. *Rapid Manufacturing* unterteilen und umfasst sämtliche Fertigungsverfahren, die Bauteile durch das Ablegen und Verbinden von Materialvolumenelementen aufbauen (vgl. Gebhardt 2016, S. 3 bis S. 6; Srivastava et al. 2020, S. 5 bis S. 7). Neben der Fertigung von Prototypen, Werkzeugen und Bauteilen ist die Überarbeitung von bestehenden Bauteilen möglich. Das engl. *Additive Repair* ermöglicht die Wiederherstellung des reparierten Bauteils ohne Änderungen an den ursprünglichen Funktionen, der geometrischen Eigenschaften und des Werkstoffs (vgl. Brinker et al. 2020, S. 45). Abgrenzend hierzu findet beim engl. *Additive Refurbishment* eine Verbesserung des Bauteils für seine Funktionserfüllung statt (vgl. Brinker et al. 2020, S. 45). Eine besondere Herausforderung besteht im Ersatzteilmanagement durch die Bauteilvielfalt und den geringen Stückzahlen (vgl. Knofius et al. 2016, S. 915 bis S. 931).

Die Fertigung von Ersatzteilen stellt eine vielversprechende Anwendung der additiven Fertigung dar (vgl. Heinen et al. 2019, S. 810). Diese Potentiale ermöglichen schnellere Lieferzeiten bei geringeren Lagerbeständen (vgl. Pérès et al. 2006, S. 490 bis S. 503; Holmström et al. 2014, S. 421 bis S. 430). Durch diesen Einsatz der additiven Fertigung in Reparaturanwendungen ist die Reduktion des Ressourcenverbrauchs möglich (vgl. Walachowicz et al. 2017, S. 214). Die dadurch stattfindende

Weiterverwendung bzw. Wiederverwendung stellt eine Chance zur Reduktion anfallender Abfälle dar und wird nach King et al. in Reparatur, Rekonditionierung, erneute Fertigung und das Recycling eingeteilt (vgl. King et al. 2006, S. 257 bis S. 267). Im Rahmen dieser Arbeit wird das FFF-Verfahren aufgrund der Kombinierbarkeit mit weiteren Fertigungsverfahren zu einem hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.5.3) detaillierter betrachtet, im folgenden Abschnitt beschrieben und zur Beschreibung der Prozesskette der additiven Fertigung verwendet.

## 2.2 Der additive Fertigungsprozess

In diesem Abschnitt wird das FFF-Verfahren in seiner Funktionsweise beschrieben und die Prozesskette der additiven Fertigung anhand diesem dargelegt. Weiterhin werden wichtige Druckparameter, verdruckbare Materialien, Verfahrenspotentiale und Erweiterungsmöglichkeiten vorgestellt. Das FFF-Verfahren entspricht der durch das Unternehmen Stratasys, LTD. (2022) geschützten Bezeichnung engl. *Fused Deposition Modeling* (FDM®).

### 2.2.1 Das Fused Filament Fabrication Verfahren

Die Funktionsweise des FFF-Verfahrens besteht im Aufschmelzen eines thermoplastischen Kunststoffes, welcher lokal abgelegt und mit bereits vorhandenem Material verbunden wird. Für das Aufschmelzen wird der thermoplastische Kunststoff, das Filament, zum Beispiel in Drahtform über Förderrollen in den Druckkopf gefördert (vgl. Kumke 2018, S. 228 f.). In Abbildung 2.2 ist das FFF-Verfahren schematisch dargestellt.

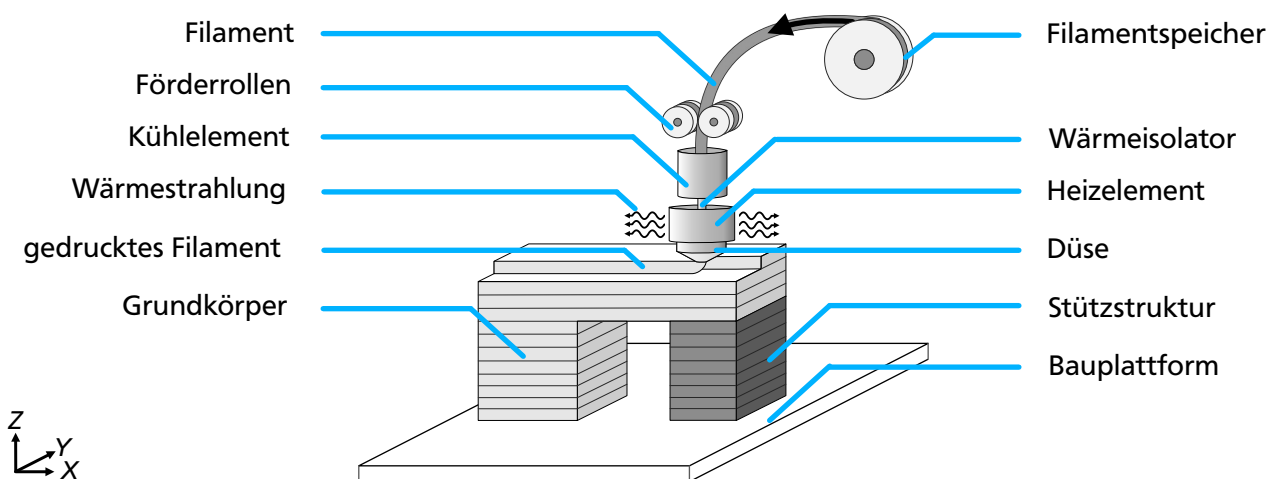


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau des Fused Filament Fabrication Verfahrens in Anlehnung an Kumke (2018, S. 228) mit FFF-Prozessdarstellung angelehnt an Gebhardt et al. (2019b, S. 50), eigene Abbildung

Neben drahtförmigem Kunststoff kann Pulver oder Granulat eingesetzt werden (vgl. Khatri et al. 2018, S. 1 bis S. 18). Entsprechend Yuran et al. besteht der Druckkopf aus einem Kühlkörper und einem Heizblock, in dem sich die Druckdüse befindet. Kühlkörper und Heizblock sind durch einen

---

Rohrabschnitt (engl. *heat break*) mit möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit, der als Wärmeisolator eingesetzt wird, miteinander verbunden. Der lokale Wärmeeintrag in den noch festen Bereich des Filaments wird durch den Kühlkörper und die *heat break* reduziert. Das Filament wird durch die Düse extrudiert, indem es erst im vorderen Bereich der Düse aufgeschmolzen wird, sodass ein Schmelzbad entsteht. (vgl. Yuran et al. 2020, S. 41 bis S. 50) Der flüssige Kunststoff wird durch die Düsenöffnung mittels des Druckaufbaus durch den Extruder extrudiert (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43038 bis S. 43044). Mit der Bezeichnung engl. *Hotend* wird für das FFF-Verfahren die Einheit zum Aufschmelzen und Konditionieren des Kunststoffs bezeichnet und ist kommerziell verfügbar (vgl. E3D-Online Ltd. 2022).

Der Materialauftrag wird auf die Bauplattform oder bereits bestehendem Material des Bauteils aufgebracht. Durch das Aufschichten des Materials entsteht die Form des Bauteils in Richtung der Z-Achse. (vgl. Gebhardt et al. 2019b, S. 49 bis S. 51) Die Materialausdehnung ist i.d.R. größer in der zur Bauplattform parallelen Ebene der gedruckten Schicht (X-Y-Ausdehnung) im Vergleich zur aufgetragenen Schichthöhe (Z-Ausdehnung).

Aufgrund des Aufschichtens und Verbindens des Materials auf eine vorherige Schicht wird für nicht unterbaute Bauteilbereiche eine zusätzliche Unterkonstruktion, die Stützstruktur, gefertigt. Die Stützstruktur wird nach Abschluss des Druckvorgangs entfernt. (vgl. Kumke 2018, S. 228 f.) Die Auflösungsgrenzen sind beispielsweise von der Fertigungsmaschine abhängig. Neuere Forschungsergebnisse bestätigen Auflösungsmöglichkeiten von Kanalelementen unterhalb von bis zu 100 µm (vgl. Quero et al. 2021, S. 3727). Für das FFF-Verfahren und die verbreitete Fertigungsmaschine *Prusa i3MK3S+* (vgl. Prusa Research a.s. 2022) liegt die reproduzierbare Auflösung von Kanälen im Bereich von 250 µm bis 300 µm (vgl. Romanov et al. 2018, S. 10450 bis S. 10456).

## 2.2.2 Prozesskette zur additiven Fertigung

Die Prozesskette der additiven Fertigung umfasst verschiedene Prozessschritte, welche zusätzlich zu den Fertigungsschritten für den erfolgreichen Druck notwendig sind. Diese Schritte sind die Bauteilkonstruktion, die Datenvorbereitung, die Maschinenvorbereitung sowie die Drucknachbereitung (vgl. Kumke 2018, S. 9 bis S. 11). Abbildung 2.3 visualisiert die genannten Schritte von der Erstellung des digitalen Bauteilmodells bis zum gefertigten und nachbearbeiteten Bauteil in Anlehnung an Kumke (2018, S. 10) adaptiert für das FFF-Verfahren. Die Schritte werden nachfolgend beschrieben.

### Konstruktion und Erstellung des Produktmodells

Der erste Schritt in der Prozesskette zur additiven Fertigung (vgl. Abbildung 2.3) ist die Konstruktion des zu fertigenden Bauteils. In der Bauteilgestaltung werden neben den Anforderungen aus der Produktentwicklung (vgl. Lachmayer et al. 2022b, S. 38 bis S. 40) die Geometrie und der Werkstoff in Form von Gestalteigenschaften festgelegt (vgl. Matthiesen 2021, S. 404 f.). Die additive Fertigung erfordert dreidimensionale Volumeninformationen für die Bauteilfertigung (vgl. Gebhardt 2016, S. 33 f.), die im Rahmen des Konstruktionsprozesses schrittweise in engl. *Computer-aided design* (CAD) Software detailliert (vgl. Lashin et al. 2013, S. 421) oder durch zweidimensionale Zeichnungen, Handskizzen (vgl. Gebhardt 2016, S. 33 f.) und dem dreidimensionalen Vermessen

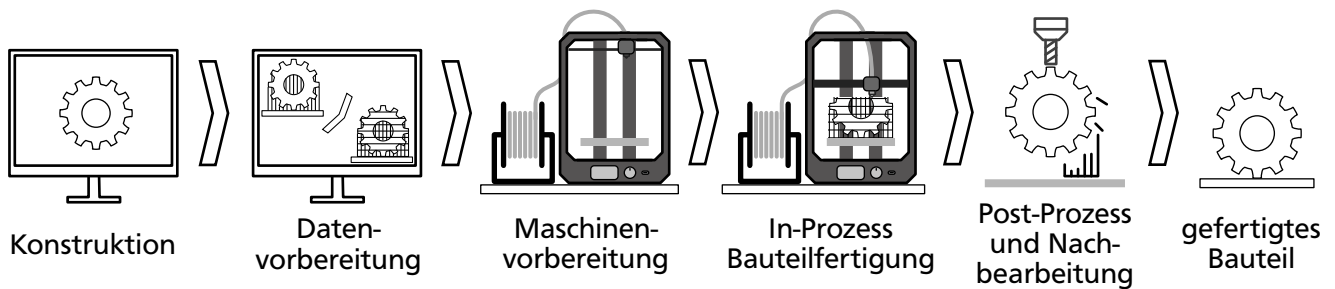


Abbildung 2.3: Übersicht der Prozesskette additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an Kumke (2018, S. 10) adaptiert für das FFF-Verfahren, eigene Abbildung

durch einen 3D-Scanvorgang eines physischen Bauteils (vgl. Gebhardt 2016, S. 33 f.; Kumke 2018, S. 10 f.; Lachmayer et al. 2022a, S. 10) erstellt werden. Durch die Bearbeitung von Objekten unter Nutzung von CAD-Systemen entsteht ein Produktmodell, das beispielsweise geometrische und technisch-funktionale Informationen als rechnerinterne Darstellung abbildet (vgl. Lashin et al. 2013, S. 421 f.).

Während der Gestaltung führt die Berücksichtigung von verfahrensspezifischen Gestaltungshinweisen zu Verbesserungen der Bauteilqualität, der Bauteilfunktion und der Reduktion von weiteren Bearbeitungsprozessen (vgl. Bender et al. 2021b, S. 765 bis S. 789; Kumke 2018, S. 89 bis S. 95). Im Rahmen der Konstruktion bestehen vielfältige Einflussmöglichkeiten auf beispielsweise die Bereiche der Fertigbarkeit, der Oberflächenqualität und der mechanischen Eigenschaften der Bauteile (vgl. Lachmayer et al. 2020c, S. 41 bis S. 44). Die Antizipation der Möglichkeiten und Restriktionen additiver Fertigungsverfahren sind im Rahmen des engl. *Design for additive Manufacturing* DfAM zusammengefasst (vgl. Laverne et al. 2015, S. 121701-1 bis S. 121701-8; Laverne et al. 2016, S. 279 bis S. 288; Kumke 2018, S. 90 f.). Für das DfAM bestehen verschiedene Strategien zur Produktänderung, beispielsweise der Montierbarkeit (vgl. Alfaify et al. 2020, S. 11 f.). Die bestehenden DfAM Ansätze eignen sich besonders zur Nutzung während verschiedener Aktivitäten des Produktentwicklungsprozesses (vgl. Pradel et al. 2018, S. 291 bis S. 316).

Nach Abschluss der Bauteilgestaltung wird das CAD-Modell zur Druckdatenerzeugung für die Fertigungsmaschine, dem Pre-Prozess, in ein Schnittstellenmodell überführt (vgl. Bender et al. 2021b, S. 759 f.). Die Erzeugung des Schnittstellenmodells erfolgt durch die Tessellierung des Produktmodells mit den Schritten der Erzeugung der tesselierten Daten und der Erstellung des tesselierten Modells (vgl. Bonnard et al. 2019, S. 1174). Die Tessellierung von CAD-Modellen ist meist mit der CAD-Software möglich, die das tesselierte Modell erzeugt und im nachfolgenden Schritt mit AM-spezifischen Informationen, beispielsweise Positionsdaten oder Prozessparametern, ergänzt (vgl. Bonnard et al. 2019, S. 1174).

Die Dateiformate engl. *Surface tessellation language* (STL) (vgl. Bonnard et al. 2019, S. 1177 f.), das engl. *3D Manufacturing Format* (3MF) (vgl. DIN EN ISO/ASTM 52950 2021, S. 10) und das engl. *Additive manufacturing file format* (AMF) (vgl. DIN EN ISO/ASTM 52915 2020, S. 6) finden Verbreitung. Im Rahmen dieser Ausführungen wird das STL-Format aufgrund der höheren Ver-

breitung detaillierter beschrieben. Das Tesselerungsergebnis ist in Anlehnung an (vgl. Reichwein 2022, S. 9 f.) in Form einer einzelnen Dreiecksfacette in Abbildung 2.4 a) und die Approximation eines Halbkreises mit unterschiedlicher Auflösungsgenauigkeit in Abbildung 2.4 b) visualisiert. Die etablierten CAD-Softwaresysteme unterscheiden sich hinsichtlich der Genauigkeit des tessellierten Modells und Art der Informationen (vgl. Hällgren et al. 2016, S. 518 bis S. 523).

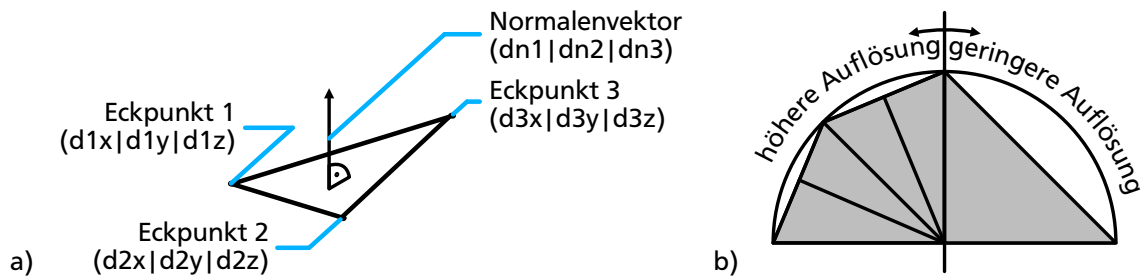


Abbildung 2.4: Visuelle Darstellung des Tesselerungsergebnisses anhand einer einzelnen Dreiecksfacette angelehnt an Gebhardt (2016, S. 36) und Reichwein (2022, S. 9 f.) in a) und der Approximation eines Halbkreises mit unterschiedlicher Auflösungsgenauigkeit angelehnt an Gebhardt (2016, S. 39) und Reichwein (2022, S. 9 f.) in b), eigene Abbildungen

## Pre-Prozess - Daten- und Maschinenvorbereitung

An die Erzeugung des Schnittstellenmodells schließt sich die Datenvorbereitung in Form des Imports in Softwarekomponenten mit dem Ziel der Erzeugung der Maschinensteuerbefehle an (vgl. Bender et al. 2021b, S. 759 f.). Neben Einzelsoftwarelösungen wird im Rahmen dieser Arbeit die Software Ultimaker B.V. (2023) eingesetzt. Die Software zur Datenvorbereitung ermöglicht die Reparatur der STL-Datei (vgl. Kumke 2018, S. 10; Yang et al. 2017, S. 37), die Skalierung des Modells (vgl. Yang et al. 2017, S. 37 bis S. 40), die Positionierung im Bauraum der Fertigungsmaschine (vgl. Gibson et al. 2021, S. 57), die Stützstrukturgenerierung (vgl. Yang et al. 2017, S. 37; Gibson et al. 2021, S. 57) und bildet den Ausgangspunkt des Slicing-Prozesses. Diesem kommt eine besondere Bedeutung durch die wählbaren Parameter zu, die einen Einfluss beispielsweise auf die Bahnführung der Fertigungsmaschine während des Bauprozesses haben (vgl. Lachmayer et al. 2020b, S.10 f.).

Mit den festgelegten Parametern wird das Produktmodell in die Fertigungsschichten aufgeteilt (vgl. Kulkarni et al. 2000, S. 18 bis S. 35), innere Strukturen und Stützstrukturen erstellt (vgl. Song et al. 2018, S. 276 bis S. 293), Verfahrenswege errechnet (vgl. Kumke 2018, S. 11) und in Form von Eingabebefehlen für die Steuerungssoftware der Fertigungsmaschine in eine weitere Schnittstellendatei gespeichert. Die Eingabebefehle sind in der Regel als G-Code formuliert (vgl. DIN 66025-1 1983, S. 1 bis S. 17; ISO 6983-1 2009, S. 1 f.), der auf dem RS274NGC Interpreter basiert (vgl. Kramer et al. 2000, S. 1 f.). Der erstellte G-Code wird der Steuerung der Fertigungsmaschine zur Verfügung gestellt und die Datenvorbereitung ist abgeschlossen.

Die Maschinenvorbereitung umfasst die notwendigen Vorkehrungen an der Fertigungsmaschine (vgl. Kumke 2018, S. 11). Häufig beinhaltet die Maschinenvorbereitung das Bereitstellen von Verbrauchs-

---

material und Betriebsstoffen sowie die Bauraumvorbereitung (vgl. VDI 3405 2014, S. 6). Für eine differenziertere Zuordnung der Einstellungsmöglichkeiten ist die Unterteilung in verfahrensspezifische Bauprozesseinstellungen, beispielsweise Parameter zur Bauteilkühlung, in Materialeinstellungen, die zum Beispiel die Gaszusammensetzung im Bauraum beeinflussen und die Bauteileinstellungen mit Einfluss auf die Fahrwege möglich (vgl. Yang et al. 2017, S.39 bis S.41). Mit der Fertigstellung der Vorbereitungsprozesse ist die additive Fertigungsmaschine einsatzbereit, die Fertigung beginnt und bildet den Übergang in den In-Prozess (vgl. Abbildung 2.3).

### **In-Prozess - Bauteilfertigung**

Der In-Prozess beinhaltet die Bauteilfertigung und die Entnahme des Bauteils und gegebenenfalls der Bauplattform nach Fertigstellung des Bauprozesses (vgl. VDI 3405 2014, S. 6). Parallel ist die Bauprozessüberwachung möglich (vgl. Kumke 2018, S. 11). Das Bauteil wird mit oder ohne Bauplattform aus dem Bauraum entnommen (vgl. VDI 3405 2014, S. 6). Nach der Entnahme ist die Durchführung von Post-Prozessen und Nachbearbeitungen möglich (vgl. Kumke 2018, S. 11).

### **Post-Prozess und Nachbearbeitung**

Die Post-Prozesse umfassen die Entfernung des Bauteils von der Bauplattform beziehungsweise das Entfernen vorhandener Stützstrukturen und die Reinigung von weiteren Materialrückständen (vgl. VDI 3405 2014, S.6 f.). Zum Abtrennen des Bauteils von der Bauplattform und die Entfernung von Stützstrukturen ist beispielsweise eine mechanische Bearbeitung des Bauteils notwendig (vgl. Bender et al. 2021b, S. 763 f.). Die Eigenschaften des Bauteils sind durch weitere Nachbearbeitungsschritte anpassbar (vgl. Lachmayer et al. 2022a, S. 11). Beispiele sind die spanende Nachbearbeitung von funktionsrelevanten Flächen oder eine Wärmebehandlung zur Homogenisierung der Materialeigenschaften (vgl. Lachmayer et al. 2022a, S. 11).

## **2.2.3 Prozessparameter des Fused Filament Fabrication Verfahrens**

Der Bauprozess des FFF-Verfahrens wird durch die Festlegung diverser Prozessparameter beeinflusst, welche zu Änderungen der Bauteileigenschaften und Produktionseffizienz führen können. Im Folgenden wird eine Übersicht fertigungsprozessbeeinflussender Parameter beschrieben.

Der schichtweise Aufbau der Bauteile erfolgt durch das Aufpressen und Verbinden des erhitzten Kunststoffes mit anschließender Abkühlung des Kunststoffes (vgl. Coogan et al. 2019, S. 671). Die Eigenschaften der gefertigten Bauteile werden durch die Gestaltung der Bahnen der Druckdüse beeinflusst (vgl. Moritzer et al. 2019, S. 030056-1 f.). Einflussreiche Prozessparameter sind beispielsweise der Luftspalt zwischen einzelnen Druckbahnen (vgl. Moritzer et al. 2019, S. 030056-2), die Bauteilorientierung, Füllmuster und Fülldicke, die Extrusionstemperatur des Kunststoffes, die Schichtdicke und die Anzahl der Konturlinien (vgl. Dey et al. 2019, S. 2). Die Druckbahnen sind in die zwei Bereiche der Konturlinien und der Fülllinien einteilbar (vgl. Moritzer et al. 2019, S. 030056-1 bis S. 030056-5; Kristiawan et al. 2021, S. 639 bis S. 649; Knoop et al. 2017, S. 190001-1 bis S. 190001-5). In Abbildung 2.5 a) sind die Linienparameter und in Abbildung 2.5 b) und c) Füllmusterbeispiele visualisiert.

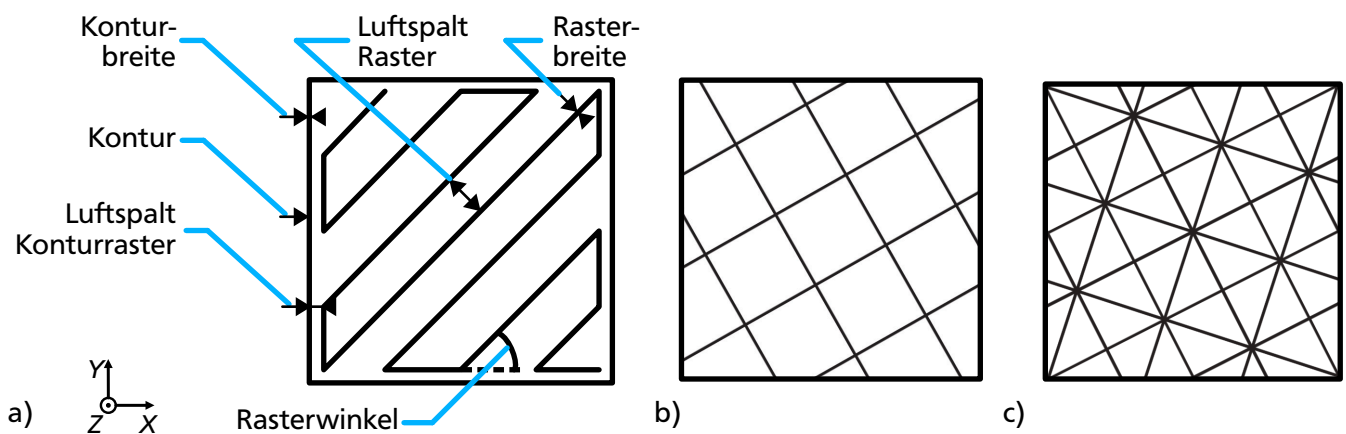


Abbildung 2.5: Parameter der Konturlinien und Fülllinien eines FFF-gefertigten Bauteils übersetzt in Anlehnung an Moritzer et al. (2019, S. 030056-2) in a) und weiteren Fülllinienmustern in Anlehnung an Dey et al. (2019, S. 2 f.), veröffentlicht unter der CC BY 4.0 Lizenz, in b) und in c), eigene Abbildungen a) bis c)

Die Bauteilorientierung beeinflusst durch den verfahrenstypischen schichtweisen Aufbau die Bauteileigenschaften. Die Baurichtung, die Schichtdicke und die Vorschubgeschwindigkeit beeinflussen beispielsweise die mechanischen Eigenschaften von Proben aus Polylactide (PLA) (vgl. Chacón et al. 2017, S. 143 bis S. 157). Die mechanischen Eigenschaften aus ULTEM gefertigter Proben unterscheiden sich deutlich zwischen der Richtung, welche parallel zur Aufbaurichtung ( $Z$ -Achse) ist und den dazu orthogonal stehenden Achsen ( $X$ -Achse und  $Y$ -Achse) (vgl. Padovano et al. 2020, S. 6 f.).

Diese Orientierungsunterschiede werden in der Literatur auf verschiedene Arten ermittelt und sich einstellende Werte anhand der Prozessparameter prognostiziert. Es bestehen Ansätze, durch mathematische Optimierung beispielsweise unter Nutzung hybrider, evolutionärer Algorithmen (vgl. Raju et al. 2019, S. 2743 bis S. 2758), genetischer Sortieralgorithmen (vgl. Asadollahi-Yazdi et al. 2018, S. 152 bis S. 157) und experimentell durch Zugproben aus beispielsweise PLA (vgl. Chacón et al. 2017, S. 143 bis S. 157) bzw. ULTEM (vgl. Padovano et al. 2020, S. 1 bis S. 15) und dem Vergleich der Ergebnisse experimenteller Tests mit einer Finite Element Analyse (FEA) (vgl. Alafaghani et al. 2017, S. 791 bis S. 803). Neben der Prognose der späteren Bauteileigenschaften werden Algorithmen zur Automatisierung der Bauteilorientierung erforscht (vgl. Zwier et al. 2016, S. 128 bis S. 133), welche den Aufwand des Anwenders in den Pre-Prozessen reduzieren.

Die Füllung eines Bauteils wird im Bereich des FFF-Verfahrens alternativ als engl. *Infill* bezeichnet. Der Füllgrad wird als Wert zwischen 0% (hohles Bauteil) und 100% (Massivbauteil) angegeben. (vgl. Pandzic et al. 2019, S. 0545 bis S. 0554) Eine Übersicht zu Einflüssen auf den Druckprozess in eher systembasierter Sichtweise sind der Pre-Prozess (im Original engl. *Method/Manufacturing*), das Material, die Maschine, die Umgebung und die Erfahrung des Nutzers (vgl. Ouazzani et al. 2022, S. 1 bis S. 9). Ein entsprechendes Ursache-Wirkungsdiagramm ist nach Ouazzani et al. (2022, S. 5) in Abbildung 2.6 dargestellt.

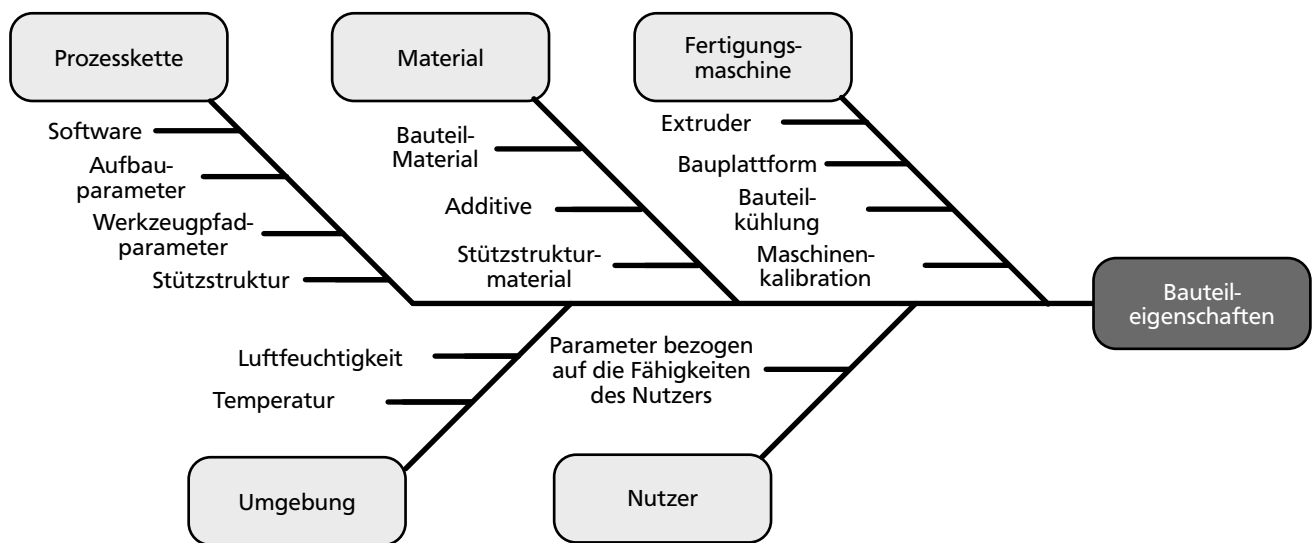


Abbildung 2.6: Ursache-Wirkungsdiagramm der Einflüsse auf die Teilequalität und die Eigenschaften von FFF-Bauteilen, eigene Abbildung übersetzt nach Ouazzani et al. (2022, S. 5)

Dey et al. führen die Ergebnisse ihrer Recherche zur Optimierung von Prozessparametern und deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften in Form eines Einflussdiagramms zusammen. Die wichtigsten Eigenschaften sind die Oberflächenrauheit, die Formtoleranz, die Aufbauzeit, die Biegefestigkeit, die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit. Anhand der Recherche wird deutlich, dass auf jede dieser Eigenschaften des Bauteiles diverse Einflussmöglichkeiten bestehen. (vgl. Dey et al. 2019, S. 1 bis 30) Weitere Forschung zur Beschreibung der Prozessparameter befasst sich mit dem Druck, mit dem der extrudierte Kunststoff auf die vorherige Schicht gepresst wird (vgl. Coogan et al. 2019, S. 655 bis S. 672), der Beschreibung der Strömung des Kunststoffs nach Austreten aus der Düse (vgl. McIlroy et al. 2017, S. 379 bis S. 397; Kim et al. 2021, S. 27 bis S. 42) sowie Beschreibungen des Zusammenhangs von Fördergeschwindigkeit und Temperatur des Extrusionsvorgangs zur Realisierung von Druckgeschwindigkeitssteigerungen (vgl. Mackay et al. 2017, S. 229 bis S. 236).

Weitere Forschung besteht in der Reduktion der Druckbahnbreite durch Nutzung des hydroelektrodynamischen Einflusses von Spannungsfeldern (vgl. Zhang et al. 2016, S. 1 bis S. 8), der Optimierung der Bauplattformhaftung durch die Heizbetttemperatur (vgl. Rosli et al. 2020, S. 020072-1 bis S. 020072-10), der Fertigungsmöglichkeit texturierter Oberflächen (vgl. Armillotta 2006, S. 35 bis S. 41) und zur Verbesserung von Bauteileigenschaften hin zu vergleichbaren Spritzgussbauteilen (vgl. Knoop et al. 2017, S. 190001-1 bis S. 190001-5).

Restriktionen in der Materialauswahl bestehen nach Freund et al. beim FFF Verfahren in den erreichbaren Temperaturen der Materialzuführung und des Extrusionsbereichs. Für die Erweiterung dieser Grenzen sind bereits erste Tests mit einer Hochtemperaturdüse durchgeführt worden. Dabei konnte Glas bereits erfolgreich verarbeitet werden. Herausforderungen bestehen aktuell unter anderem in Stringingeffekten. (vgl. Freund et al. 2021, S. 183 bis S. 200) Weiterhin bestehen Verfahrensadaptionen zur Erweiterung der verarbeitbaren Materialformen von drahtförmigen Kunststofffilamenten hin



---

zur direkten Verarbeitung von Kunststoffpulver (vgl. Fanous et al. 2020, S. 1 bis S. 8). Zur detaillierten Betrachtung weiterer Prozessparameter wird auf (vgl. Gibson et al. 2021, S. 171 bis S. 201) und für veranschaulichende Beispielbauteile auf (vgl. Gebhardt et al. 2019b, S. 49 bis S. 52) verwiesen.

Abschließend wird anhand der im Stand der Forschung dokumentierten Charakterisierungsansätze und Weiterentwicklungsmöglichkeiten des FFF-Verfahrens festgestellt, dass es sich um ein aktuelles Fertigungsverfahren mit entsprechender Zukunftsfähigkeit handelt. Weiterhin bestehen vielfältige Möglichkeiten für Verfahrensverbesserungen und zur Fertigung innovativer Bauteile. Im folgenden Abschnitt werden die Potentiale und Restriktionen der additiven Fertigung betrachtet.

## 2.3 Potentiale der additiven Fertigung

Die additive Fertigung ermöglicht vielfältige neue Produkte und Produktionsmöglichkeiten aufgrund der einzigartigen Gestaltungsmöglichkeiten anhand des lokalen (vgl. Campbell et al. 2011, S. 1 bis S. 15; Kumke 2018, S. 18 f.) und schichtweisen Aufbaus der gefertigten Bauteile (vgl. Gibson et al. 2021, S. 560; Campbell et al. 2013, S. 259 bis S. 268; Adam 2015, S. 16; Atzeni et al. 2010, S. 309; Gao et al. 2015, S. 67; Petrovic et al. 2011, S. 1062 f.). Sie stellen dadurch neue Potentiale, welche konstruktive Freiheiten in der Produktgestaltung ermöglichen (vgl. Thompson et al. 2016, S. 737 bis S. 760; Kumke 2018, S. 76 f.) und andererseits organisatorische Möglichkeiten bereitstellen (vgl. Gibson et al. 2021, S. 560 bis S. 566; Schneck et al. 2019, S. 21). Die Potentiale der additiven Fertigung können auf verschiedenen Ebenen im Unternehmenskontext eingesetzt werden. Die Ebenen lassen sich mit steigendem strategischen Einfluss in das Produkt, die Prozesskette, den Life-Cycle und die Organisation einteilen. (vgl. Schneck et al. 2019, S. 21)

Nach Baldinger et al. sind die Potentiale der additiven Fertigungstechnologie in technische Potentiale und von diesen abgeleitete wirtschaftliche Potentiale unterteilbar. Während durch die technischen Potentiale neue, innovative Produkte realisiert werden, führen die ökonomischen Potentiale beispielsweise zu neuen innovativen Geschäftsmodellen, welche auch für eine weitere Verbreitung additiv gefertigter Bauteile nutzbar sind. Aus dieser ökonomischen Sichtweise heraus werden Eigenschaften der additiven Fertigung als Ausgangspunkt für *Nutzenversprechen* beschrieben. Die Eigenschaften führen zu sogenannten *Hebeln*, die zu einem Nutzen eingesetzt werden können, sodass die prinzipielle Nutzungsmöglichkeit mit Nutzenversprechen bezeichnet wird. Die Eigenschaften der additiven Fertigung werden in *Additiv*, *Digital*, *Generisch* und *Direkt* aufgeteilt. (vgl. Baldinger et al. 2013, S. 11 bis S. 14)

Dieser Ansatz wurde von Kumke erweitert und modifiziert. Ausgangspunkt sind weiterhin die Eigenschaften der additiven Fertigung. Mit *Additiv* wird das geometrisch begrenzte Herstellen des Materialverbunds ohne Abtragung verstanden. *Generisch* bezeichnet die Fertigbarkeit von Bauteilen ohne bauteilspezifische Anpassungen. *Digital* ist Ausdruck für die verkürzte Prozesskette vor der Fertigung durch das Fehlen von spezifischen Werkzeugen und *Direkt* beinhaltet die Fertigung des gesamten Bauteils ohne Maschinenwechsel und ohne Berücksichtigung von Nachbearbeitungsprozessen. (vgl. Kumke 2018, S. 17 f.)

Die Verknüpfung von Hebel und Nutzenversprechen bildet nach Kumke ein Potential. Hebel sind beispielsweise die konstruktive Freiheit und die lokale Produktion, welche zu den Nutzenversprechen, zum Beispiel eines höheren Produktnutzens oder der Verkürzung der Zeit bis zum Produkt bzw. dem Markteintritt, führen. (vgl. Kumke 2018, S. 17 bis S. 23) Diese Verknüpfungen sind in Abbildung 2.7 dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die konstruktiven und organisatorischen Möglichkeiten der additiven Fertigung beschrieben. Auf die Betrachtung der Potentiale folgt die Darlegung bekannter Verfahrensrestriktionen.

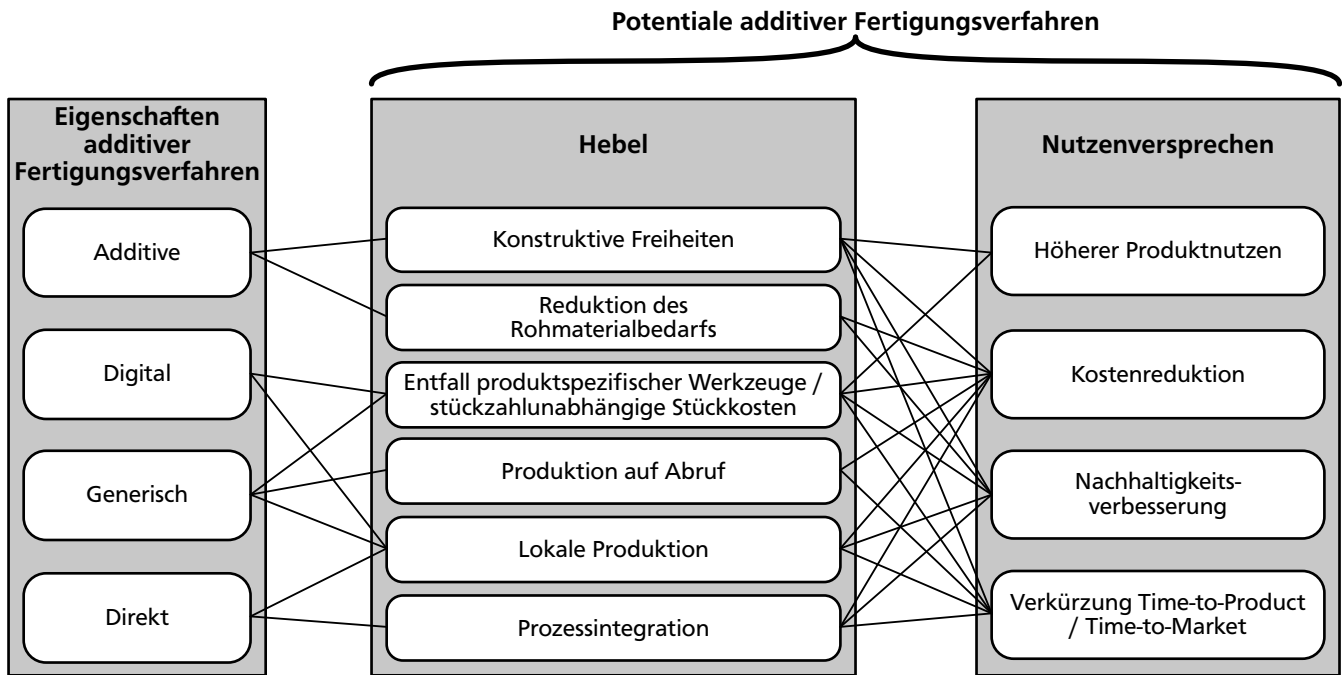


Abbildung 2.7: Verknüpfungen von Potentialen mit den Eigenschaften der additiven Fertigung in Anlehnung an Kumke (2018, S. 18) basierend auf Baldinger et al. (2013, S. 13), eigene Abbildung

### 2.3.1 Möglichkeiten durch gestalterische Potentiale

Die konstruktiven Potentiale komplexer Bauteile basieren auf der Eigenschaft Additiv und sind in *geometrische, hierarchische, funktionale* und *materielle Komplexität* unterteilbar (vgl. Gibson et al. 2021, S. 560 bis S. 566). Sie stellen die Basis zur Vielfalt möglicher Bauteileigenschaften dar und werden im Folgenden beschrieben.

Die geometrische Komplexität additiver Fertigungsverfahren basiert auf der voneinander unabhängigen Fertigung einzelner Materialsichten (vgl. Gibson et al. 2021, S. 560). Der lokal hergestellte Materialverbund in einer Schicht (vgl. Campbell et al. 2011, S. 1 bis S. 15) ermöglicht Freiformflächen und Hinterschnitte (vgl. Adam 2015, S. 16) für beispielsweise topologieoptimierte Bauteile und bionische Strukturgestaltung (vgl. Lippert 2016, S. 45 bis S. 55). Im Vergleich zu Gießverfahren sind keine komplexen Kerne oder Formen erforderlich (vgl. Kumke 2018, S. 77). Die Fertigung geometrisch komplexerer Strukturen führt im Rahmen des Fertigungsprozesses zu geringem Mehraufwand,

---

sodass von engl. *Complexity for free* gesprochen wird (vgl. Campbell et al. 2011, S. 1 bis S. 15; Gao et al. 2015, S. 67; Conner et al. 2014, S. 67 f.). Ein Ansatz zur Erweiterung der geometrischen Fertigungsmöglichkeiten ist die Fertigungsmaschine durch eine zusätzliche Kinematik zu erweitern. Durch das Drehen des Werkstücks während der Fertigung, beispielsweise um die Aufbauachse Z und eine orthogonal zu dieser stehende Achse in der X-Y-Ebene, wird es möglich, die Aufbaurichtung während des Drucks zu verändern und so Bauteile mit Überhängen ohne Stützstrukturen zu drucken, die unter einem System mit drei translatorischen Freiheitsgraden nicht möglich sind (vgl. Oliveira et al. 2020, S. 185 bis S. 201).

Die hierarchische Komplexität basiert auf der Anwendung der geometrischen Komplexität zur Fertigung von Bauteilstrukturen unterschiedlicher Größenordnung (vgl. Kumke 2018, S. 78 f.). Durch die gestalterischen Potentiale werden Makrostrukturen zur verbesserten Kühlung von Spritzgussformen (vgl. Malca et al. 2018, S. 13 bis S. 22) über Mesostrukturen im Größenbereich von 0,1 mm bis 10 mm (vgl. Nguyen et al. 2013, S. 1071 bis S. 1078; Schulte et al. 2022, S. 1451 bis S. 1460; Steffan et al. 2021, S. 1807 bis S. 1816) in den Anwendungsbereichen des Leichtbaus, beispielsweise von Tragstrukturen im Anströmbereich von Luftfahrtanwendungen (vgl. Bici et al. 2018, S. 215 f.) und Mikrostrukturen zur Verbesserung des Verformungsverhaltens von Bauteilen (vgl. Geis et al. 2021, S. 1 bis S. 10; Gibson et al. 2021, S. 561 f.) möglich. Additiv gefertigte Gitterstrukturen sind für Verbesserungen in den Bereichen des Leichtbaus, des Schwingungsverhaltens, der Energieabsorption und der Wärmeübertragung nutzbar (vgl. Schulte et al. 2021, S. 4 bis S. 7).

Die funktionale Komplexität beschreibt die Zusammenfassung von Bauteilen zu einem Gesamtbauteil entsprechend einer Integralbauweise, die Fertigung von Bauteilen ineinander im gefügten Zustand zur Montageprozessreduktion und die Erweiterung um neue Funktionen (vgl. Kumke 2018, S. 78 f.). Die additive Fertigung ermöglicht bereits das Potential zur Funktionsintegration basierend auf der Vereinigung von Bauteilen (vgl. Klahn et al. 2014, S. 139). Dies ist ebenfalls durch die Integration weiterer Komponenten möglich (vgl. Gibson et al. 2021, S. 564 f.) und wird in Abschnitt 2.5.3 im Rahmen hybrider Verfahren beschrieben. Ein Beispiel für eine Kombination aus Funktionsintegration und Materialkomplexität ist die integrierte Fertigung von einem Bauteil mit einer integrierten Leitung. Für das FFF-Verfahren sind diverse Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften erhältlich, die beispielsweise die integrierte Fertigung einer Induktionsspule unter Nutzung des FFF-Extrusionsprozesses ermöglichen (vgl. Flowers et al. 2017, S. 156 bis S. 163). Eine weitere Möglichkeit stellt die additive Fertigung von Magneten durch das Zusetzen von Metallpulver in Druckfilamente dar (vgl. Huber et al. 2016, S. 162401-1 f.).

Die Materialkomplexität umfasst die Verwendung unterschiedlicher Materialien innerhalb eines Bauteils oder kontinuierliche Übergänge von einem Material zum anderen (vgl. Kumke 2018, S. 78 f.; Gibson et al. 2021, S. 565 f.). Die funktionale Gradierung ist beispielsweise zur Minimierung der Biegung nutzbar (vgl. Garcia et al. 2018, S. 65 f.). Die Fertigung funktional gradierter Strukturen ist bei FFF-Verfahren beispielsweise durch Multimaterialextruder unter erweiterten Vorbereitungsprozessen von der CAD-Konstruktion bis hin zur Pfadplanung des Druckkopfs möglich (vgl. Zhang et al. 2018, S. 041002-1 bis S. 041002-16).

---

## 2.3.2 Möglichkeiten durch organisatorische Potentiale

Neben den beschriebenen konstruktiven Potentialen lassen sich die Eigenschaften der additiven Fertigung zusätzlich für produktionstechnische Vorteile durch die Eigenschaften Generisch, Digital und Direkt nutzen (vgl. Kumke 2018, S. 17 f.). Ein organisatorisches Potential basiert auf bauteilun-spezifischen Werkzeugen, dass in der Literatur als werkzeuglose Fertigung aufgeführt ist (vgl. Atzeni et al. 2012, S. 1147 bis S. 1155; Campbell et al. 2011, S. 5 f.; Hopkinson et al. 2003, S. 32; Lindemann et al. 2012, S. 178). Durch die fehlenden bauteilspezifischen Werkzeuge bestehen Kostenvorteile in den Bereichen der Werkzeuginvestition, der Logistik und der Lagerhaltung (vgl. Achillas et al. 2015, S. 328 bis S. 339; Atzeni et al. 2012, S. 1147 bis S. 1155).

Die werkzeuglose Fertigung ermöglicht die lokale Produktion nahe am Nutzungsort (vgl. Hopkinson et al. 2003, S. 32). Sie ist zur wirtschaftlichen Rückverlagerung der Produktion in die Abnehmerländer einsetzbar (vgl. Gebler et al. 2014, S. 165 f.). Durch die Möglichkeiten einer weitgehend digitalen Prozesskette und die Fertigung des gesamten Bauteils durch die Fertigungsmaschine (vgl. Kumke 2018, S. 17 f.) wird die besondere physische Flexibilität der Bauteilfertigung unterstützt. Diese Flexibilität mündet in der dezentralen lokalen Fertigung von Bauteilen (vgl. Kumke 2018, S. 19) und bietet durch die Fertigung am Verwendungsort Vorteile in der Supply Chain (vgl. Achillas et al. 2015, S. 337 f.). Die lokale Produktion ermöglicht Produktionsorte und Nutzungsorte entfernt vom Standort des Unternehmens zu betreiben. Dadurch wird die regionale Produktion individueller Produkte unter Einsparung des Rohmaterialtransports und der Nutzung lokaler Materialien möglich. (vgl. Becker et al. 2005, S. 266)

Neben den bisher aufgeführten Potentialen sind die Kosten pro Bauteil bei der additiven Fertigung näherungsweise konstant, sodass die additive Fertigung bei geringen Stückzahlen Kostenvorteile aufweist (vgl. Conner et al. 2014, S. 71 f.). Beispielsweise fehlt die Amortisation der Werkzeugherstellung bei Gießverfahren oder die Formkomplexität der Bauteile hat geringe Auswirkungen auf den Fertigungsprozess im Vergleich zu subtraktiven Verfahren (vgl. Poprawe et al. 2015, S. 50 f.). Dadurch wird es durch die additive Fertigung möglich, individuelle Produkte, beispielsweise auf den Nutzer angepasste Hörgeräte (vgl. Lindemann et al. 2012, S. 178 f.) oder Dentalimplantate (vgl. Kumke 2018, S. 20 f.), zu fertigen.

Für sich schnell wandelnde Märkte sind nach Lindemann et al. neue Fertigungsmöglichkeiten erforderlich. Mit immer individueller werdenden Produkten und kürzer werdenden Lebenszyklen ist die additive Fertigung eine Fertigungsmöglichkeit. (vgl. Lindemann et al. 2012, S. 178) Die additive Fertigung ist weiterhin zur Verkürzung der Zeit bis zur Marktreife (vgl. Lindemann et al. 2012, S. 179; Huang et al. 2015, S. 014001-3 f.; Achillas et al. 2015, S. 337; Diegel et al. 2010, S. 71) durch beispielsweise nicht notwendige Werkzeugfertigung und der Verkürzung der Prozessketten (vgl. Kumke 2018, S. 20) nutzbar. Verstärkt wird dieses Potential durch geringere Lagerbestände und Handhabung (vgl. Atzeni et al. 2012, S. 1147; Lindemann et al. 2012, S. 178 f.) und führt zu neuen Geschäftsmodellen, beispielsweise der Fertigung auf Nachfrage (vgl. Hopkinson et al. 2003, S. 31 bis S. 39; Huang et al. 2015, S. 014001-1 bis S. 014001-10; Gao et al. 2015, S. 67 f.).

---

## 2.4 Restriktionen additiver Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen nicht nur Potentiale sondern besitzen ebenfalls Grenzen. Diese Grenzen schränken beispielsweise die Fertigbarkeit von Bauteilen ein und deren Berücksichtigung ist während der Gestaltung der Bauteile oder dem Einsatz additiver Verfahren möglich (vgl. Adam 2015, S. 1 bis S. 23). Die Einteilung ist entsprechend der Potentialeinteilung in konstruktive Restriktionen und in organisatorische Restriktionen möglich (vgl. Reichwein 2022, S. 15).

### 2.4.1 Restriktionen gestalterischer Möglichkeiten

Die konstruktiven Restriktionen sind beispielsweise durch das Verfahren begründet. Zum Beispiel sind für die Fertigung von Überhängen Stützstrukturen für den erfolgreichen Druck notwendig (vgl. Gao et al. 2015, S. 69). Die Stützstrukturen beeinflussen die Oberflächenrauigkeit und damit die mechanischen Bauteileigenschaften (vgl. Obilanade et al. 2021, S. 2842 und S. 2846 f.). Bei pulverbettbasierten Verfahren wird die Gestaltung durch die Berücksichtigung der Pulverentnahme eingeschränkt (vgl. Adam 2015, S. 88 f.). Die Verfahren besitzen ebenfalls Auflösungsgrenzen fertiger Gestaltfeatures. Durch die fehlerbehaftete schichtweise Geometrieapproximation bestehen zum Beispiel Maßabweichungen (vgl. Adam 2015, S. 66 f.). Für das FFF-Verfahren liegt beispielsweise die Fertigungsgrenze etablierter Fertigungsmaschinen für Kanäle im Bereich von 100 µm (vgl. Quero et al. 2021, S. 3727; Turner et al. 2015, S. 252). Neben den Gestaltfeatures ist der minimale Abstand z.B. zwischen zwei gefertigten Wänden, das minimale Spaltmaß, nicht beliebig klein wählbar (vgl. Adam 2015, S. 116 bis S. 120).

Weitere Restriktionen sind die Inhomogenität der Bauteileigenschaften und die Bauraumbeschränkung (vgl. Kumke 2018, S. 22). Neben den bisherigen konstruktiven Einschränkungen ist die Materialauswahl tendenziell gering (vgl. Baumers et al. 2016, S. 194). Besonderer Forschungsbedarf besteht in der Erforschung von Werkstoffen beispielsweise in Hochtemperaturanwendungen und für den Einsatz unter hohen Verschleißanforderungen (vgl. Abele et al. 2011, S. 82 f.).

Die Entscheidung, ob Massenanhäufungen bei der Gestaltung von Bauteilen berücksichtigt werden, ist nach Adam vom eingesetzten additiven Fertigungsverfahren abhängig. Während das Laserstrahlschmelzen durch hohe lokale Temperaturgradienten zu heterogenen Abkühl- und damit Schrumpfungsprozessen und infolge dessen zu Eigenspannungen führt, stellen Massenanhäufungen für Lasersinterverfahren und FFF-Verfahren keine Restriktion dar. (vgl. Adam 2015, S. 128 f.) Für das FFF-Verfahren ist die Querschnittsfläche von Bedeutung für die Maßhaltigkeit der Bauteile. Bei sehr kleinen Flächen in einer Schicht befindet sich die Druckdüse über lange Zeiträume oberhalb des Bauteils und erwärmt dieses, sodass es zu Verformungen kommt. (vgl. Adam 2015, S. 131 f.)

### 2.4.2 Restriktionen organisatorischer Möglichkeiten

Die Nutzung der organisatorischen Potentiale wird ebenfalls durch Restriktionen eingeschränkt. Diese sind auf verfahrensspezifische Eigenschaften und auf den aktuellen Entwicklungsstand von Softwarekomponenten und Hardwarekomponenten zurückzuführen (vgl. Abele et al. 2011, S. 82 f.).

---

Eine Restriktion besteht in der Verfügbarkeit digitaler Softwarewerkzeuge (vgl. Abele et al. 2011, S. 82 f.; Kumke 2018, S. 22 f.). Bisherige Software ist nach Newell et al. für die Gestaltungsmöglichkeiten der additiven Fertigung nicht optimal, sondern erfordert hohe Kompetenzen in der Modellierung. Die Erweiterung um Augmented Reality oder Virtual Reality findet Verbreitung unter hohen Anforderungen an die Endgeräte. Interaktivere Eingabemöglichkeiten, beispielsweise Feedback-Handschuhe, haben noch keine Verbreitung. (vgl. Newell et al. 2019, S. 1 bis S. 7) Eine weitere Restriktion ist die Fertigungsgeschwindigkeit (vgl. Abele et al. 2011, S. 82 f.; Gao et al. 2015, S. 67 bis S. 69), die beispielsweise durch Leistungssteigerungen der Fertigungsmaschinen verbessert wurde (vgl. Korpela et al. 2020, S. 27). Neben den genannten stellt ein reproduzierbarer Fertigungsprozess (vgl. Baumers et al. 2016, S. 194; Campbell et al. 2011, S. 7) für gleiche Bauteileigenschaften auf verschiedenen Fertigungsmaschinen (vgl. Campbell et al. 2011, S. 7) eine weitere Restriktion dar.

Neben der Herstellung ist ebenfalls die Vertriebsmöglichkeit der Bauteile erforderlich. Eine Orientierung zum Erwerb additiv gefertigter Bauteile besteht mit der, von der engl. *International Organization for Standardization* (ISO) herausgegebenen, ISO-Norm 52901 (vgl. DIN EN ISO/ASTM 52901 2018, S. 1 bis S. 17). Damit ist allerdings eine umfassende Standardisierung der Bauteilfertigung nicht unmittelbar gegeben (vgl. Abele et al. 2011, S. 82 f.; Gao et al. 2015, S. 68). Hinzu kommt, dass viele bisher genutzte Qualitätssicherungsmaßnahmen auf additiv gefertigte Bauteile nicht anwendbar sind (vgl. Pereira et al. 2019, S. 15 f.). Wichtige Anforderungen an die erfolgreiche kommerzielle Nutzung der additiven Fertigung sind Prozessstabilität, dokumentierte Eigenschaften von AM-Materialien, das Bereitstellen von Konstruktionsregeln, Qualitätskontrollverfahren, sowie die kontinuierliche Zertifizierung (vgl. Gausemeier et al. 2013, S. 77 bis S. 80), wie es bereits im Aviationkontext voranschreitet (vgl. Gausemeier et al. 2013, S. 34).

Die beschriebenen Restriktionen führen zu Unsicherheiten im Einsatz additiver Verfahren zur Bauteilproduktion. Diese Unsicherheiten verzögern beispielsweise die Verbreitung von Fertigungsverfahren und führen zu höheren Fertigungskosten durch beispielsweise aufwendige Qualitätssicherungsprozesse. (vgl. Baumers et al. 2016, S. 193 bis S. 201) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen finden u.a. durch Kostenanalysen statt (vgl. Atzeni et al. 2010, S. 308 bis S. 317; Atzeni et al. 2012, S. 1147 bis S. 1155).

## **2.5 Erweiterung additiver Fertigungsverfahren zu hybriden Fertigungsverfahren**

In diesem Abschnitt werden Erweiterungsmöglichkeiten der additiven Fertigung durch die Verbindung mit weiteren Verfahren zu hybriden Fertigungsverfahren beschrieben. Beginnend mit einer Klassifizierung der hybriden Fertigung in Abschnitt 2.5.1 wird über die Potentiale hybrider additiver Fertigungsverfahren in Abschnitt 2.5.2 ein Bereich der Verfahren mit besonderen Gestaltungsmöglichkeiten für Bauteile durch die Integration von Komponenten in die gefertigten Bauteile, den hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahren, in Abschnitt 2.5.3 beschrieben.

## 2.5.1 Hybride Fertigungsverfahren

Die hybride Fertigung zeichnet sich durch besondere Vorteile aus, welche die der kombinierten Technologien übersteigen (vgl. Schuh et al. 2009, S. 386). Hierbei wird die Erweiterung der Fertigungsfähigkeiten und bzw. oder Grenzüberschreitung der kombinierten Verfahren angestrebt (vgl. Hirt et al. 2011, S. 469 f.). Neben der verkürzten Durchlaufzeiten, Rüstzeiten, verringertem Ressourceneinsatz oder geringeren Fertigungskosten können hybride Technologien zu höherer Flexibilität in der Produktion beitragen, technische oder physikalische Leistungsgrenzen verschieben und bei geschickter Kombination von Einzelkomponenten zu neuen Produkteigenschaften führen (vgl. Schuh et al. 2009, S. 386). Die Grundprämisse ist, dass die Möglichkeiten eines hybriden Fertigungsverfahrens größer im Vergleich zu den Möglichkeiten beider Verfahren einzeln sind (vgl. Gibson et al. 2021, S. 347).

Während Schuh et al. eine Unterteilung in *hybride Produkte*, *hybride Maschinen*, *kombinierte Prozessschritte* und *kombinierte Wirkprinzipien* vornimmt (vgl. Schuh et al. 2009, S. 386 f.), unterteilen Lauwers et al. *hybride Prozesse* in die Kombination von unterschiedlichen Energiequellen beziehungsweise Werkzeugen und in die Verwendung von Prozessmechanismen, welche kontrolliert angewandt und bei nicht hybrider Fertigung separat durchgeführt werden (vgl. Lauwers et al. 2014, S. 562 f.). Die Kombination von unterschiedlichen Energiequellen und Werkzeugen wird weitergehend unterteilt in die Unterstützung eines Prozesses und in dem parallelen oder sequentiellen Zusammenschluss von Prozessen (vgl. Lauwers et al. 2014, S. 562 f.). Die Untergliederung in Anlehnung an Lauwers et al. (2014, S. 563) ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

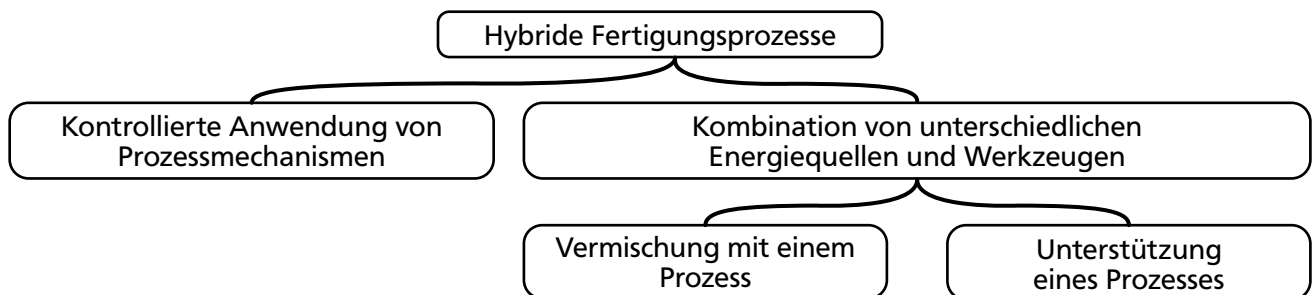


Abbildung 2.8: Einteilung hybrider Fertigungsverfahren in die Kombination von Energiequellen beziehungsweise Werkzeugen und die Nutzung von Prozessmechanismen, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Lauwers et al. (2014, S. 563)

Ein Beispiel für den unterstützten Prozess ist das laserunterstützte Drehen, bei welchem das Werkstück vor dem Zerspanungsprozess durch einen Laser erhitzt wird, um die Härte des Werkstoffs zu reduzieren (vgl. Shin 2010, S. 513 bis S. 522). Der Zusammenschluss von Fertigungsverfahren wird nach Lauwers et al. (2014, S. 562) anhand der engl. *Curved profile extrusion* (vgl. Klaus et al. 2006, S. 5 bis S. 12) dargelegt. Ein Beispiel für die Verwendung von Prozessmechanismen, welche kontrolliert angewandt werden, ist nach Lauwers et al. (2014, S. 562 f. und S. 577 f.) das engl. *Combination of stretch forming and incremental sheet forming* (vgl. Taleb Araghi et al. 2011, S. 393 bis S. 404). Für die Verknüpfung zu einem hybriden Fertigungsverfahren eignen sich beispielsweise additive Fertigungsverfahren, um bestehende Potentiale zu erweitern oder Restriktionen aufzuheben.

---

## 2.5.2 Hybride additive Fertigungsverfahren

Nach Merklein et al. führen die Anforderungen der industriellen Fertigung hinsichtlich wachsender Produktportfolios und kürzer werdender Produktzyklen zur Nachfrage nach innovativen Fertigungsverfahren. Im Bereich der additiven Fertigung mit Metallen werden neben der Nutzung der Vorteile geometrischer Freiheit, optimierter Materialausnutzung und einfacher Anpassung bestehender Bauteile durch die Kombination mit einem spanenden engl. *computer numerical control* (CNC) Prozess Nachteile, wie ungenügende Genauigkeit und Oberflächenrauigkeit, ausgeglichen. (vgl. Merklein et al. 2016, S. 557)

Die hybride Fertigung eröffnet große kombinatorische Freiheiten von Fertigungstechnologien, welche in Abschnitt 2.5.1 anhand von drei hybriden Fertigungstechnologien aufgezeigt wurden. Für eine hybride Fertigungstechnologie ist die Nutzung der additiven Fertigung möglich. Gibson et al. beschreiben hybride additive Fertigungsverfahren als additiven Hauptprozess, welcher durch zusätzliche sekundäre Fertigungsverfahren mit dem Ziel der Verbesserung der geometrischen Genauigkeit, der physikalischen Eigenschaften oder der Mikrostruktur ergänzt beziehungsweise erweitert wird (vgl. Gibson et al. 2021, S. 351). Das additive Fertigungsverfahren wird mit subtraktiven Fertigungsverfahren wie Fräs- und Drehprozessen, mit Fertigungsverfahren zur Änderung der Bauteiloberfläche beispielsweise Kugelstrahlen, Walzverfahren oder Schleifverfahren (vgl. Gibson et al. 2021, S. 351) oder mit Verfahren zur Komponenteneinbettung (vgl. Aguilera et al. 2013, S. 950 bis S. 961) kombiniert.

Für diese Arbeit wird unter der hybriden additiven Fertigung (hAM) in Anlehnung an Lauwers et al. (2014, S. 562 f. und S. 573), Sealy et al. (2018, S. 060801-3) und Gibson et al. (2021, S. 347 bis S. 351) *der kombinierte Fertigungsprozess aus einem additiven Hauptprozess und einem erweiternden Sekundärprozess, die periodisch oder parallel ablaufen*, aufgefasst. Zur Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration bestehen diverse hybride additive Fertigungsverfahren zur Integration von Komponenten in die additiv gefertigten Bauteile. Dieser Bereich der hybriden additiven Fertigung wird im folgenden Abschnitt ausgeführt.

## 2.5.3 Hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren

Im Stand der Forschung sind hybrid-integrierende Fertigungsverfahren, welche die Integration von verschiedenen Funktionsträgern während der additiven Fertigung eines Bauteils ermöglichen, dokumentiert. Integrierbare Funktionsträger sind beispielsweise mechanische Zugfasern (vgl. Dickson et al. 2020, S. 8 f.) und Elektronikbauteile (vgl. Carranza et al. 2019, S. 1176 bis S. 1183). Für die Integration von Funktionsträgern stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, welche unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration aufweisen. In dieser Arbeit wird mit *hybrid-integrierender additiver Fertigung* (hiAM) ein hybrides additives Fertigungsverfahren bezeichnet, das Funktionsträger in das gefertigte Bauteil während des Fertigungsprozesses integriert (vgl. auch Steffan et al. 2022, S. 1471). Nachfolgend wird die Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration durch eine Übersicht bestehender hiAM dargelegt.



---

## Integrierbare Funktionsträger

In der Literatur sind vielfältige hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren dokumentiert. Für die Integration werden zum additiven Aufbau eines Grundkörpers parallel oder alternierend weitere Funktionsträger beispielsweise eingepresst und ummantelt (vgl. Tabelle 2.1). Unter Nutzung der Stereolithografie integrierbare Funktionsträger sind Leitungen (vgl. Medina et al. 2005, S. 39 bis S. 49; Palmer et al. 2005, S. 287 bis S. 293; Woo et al. 2015, S. 3905 bis S. 3909), die zusätzlich mit weiteren, meist elektronischen Bauteilen, kombiniert werden. Die integrierende Fertigung ist beispielsweise mit Microcontrollern, Spulen, Widerständen, Schaltern und weiteren möglich (vgl. MacDonald et al. 2014, S. 234 bis S. 242; Castillo et al. 2009, S. 730 bis S. 737; Navarrete et al. 2007, S. 575 bis S. 585; Espalin et al. 2014, S. 963 bis S. 978; Wasley et al. 2016, S. 849 bis S. 856; Li et al. 2016, S. 1 bis S. 14).

Neben der Integration von konventionell gefertigten Bauteilen ist die Integration eines durch ein Laserschmelzverfahren gefertigtes Metallskelett und der Ummantelung durch ein Stereolithografieverfahren möglich. Ein gefertigtes Bauteil ist beispielsweise eine mit einem Metallskelett verstärkte stereolithografiegefertigte Orthese. (vgl. Silva et al. 2017b, S. 179 bis S. 186; Silva et al. 2017a, S. 150 bis S. 155) Durch die Metallverstärkung wird anhand von Probenversuchen eine höhere maximal ertragbare Zugspannung dargelegt (vgl. Silva et al. 2019, S. 34 bis S. 42).

Der Einsatz des FFF-Verfahrens ermöglicht die Integration einer Vielzahl von Funktionsträgern innerhalb des gefertigten Bauteils. Eine Übersicht ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Diese Vielfalt deutet auf eine besondere Eignung des Fertigungsverfahrens zur Komponentenintegration hin. Neben starren, dedizierten Bauteilen, beispielsweise als oberflächenmontiertes Bauteil (engl. *surface mounted device* (SMD)), werden kontinuierliche, flexible Bauteile, zum Beispiel Karbonfasern und Lichtleiter integriert. Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren ist das FFF-Verfahren besonders häufig verbreitet (vgl. Persad et al. 2022, S. 27295).

Tabelle 2.1: Integrierbare Funktionsträger unter Einsatz des additiven FFF-Verfahrens

Funktionsträger	Publikation
elektrische Leitungen	(vgl. Periard et al. 2007, S. 503 bis S. 512; Perez et al. 2014, S. 1 bis S. 12; Diegel et al. 2011, S. 1984 bis S. 1987; Nassar et al. 2021, S. 1 bis S. 16; Ziervogel et al. 2021, S. 43036 bis S. 43049; Kutuniva et al. 2018, S. 364 bis S. 370; Flowers et al. 2017, S. 156 bis S. 163; Aguilera et al. 2013, S. 950 bis S. 961; Sarobol et al. 2016, S. 41 bis S. 62)
Lichtleitungen	(vgl. Loke et al. 2019, S. 1 bis S. 10)
Karbonfasern	(vgl. Prüß et al. 2015, S. 111409-1 bis S. 111409-7; Markforged Inc. 2023; Kuschmitz et al. 2021, S. 1 bis S. 20; Dickson et al. 2020, S. 8 f.; Pezold et al. 2021, S. 125 bis S. 141)

---

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle 2.1 – von vorheriger Seite fortgesetzt.

Funktionsträger	Publikation
Integrierte Schaltkreise (engl. <i>Integrated circuit</i> (IC)), Widerstände, Kondensatoren, engl. <i>Light-emitting diode</i> (LED) in SMD Bauweise	(vgl. Carranza et al. 2019, S. 1176 bis S. 1183; Wasserfall 2019, S. 70 bis S. 81)
Batterien	(vgl. Malone et al. 2008, S. 128 bis S. 140)

Neben der Stereolithografie und dem FFF-Verfahren wird bei Robinson et al. das Verbinden von Laminatschichten eingesetzt. Durch das Verbinden von Aluminiumschichten mittels Ultraschall wird ein Grundkörper gefertigt und auf durch Epoxidharz isolierten Flächen das Auftragen von Leiterbahnen mit einem engl. *Direct Writing* (DW) Prozess ermöglicht. (vgl. Robinson et al. 2006, S. 60 bis S. 69) Die Integration von Muttern, Karbonfasern, engl. *Radio-frequency identification* (RFID) Elementen, Magnete und elektrischen Leitungen ist weiterhin mit der engl. *Binder Jetting* Technologie möglich (vgl. Glasschröder et al. 2015, S. 207 bis S. 215; Glasschröder 2018, S. 1 bis S. 238). Die Integration von Piezoelementen zur sensorischen und aktorischen Nutzung während der Bauteilfertigung eines Laserschmelzverfahrens (vgl. Link 2022, S. 51 bis S. 59). Für eine Übersicht über dokumentierte Verfahren zur Integration von Elektronik und den Integrationsverfahren wird auf (vgl. Persad et al. 2022, S. 27289 bis S. 27319) verwiesen.

Anhand des bisher beschriebenen Stands der Forschung werden als additive Fertigungsverfahren besonders häufig kunststoffverarbeitende Verfahren eingesetzt. Die integrierten Funktionsträger weisen zum Zeitpunkt der Verarbeitung verschiedene Eigenschaften auf, welche in formlose Materialien, z.B. elektrisch leitfähige Pasten, in feste, starre Materialien, beispielsweise Kondensatoren und Batterien und in feste, flexible Materialien, z.B. Karbonfasern einteilbar sind (vgl. Tabelle 2.1). Für die erfolgreiche Integration der Bauteile werden Leitungen für elektrische, optische oder mechanische Energie benötigt und bilden den häufigsten Anwendungsfall der hybrid-integrierenden additiven Fertigung anhand des Stands der Forschung (vgl. Tabelle 2.1). Für die Leitung von Energien werden beispielsweise Tinten in Form von Aerosolstrahlen für Leitungsflächen (vgl. Vogeler et al. 2013, S. 689 bis S. 696; Joshi et al. 2012, S. 1 bis S. 4) verwendet. Eine verbreitete Form zur Fertigung leitungsintegrierter Bauteile sind die in flüssigem Zustand verarbeiteten Funktionsträger. Zur Sicherstellung einer leichten Anwendung werden beispielsweise leitfähige Filamente zur direkten Nutzung mit FFF-Fertigungssystemen entwickelt und kommerziell vertrieben.

Typische Filamente sind Proto-Pasta von Protoplant Inc. mit Kosten von ca. 90 \$/kg (vgl. Protoplant Inc. 2024) und Electrifi Conductive Filament von Multi3D LLC mit ca. 1940 \$/kg (vgl. Multi3D LLC 2024). Beide Filamente wurden von Flowers et al. hinsichtlich der elektrischen Eigenschaft Widerstand untersucht. Für eine Leiterbahn mit quadratischem Querschnitt und einer Kantenlänge von 2 mm und einer Länge von 50 mm wurden über 1000  $\Omega$  für Protopasta, über 2  $\Omega$  für Electrifi und über 0,02  $\Omega$  für eine Kupferplatine ermittelt. (vgl. Flowers et al. 2017, S. 158) Die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Kupferleitungen ist höher und die erreichten spezifischen Widerstände sind von der Richtung des Aufbaus abhängig (vgl. Jaksic et al. 2018, S. 37 f. und S. 43 f.).

---

Anhand der Entwicklungen im Bereich leitfähiger Materialien im Bereich der hybrid-integrierenden additiven Fertigung des vorangegangenen Abschnitts werden große Fortschritte in den elektrischen Eigenschaften deutlich. Im Vergleich zu Kupfer liegen bspw. die Widerstandswerte weiterhin ca. zwei Größenordnungen oberhalb vergleichbarer konventioneller Kupferleitungen und es besteht ein bedeutender Zielkonflikt zwischen den elektrischen Eigenschaften und den Kosten für die Filamente. Während die Pasten und Tinten in Bauteilen im Bereich von Zentimetern eingesetzt werden, ist beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zu Kupferleitungen geringer. Unterstützt wird die Leitungsintegration durch Softwareentwicklungen zur automatisierten Erstellung des Leitungsverlaufs innerhalb topologieoptimierter Bauteile in CAD-Software (vgl. Panesar et al. 2017, S. 98 bis S. 106; Panesar et al. 2015, S. 111414-1 bis S. 111414-10; Panesar et al. 2014, S. 1 bis S. 15).

Die Integration von festen aber flexiblen Funktionsträgern zum Beispiel in Form von Kupferdrähten, Glasfasern und Karbonfasern ermöglicht eine Integration der Funktionen durch standardisierte Funktionsträger ohne eine Einschränkung der Eigenschaften zur Funktionserfüllung (vgl. Tabelle 2.1). Entsprechend des genutzten additiven oder integrierenden Fertigungsverfahrens ist eine Kompatibilität der Leitung erforderlich. Beispielsweise erfordert das Verfahren von Markforged Inc. (vgl. Markforged Inc. 2023; Pezold et al. 2021, S. 125 bis S. 127) zum Einbringen von Fasern hohe Temperaturen von über 200 °C (vgl. Chacón et al. 2019, S. 3 f.). Das Einschmelzen von Kupferdrähten in einen FFF-Grundkörper nach Aguilera et al. (vgl. 2013, S. 950 bis S. 961), visualisiert in Abbildung 2.9 a), stellt an die Leitung die Anforderung, Temperaturen von 100 °C und höher zu ertragen, ohne die Funktionsfähigkeit zu verlieren. Dies ist ebenfalls für die Integration durch Umfließen der Leitung mit Kunststoff unter Einsatz des FFF-Verfahrens für Kupferdrähte (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43036 bis S. 43049) und Karbonfasern (vgl. Prüß et al. 2015, S. 111409-1 bis S. 111409-7), visualisiert in Abbildung 2.9 b), oder einer Umspritzung der Faser mit Kunststoff außerhalb der Druckdüse (vgl. Saari et al. 2015, S. 35) in Abbildung 2.9 c) erforderlich. Alternativ zu den bisher beschriebenen Integrationsarten ist die Umspülung des flexiblen Funktionsträgers mit Photopolymer und anschließender Aushärtung durch ultraviolette (UV) Strahlung möglich und in Anlehnung an Continuous Composites Inc. (2024) in Abbildung 2.9 d) dargestellt.

Anhand der Übersicht des Stands der Forschung zu bestehenden hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahren wird ersichtlich, dass die Integration starrer Funktionsträger wie RFID-Chips, Gewindeeinsätze und Sensoren durch Handhabungsprozesse häufig in Verbindung mit der Integration von Leitungen verbunden sind. Die Integration von Leiterbahnen wird beispielsweise durch die Verarbeitung leitfähiger flüssiger bzw. pastöser Stoffe möglich, sodass die integrierten Funktionen stark erweitert werden. Diese Integrationsarten sind besonders für kleine Bauteilabmaße dokumentiert. Die Integration von flexibel formbaren Funktionsträgern wie beispielsweise Kupferdrähte und Karbonfasern sind in den Eigenschaften ihrer Funktionserfüllung, beispielsweise der elektrischen Leitfähigkeit, zu bevorzugen.

Bekanntere Verfahren in dem Bereich der flexibel formbaren Funktionsträger stellen das Verlegen von Zugfasern bereit. Die Integration ist innerhalb einer Druckschicht des additiven Fertigungsverfahrens und wird hohen thermischen oder chemischen Belastungen ausgesetzt. Die integrierten kontinuierlichen elektrischen Leitungen weisen keine Ummantelung auf, beispielsweise zur Isolierung.

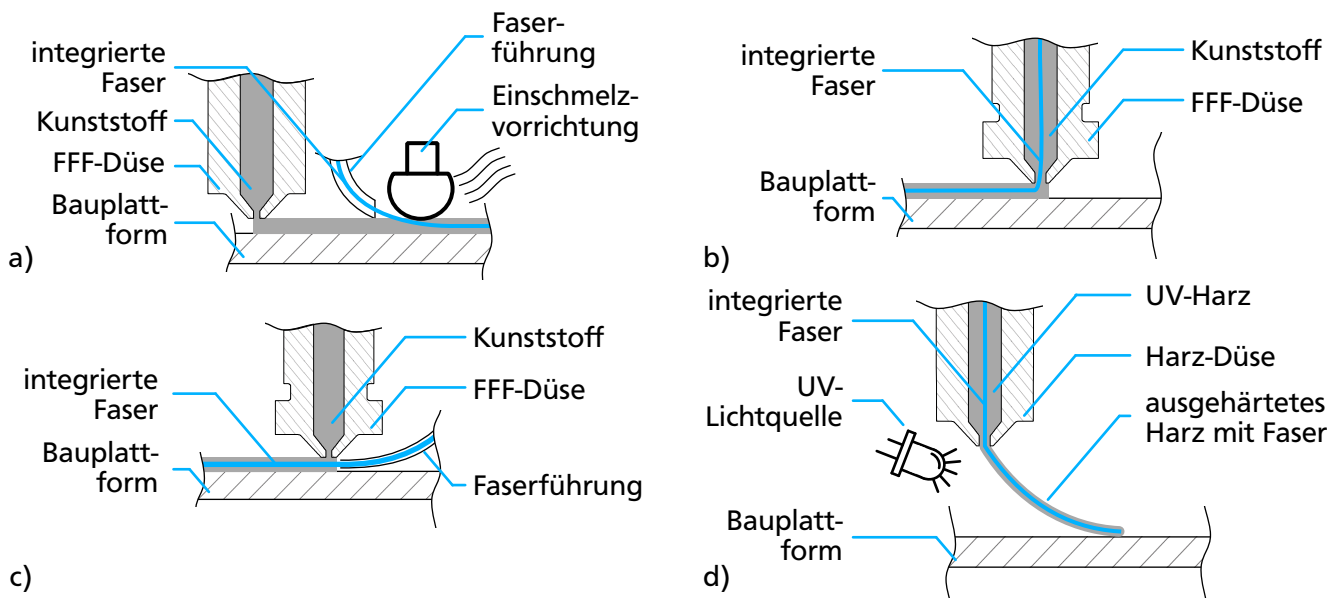


Abbildung 2.9: Schematische Darstellungen verschiedener Arten der Integration mit dem Einschmelzen in den Kunststoff in Anlehnung an Aguilera et al. (2013, S. 950 bis S. 961) in a), der Umspülung der Faser und kombinierte Faser-Kunststoffextrusion in Anlehnung an Ziervogel et al. (2021, S. 43036 bis S. 43049) in b), der Umspritzung der Faser mit Kunststoff außerhalb der Druckdüse in Anlehnung an Saari et al. (2015, S. 35) in c) und der Umspülung der Faser mit Photopolymer und simultaner Faserextrusion und nachfolgender UV-Aushärtung in Anlehnung an Continuous Composites Inc. (2024) in d), eigene Abbildungen a) bis d)

rung. Weiterhin wurden mehradrige Leitungen und die Integration von Stoffleitern nicht ermittelt, sodass im Bereich der Integration von mehradrigen Energie-, Signal- und Stoffleitern in additiv gefertigte Bauteile bei Skalierungsmöglichkeiten hin zu größeren Bauteilabmaßen weitere Potentiale zur Funktionsintegration möglich sind.

---

## 3 Methodische Produktentwicklung mit Berücksichtigung der Fertigung

---

Dieses Kapitel umfasst in Abschnitt 3.1 die Modellierung von technischen Systemen, die eine abstrakte Beschreibung von Produkten und Fertigungsmaschinen ermöglichen. Nachfolgend wird der Problemlöseprozess und ein exemplarischer Produktentwicklungsprozess vorgestellt, während dessen die Modelle technischer Systeme nutzbar sind. Anschließend werden ein Aufbau einer Entwicklungsmethode zur Förderung und Strukturierung der Entwicklungsaktivitäten, Entwicklungsmöglichkeiten der Fertigungsmaschine und die Produktgenerationsentwicklung dargelegt. In Abschnitt 3.2 wird die Einordnung des entwickelten Produkts in dessen Produktlebenslauf, die Möglichkeiten der methodischen Berücksichtigungen der Fertigung mit den Rahmenwerken des Design for X (DfX) und die Möglichkeiten der Funktionsintegration aufgezeigt. In Abschnitt 3.3 wird die eigenschaftsbasierte Beschreibung der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung und das Verfahrensprinzipmodell (VP-Modell) nach Roos (2018) zur Abbildung fertigungstechnologischen Wissens vorgestellt.

### 3.1 Grundlagen der methodischen Produktentwicklung

Im Folgenden wird aufbauend auf den für die Beschreibung von technischen Systemen geeigneten Modellen die Anwendung des technischen Systems zur Problemlösung in Abschnitt 3.1.1 dargelegt. Die Problemlösung bildet die Grundlage für den Produktentwicklungsprozess in Abschnitt 3.1.2, der durch Entwicklungsmethoden (vgl. Abschnitt 3.1.3) gefördert wird. Abschließend wird die Entwicklung von Fertigungsmaschinen in Abschnitt 3.1.4 und die Weiterentwicklung in der möglichen Form der Produktgenerationsentwicklung in Abschnitt 3.1.5 beschrieben.

#### 3.1.1 Modelle zur Beschreibung technischer Systeme

Der allgemeine Modellbegriff wird in dieser Arbeit von Stachowiak genutzt. Ein Modell zeichnet sich durch das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal aus. Das Abbildungsmerkmal beschreibt, dass Modelle eine Repräsentation oder auch Abbildung eines Originals künstlicher oder natürlicher Form darstellen. Das Verkürzungsmerkmal besteht darin, dass ein Modell von einem Original nicht alle Attribute erfasst, sondern lediglich die, welche der modellierenden Person relevant erscheinen. Die Auswahl erfasster Attribute führt bereits zu einer weitgefassten pragmatischen Sichtweise, die bei strenger Spezifizierung zum dritten Merkmal führt. Das pragmatische Merkmal beinhaltet, dass ein Modell von einem Subjekt zu einer bestimmten Zeit für spezifizierte Operationen, den Zweck, geschaffen bzw. verwendet wird. (vgl. Stachowiak 1973, S. 131 bis S. 133)

Im Rahmen der Konstruktionsmethodik ist die Unterscheidung zwischen Produkt- und Prozessmodellen möglich (vgl. Braun 2013, S. 27 f.). Im Bereich der Produktentwicklung fasst ein produktbeschreibendes Modell alle notwendigen, definierenden Informationen zusammen, welche während der Anwendung des Modells im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses benötigt werden (vgl. Gramlich 2013, S. 24). Die produktbeschreibenden Modelle sind nach Gramlich in Partialmodelle einteilbar, die entsprechend ihrem Konkretisierungsgrad an Komplexität zunehmen. Elementar für die Bildung von Modellen ist der Zweck, für welchen sie erstellt werden (vgl. Gramlich 2013, S. 24 bis S. 28).

Prozessmodelle werden zur Beschreibung in einem Zeitraum stattfindende Zustandsänderungen eingesetzt. Der Startpunkt ist der Anfangszustand eines Operanden, der durch die Zustandsänderung in den Endzustand überführt wird. Als Operand werden stoffliche Systeme aufgefasst. Die Eingrenzung des Betrachtungsbereichs ist bei Prozessmodellen durch die Festlegung einer Systemgrenze möglich. (vgl. Gramlich 2013, S. 63 f.) In Abbildung 3.1 ist die Überführung eines Operanden von einem Anfangs- in einen Endzustand schematisch dargestellt. Davon abgegrenzt werden Vorgehensmodelle, die beispielsweise zur Förderung des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden und zusammenhängende Schritte oder Aktivität beschreiben (vgl. Gramlich 2013, S. 37 f.).

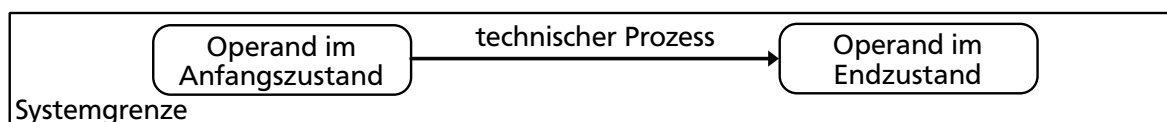


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des technischen Prozesses zur Überführung eines Operanden von einem Anfangszustand in einen Endzustand, eigene Abbildung in Anlehnung an Gramlich (2013, S. 63 f.)

Der Prozess stellt eine abstrakte Beschreibungsform der Zustandsänderung dar und erfolgt nach einem Verfahren. Das Verfahren basiert auf Wirkungsabläufen aufgrund physikalischer Effekte und stellt damit eine Konkretisierung des Prozesses dar. (vgl. Gramlich 2013, S. 86 f.) Im Rahmen dieser Arbeit wird die Definition des Begriffs *Verfahren* in Anlehnung an Gramlich (2013, S. 167), Heidemann (2001, S. 145) und DIN EN ISO 9000 (2015, S. 35) von Roos (2018, S. 32) übernommen mit „Verfahren beschreiben die geordnete Abfolge von Operationen, die notwendig sind, um einen Prozess zu realisieren. Verfahren definieren, in welcher Art und Weise die Zustandsänderung abläuft.“

## Das technische System

Das technische System ist ein künstliches System und dient der Zweckerfüllung in Form von Funktionen (vgl. Ehrlenspiel et al. 2017, S. 35). Technische Objekte und die zugehörigen Objektgruppen sind unter dem Oberbegriff des technischen Systems im Rahmen der Technikwissenschaften zusammengefasst (vgl. Hubka et al. 1992, S. 7). Das technische System ist durch die Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt, besitzt Eingänge und Ausgänge sowie eine innere Struktur aus Elementen und deren Relationen (vgl. Hubka 1984, S. 15). Dieses allgemeine Modell eines technischen Systems ist in Abbildung 3.2 visualisiert.

Ein technisches System ist nach Ropohl mit verschiedenen Konzepten entsprechend des Zwecks darstellbar. Die Konzepte lassen sich unterteilen in das funktionale, das strukturelle und das hierarchi-

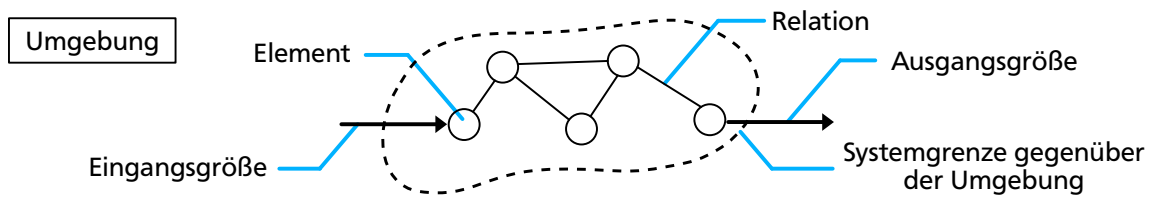


Abbildung 3.2: Technisches System, eigene Abbildung in Anlehnung an Hubka (1984, S. 15)

sche Konzept. Steht beispielsweise das Verhalten des technischen Systems gegenüber der Umgebung im Fokus, bietet sich die Darstellung in Form des funktionalen Konzepts an. Das strukturelle Konzept bildet die Elemente des Systems und deren Relationen innerhalb einer definierten Grenze. Hierbei ist die Erfassung der Interdependenzen zwischen einzelnen Elementen wichtig, um die Systemeigenschaften zu beschreiben. Das hierarchische Konzept ermöglicht die Sichtweise, dass Elemente eines Systems selbst wiederum Systeme sind und als Teilsystem eines Gesamtsystems betrachtet werden. (vgl. Ropohl 2009, S. 75 bis S. 83) Die drei Konzepte sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

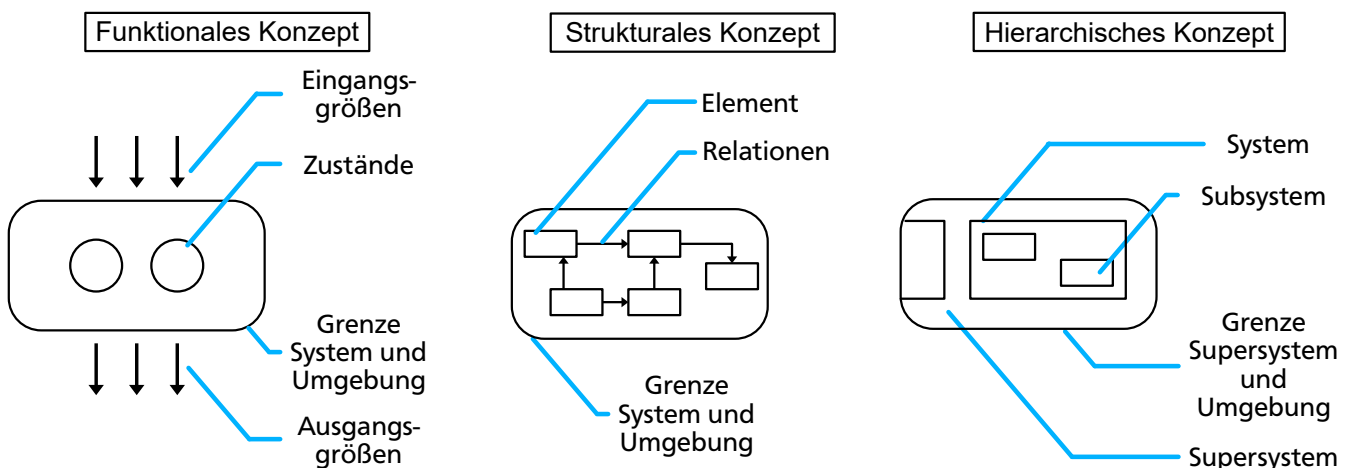


Abbildung 3.3: Systemtheoriekonzepte, eigene Abbildung in Anlehnung an Ropohl (2009, S. 76)

Ein Modell im Rahmen der Produktentwicklung beschreibt verschiedene Formen der Abbildung eines Teilaspekts der Realität (vgl. Heidemann 2001, S. 55). Modelle ermöglichen Rückschlüsse auf das reale Verhalten des abgebildeten Teils der Realität (vgl. Ehrlenspiel et al. 2017, S. 911) und ermöglichen die Reduktion der Komplexität (vgl. Lindemann 2009, S. 12). Die Modelle werden im Rahmen der Produktentwicklung zur Beschreibung verschiedener Eigenschaften, zum Beispiel die Festigkeit über Werkstoffgesetze, eingesetzt (vgl. Feldhusen et al. 2013a, S. 12).

### Die modellbasierte Problemlösung

Während der Entwicklung besteht die Möglichkeit der Lösung von Problemen. Als Problem wird eine Situation aufgefasst, in welcher die Transformationsregeln zwischen einem Soll- und einem Ist-Zustand unbekannt sind und damit eine Barriere bilden (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 14 f.).

Probleme lassen sich durch die Intransparenz, die Vielzieligkeit, die Vernetztheit und die (Eigen-)Dynamik charakterisieren (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 16). Zur Problemlösung ist das menschliche Denken und Handeln in Form von Regelzyklen beschreibbar, beispielsweise mithilfe des Test-Operate-Test-Exit (TOTE) Schemas (vgl. Ehrlenspiel et al. 2017, S. 103 f.).

Dabei besteht die Möglichkeit, den Problemlösungsprozess durch Modelle zu unterstützen. Hierzu wird eine bestehende Barriere zwischen einem Anfangszustand in einen gewünschten Endzustand überwunden, indem das Problem in den Modellraum transformiert und dort in eine modellbasierte Lösungsbeschreibung überführt wird. Diese Lösungsbeschreibung ist in den gewünschten Endzustand transformierbar. (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 14 f.) Das rekursive TOTE-Schema ist in Abbildung 3.4 a) und die modellbasierte Problemlösung ist in Abbildung 3.4 b) visualisiert.

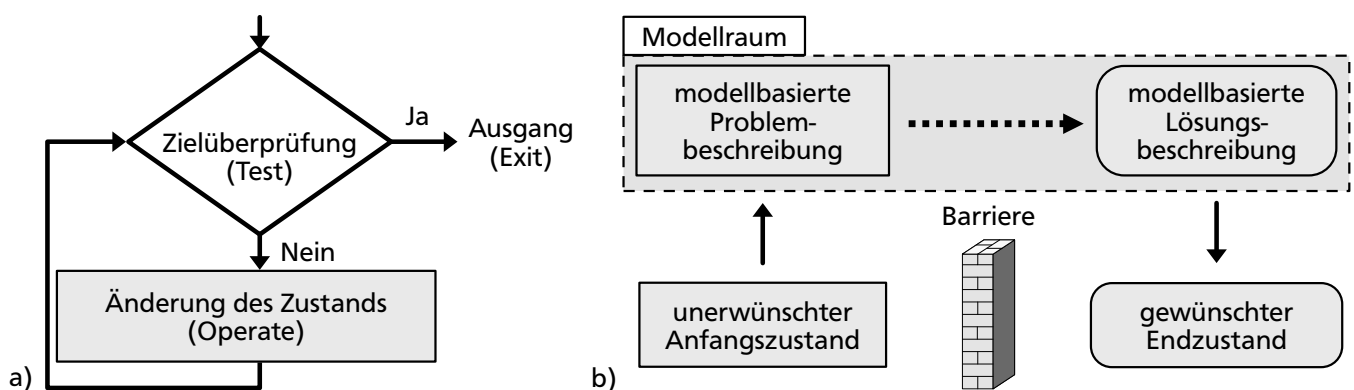


Abbildung 3.4: TOTE-Schema in Anlehnung an Ehrlenspiel et al. (2017, S. 103) in a) und modellbasierte Problemlösung angelehnt an die Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 15) in b), eigene Abbildungen

### 3.1.2 Der Produktentwicklungsprozess

In diesem Abschnitt wird das Vorgehensmodell des Produktentwicklungsprozesses nach der VDI-Richtlinie 2221 zur Verortung der Produktentwicklung in Bezug zur Fertigung umrissen. Das Vorgehensmodell ermöglicht die Strukturierung des Produktentwicklungsprozesses von der Entwicklungsaufgabe hin zur Dokumentation des Produkts. (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 1 bis S. 56; VDI 2221 Blatt 2 2019, S. 1 bis S. 42) Die im Folgenden verwendete schematische Darstellung ist in Abbildung 3.5 a) visualisiert. Als Alternativen zur VDI-Richtlinie 2221 bestehen für die Strukturierung des Entwicklungsprozesses in der Literatur eine Vielzahl weiterer Vorgehensmodelle, beispielsweise das engl. *Axiomatic Design* (vgl. Suh 1998, S. 189 bis S. 209) und das engl. *Property-Driven-Development* (vgl. Weber 2012, S. 25 bis S. 62).

Ein Beispiel ist der Fokus eines Vorgehensmodells auf die frühen Phasen der Produktentwicklung zur Beeinflussung der erreichbaren Funktionalität, der Kosten und der Qualität des späteren Produkts (vgl. Groche et al. 2012, S. 163 f.). Vorgehensmodelle der Produktentwicklung, beispielsweise der VDI-Richtlinie 2221 (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 1 bis S. 56; VDI 2221 Blatt 2 2019, S. 1 bis S. 42)



und der VDI-Richtlinie 2222 (vgl. VDI 2222 Blatt 1 1997, S. 1 bis S. 63; VDI 2222 Blatt 2 1982, S. 1 bis S. 43) führen zu intensiven frühen Phasen der Produktentwicklung bei einem von Entwicklungsschritten und Iterationen geprägtem Vorgehen (vgl. Groche et al. 2012, S. 163 f.).

Zur umfangreicheren Nutzung der Potentiale der additiven Fertigung bestehen Ansätze zur Adaption des Vorgehensmodells nach der VDI-Richtlinie 2221, während ein Ansatz zur Fokussierung auf das DfAM ausgerichtet ist (vgl. Kumke 2018, S. 87 bis S. 95), bestehen weitere Ansätze in der systematischen Erweiterung der berücksichtigten Teillösungen (vgl. Steffan et al. 2020, S. 1118 f.) und in der iterativen Entwicklung von Produkten und der Planung der Produktion (vgl. Jacob et al. 2018a, S. 742).

Das Ergebnis für die additive Fertigung ist nach Jacob et al. ein an die VDI-Richtlinie 2221 (Im Originaltext wird die VDI 2221 (1993) zitiert) angelehntes Vorgehen, welches nach der prinzipiellen Lösung die Iteration von Produkt- und Technologieanpassung vorsieht, bevor der Produktgesamtentwurf und die finale Technologiekette festgelegt werden. Hierzu wird die bestmögliche Fertigungskette zur Fertigung der Bauteile festgelegt, während eine bekannte Fertigungsmaschine zur Realisierung zugeordnet wird. (vgl. Jacob et al. 2018a, S. 742 bis S. 745) Die Lösungsfindung ist als Optimierungsproblem beschreibbar (vgl. Jacob et al. 2018b, S. 108 bis S. 113). Diese Methodik wurde beispielsweise um das Funktionsdesign des Produkts und die Auswahl einer geeigneten Fertigungsmaschine erweitert und am Beispiel einer hybriden Fertigungsprozesskette überprüft (vgl. Jacob et al. 2019, S. 222 bis S. 227). Die Möglichkeiten der Fertigungsmaschinenentwicklung werden bisher nicht berücksichtigt.

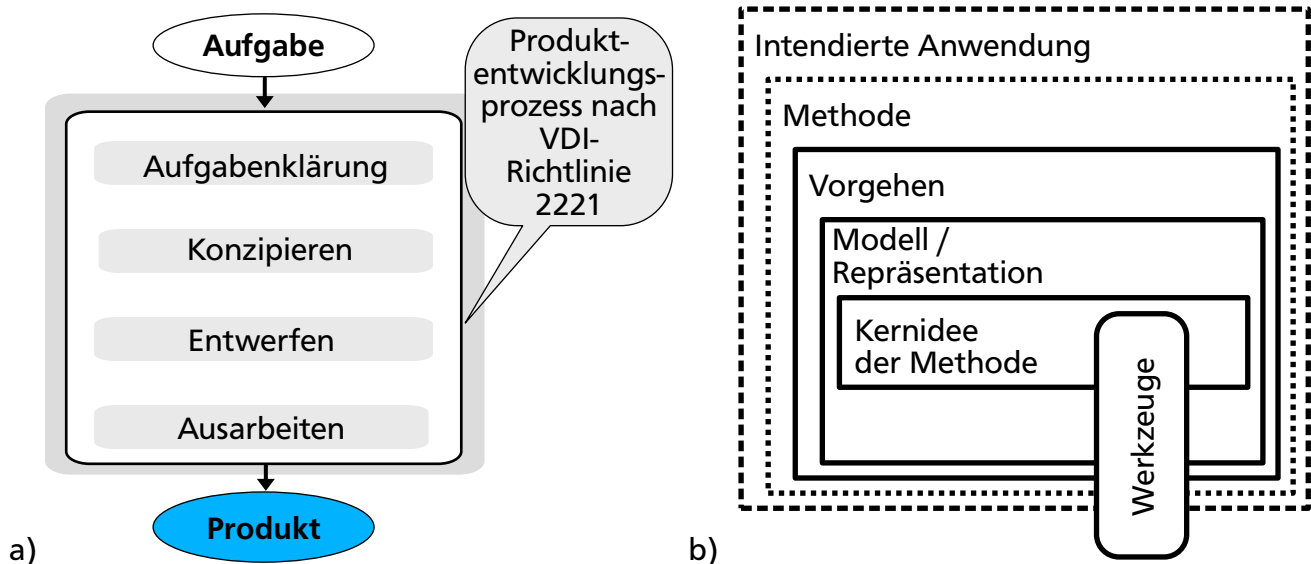


Abbildung 3.5: Schematische Vorgehensmodellardarstellung vereinfacht in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 31) als allgemeines Modell des Produktentwicklungsprozesses zwischen der Aufgabe und dem gefertigten Produkt in a) und Elemente einer Methode übersetzt in Anlehnung an Gericke et al. (2017, S. 107) in b), eigene Abbildungen

---

### 3.1.3 Aufbau einer Entwicklungsmethode

Zur Entwicklung von Produkten sind vielfältige Vorgehensmodelle dokumentiert, sodass im Rahmen dieser Arbeit auf eine Differenzierung und Übersicht in der Literatur verwiesen wird (vgl. Gericke et al. 2021b, S. 80 bis S. 89). Zur Förderung der Entwicklungsaktivitäten stellen Entwicklungsmethoden eine etablierte Möglichkeit dar (vgl. Roos 2018, S. 39).

Eine Methode wird nach der Richtlinie VDI 2223 (2004, S. 88) und Pahl et al. (2007, S. 784) beschrieben als „Planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels.“, das in der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 7) auch um den Aspekt einer Tätigkeitsabfolge erweitert wird. In der Literatur besteht eine Vielfalt von Methoden, die in Sammlungen zusammengestellt sind und auf die an dieser Stelle verwiesen wird (vgl. Lindemann 2009, S. 241 bis S. 328; Ehrlenspiel et al. 2017, S. 433 bis S. 680).

Die Ausgestaltung einer Methode kann nach Gericke et al. vielseitig von einer klar festgelegten Abfolge von Schritten bis zu einer freien Sammlung an Heuristiken erfolgen. Das Ziel einer Methode ist flexibel von nützlichen Einsichten über die Ermittlung von Anforderungen, der Bewertung von Arbeitsergebnissen bis zu festgelegten Ergebnissen setzbar. Die Entwicklungsmethode besteht aus den Elementen der Kernidee, dem Modell bzw. der Repräsentation sowie dem Vorgehen zur Durchführung. Die Kernidee ist beispielsweise die Theorie oder eine Technik, die mit der Methode verwendet wird. Die Repräsentation entspricht dem Zwischenergebnis oder Endergebnis der Methode und das Vorgehen beschreibt die durchzuführenden Handlungen und deren Reihenfolge zur möglichst vollständigen Durchführung der Methode. (vgl. Gericke et al. 2017, S. 101 bis S. 110)

Erweitert werden diese Bereiche nach Gericke et al. um die intendierte Anwendung. Diese liefert zur Einschätzung von Anwendung und Eignung einer Methode die Beschreibung des Anwendungsbereichs, des Geltungsbereichs und des erwartbaren Nutzens. Während der Anwendungsbereich Informationen zur Situation oder der Produktart beispielsweise eines Branchensektors oder die Gestaltungssituation beinhalten, beschreibt der Geltungsbereich für welche Situationen die Methode zum Beispiel durch fehlende Informationen nicht geeignet ist. Der erwartbare Nutzen spezifiziert, welche Form das Ergebnis, von Einsichten in die Problematik bis hin zur vollständigen Lösung des Problems aufweist. Über die verschiedenen Bereiche sind Werkzeuge nutzbar, die zur Durchführung erforderlich oder optional ausgeführt sein können. (vgl. Gericke et al. 2017, S. 101 bis S. 110) Die schematische Darstellung des verwendeten Aufbaus einer Entwicklungsmethode ist in Abbildung 3.5 b) dargestellt.

### 3.1.4 Entwicklung von Fertigungsmaschinen

Für die Entwicklung von Fertigungsmaschinen sind mehrere Ansätze möglich, die von einer erfahrungsbasierten Lösungsauswahl bis zu einem methodischen Vorgehen reichen und in diesem Abschnitt umrissen werden. Fertigungsmaschinen, im Besonderen Werkzeugmaschinen werden als technische Systeme aufgefasst (vgl. auch Uhlmann et al. 2010, S. 22). Diese stellen als Arbeitsmittel (Operator) die Wirkgrößen und Wirkelemente zur Durchführung des Fertigungsprozesses dar (vgl. Gramlich 2013, S. 86 f.). Analog zum Produkt ist der Fertigungsprozess der Fertigungsmaschine als

---

Einsatzprozess des Produkts *Fertigungsmaschine* auffassbar (vgl. Produkt und dessen Einsatzprozess nach Roos (2018, S. 28 bis S. 36) basierend u.a. auf Gramlich (2013), Heidemann (2001) und Hubka (1984)). Im Folgenden wird zur Unterscheidung mit Produkt das technische System bezeichnet, dessen Bauteile durch die Fertigungsmaschine ermöglicht werden. Mit Fertigungsmaschine wird das Arbeitsmittel bezeichnet, dessen Einsatzprozess der Fertigungsprozess zur Bauteilfertigung ist.

Die Entwicklung von Fertigungsmaschinen und deren Komponenten durchläuft nach Brecher et al. die Schritte des Lastenhefts, der Konzeption über die Gestaltung und Dokumentation in Form von Fertigungsunterlagen hin zum Arbeitsplan und im Fall von computergesteuerten Maschinen das Numerical Control Programm. Abschließend kann die Fertigung und Montage der Fertigungsmaschine erfolgen. Beispielhafte Beurteilungskriterien im Bereich der Leistungsfähigkeit der Maschine sind das statische und dynamische Maschinenverhalten, das Temperaturverhalten und die Festigkeit. Das Geräuschverhalten, mögliche Erschütterungen, Sicherheit und Ergonomie sind zusätzlich als weitere Kriterien nutzbar. Zur Konstruktion und Berechnung werden derzeit engl. *Computer-Aided Design* (CAD) und engl. *Computer-Aided Engineering* (CAE) eingesetzt. (vgl. Brecher et al. 2017, S. 4 f.)

Die Fertigungsmaschine wird im Rahmen dieser Arbeit als das entwickelte Produkt des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses aufgefasst. Die Fertigungsmaschinenentwicklung nutzt die in Form von Anforderungen formulierte Entwicklungsaufgabe zur systematischen oder erfahrungsbasierten Entwicklung der Fertigungsmaschine. Die Entwicklung kann unter Nutzung eines Entwicklungsvorgehens und Entwicklungsmethoden erfolgen (vgl. Abschnitte 3.1.2 und 3.1.3). Für die Gestaltung der Fertigungsmaschine sind zur Ermittlung und Bewertung einer Lösung Berechnungsverfahren, Messverfahren, Lösungskataloge und Beurteilungsmaßstäbe nutzbar (vgl. Brecher et al. 2017, S. 5).

Das bestehende und dokumentierte Wissen wird beispielsweise in Sammelwerken zusammengestellt, weist erheblichen Umfang auf und es wird an dieser Stelle auf bestehende Literatur verwiesen (vgl. Böge et al. 2021a; Hoenow et al. 2021; Brecher et al. 2017; Doege et al. 2016; Dietrich 2018). Damit ist ein Ziel der Fertigungsmaschinenentwicklung, die erforderlichen Wirkgrößen und die Gestaltung der Wirkelemente zur Durchführung der Fertigungsprozesse bereitzustellen. Das erforderliche fertigungstechnologische Wissen ist beispielsweise in den angegebenen Sammelwerken zusammengefasst.

### **3.1.5 Die Produktgenerationsentwicklung**

Ein Verständnis der Innovation besteht darin, dass eine Invention zusätzlich retrospektiv beispielsweise zu wirtschaftlichem Erfolg führt (vgl. Hauschildt 2005, S. 25 f.). Innovationen sind in Produkt- und Prozessinnovationen unterscheidbar (vgl. Utterback et al. 1975, S. 639 bis S. 656). Innovationen sind für Unternehmen eine Möglichkeit, im Wettbewerb des Markts dauerhaft zu bestehen (vgl. Albers et al. 2015, S. 2). Hauschildt differenziert fünf Dimensionen einer Innovation, welche neben der inhaltlichen Dimension die subjektive, die prozessuale, die normative und die Intensitätsdimension umfassen (vgl. Hauschildt 2005, S. 26). Das Innovationsmanagement ist zukunftsbezogen und setzt die Erwartung des Erfolgs der Innovation voraus, während der erzielte Erfolg in Form von Gewinnen, Umsätzen oder Kostenreduktionen lediglich retrospektiv beurteilt werden kann (vgl. Hauschildt 2005, S. 35 f.).

---

Die während der Produktentwicklung entstehenden Inventionen führen einerseits nicht zwangsläufig zu Innovationen und werden durch eine reine Innovationsbetrachtung nicht erfasst (vgl. Albers et al. 2015, S. 3). Es besteht eine Unsicherheit in der Weiterentwicklung von Ideen zu Produkten. Für Unternehmen besteht die Notwendigkeit der Kompromissfindung zwischen der Risikominimierung durch möglichst geringe Anteile an Neuentwicklungen und dem Innovationsdruck des Markts durch den Wettbewerbsvorteil anhand technischer Weiterentwicklungen. (vgl. Albers et al. 2021, S. 2611 bis S. 2620; Albers A. et al. 2014, S. 3)

Nach Albers et al. besteht eine Lösung in der Produktgenerationsentwicklung. Diese unterscheidet die Entwicklungstätigkeiten in die Übernahmevariation und die Neuentwicklung, wobei die Neuentwicklung weiter unterteilt ist in die Gestaltvariation und die Prinzipvariation. Die Basis einer neuen Produktgeneration bildet ein Referenzprodukt, welches mit der Neuentwicklung von Teilsystemen kombiniert wird, sodass das Risiko der Entwicklung minimiert wird und gleichzeitig die Differenzierungsmöglichkeiten ansteigen. Das Referenzprodukt kann eine vorherige Produktgeneration oder ein Wettbewerbsprodukt sein. (vgl. Albers et al. 2015, S. 4 f.)

Die Übernahmevariation beschreibt nach Albers et al., dass die Gestalt und das gewählte Lösungsprinzip des Referenzprodukts verwendet werden. Durch die Übernahme sind die notwendigen Anpassungen gering und befinden sich i.d.R. an den Schnittstellen zu den anderen Teilsystemen. Die Gestaltvariation ist auf die Änderung der Gestalt beschränkt und das Lösungsprinzip des Referenzprodukts ist gleich. Die Prinzipvariation liegt vor, wenn das Lösungsprinzip des neu entwickelten Teilsystems von der Referenzlösung abweicht. (vgl. Albers et al. 2017, S. 17 f.) Zur Festlegung der Entwicklungstätigkeit ist die Berücksichtigung der Produkteigenschaften unter Nutzung des KANO-Modells möglich (vgl. Albers et al. 2021, S. 2611 bis S. 2620).

## **3.2 Verbindung der Produktentwicklung und der Fertigung**

Die Produktentwicklung beeinflusst durch die Festlegungen der Produktgestalt neben den Nutzungsprozessen des Produkts ebenfalls die vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse, beispielsweise die Fertigung (vgl. Kirchner et al. 2021, S. 467 f.). In diesem Abschnitt werden diese Verknüpfungen beschrieben. Dazu werden die Ansätze zur systematischen Berücksichtigung der Fertigung des Design for X (DfX) und der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung dargestellt.

### **3.2.1 Verknüpfung durch den Produktlebenslauf**

Der *Produktlebenslauf* ist Teil des *Produktlebenszyklus* (engl. *Product Lifecycle*), der eine umfassendere Sicht auf die zeitliche Entwicklung von Produkten darstellt (vgl. Gramlich 2013, S. 36 f.). Der Produktlebenszyklus ist in die inhaltlichen Teile des betriebswirtschaftlichen, technologischen und des *intrinsischen Produktlebenszyklus* einteilbar (vgl. Pahl et al. 2007, S. 97). Der Teil des intrinsischen Produktlebenszyklus umfasst die aufeinander folgenden Situationen, die das Produkt von der Produktidee, der Produktentwicklung über die Fertigung bis zum Recycling bzw. der Entsorgung durchläuft (vgl. Pahl et al. 2007, S. 98 f.).

Im Vergleich zum intrinsischen Produktlebenszyklus umfasst der *Produktlebenslauf* die Phasen in welchen das Produkt in mehreren vorgelagerten und nachgelagerten Prozessen realisiert und während des Nutzungsprozesses genutzt wird (vgl. Birkhofer et al. 2018, S. 602 bis S. 604). Die durchlaufenen Prozesse bestehen aus den fünf Phasen der Werkstoffherstellung, der Bauteil- und Komponentenfertigung, der Montage, der Nutzung und dem Recycling bzw. der Entsorgung (vgl. Kirchner et al. 2021, S. 467 f.) in Anlehnung an Birkhofer et al. (2018, S. 602). Die Phasen sind in Abbildung 3.6 dargestellt.



Abbildung 3.6: Phasen des Produktlebenslaufs in Anlehnung an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.) basierend auf Birkhofer et al. (2018, S. 602), eigene Abbildung

Während das Produkt nach Birkhofer et al. in den Phasen als Gesamtsystem oder in Teilen verändert wird, ermöglicht das Produkt die Nutzungsprozesse im Rahmen der Nutzungsphase. Das Produkt stellt im Rahmen der Nutzungsprozesse das Arbeitsmittel dar und ermöglicht den eigentlichen Zweck des Produkts. Die Phasen sind durch einen Stoff- beziehungsweise Energietransport miteinander verbunden. In jeder Phase durchläuft das Produkt in der Regel mehrere Prozesse. Die Eingangsgrößen werden in Ausgangsgrößen überführt, die von Rohstoffen bis hin zu fertigen Produkten reichen. In der Produktionsphase, bestehend aus Fertigungsprozessen und Montageprozessen, entstehen aus Halbzeugen als stoffliche Eingangsgrößen die erforderlichen Bauteile und Komponenten, um in nachfolgenden Montageprozessen zum Produkt zusammengesetzt zu werden. Für die Prozessdurchführung werden zusätzliche Energien oder Hilfsstoffe benötigt. Das hergestellte Produkt ist in der Nutzungsphase für die Nutzungsprozesse entsprechend der Entwicklungsaufgabe einsetzbar und erfüllt den vorgesehenen Zweck, bevor es in die Recycling und Entsorgungsphase eintritt. (vgl. Birkhofer et al. 2018, S. 602 f.)

Mit dem intrinsischen Produktlebenszyklusmodell besteht die Verbindung zwischen der Produktentwicklung und dem Produktlebenslauf. Während der Produktentwicklung wird das Produkt festgelegt und beeinflusst damit sämtliche Phasen des Produktlebenslaufs. Gleichzeitig können die erforderlichen Prozesse der verschiedenen Lebenslaufphasen in der Produktentwicklung berücksichtigt werden. (vgl. Gramlich 2013, S. 48 f.) Aus dieser Überlegung folgt die ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE) (vgl. Kirchner et al. 2021, S. 468; Birkhofer et al. 2018, S. 604). Aufgrund der beschriebenen Verknüpfungen wird im Folgenden der Produktentwicklungsprozess mit dessen Verbindung zum Produktlebenslauf kombiniert dargestellt.

### 3.2.2 Das Design for X - DfX

Im Produktentwicklungsprozess und im Produktlebenszyklus werden diverse Anforderungen an das Produkt gestellt (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 44 bis S. 46; McAloone et al. 2021, S. 985), welche

---

produktspezifisch zu Zielkonflikten führen und eine Herausforderung darstellen (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 44). Die Informationen über das Produkt durch dessen Festlegung im Produktentwicklungsprozess werden zur Gestaltung von Prozessen des Produktlebenslaufs eingesetzt. Im Rahmen der Produktentwicklung wird beispielsweise die Geometrie der Bauteile festgelegt, die einerseits einen Einfluss auf die Auswahl möglicher Fertigungsverfahren zur Herstellung des Bauteils ausübt und andererseits für ein ausgewähltes Fertigungsverfahren die Fertigbarkeit sichergestellt. Aus diesem Grund bestehen bereits vielfältige Ansätze zur Berücksichtigung der Fertigung während der Produktentwicklung, z.B. im Rahmen des Design for X (DfX). (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 1 bis S. 56)

Das Design for X ist eine gehäuft anzutreffende Benennung von Gestaltungsrichtlinien im internationalen Kontext (vgl. Kirchner et al. 2021, S. 469; Ponn et al. 2008, S. 26; Pahl et al. 2007, S. 393). Im Rahmen des Design for X werden Erfahrungen über die Beziehungen zwischen spezifischen Produktlebensphasen und Gestaltungsaktivitäten genutzt, um die Produktqualität und die Produktfunktion zu verbessern und beziehungsweise oder die Herstellung, die Montage und bzw. oder den Umwelteinfluss zu reduzieren (vgl. Duffy et al. 1993, S. 258). Die Berücksichtigung der Herstellbarkeit wird als spezifischer DfX-Bereich meist als engl. *Design for Manufacture* (DfM) und die Berücksichtigung der Montierbarkeit als engl. *Design for Assembly* (DfA) bezeichnet (vgl. Herrmann et al. 2004, S. 853 f.; Boothroyd et al. 2010, S. 1).

Die Sicherstellung der Durchführbarkeit der Lebenslaufprozesse durch das DfX führt zu Restriktionen in der Produktentwicklung, die notwendig sind, aber die neuen Möglichkeiten durch die Fertigungs- und Montageprozesse nicht unbedingt beinhalten (vgl. auch Roos 2018, S. 14 bis S. 42 und S. 44). Allerdings finden sich im DfX zunehmend auch lösungsfördernde Informationen für den Produktentwicklungsprozess, welche beispielsweise als opportunistische Ansätze für den Bereich des DfAM beschrieben werden (vgl. Kumke 2018, S. 47 bis S. 49; Steffan et al. 2020, S. 1115 bis S. 1124), um beispielsweise das Potential der Funktionsintegration umfassender zu nutzen (vgl. Steffan et al. 2022, S. 1471 bis S. 1480; Tüzün et al. 2023, S. 2005 bis S. 2014). Das DfAM umfasst die Wissensdarstellung beispielsweise durch Gut-Schlecht-Beispiele (vgl. Adam 2015, S. 56 bis S. 142; Kranz et al. 2015, S. S14001-1 bis S. S14001-16) und die Anlehnung an bestehende Vorgehensmodelle (vgl. Kumke 2018, S. 87 bis S. 95; Pradel et al. 2018, S. 310 bis S. 312) beziehungsweise eigene Vorgehensmodelle (vgl. Leutenecker-Twelsiek et al. 2016, S. 411; Ponche et al. 2017, S. 172 bis S. 177; Laverne et al. 2016, S. 279 bis S. 288).

Auch die systematische Modifikation, Erweiterung oder Neukonfiguration von Richtlinien im Bereich des DfAM für individuelle Bedürfnisse ist möglich (vgl. Mani et al. 2017, S. 1 bis S. 10). Die beschriebenen Wechselwirkungen zwischen dem DfX und dem Produktentwicklungsprozess sind in Form einer schematischen Darstellung in Abbildung 3.7 visualisiert. In Bezug auf die additive Fertigung besteht das Potential der Funktionsintegration (vgl. Abschnitt 2.3), sodass hinsichtlich dieser Fertigungsverfahren im folgenden Abschnitt die Möglichkeiten zur Funktionsintegration aus Sicht der Produktentwicklung aufgezeigt werden.

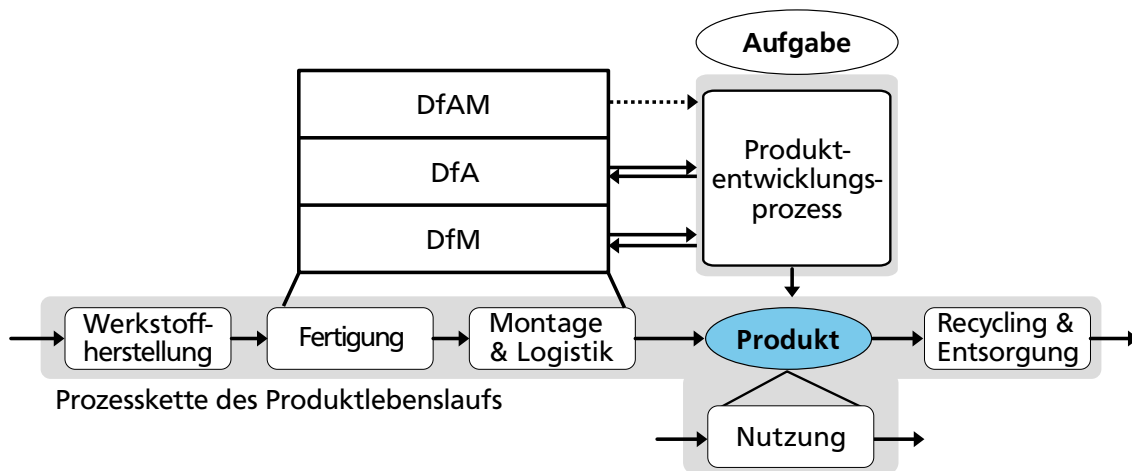


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des DfX und dessen Einfluss auf die Produktentwicklung, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 16) und für den Produktlebenslauf an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.)

### 3.2.3 Möglichkeiten der Funktionsintegration

Der Begriff der Funktionsintegration ist in der Literatur nicht einheitlich definiert, sodass für diese Arbeit aufbauend auf in der Literatur dokumentierten Definitionen in Tabelle A.1 in Anhang A.1 die folgende Definition festgelegt wird: *Funktionsintegration ist die Integration von neuen oder mehreren vorhandenen Funktionen in ein Gesamtsystem durch die konstruktive Gestaltung von neuen oder bestehenden Bauteilen mit dem Ziel der Reduktion der Aufwände für die Bauteilfertigung und den Materialeinsatz zur Bereitstellung aller Funktionen des Gesamtsystems.*

Die für die Definition verwendete Sichtweise ist von einem dem technischen System nicht zugehörigen Standpunkt auf das technische System gerichtet. Die in das System integrierten Funktionen sind an die zugehörigen Funktionsträger gekoppelt, sodass diese Funktionsträger aus Systemsicht integrierend im Sinne der Funktionsintegration wirken. Für die Hervorhebung der Systemsicht werden im Folgenden die Bezeichnungen integrierende Funktionsträger und integrierende Fertigungsverfahren verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird damit der Begriff fertigungsintegrierend statt fertigungsintegriert genutzt, beispielsweise auch in Bezug auf die Entwicklungsmethodik (vgl. Abschnitt 3.3). Nutzen und Nachteile der Integralbauweise, deren Ergebnis zur Teilereduktion dem Ergebnis der Funktionsintegration entspricht, sind als Auszug in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Nutzen und Nachteile der Integralbauweise, deren Ergebnis zur Teilereduktion dem Ergebnis der Funktionsintegration entspricht, Auszug nach Ehrlenspiel et al. (2017, S. 600 bis S. 603)

Nutzen	Nachteile
geringere Teilezahl und damit weniger Fügestellen	komplexere Gestalt der Bauteile und damit höherer Aufwand zur Qualitätssicherung

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle 3.1 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Nutzen	Nachteile
Reduktion der Fertigungskosten bei Serienfertigung	serielle Fertigungsschritte führen zu zeitaufwendiger und unflexibler Fertigung
geringerer Montageaufwand	erhöhtes Fertigungsrisiko durch hohe Gestaltkomplexität
vereinfachte Materialbeschaffung und Logistik	höherer Änderungsaufwand bei Fertigungsverfahren mit Werkzeugen

Der zuvor beschriebene Fokus auf die Nutzung der Fertigungsmöglichkeiten im Rahmen der Produktentwicklung ist für innovative Produkte nutzbar (vgl. Wagner 2018, S. 4). Die Bauteile als Elemente der Baustruktur werden durch Fertigungsverfahren gefertigt und die Berücksichtigung dieses Zusammenhangs ermöglicht weitere Vorteile, beispielsweise in Bezug auf die Funktionsintegration (vgl. Wagner 2018, S. 39 bis S. 42).

In Abbildung 3.8 sind drei Möglichkeiten zur Integration nach Wagner (2018, S. 39 bis S. 45) visualisiert. In Abbildung 3.8 a) ist die Integration neuer Funktionen in ein Produkt ohne Änderung der Anzahl von eingesetzten Fertigungsverfahren und der Bauteilanzahl abgebildet. In Abbildung 3.8 b) ist die Fertigungsverfahrenintegration visualisiert, bei der die Anzahl der eingesetzten Fertigungsverfahren reduziert wird. Dieser Fall beinhaltet beispielsweise hybride Fertigungsverfahren. In Abbildung 3.8 c) ist die Möglichkeit einer integralen Baustruktur dargestellt, bei der die Produktfunktionen mit einer geringeren Zahl an Bauteilen ermöglicht wird. (vgl. Wagner 2018, S. 39 bis S. 45)

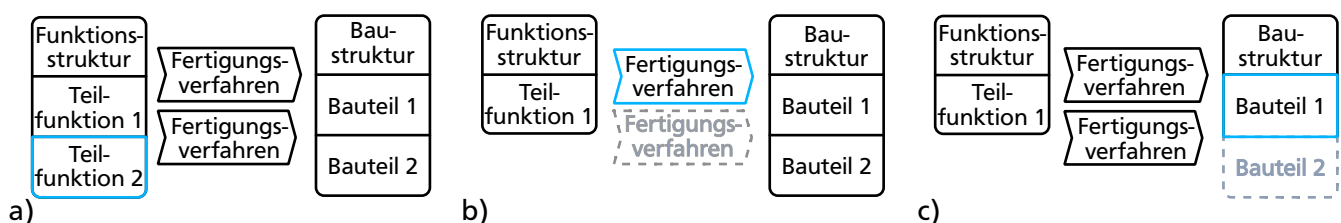


Abbildung 3.8: Integrationsarten durch Erfüllung neuer Funktionen in a), der Integration von Fertigungsverfahren in b) und einer integralen Baustruktur in c). Abbildungsteile a) bis c) als eigene Abbildungen in Anlehnung an Wagner (2018, S. 39 bis S. 45)

Mit dem Rahmenwerk des DfX und der Funktionsintegration besteht ein Einblick in die Möglichkeiten der Produktentwicklung durch die Berücksichtigung von Fertigungsverfahren. Zur systematischen Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten für Produkte und deren Funktionen durch die Fertigungsprozesse besteht ein Ansatz zur fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, der im folgenden Abschnitt 3.3 beschrieben wird.



---

## 3.3 Die fertigungsintegrierende Entwicklungsmethodik

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik als Ausgangspunkt für die Beschreibung der Möglichkeiten durch die Fertigungsverfahren für die Produktentwicklung dargestellt. Anschließend wird das Verfahrensprinzipmodell zur Zuordnung fertigungstechnologischen Wissens beschrieben.

### 3.3.1 Aufbau der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik

An neue Produkte werden die Forderungen gestellt, innovativ und auf die Kundenbedürfnisse abgestimmt zu sein. Diese Herausforderungen werden durch verfahrensspezifische Vorteile erreichbar (vgl. Gramlich 2013, S. 1). Das Fertigungsverfahren ermöglicht gestalterische Potentiale (vgl. Roos 2018, S. 141), die sich in den Eigenschaften des Bauteils manifestieren. Die durch das Fertigungsverfahren ermöglichten und beeinflussten Eigenschaften des Bauteils werden als verfahrensinduzierte Gestalteigenschaften bezeichnet (vgl. Gramlich 2013, S. 90 bis S. 92; Ahmels et al. 2017, S. 99 f.).

In diesem Kontext bestehen verschiedene Benennungen von Eigenschaften bzw. Merkmalen. In Anlehnung an Weber wird unter einem Merkmal eine produktbeschreibende Größe verstanden, deren Festlegung im Rahmen der Produktentwicklung direkt möglich ist. Unter einer Eigenschaft wird eine produktbeschreibende Größe aufgefasst, deren Festlegung nicht unmittelbar möglich ist. (vgl. Weber 2012, S. 31 f.) In Bezug auf die fertigungsintegrierende Entwicklung wird von abhängigen Eigenschaften (entsprechen Eigenschaften nach Weber) und unabhängigen Eigenschaften (entsprechen Merkmalen nach Weber) gesprochen (vgl. Roos 2018, S. 21 f.), welche die gleiche Unterscheidung zeigen. Ein Bauteil oder ein Produkt ist durch die abhängigen und unabhängigen Eigenschaften (vgl. Roos 2018, S. 21 f.) beziehungsweise Merkmalen und Eigenschaften festgelegt, sodass im Folgenden zur Verbesserung der Lesbarkeit auf diese Unterscheidung verzichtet und allgemein von Eigenschaften gesprochen wird.

Während Anforderungen an Bauteileigenschaften prinzipielle Lösungen einschränken können, ermöglicht die Nutzung verfahrensinduzierter Eigenschaften die Erarbeitung neuer Lösungen (vgl. Groche et al. 2012, S. 164). Durch die Betrachtung der verschiedenen Fertigungstechnologien werden technologiespezifische Entwürfe zur Beurteilung von Vorteilen der verfahrensinduzierten Eigenschaften benötigt. Diese führen zu einem erhöhten Aufwand, der durch einen effizienten Entwurfsprozess geleistet werden kann. (vgl. Groche et al. 2012, S. 164) DfM berücksichtigt nicht umfassend spezifische positive Effekte und zusätzlichen funktionellen Nutzen, die durch Fertigungsverfahren induziert sind. Diese bieten Designverbesserungen, die auf diesem Wege nur unzureichend genutzt werden. Ein Ziel des Ansatzes ist die Bereitstellung während der frühen Gestaltungsphase von verfahrensinduzierten Eigenschaften. (vgl. Groche et al. 2012, S. 163 f.) Die verfahrensinduzierten Eigenschaften repräsentieren in formaler Art die technologischen Potentiale (vgl. Wagner et al. 2017, S. 275 f.).

Die fertigungsintegrierende Produktentwicklung verfolgt das Ziel, Modelle und Methoden zur Bereitstellung von fertigungstechnologischem Produktwissen zu erarbeiten (vgl. Roos 2018, S. 121 f.). Die Basis bildet ein Modell des Systems um und mit technischen Produkten, das Prozessmodell, welches die Trennung von dem kundenrelevanten Prozess und dem technischen Produkt fördert

(vgl. Heidemann 2001, S. 140). Eine übertragbare Beschreibungsform von technischen Systemen bis zu den konstruktiven Parametern ist durch die Beschreibung mittels Eigenschaften möglich (vgl. Wäldele 2012, S. 138 bis S. 142). Stehen Eigenschaften und bzw. oder Merkmale miteinander in Verbindung, sind diese in Form eines Netzwerks abbildbar (vgl. Wäldele 2012, S. 82).

Die Verbindungen und Wechselwirkungen von Produktion und Produktentwicklung sind ebenfalls mittels Eigenschaften beschreibbar (vgl. Gramlich 2013, S. 153 f.). Diese Berücksichtigung führt zur Möglichkeit der gezielten Nutzung fertigungstechnologischer Potentiale durch verfahrensinduzierte Eigenschaften in der Produktentwicklung, welche auf den Erkenntnissen der Fertigung beruhen (vgl. Gramlich 2013, S. 153 bis S. 155. Ahmels et al. 2017, S. 132 bis S. 134). Der Ansatz der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung ist mit der integrierten, algorithmenbasierten Produkt und Prozessentwicklung weitergeführt (vgl. Roos et al. 2017, S. 302 bis S. 308). Die genannten Bestrebungen zur Abbildung von Prozessen und der Berücksichtigung der Fertigungstechnologie in der Produktentwicklung auf Basis einer eigenschaftsbasierten Beschreibung führen zur Beschreibung und Zuordnung der Wechselwirkungen durch das Verfahrensprinzipmodell (VP-Modell) von Roos (2018, S. 56 bis S. 59), ausgeführt in Abschnitt 3.3.3. Zur umfassenderen Nutzung der Möglichkeiten durch die Berücksichtigung der Funktionsintegration wurden Modelle und Methoden in Form der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration erarbeitet (vgl. Wagner 2018, S. 109 f.). Die Wechselwirkung zwischen der Fertigung und der Produktentwicklung mit der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung ist schematisch in Abbildung 3.9 dargestellt.

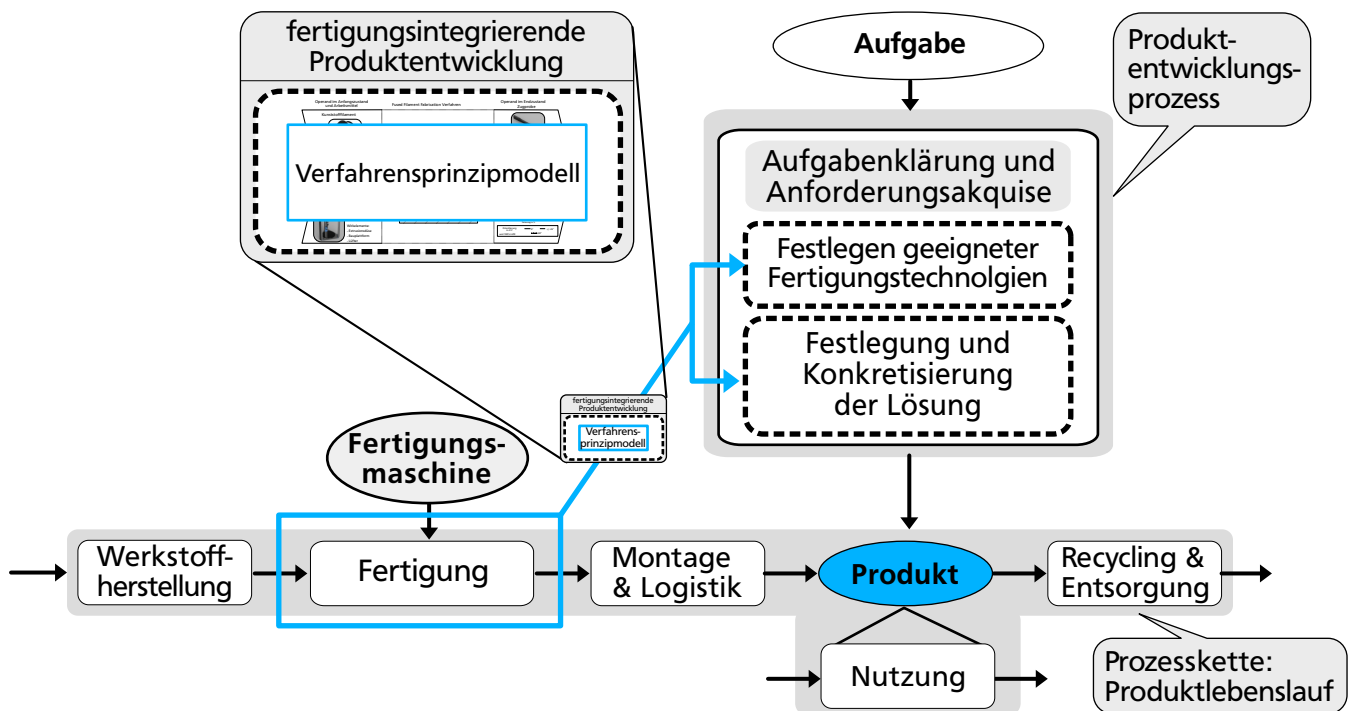


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und für den Produktlebenslauf an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.)

---

Fertigungsverfahren ermöglichen die Beeinflussung der geometrischen, mechanischen und die auf den Werkstoff bezogenen Bauteileigenschaften und führen zu den verfahrensinduzierten Eigenschaften. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften ermöglichen zusätzliche funktionale Mehrwerte, reduzieren den Fertigungsaufwand oder sind beispielsweise für den Leichtbau nutzbar. (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 1) Etablierte Vorgehensmodelle der Produktentwicklung, beispielsweise die VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 1 bis S. 56) (Im Originaltext wird die VDI 2221 (1993) zitiert) und das Axiomatic Design (vgl. Suh 1998, S. 189 bis S. 209) nutzen die Potentiale der durch die Verfahren ermöglichten Eigenschaftsänderungen nicht oder nur teilweise aus (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 1).

Verfahrensinduzierte Eigenschaften lassen sich zur Charakterisierung von Fertigungstechnologien nutzen (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 1 bis S. 3). Durch die integrierte Entwicklung von Materialentwicklung, Fertigungsentwicklung und Produktentwicklung lassen sich neue Lösungen erschließen (vgl. Gramlich et al. 2018, S. 15). Entwicklungsentscheidungen und Festlegungen während des Entwicklungsprozesses beeinflussen den durchgeführten Entwicklungsprozess und vorgelagerte sowie nachgelagerte Entwicklungsprozesse (vgl. Gramlich et al. 2018, S. 18).

Im Rahmen der Produktentwicklung werden nach Gramlich et al. Festlegungen getroffen, welche die Fertigbarkeit der Bauteile beeinflussen. Anhand der Produktdokumentation erzeugt die Fertigung Bauteile unter Nutzung von Fertigungsverfahren, welche die festgelegten Eigenschaften erfüllen. Die Bauteile weisen für das Fertigungsverfahren spezifische Eigenschaften auf. Der Zusammenhang mit den Verfahrensparametern zur Beeinflussung des Fertigungsprozesses sind in den jeweiligen fertigungstechnologischen Werken festgelegt. (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 2)

Die Eigenschaften zur Beschreibung des Bauteils nach Abschluss des Fertigungsprozesses charakterisieren die Fertigungstechnologie eindeutig (vgl. Gramlich 2013, S. 90 f.; Gramlich et al. 2015, S. 3). Ein Teil dieser Eigenschaften ist während des Produktentwicklungsprozesses einsetzbar und ermöglicht damit die Berücksichtigung fertigungstechnologischer Vorteile. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften sind einerseits das Ergebnis des Fertigungsprozesses und andererseits die Realisierung der entwickelten Produktdokumentation. (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 3)

Das fertigungstechnologische Wissen muss für den Einsatz während des Produktentwicklungsprozesses aufbereitet werden. Dies wird durch die Verknüpfung von verfahrensinduzierten Eigenschaften mit Informationen zur Anwendbarkeit in der Produktentwicklung erreicht. (vgl. Gramlich et al. 2015, S. 5) Das Wissen ist in Informationsspeichern externalisierbar und dokumentierbar (vgl. Wäldele 2012, S. 73 f.). Bekannte elementare Speicherformen sind Texte, Gleichungen, Funktionsgraphen, Wertetabellen und graphische Darstellungen (vgl. Wäldele 2012, S. 75 bis S. 79).

### **3.3.2 Beschreibung von Fertigungsverfahren im Kontext der Produktentwicklung**

Innovationen von Fertigungsverfahren stellen nach Hirt et al. einen wichtigen Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit für Unternehmen dar. Neben den Zielen der Verbesserung der Prozessstabilität und der Fertigungszeitverkürzung sind meist Potentiale in Form von Produkteigenschaften und Produktfunktionen möglich. Die Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien ist durch die Kombination bestehender zu hybriden Fertigungsverfahren möglich. (vgl. Hirt et al. 2011, S. 468) Die

---

Beschreibung von Fertigungsprozessen kann mit der eigenschaftsbasierten Prozessmodellierung auf unterschiedlichen Konkretisierungsgraden durchgeführt werden (vgl. Roos 2018, S. 50 bis S. 67). Das Fertigungsverfahren überführt einen Operanden von einem Anfangszustand in einen Ausgangszustand (vgl. Roos 2018, S. 50 f.) Beispielsweise von einem Halbzeug oder Grundstoff zum Bauteil (vgl. Westkämper et al. 2018, S. 1512 bis S. 1520).

Gleichzeitig bestehen durch das Fertigungsverfahren Anforderungen an den Anfangszustand des Operanden, um bearbeitet oder verarbeitet zu werden. Diese Anforderungen werden an die verfahrensrelevanten Gestaltelemente des Halbzeugs gestellt, welche die notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung des Fertigungsverfahrens sind. (vgl. Roos 2018, S. 51) Im Folgenden werden die Begriffe Anfangszustand und Endzustand immer auf den Operanden (also zum Beispiel das Halbzeug) bezogen. Für das additive Fertigungsverfahren *fused filament fabrication* (FFF) (vgl. Abschnitt 2.2.1) sind das beispielsweise die charakteristischen Materialeigenschaften von Thermoplasten. Diese lassen sich reversibel verflüssigen und wieder verfestigen (vgl. Schüle et al. 2020, S. 1 bis S. 28). Durch das Fertigungsverfahren wird der verflüssigte Werkstoff, der Operand, definiert schichtweise angeordnet und ausgehärtet, bildet das neue Bauteil und weist die für das Fertigungsverfahren charakteristischen verfahrensinduzierten Gestaltelemente mit deren zugehörigen Eigenschaften auf. Das Verfahren ist in Abschnitt 2.2 detailliert beschrieben.

Während des Durchlaufens des Fertigungsverfahrens wird ein Teil der Eigenschaften des Operanden verändert, wobei nicht alle Eigenschaften eine Änderung erfahren müssen (vgl. Roos 2018, S. 51 bis S. 52). Das Fertigungsverfahren ist beschreibbar als ein Verfahrensschritt oder als Abfolge von Verfahrensschritten analog zur Beschreibung von Prozessketten als Verfahrensketten, bei welchen der Operand mehrere Zustands- und damit Eigenschaftsänderungen durchläuft. (vgl. Roos 2018, S. 50 bis S. 54) Die Fertigungsschritte gehen ineinander über, indem der Endzustand des vorherigen Fertigungsschritts die Anforderungen des Anfangszustands des aktuellen Fertigungsschritts erfüllt. Innerhalb der Fertigungsschritte werden die verfahrensrelevanten Eigenschaften am Anfangszustand in die verfahrensinduzierten Eigenschaften am Ausgangszustand überführt. (vgl. Gramlich 2013, S. 135 f.; Roos 2018, S. 53 f.) In Abbildung 3.10 a) sind ein Fertigungsschritt und in Abbildung 3.10 b) die Aneinanderreihung zu einer Abfolge schematisch mit der Eigenschaftszuordnung dargestellt.

Das Fertigungsverfahren und die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen werden durch Wirkungsabläufe realisiert, welche auf den Effekten der Physik, der Chemie und Biologie basieren (vgl. Sauer 2006, S. 74). Die Identifikation und die Findung von Lösungen werden durch in der Literatur verfügbaren Sammlungen, häufig in Katalogform unterstützt (vgl. Koller 1985, S. 222 bis S. 314; Roth 2001, S. 39 bis S. 234).

Die physikalischen Wirkzusammenhänge ermöglichen die Beschreibung, wie beispielsweise Eigenschaften verändert werden. Eine Möglichkeit sind Gleichungen, welche die physikalischen Wirkzusammenhänge abbilden. Die physikalischen Effekte sind unabhängig von den Objekten, welche die Einflüsse der Effekte erfahren. (vgl. Roos 2018, S. 56) Aus diesem Grund ist für die Bestimmung der im realisierten Fertigungsprozess beteiligten Objekte eine weitere detailliertere Beschreibungsform notwendig, die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

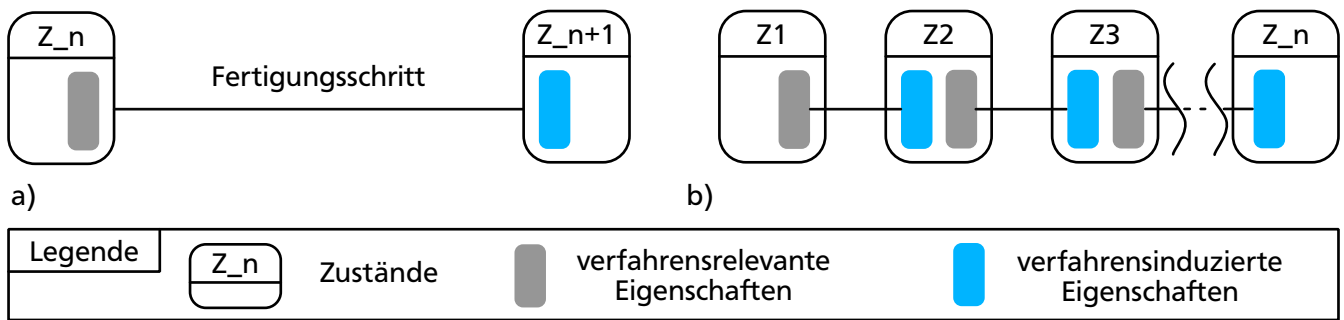


Abbildung 3.10: Beschreibung des Fertigungsverfahrens in Form einer zusammengefassten Zustandsänderung in a) und als Abfolge einer endlichen Anzahl von Fertigungsschritten  $N+1$  in b), eigene Abbildungen angelehnt an Gramlich (2013, S. 135) und Roos (2018, S. 53 f.). Es besteht die Möglichkeit, dass verfahrensinduzierte Eigenschaften die verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften eines nachfolgenden Fertigungsschritts darstellen (vgl. Gramlich 2013, S. 135 f.)

### 3.3.3 Das Verfahrensprinzipmodell

Roos stellt ein eigenschaftsbasiertes Modell vor, welches sich auf Verfahrensprinzipien stützt (vgl. Roos 2018, S. 56 f.). Das Verfahrensprinzip beschreibt den Wirkgrößen-Wirkelement-Zusammenhang, der an der Zustandsänderung während des Fertigungsschritts partizipiert. Bei der Beschreibung des Verfahrensprinzips steht im Vordergrund, welche physikalischen Gesetze genutzt werden, welche Wirkelemente zum Einsatz kommen und welche Wirkgrößen beteiligt sind. (vgl. Roos 2018, S. 57)

Als Wirkgrößen werden für das Verfahrensprinzip erforderliche Energien oder Signale bezeichnet (vgl. Gramlich 2013, S. 87). Das fertigungstechnologische Wissen bietet die Grundlage für die Formulierung des Verfahrensprinzips, welches das Zusammenwirken von Operand und technischem Arbeitsmittel beschreibt (vgl. Roos 2018, S. 57 f.). Das Verfahrensprinzip beschreibt die Wirkgröße, die wiederum der Ausgangsfunktion entspricht (vgl. Gramlich 2013, S. 126). In Abbildung 3.11 sind die Wechselwirkungen der Wirkelemente in Form des Verfahrensprinzipmodells dargestellt, welche die Gestaltelemente hervorbringen.

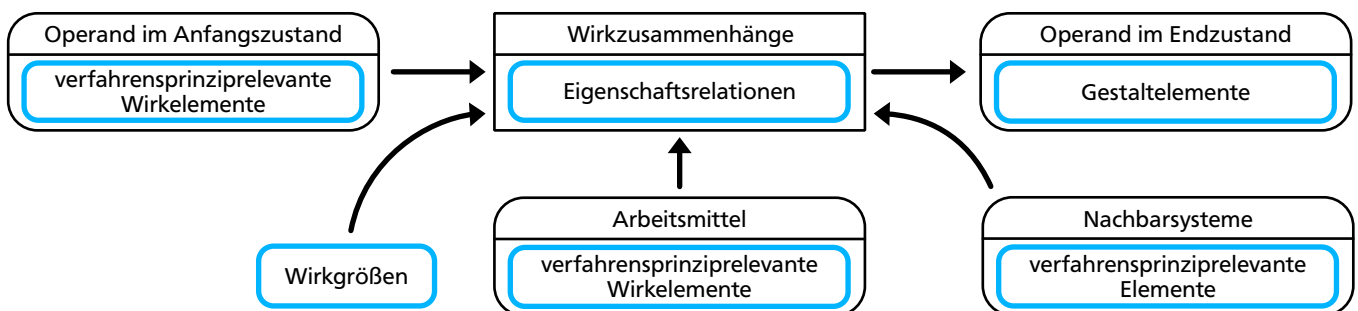


Abbildung 3.11: Wechselwirkung der Operanden, des Arbeitsmittels und der Wirkgrößen von Nachbarsystemen in Form des Verfahrensprinzipmodells dargestellt, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 58)

---

Diese Zusammenhänge lassen sich durch das Verfahrensprinzipmodell detailliert beschreiben, welches das vielfältige fertigungstechnologische Wissen strukturiert aufnimmt (vgl. Roos 2018, S. 58). Das fertigungstechnologische Wissen zu einem Verfahren ermöglicht das gezielte Beeinflussen der zugehörigen Fertigungsprozesse. Zu diesem Wissen zählen beispielsweise Operanden, Wirkgrößen, das Arbeitsmittel, die Wirkabläufe und die Wirkzusammenhänge, mit welchen der Fertigungsschritt realisiert wird. Das fertigungstechnologische Wissen ist auf das entsprechende Fertigungsverfahren bezogen und stellt übertragbare Aussagen über ein Fertigungsverfahren bereit. (vgl. Roos 2018, S. 47 f.) Die eigenschaftsbasierte Beschreibung der verwendeten Modellelemente sind durch Gramlich ausgeführt worden (vgl. Gramlich 2013, S. 86 bis S. 92). Weiterhin ist eine Wechselwirkung im Rahmen der Wirkzusammenhänge durch Systeme außerhalb der gesetzten Systemgrenze möglich, die als Nachbarsysteme berücksichtigt werden (vgl. Roos 2018, S. 59).

Die Wirkgrößen sind sowohl zeitlich als auch örtlich veränderlich und bilden die Grundlage für die Abbildung des Einflusses der Zeit in der Modellierung mit Verfahrensprinzipien (vgl. Gramlich 2013, S. 86 bis S. 92; Roos 2018, S. 59 f.). Wirkgrößen sind als Eigenschaften handhabbar (vgl. Roos 2018, S. 59). Zur Charakterisierung von Prozessen besteht die Möglichkeit, diese durch Prozesseigenschaften zu beschreiben. Diese können nicht dem Operanden oder dem Arbeitsmittel allein zugeordnet werden. Reibungskoeffizienten sind bei Operand-Arbeitsmittel-Interaktionen beispielsweise nicht eindeutig zuordbar. Weiterhin ermöglichen Prozesseigenschaften die Beschreibung des Unterschieds von Eigenschaften zwischen Anfangszustand und Endzustand. (vgl. Roos 2018, S. 60 f.)

Besondere Relevanz hat das Verfahrensprinzipmodell durch die Zuordnungsmöglichkeit für bestehendes Wissen zu den beteiligten Produkten (vgl. Roos 2018, S. 67). In der Produktentwicklung wird der Fertigungsprozess und der Einsatzprozess des Produkts unterschieden, die jeweils einen technischen Prozess darstellen (vgl. Roos 2018, S. 68). Diese Betrachtung ist neben dem Fertigungsprozess auch auf Einsatzprozesse übertragbar (vgl. Roos 2018, S. 68), sodass im Rahmen dieser Arbeit neben dem Fertigungsprozess auch die Prozesse der Fertigungsmaschine beschreibbar sind. Die Wirkgröße stellt die Verbindung zwischen dem Fertigungsprozess und der Fertigungsmaschine (vgl. Roos 2018, S. 74) durch mindestens ein der Fertigungsmaschine zugehöriges Wirkelement dar.

Mit der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, der eigenschaftsbasierten Beschreibung und Modellen wie beispielsweise dem VP-Modell wird die Formulierung der Zusammenhänge von Halbzeugen, der Fertigungsmaschine und dem Bauteil möglich und dieses Wissen zuordbar und nutzbar. Zur Konkretisierung der abstrakten Darstellung des VP-Modells in Abbildung 3.11 wird eine Darstellung für das additive Fused Filament Fabrication Verfahren während des schichtweisen Aufbaus eines Bauteils dargelegt. Das FFF-Verfahren ist in Abschnitt 2.2 beschrieben und überführt durch das räumlich dedizierte Ablegen und Herstellen des Zusammenhalts von Kunststoffen ein formloses Material in einen Körper mit einer spezifischen Geometrie. In Abbildung 3.12 ist ein VP-Modell (vgl. Roos 2018, S. 58) für den FFF-Druckprozess mit einem Teil der Bauteileigenschaften angelehnt an De Bernardez et al. (2023, S. 119 bis S. 121) dargestellt.

Im linken Teil der Abbildung ist das Kunststofffilament, der *Operand* im Anfangszustand, dargestellt. Unter der Visualisierung befindet sich ein Auszug der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften des Kunststofffilaments, beispielsweise die Schmelztemperatur der Länge  $l_F$  und dem Durchmesser  $d_F$ . Die

Schmelztemperatur stellt eine Werkstoffeigenschaft dar, beeinflusst die erforderliche Temperatur zur Extrusion des Kunststoffes und ist damit für das Verfahrensprinzip relevant. Weiterhin befindet sich im linken Teil darunter die Fertigungsmaschine, das *Arbeitsmittel*, in der Abbildung durch eine additive Fertigungsmaschine mit Deltaportalsystem visualisiert. Die Fertigungsmaschine stellt Wirkgrößen und Wirkelemente bereit, um die Durchführung des Fertigungsverfahrens zu ermöglichen. Ein Beispiel einer *Wirkgröße* ist die Bereitstellung eines Wärmestroms zur Erhöhung der Temperatur des Kunststofffilaments. Ein zugehöriges *Wirkelement* stellt die Extrusionsdüse dar, die mit dem Kunststofffilament in direktem Kontakt steht und so die Erwärmung des Kunststoffes ermöglicht.

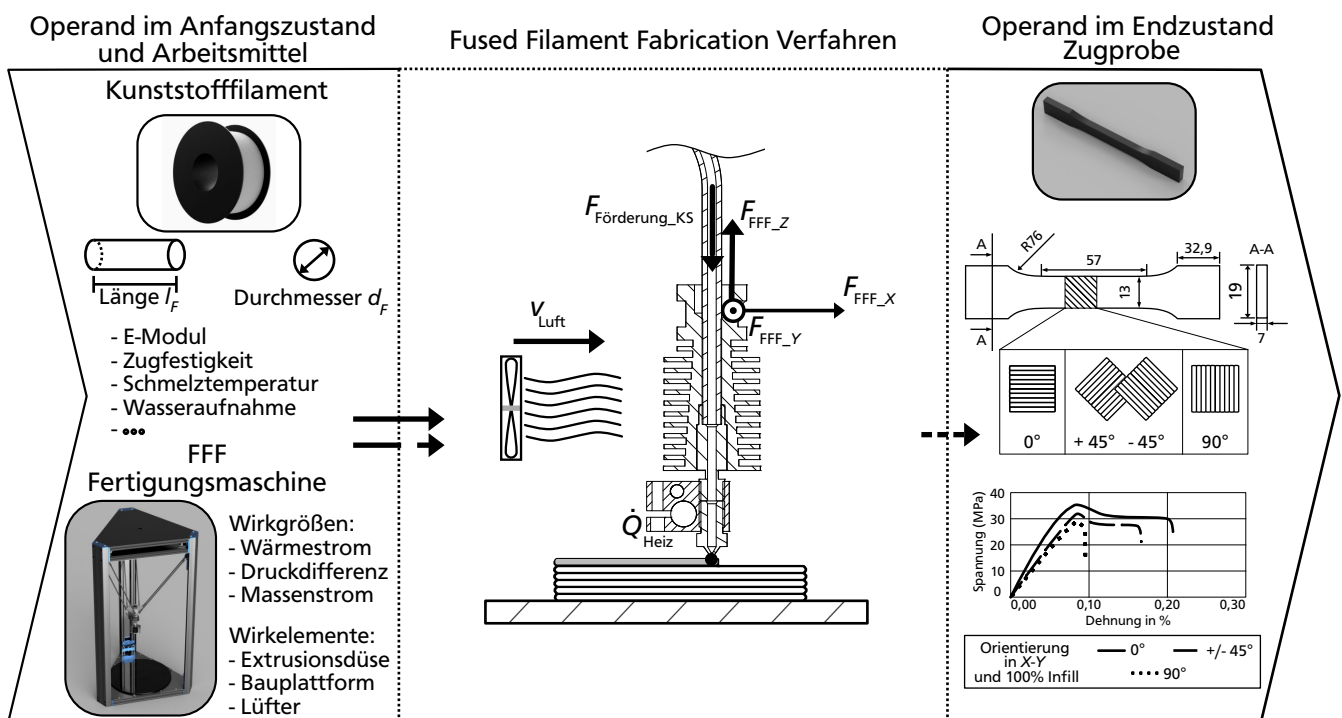


Abbildung 3.12: Verfahrensprinzipmodell in Anlehnung an Roos (2018, S. 58) ausgeführt für das Fused Filament Fabrication Verfahren und der verfahrensinduzierten Materialeigenschaften anhand einer Zugprobe in Anlehnung an De Bernardes et al. (2023, S. 119 bis S. 121), eigene Abbildung

Im mittleren Teil ist das Verfahrensprinzip in Form des für die Betrachtung relevanten fertigungstechnologischen Wissens in Form der schematischen Visualisierung des FFF-Verfahrens dargestellt. Die Extrusionsdüse erwärmt und verflüssigt den Kunststoff durch  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , um diesen schichtweise auf eine Bauplattform beziehungsweise auf zuvor abgelegte Kunststoffstränge aufzutragen und zu verbinden. Der aufgeschmolzene Kunststoff wird durch eine Druckerhöhung im Schmelzbad, ausgehend von der Förderkraft  $F_{\text{Förderung\_KS}}$  auf das drahtförmige noch feste Filament aus der Düse extrudiert und das Hotend mit dem Luftstrom  $v_{\text{Luft}}$  gekühlt. Während des Extrusionsprozesses wird die Düse in der X-Y-Ebene mit den Kräften  $F_{\text{FFF\_X}}$  und  $F_{\text{FFF\_Y}}$  verfahren, nach Vollendung einer Bauteilschicht um eine definierte Höhe mit der Kraft  $F_{\text{FFF\_Z}}$  angehoben und so die nächste Schicht gefertigt.

---

Durch diesen schichtweisen Aufbau führt das Verfahrensprinzip zu einer Vielzahl von *verfahrensinduzierten Eigenschaften* des gefertigten Bauteils. Diese sind im rechten Teil des VP-Modells auszugsweise dargestellt. Im oberen Bereich ist eine Zugprobe visualisiert. Während innerhalb einer Druckschicht die Stränge in der Bewegungsrichtung der Düse aus kontinuierlichen Strängen bestehen, die an den Längsseiten mit den anderen Strängen verbunden sind, werden diese Stränge auf die zuvor gedruckte Schicht gelegt. Dies führt zu einer Anisotropie der Bauteileigenschaften bezogen auf die Richtungen entsprechend der Bauteilorientierung (vgl. Abschnitte 2.2 und 2.4). Diese Unterschiede sind beispielsweise mit Zugversuchen experimentell nachweisbar. Die Zugfestigkeit in der Richtung, in der die Stränge aufgetragen sind, ist höher im Vergleich zur Zugfestigkeit orthogonal zur Auftragsrichtung (vgl. De Bernardez et al. 2023, S. 117 bis S. 129).

Entsprechend der Ausführungen dieses Abschnitts ermöglicht das VP-Modell die Beschreibung der Verknüpfungen während Fertigungsprozessen, die in den verfahrensinduzierten Gestaltelementen münden und für eine umfassendere Nutzung der Fertigungstechnologien in Form innovativer Lösungen eingesetzt werden können. Eine Möglichkeit der Förderung von verfahrensinduzierten Eigenschaften ausnutzender Lösungen ist der Einsatz der engl. *Design Pattern Matrix* (DPM) zur Bereitstellung des fertigungstechnologischen Wissens (vgl. Roos 2018, S. 90 f.). Die Aufbereitung der Erkenntnisse lassen sich beispielsweise als engl. *Design Pattern* darstellen (vgl. Roos 2018, S. 88 bis S. 90). Die DPM ist für verschiedene Fertigungsverfahren anwendbar. Diese wurde beispielsweise für die additive Fertigung initial eingesetzt (vgl. Würtenberger et al. 2018, S. 1468 bis S. 1476). Eine weitere Möglichkeit stellen engl. *process integrated design guidelines* dar, die verfahrensinduzierte Gestaltelemente durch deren Realisierungs- und Erweiterungsmöglichkeiten der Produktfunktionen einheitlich beschreiben (vgl. Roos 2018, S. 95 f.).

Mit der Verknüpfung der Fertigungsmaschine und dem Produktentwicklungsprozess durch den intrinsischen Produktlebenslauf (vgl. Abschnitt 3.2) sowie der eigenschaftsbasierten Beschreibung technischer Systeme und technischer Prozesse im Rahmen der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.3) besteht eine Modellbasis zur Förderung der Entwicklung der Fertigungsmaschine ausgehend von gestalterischen Potentialen von Fertigungsverfahren. Im folgenden Kapitel wird das Forschungsdesign zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung dargelegt.



---

## 4 Forschungsdesign

---

In diesem Kapitel werden ausgehend von dem ermittelten Stand der Forschung neuartiger Potentiale hybrid-integrierender additiver Fertigungsverfahren in Abschnitt 2.5.3 und der Nutzung gestalterischer Verfahrenspotentiale im Rahmen der Produktentwicklung in Abschnitt 3.3 Einschränkungen zur umfassenden Nutzung der Verfahrenspotentiale ermittelt. In Abschnitt 4.1 wird der Forschungsbedarf zur systematischen Erweiterung nutzbarer gestalterischer Verfahrenspotentiale durch das Aufheben dieser Einschränkungen dargelegt sowie die Zielsetzung und die Forschungsfragen dieser Arbeit in Abschnitt 4.2 abgeleitet. In Abschnitt 4.3 wird das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben.

### 4.1 Forschungsbedarf

Der Trend zu immer vielfältigeren Produkten führt zur Nutzung immer komplexerer Potentiale von Fertigungsverfahren beziehungsweise der Neuentwicklung hybrider Fertigungsverfahren (vgl. Abschnitt 1.1). Neue Fertigungsverfahren ermöglichen neue gestalterische Verfahrenspotentiale. Die gestalterischen Verfahrenspotentiale stehen stellvertretend für ungenutzte Möglichkeiten eines Fertigungsverfahrens, die sich auf die Gestaltung von Produkten auswirken (vgl. Roos 2018, S. 141). Sie sind in Form von verfahrensinduzierten Eigenschaften beschreibbar. Das Ausschöpfen der gestalterischen Potentiale der jeweiligen Fertigungsverfahren ist durch die von einer Fertigungsmaschine gefertigten Bauteile für die Produktentwicklung nutzbar. Die gefertigten Bauteile weisen verfahrensinduzierte Eigenschaften auf, welche durch maschinenspezifische Eigenschaften, ausgehend von den verfahrensprinziprelevanten Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine, beeinflusst werden (vgl. Gramlich 2013, S. 123 bis S. 125).

Die maschinenspezifischen Eigenschaften ergeben sich aus den festgelegten Merkmalen während des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses. Während der Entwicklung der Fertigungsmaschine wird diese konkretisiert und deren Wirkgrößen und Wirkelemente festgelegt. Die Fertigungsmaschinenentwicklung beeinflusst damit die verfahrensinduzierten Eigenschaften der gefertigten Bauteile und damit die im Rahmen der Produktentwicklung nutzbaren gestalterischen Verfahrenspotentiale. Im Rahmen der bestehenden Ansätze zur Berücksichtigung der Fertigung während der Produktentwicklung wird eine geeignete Fertigungsmaschine zur Bereitstellung der erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente vorausgesetzt (vgl. Abschnitte 1.1 und 3). Die Verfügbarkeit einer Fertigungsmaschine ist jedoch nicht prinzipiell gegeben. Damit ist die Nutzbarkeit der gestalterischen Verfahrenspotentiale in Form verfahrensinduzierter Eigenschaften gleichsam nicht zwangsläufig sichergestellt und es steht nur ein Teil der gestalterischen Verfahrenspotentiale zur Nutzung im Rahmen der Produktentwicklung zur Verfügung.

---

Eine systematische Zusammenführung der Fertigungsmaschinenentwicklung und der Sicherstellung der Fertigbarkeit gestalterischer Verfahrenspotentiale in Form verfahrensinduzierter Eigenschaften besteht derzeit nicht. Eine Methode zur Nutzung von Möglichkeiten im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung mit dem Ziel der Bereitstellung geforderter verfahrensinduzierter Eigenschaften wurde im Stand der Forschung nicht ermittelt (vgl. Abschnitt 3.3). Die Entwicklungstrends hybrider und im Besonderen hybrid-integrierender Fertigungsverfahren verschärfen die Sicherstellung der Verfügbarkeit einer geeigneten Fertigungsmaschine zur Fertigung der verfahrensinduzierten Eigenschaften aufgrund der erweiterten gestalterischen Potentiale dieser Verfahren (vgl. Abschnitt 2.5.3) und der ansteigenden Komplexität der Fertigungsmaschinen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Förderung der systematischen Nutzung der Möglichkeiten des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses durch ein methodisches Vorgehen an Bedeutung. Die Analyse des Stands der Forschung zeigt den folgenden Forschungsbedarf auf:

- Der Einfluss der Fertigungsmaschine auf die fertigmachen gestalterischen Verfahrenspotentiale wird aufgrund des Fokus auf die entwickelten Produkte als Arbeitsmittel nur unzureichend berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.3). Zum Beispiel wird der Zugriff auf eine geeignete Fertigungsmaschine vorausgesetzt, obwohl dies nicht prinzipiell gegeben ist. Die Fertigungsmaschinenentwicklung legt durch die Konkretisierung der Fertigungsmaschine die fertigmachen verfahrensinduzierten Eigenschaften fest, sodass zur Sicherstellung der Verfügbarkeit einer Fertigungsmaschine die verfahrensinduzierten Eigenschaften während des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses berücksichtigt werden müssen.
- Mit der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik besteht ein Ansatz zur systematischen Überführung der verfahrensinduzierten Eigenschaften in Produktlösungen. Mit dem Verfahrensprinzipmodell ist eine Beschreibungsweise der Verknüpfung von am Fertigungsprozess beteiligten Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine und der Zuordnung fertigungstechnologischen Wissens über die Wirkzusammenhänge des Fertigungsverfahrens bekannt. Die Modelle und Methoden nutzen die Verknüpfungen nur für die Produktentwicklung aus. Zur weiterführenden Ausschöpfung der gestalterischen Verfahrenspotentiale ist die Nutzung der Verknüpfungen für die Fertigungsmaschinenentwicklung zur gezielten Erweiterung der nutzbaren gestalterischen Verfahrenspotentiale und zur Sicherstellung der Verfügbarkeit der Fertigungsmaschine erforderlich.
- Im Stand der Forschung wurden keine Methoden zur systematischen Bereitstellung der erforderlichen Informationen für die zielgerichtete Entwicklung einer Fertigungsmaschine zur Sicherstellung der Fertigbarkeit gestalterischer Verfahrenspotentiale ermittelt. Vor dem Hintergrund der Entwicklungen im Bereich der hybriden Fertigungsverfahren ist eine Methode zur systematischen Förderung der Fertigbarkeit der neuartigen Verfahrenspotentiale trotz höherer Komplexität der Fertigungsmaschinen wesentlich.

---

## 4.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Im vorherigen Abschnitt des Forschungsbedarfs wurde herausgearbeitet, dass die Fertigungsmaschine die im Rahmen der Produktentwicklung nutzbaren gestalterischen Potentiale festlegt. Eine methodische Ableitung der erforderlichen Informationen zur zielgerichteten Entwicklung der Fertigungsmaschine auf Basis der Erweiterung und Sicherstellung der nutzbaren gestalterischen Potentiale wurde nicht ermittelt. Anhand des Forschungsbedarfs besteht das Ziel dieser Dissertation in der Erarbeitung einer Methode, mit der die Informationsbereitstellung für die Fertigungsmaschinenentwicklung, getrieben von den Forderungen nach nutzbaren gestalterischen Verfahrenspotentialen, möglich wird. Mit dem Ziel dieser Arbeit sind zwei Forschungsfragen verbunden:

1. **Forschungsfrage:** Wie lassen sich systematisch Informationen für die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung zur Erweiterung der nutzbaren gestalterischen Verfahrenspotentiale ermitteln?

**Hypothese:** Die Sicherstellung der Fertigbarkeit und der Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften wird durch die Bereitstellung der erforderlichen Informationen für den Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess gefördert. Ausgehend von dem Erweiterungsbedarf der gestalterischen Verfahrenspotentiale ist die Ermittlung der erforderlichen Informationen mittels des Verfahrensprinzipmodells unter Nutzung eines methodischen Vorgehens systematisch möglich.

2. **Forschungsfrage:** Wie lassen sich die systematisch ermittelten Informationen während der Fertigungsmaschinenentwicklung nutzen?

**Hypothese:** Die Fertigungsmaschine besteht aus miteinander in Wechselwirkung stehenden Bauteilen, die während der Fertigungsmaschinenentwicklung festgelegt werden. Die ermittelten Informationen lassen sich durch eine Zuordnung auf Basis der strukturellen Beschreibung der Fertigungsmaschine im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung nutzen.

In Abbildung 4.1 sind die Forschungsfragen anhand der Zusammenhänge des Stands der Forschung und des Forschungsbedarfs visualisiert. Die fehlende Nutzung der Verknüpfung von Produktentwicklung, Fertigungsverfahren, Fertigungsmaschine und Fertigungsmaschinenentwicklung sind mit den zugeordneten Forschungsfragen blau dargestellt.

## 4.3 Forschungsvorgehen

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben. Anhand des identifizierten Forschungsbedarfs und der formulierten Forschungsfragen ist ein Einblick in die Entwicklung komplexer Fertigungsverfahren und einer Fertigungsmaschine, die das Verfahren bereitstellt, erforderlich. Hierzu eignet sich die Entwicklung eines hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahrens. In Kapitel 5 wird anhand der Literaturübersicht zu hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.5) ein Verfahren und eine Fertigungsmaschine zur Bereitstellung dieses Verfahrens entwickelt. Dieses hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren

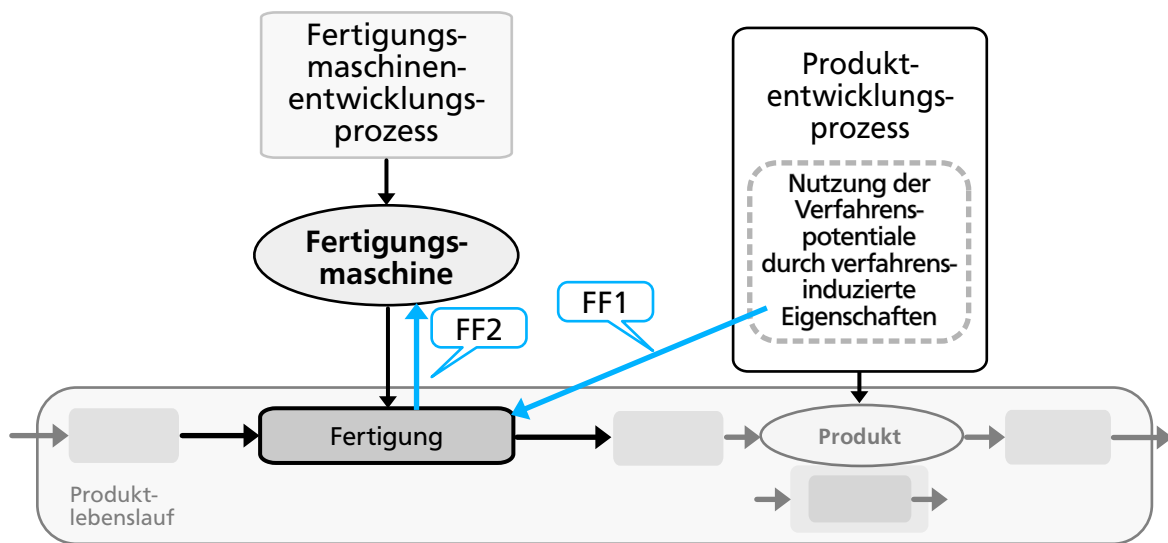


Abbildung 4.1: Zusammenhang von Produktentwicklung, Fertigung, Fertigungsmaschine und deren Entwicklung mit zugeordneten Forschungsfragen. Schematische Darstellung von Produktentwicklungsprozess und Produktlebenszyklus in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und Kirchner et al. (2021, S. 467 f.), eigene Abbildung

soll neuartige verfahrensinduzierte Eigenschaften ermöglichen, die durch bekannte Fertigungsverfahren nicht möglich sind. Die Entwicklung bildet mit dem aufgebauten fertigungstechnologischen Wissen, beispielsweise in Form erforderlicher Wirkgrößen und Wirkelemente, die Voraussetzung zur Erarbeitung der Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung.

Mit dem Wissen aufgrund der Verfahrens- und Fertigungsmaschinenentwicklung wird in Kapitel 6 die systematische Ermittlung der erforderlichen Informationen zur Fertigungsmaschinenentwicklung unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells für einen Fertigungsschritt und mehrere aufeinanderfolgende Fertigungsschritte aufgezeigt. Hierzu werden die benötigten Informationen zur Fertigungsmaschinenentwicklung identifiziert, mit bereits verfügbaren Informationen anhand der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, insbesondere dem Verfahrensprinzipmodell gegenübergestellt und eine Verknüpfungsmöglichkeit erarbeitet. Daran schließt die Ableitung einer Zuordnungsmöglichkeit der ermittelten Informationen und den Strukturen der Fertigungsmaschine ausgehend von den Wirkgrößen und Wirkelementen für die Nutzung im Rahmen des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses an. Die systematische Durchführung wird durch ein Vorgehensmodell weiter gefördert. Die systematische Informationsermittlung, die Zuordnung der Informationen und das Vorgehensmodell bilden die Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung.

In Kapitel 7 wird die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung anhand der Durchmesserreduktion der durch die Fertigungsmaschine integrierbaren Leitungen zur Erweiterung der nutzbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften initial verifiziert. Weiterhin wird die Methode zur Potentialerweiterung der Funktionsintegration durch die Anforderungsableitung an die Fertigungsmaschine genutzt sowie der Einfluss einer Wirkgrößenerweiterung auf die verfahrensinduzierten Eigenschaften anhand einer kinematischen Erweiterung dargelegt.

---

# 5 3DConFil – Verfahrenskonkretisierung und Fertigungsmaschinenentwicklung

---

In diesem Kapitel wird unter Berücksichtigung des Stands der Forschung zu hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahren (hiAM) (vgl. Abschnitt 2.5.3) und dem abgeleiteten Forschungsvorgehen (vgl. Abschnitt 4.3) ein neues Fertigungsverfahren anhand einer Produktidee konkretisiert und eine Fertigungsmaschine zur Bereitstellung dieses Verfahrens entwickelt. Zu Beginn erfolgt in Abschnitt 5.1 die Identifikation einer Erweiterungsmöglichkeit von hiAM, die den Ausgangspunkt der Entwicklung der initialen Fertigungsschritte bildet.

Die während der Ableitung der Fertigungsschritte getroffenen Annahmen werden in Abschnitt 5.2 experimentell überprüft und anhand der Ergebnisse die initialen Fertigungsschritte erweitert. In Abschnitt 5.3 werden die erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine zur Bereitstellung der Fertigungsschritte beschrieben und zusammengefasst. Das aufgebaute fertigungstechnologische Wissen wird anschließend in Abschnitt 5.4 für die Konzeption und Gestaltung einer Fertigungsmaschine und zur Konkretisierung der erweiterten digitalen Prozesskette des neuen Fertigungsverfahrens eingesetzt. Das Kapitel schließt mit der Gestaltung der Produktidee zur Darstellung der verfahrensinduzierten Eigenschaften in Abschnitt 5.5.

## 5.1 Idee und Konkretisierung des 3DConFil-Verfahrens

In diesem Abschnitt wird eine Erweiterungsmöglichkeit des Stands der Forschung verfügbarer hybrid-integrierender additiver Fertigungsverfahren anhand einer Produktidee aufgezeigt. Das Verfahren wird schrittweise von den neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften über die Anforderungsermittlung bis zur Ableitung der Fertigungsschritte konkretisiert.

### 5.1.1 Die Produktidee einer funktionsintegrierten Armablage

Zu Beginn sei der Hinweis gegeben, dass zur Entwicklung von hybriden Fertigungsverfahren ein systematischer Ansatz zur Kombination von Fertigungsverfahren zu hybriden Fertigungsverfahren besteht. Die Methodik zur Entwicklung von hybriden Fertigungstechnologien ermöglicht basierend auf der Anwendung von Konzepten der Konstruktionswissenschaft die systematische Ableitung und Bewertung einer hybriden Fertigungstechnologie (vgl. Hirt et al. 2011, S. 465 bis S. 504). Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte hybrid-integrierende additive Fertigungsverfahren besteht eine Idee zu einem verfahrensinduzierte Eigenschaften nutzenden Bauteil. Anhand der Informationen bekannter hybrider Fertigungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.5.3) und der Bauteilidee wird die

---

Methode nicht angewandt, sondern die Abschätzung der Kombinationsmöglichkeiten wird anhand der bestehenden Fertigungsverfahren durchgeführt und das weiterverfolgte Verfahren festgelegt. Anschließend erfolgt die schrittweise Konkretisierung und Erweiterung der Fertigungsschritte für das neuartige Fertigungsverfahren.

Der Ausgangspunkt der Entwicklung ist die Idee, kontinuierliche, flexible Funktionsträger, beispielsweise elektrische Leitungen, innerhalb additiv gefertigter Bauteile frei positionieren zu können. Dabei handelt es sich um überirdisch verlegte, bewegte Funktionsträger, welche entsprechend der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) als Leitungen bezeichnet werden (vgl. Bör 2018, S. 11). Das Verfahren wird nicht auf elektrische Leitungen eingeschränkt. Das angestrebte Verfahrensprinzip soll zusätzlich die Integration von optischen Fasern und flexiblen Hohlleitungen, beispielsweise Druckluftschläuche, ermöglichen. Zur Verbesserung der Lesbarkeit wird im Folgenden mit Leitung ein kontinuierlicher, flexibler Funktionsträger der drei ausgeführten Energien und Stoffe bezeichnet.

Im Bereich der additiven Fertigung ist für kontinuierliche, verarbeitete Materialien die Bezeichnung als Filament möglich. Aufgrund der Integration kontinuierlicher Leitungen in additiv gefertigte Bauteile wird das Verfahren 3DContinuousFilament mit dem Akronym *3DConFil* benannt und im Folgenden entsprechend als *3DConFil-Verfahren* bezeichnet. Mit den zusammengefassten Alleinstellungsmerkmalen bzw. verfahrensinduzierten Eigenschaften wurde das Verfahren mit dem Verfahrensprinzip im Rahmen eines Patentierungsprozesses (vgl. Kirchner et al. 2022) sowie mit dem verkürzten Verfahrensprinzip in weiteren Veröffentlichungen (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1164 f.; Steffan et al. 2022, S. 1473; Steffan et al. 2023a) auch unter dem Namen 3DConFil (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1164 f.; Steffan et al. 2023a; Ludwig 2022) und detaillierter mit Fokus auf die digitale Realisierung unter Nutzung der entwickelten Fertigungsmaschine (vgl. Steffan et al. 2023a) publiziert. Hervorgehoben wird zusätzlich die Nutzung der integrierten Hohlleitungen für Bowdenzüge am Beispiel einer Arm- und Handprothese (vgl. Steffan et al. 2022, S. 1473 und S. 1476 bis S. 1478) oder der spiralförmigen Verlegung eines elektrischen Leiters für spulenähnliche Bauteileigenschaften (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1165).

Die Integration von Leitungen führt zu neuen gestalterischen Möglichkeiten von Produkten. Die Leitungsintegration ermöglicht die Integration neuer Funktionen in Bauteile. Zur Visualisierung dieser Möglichkeiten wird die Produktidee einer funktionsintegrierten Armablage genutzt. Die Funktionsvielfalt in den Bereichen der Gabelstapler (vgl. Linde Material Handling 2022), der Personenkraftwagen (vgl. Knauf Industries 2021) und Landwirtschaftsmaschinen (vgl. Richter 2018) nimmt stetig zu. Die neuen Funktionen sind nicht immer automatisiert und die Fahrzeugbedienung wird zunehmend komplexer. Die Bedienung dieser Funktionen erfordert eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die meist durch haptische Knöpfe ausgeführt ist und ergonomisch im Griffbereich des Bedienenden angeordnet sein muss. Das Konzept einer hybrid-integrierend additiv gefertigten Armablage stellt lediglich eine mögliche Anwendung der neuen gestalterischen Möglichkeiten dar.

Ein Konzept der Armablage ist in Abbildung 5.1 in einem teilweise gefertigten Zustand als Drahtmodell mit der integrierten, in blau dargestellten Leitung auf einer Bauplattform schematisch visualisiert. Die Armablage wird additiv gefertigt und weist im Inneren einen Verlauf der Leitung von der Anbin-

dung an den Fahrersitz bis zum Auflagebereich der Hand auf, um dort integrierte Bedienelemente mit dem Bordsystem zu verbinden. Zur sprachlichen Trennung des leitungsintegrierten Gesamtbauteils nach Abschluss des 3DConFil-Verfahrens und des additiv aus Kunststoff gefertigten Bauteilbereichs wird der additive Kunststoffbauteilbereich im Folgenden mit *Grundkörper* bezeichnet.

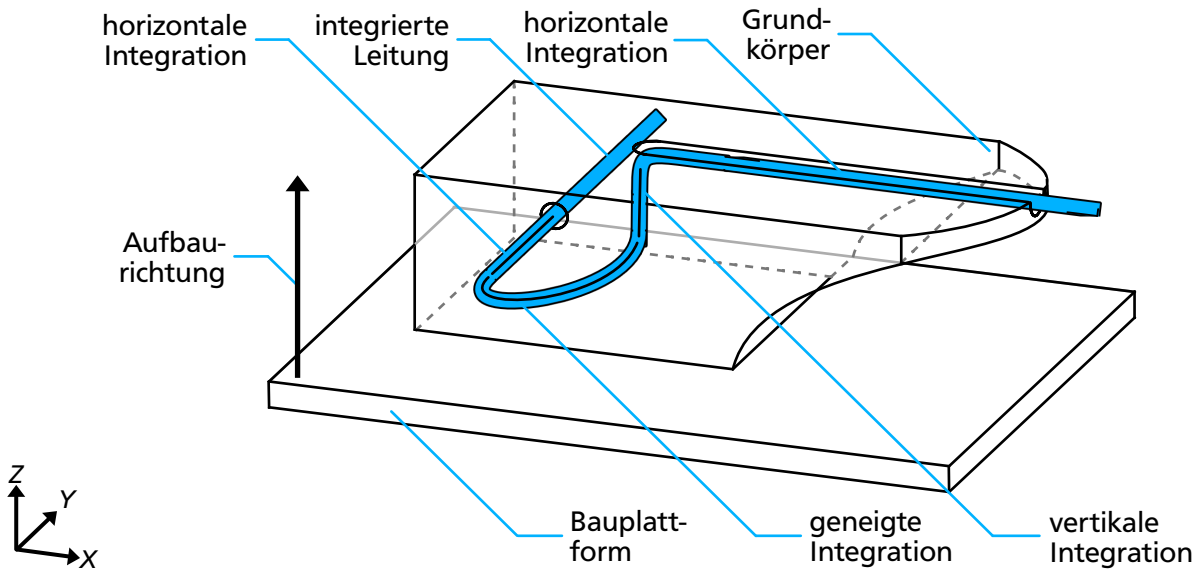


Abbildung 5.1: Verlauf einer flexiblen, kontinuierlichen Leitung innerhalb eines Bauteils bestehend aus horizontalen, vertikalen und geneigten Verlaufsabschnitten, eigene Abbildung

Im Rahmen der additiven Fertigung wird der Grundkörper schichtweise aufgebaut, sodass eine Aufbaurichtung besteht. Die Z-Achse in der Abbildung entspricht der Aufbaurichtung des Grundkörpers. Die Leitung tritt in negativer Y-Richtung bezogen auf die X-Y-Ebene horizontal in einen Grundkörperkanal ein. Nach einem Teilabschnitt des horizontalen Leitungsverlaufs innerhalb des Grundkörpers, der horizontalen Integration, verläuft die Leitung auf einer spiralförmigen Bahnkurve. Dieser Leitungsabschnitt stellt eine geneigte Integration dar. An diesen spiralförmigen Leitungsverlauf schließen sich ein Abschnitt der vertikalen und ein Abschnitt der horizontalen Integration an.

Mit dem weiteren Grundkörperaufbau wird die Leitung innerhalb des Kanalabschnitts von den nächsten Grundkörperschichten umschlossen. In diesem teilweise gefertigten Zustand ist der abschließende horizontale Kanalabschnitt noch geöffnet und ist mit den folgenden Grundkörperschichten ebenfalls verschließbar. Die Integration der Leitung erfolgt in diesem Konzept in den drei Raumrichtungen. Die Leitung verläuft stetig innerhalb des Grundkörpers und aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Grundkörpergeometrie erfolgt die Integration bezogen auf die Aufbaurichtung monoton. Ausgehend von dieser Produktidee wird nachfolgend ein additives Fertigungsverfahren ausgewählt, das mit der Leitungsführung kompatibel ist und für das die Fertigungsschritte nachfolgend konkretisiert werden.

## 5.1.2 Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens

Ein verbreiteter Teil bekannter additiver Fertigungsverfahren, welche in Abschnitt 2.5.3 aufgeführt sind, dokumentieren die Integration von Leitungen in eingeschränktem Umfang beispielsweise zu

---

Beginn oder zum Ende des Fertigungsprozesses. Dadurch sind die gestalterischen Möglichkeiten stark von Restriktionen betroffen. Beispielsweise in das nachträgliche Einbringen und das Herstellen einer mechanischen Verbindung von Leitungen innerhalb eines Grundkörpers nach der Bauteilfertigung mit zusätzlichen Montageschritten möglich.

Bei einer Verarbeitung der Leitung während des Grundkörperaufbaus bestehen diese Restriktionen nicht. Ein besonderer Vorteil der Leitungen als kontinuierliche, flexible Funktionsträger liegt darin, dass die Formgebung während der additiven Fertigung möglich ist. Die Flexibilität der Grundkörperfertigung (vgl. Abschnitt 2.3) des nachfolgend gewählten additiven Fertigungsverfahrens bleibt für zusätzliche neue Gestaltungsmöglichkeiten von Bauteilen erhalten. Diesem Vorteil steht die erhöhte Verfahrenskomplexität durch die Wechselwirkungen von Bauteilaufbau und Verarbeitung der Leitung gegenüber.

Im Stand der Forschung ist die Integration während des Grundkörperaufbaus von einzelnen Kupferlitzen (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43036 bis S. 43049), Kohlenstofffasern (vgl. Eichenhofer et al. 2017, S. 48 bis S. 57; Wang et al. 2020, S. 1 bis S. 15), Aramidfasern und Glasfasern (vgl. Continuous Composites Inc. 2024; Markforged Inc. 2022) beschrieben und bereits im Forschungsmaßstab und industriell möglich. Bei diesen Fertigungsverfahren werden für den Grundkörperaufbau das SLA-Verfahren in einer adaptierten Form und das FFF-Verfahren eingesetzt. Im folgenden Abschnitt werden bekannte hiAM auf deren Restriktionen in der Integration von Leitungen analysiert und das eingesetzte Fertigungsverfahren ausgewählt.

Für das SLA-Verfahren von Continuous Composites Inc. wird ein Photopolymer verwendet, das statt in einer Wanne als Polymerbad durch eine Düse austritt und dann lokal polymerisiert wird. Dabei wird der flüssige Zustand des Polymers ausgenutzt, um faserartige, biegeschlaffe Funktionsträger (Glasfasern) vor dem Aushärten zu umspülen und nach dem Aushärten abzustützen. (vgl. Continuous Composites Inc. 2024) Neben dem SLA-Verfahren ist das FFF-Verfahren beispielsweise durch das von Ziervogel et al. veröffentlichte Fertigungsverfahren dokumentiert. Die Leitung in Form eines Kupferdrahts wird in der aufgeheizten Düse mit dem verflüssigten Kunststoff umspült und anschließend auf den Grundkörper extrudiert. (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43036 bis S. 43049) Dabei wird der Draht für den jeweils eingesetzten Kunststoff Temperaturen im Bereich von 200 °C für PLA (vgl. Ziervogel et al. 2021, S. 43039) bis zu 330 °C bei Polycarbonat (vgl. BASF 3D Printing Solutions BV 2022) ausgesetzt.

Die hohe Erwärmung der Leitungen findet zum Beispiel ebenfalls bei einem Ultraschall Schweißverfahren durch die Fertigungsmaschine statt (vgl. Aguilera et al. 2013, S. 954 f.). Durch den Temperaturanstieg im Kontaktbereich von Grundkörper und Leitung verflüssigt sich der bereits verarbeitete Kunststoff des Grundkörpers und es entsteht eine Verbindung. Die Verarbeitungstemperaturen eines weiteren Verfahrens zur Integration kontinuierlicher Fasern von Markforged Inc. deutet mit einer Wärmeformbeständigkeitstemperatur von 105 °C (vgl. Markforged Inc. 2022) sowie im Vergleich der weiteren Veröffentlichung von Chacón et al. (2019, S. 3 f.) auf Temperaturen hin, die beispielsweise für isolierte, standardisierte Leitungen mit Höchsttemperaturen von 80 °C (vgl. HELU KABEL GmbH 2015, S. 157) nicht kompatibel sind.



---

Die aufgeführten Verfahren ermöglichen bereits eine automatisierte Leitungsintegration. Zur Integration sind entweder eine aufwendige Polymerhandhabung oder hohe Verarbeitungstemperaturen notwendig. Die Verarbeitungstemperatur ist eine Hauptanforderung an die Leitungen und deren Isolation mit spezifisch vorgegebener Temperaturbeständigkeit. Bei Erhalt der Leitungsfunktion führen diese zu erheblichen Einschränkungen der verarbeitbaren standardisierten Leitungen und damit der Anwendungsbereiche der additiv gefertigten hybrid-integrierten Bauteile.

Das Ziel des neuen hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahrens ist die Aufhebung der thermischen Restriktion bei gleichzeitiger Verarbeitungsmöglichkeit verfahrensunspezifischer, zertifizierter Leitungen. Bisher werden im Bereich der kontinuierlichen, flexiblen Funktionsträger einzelne Fasern und Leitungen integriert, welche während der Verarbeitung hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind oder eine komplexe Flüssigkeitshandhabung erfordern. Für das FFF-Verfahren besteht die thermische Restriktion durch Einschmelzen oder den direkten Kontakt mit dem verflüssigten Kunststoff bzw. der Druckdüse. Der Kunststoff kühlt nach der Extrusion ab, sodass die Integration des Funktionsträgers in den verfestigten Kunststoff bei gleichzeitig einfacher Handhabung möglich ist.

Im Rahmen des 3DConFil-Verfahrens wird die automatisierte Integration bei geringen Temperaturen des bereits erstarrten Kunststoffs zwischen zwei und über mehrere Druckschichten unter Verwendung des FFF-Verfahrens angestrebt. Ein Kontakt der integrierten Leitung mit der heißen FFF-Druckdüse findet nicht statt. Somit wird das FFF-Verfahren ausgewählt. Neue Gestaltungsmöglichkeiten aufgrund der niedrigen Verarbeitungstemperatur werden durch die signifikante Erweiterung integrierbarer Funktionsträger und der Nutzung zertifizierter, nicht für das Verfahren spezifisch entwickelter Leitungen, für optische und elektrische Energien und Signale sowie von Stoffen möglich.

### 5.1.3 Leitungsverhalten und Anforderungen an das 3DConFil-Verfahren

Für eine initiale Ermittlung des Leitungsverhaltens wird die zweidimensionale Ausbildung des Leitungsverlaufs unter verschiedenen Randbedingungen und unter dem Einfluss der Gravitation betrachtet. In diesem Abschnitt wird das ebene Verhalten biegeschlaffer Materialien ohne mechanische Abstützung zwischen zwei Einspannungen zur Einschätzung der Verarbeitung und der Handhabung der Leitung beschrieben. Anhand der Idee des neuen Fertigungsverfahrens, der Auswahl des FFF-Verfahrens als primäres additives Fertigungsverfahren zur Hybridisierung und der Betrachtungen des Leitungsverhaltens werden die Anforderungen an das 3DConFil-Verfahrens abgeleitet.

Das biegeschlaffe Verhalten der Leitungen ist durch eine deutlich niedrigere Biegesteifigkeit im Vergleich zur Dehnsteifigkeit charakterisiert und führt zu einer Verformung unter Biegekräfteinfluss. Die zur Biegung einer Leitung notwendige Kraft wird durch die Biegesteifigkeit  $S_B$  bestimmt. Durch die geringe Biegesteifigkeit führen bereits niedrige Biegekräfte zu großen Verformungen. Es wird ein nichtlineares makroskopisches Verhalten der Leitung im Besonderen in Querrichtung zur neutralen Faser angenommen (vgl. Petersen et al. 2017b, S. 1300 bis S. 1316). Im elastischen Bereich ist die Biegesteifigkeit von Elastizitätsmodul  $E$  und Flächenträgheitsmoment  $I$  abhängig (vgl. Kunz et al. 2006, S. 65 bis S. 67) deren Zusammenhang in Gleichung 5.1 formuliert ist.

$$S_B = EI \quad (5.1)$$

Für die Konkretisierung der Fertigungsschritte wird das Verhalten der Leitungen während der Handhabung ohne mechanische Unterstützung im Folgenden betrachtet. Biegeschlaffe Materialien als Freileitung sind beispielsweise durch die Gravitation mit Zugkräften belastet (sog. Eigengewichtsdurchhang (vgl. Petersen et al. 2017b, S. 1304 f.)). Der Verlauf der Leitung hängt von den Materialeigenschaften und den Randbedingungen ab. Wichtige Materialeigenschaften sind die Biegesteifigkeit und die Länge  $L$  der Leitung. Die Dehnsteifigkeit wird aufgrund der während des Verfahrens erwarteten geringen Zugkräfte und der daraus resultierenden geringen Dehnung im Weiteren nicht explizit betrachtet. Verlaufbeeinflussende Randbedingungen sind die Gravitationskraft, extern eingebrachte Zugkräfte durch die Leitung, die Art der Einspannungen und die Lage der Einspannungen im Raum.

Abweichende Formen mit heterogenem Biegeverhalten, beispielsweise Doppelkabel, werden aufgrund der zusätzlichen Komplexität nicht betrachtet. Die integrierbaren Funktionen können durch runde Leitungen vollständig abgedeckt werden, wodurch diese Einschränkung des Leitungsquerschnitts zu keiner Einschränkung der verfahrensinduzierten Eigenschaften führt. Zur Abschätzung des Verhaltens wird die Änderung des Leitungsverlaufs bei unterschiedlichem relativen E-Modul und für verschiedene Randbedingungen, beispielsweise unter Gravitationseinfluss, dargestellt. Das axiale Flächenträgheitsmoment  $I_L$  ist bei allen Seillinien gleich. In Abbildung 5.2 sind die sich einstellenden Verläufe der statischen Seillinie qualitativ visualisiert.

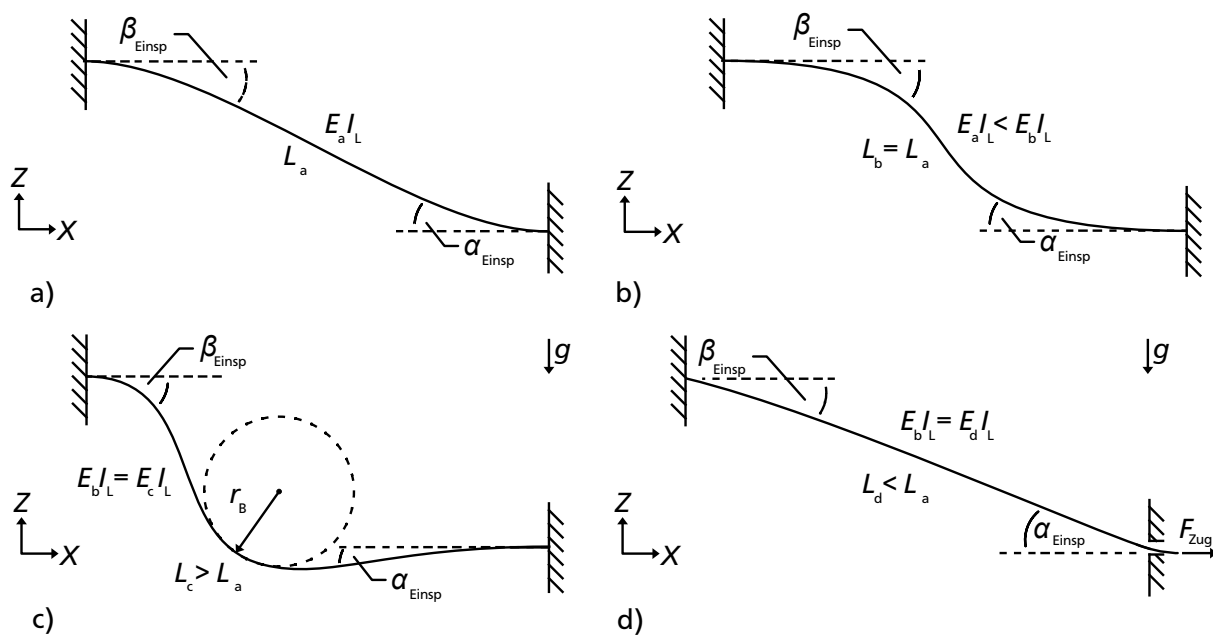


Abbildung 5.2: Ausbildung einer statischen Seillinie mit geringerer Biegesteifigkeit in a) im Vergleich zu einer höheren Biegesteifigkeit in b) jeweils ohne Gravitationseinfluss angelehnt an einen Biegebalken mit festen Einspannungen (vgl. Gross et al. 2021, S. 108 f.). Unter Gravitationseinfluss  $\vec{g}$  tritt eine Änderung der Seillinie bei festen Einspannungen an beiden Enden auf (vgl. Petersen et al. 2017a, S. 573; Petersen et al. 2017b, S. 1304 f.) mit eingezeichnetem Biegeradius in c). Die Seillinie in d) nähert sich unter Zugkraft einer Geraden an (vgl. Petersen et al. 2017b, S. 1300 bis S. 1316), eigene Abbildungen a) bis d)

Die Abbildungen 5.2 a) und b) visualisieren eine Seillinie ohne Gravitationseinfluss mit festen Einspannungen und einem orthogonalen Austritt aus der jeweiligen Einspannung. Die beiden festen Einspannungen sind mit einem Abstand in der  $X$ -Achse und in der  $Z$ -Achse versetzt. Der Wert der Biegesteifigkeit ist in Abbildung 5.2 a) geringer als in Abbildung 5.2 b) gewählt ( $E_a < E_b$ ). Mit steigender Biegesteifigkeit weicht die Form der Seillinie immer stärker von der einer Geraden zwischen den Einspannungen ab. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei einem Biegebalken zu beobachten (vgl. Gross et al. 2021, S. 108 f.).

Abbildung 5.2 c) weist zusätzlich die Randbedingung der Gravitation  $\vec{g}$  auf. Die Seillänge ist zur Visualisierung länger gewählt und der asymmetrische Verlauf der Seillinie weicht durch den Durchhang aufgrund des Seileigengewichts deutlich von dem Verlauf einer Geraden ab (vgl. Petersen et al. 2017a, S. 573; Petersen et al. 2017b, S. 1304 f.). Der Durchhang ist überhöht dargestellt. Abbildung 5.2 d) ergänzt Abbildung 5.2 c) um eine zusätzlich am Seil aufgebrachte Zugkraft und eine Durchführung durch die rechte Einspannung. Die Länge des Seils zwischen den Einspannungen ist geringer und der Verlauf nähert sich wieder dem einer Geraden. Durch das Aufbringen einer Zugkraft können Einflüsse der Gravitation und der Biegesteifigkeit auf die Seillinie reduziert werden (vgl. Petersen et al. 2017b, S. 1300 bis S. 1316). Die Biegewinkel stellen sich entsprechend der Werte von  $\alpha_{\text{Einsp}}$  und  $\beta_{\text{Einsp}}$  an den Einspannungen ein. Zur gezielten Einstellung der Lage der Leitung sind die Zugkraft und die Leitungslänge geeignet. Die im Rahmen dieser Entwicklung berücksichtigten Parameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Berücksichtigte Parameter biegeschlaffer Leitungen

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
$r_B$	Biegeradius	Der Biegeradius bezeichnet den Radius der neutralen Faser einer Leitung oder eines Kabels.
$L$	Länge	Die Länge der Leitung beeinflusst deren Lage zwischen zwei Einspannungen. Die Änderung der Länge ist ein nutzbarer Parameter zur Beeinflussung des Leitungsverhaltens.
$I_L$	axiales Flächenträgheitsmoment	Das betrachtete axiale Flächenträgheitsmoment ist als Flächenmoment zweiter Ordnung eine querschnittsspezifische, geometrische Größe und ist im Kontext standardisierter Leitungen festgelegt.
$S_B$	Biegesteifigkeit	Die Biegesteifigkeit setzt sich aus dem Elastizitätsmodul und dem Flächenträgheitsmoment zusammen und bildet den Zusammenhang zwischen einem eingebrachten Biegemoment und der resultierenden Biegung der Leitung. Die Biegesteifigkeit wird im Kontext standardisierter Leitungen als festgelegt angenommen.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle 5.1 – von vorheriger Seite fortgesetzt.

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
$F_{\text{Zug}}$	Zugkraft	Das Aufbringen einer Zugkraft ist zum Spannen der Leitung zwischen zwei Einspannpunkten einsetzbar, ermöglicht die Verringerung des Durchhangs und die Leitung nähert sich der Form einer Geraden an.

Anhand der bisher durchgeführten Betrachtungen wird deutlich, dass unterschiedliche Material- und Geometrieparameter einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Freileitungen und damit auf die möglichen Fertigungsschritte aufweisen. Eine im Besonderen verfahrensunspezifische Leitung stellt eine spezifische Kombination dieser Parameter dar, welche nur geringfügig in ihrer Ausprägung veränderbar sind, ohne den Gesamtaufbau oder die Materialien zu verändern. Damit wird das Leitungsverhalten maßgeblich durch die Auswahl der integrierten Leitungen festgelegt und beeinflusst die Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens.

Für das 3DConFil-Verfahren stellen nach den bisherigen Ergebnissen die Wahl und die Relativposition der Leitungseinspannungen sowie die Zugkraft wichtige Parameter zur Einstellung des Leitungsverlaufs dar. Dadurch ist einerseits der Winkel an den Einspannungen beeinflussbar, sodass der minimale Biegeradius der Leitungen nicht unterschritten wird und keine Beschädigungen auftreten. Andererseits ist durch Aufbringen einer Zugkraft das Spannen der Leitung und damit deren Positionsfestlegung mit den Einspannungen möglich. Für die Entwicklung der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens werden anhand der in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 beschriebenen Produktidee und der Festlegung des additiven Fertigungsverfahrens die Zielsetzung des Verfahrens und unter Berücksichtigung des Leitungsverhaltens die in Tabelle 5.2 folgenden initialen Anforderungen abgeleitet. Die Anforderungen werden nach deren Art in Festforderung (FF), Bereichsforderung (BF), Zielforderung (ZF) und Wunsch (W) unterschieden.

Tabelle 5.2: Initiale Anforderungsliste an das 3DConFil-Verfahren

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
3DConFil-Verfahren (V)	V1	FF	freie Integration der Leitung	Freies Verlegen der Leitungen auf Geraden und Kurven ist in drei Raumrichtungen innerhalb des Grundkörpervolumens möglich.
	V2	FF	Verbindung von Grundkörper und Leitung	Erstellung einer dauerhaften Verbindung zwischen integrierter Leitung und Grundkörper.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle 5.2 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
	V3	BF	kommerziell erhaltliche Leitungen	Das Fertigungsverfahren ermöglicht die Verwendung kommerziell verfügbarer Leitungen ohne verfahrensspezifische Modifikationen. Im Entwicklungsrahmen wird die integrierende Fertigung mit Leitungen aus den Funktionsbereichen <i>elektrische Energie leiten</i> , <i>optische Energie leiten</i> und <i>Stoffe leiten</i> berücksichtigt.
	V4	FF	beschädigungsfreie Verarbeitung	Während der Verarbeitung tritt keine Beschädigung der integrierten Leitung auf und die Funktion bleibt erhalten.
	V5	ZF	Erhaltung der Zertifizierung	Vorhandene Zertifizierungen der Leitungen werden durch die Fertigungsschritte nicht beeinträchtigt.
	V6	FF	Automatisierbarkeit	Die integrierte Leitung ist innerhalb des Grundkörpers automatisiert während des Aufbaus zu führbar und integrierbar.
	V7	ZF	Komplexität	Die Entwicklung des 3DConFil-Verfahrens ist auf die Grundfertigungsschritte und die Darlegung der gestalterischen Potentiale ausgerichtet. Erweiterungen und Lösungen mit geringerer Erhöhung der Verfahrenskomplexität werden im Vergleich zu Lösungen mit erheblicher Steigerung der Komplexität präferiert.

#### 5.1.4 Die initialen Fertigungsschritte

Die Entwicklung der Fertigungsschritte basiert auf der Kombination der Leitungshandhabung mit dem FFF-Verfahren. Die Bauteilgeometrie wird schichtweise während der FFF-Fertigung aufgebaut. Für die Integration der Leitung sind anhand des FFF-Verfahrens zwei Fälle unterscheidbar:

- Der erste Fall ist die Integration der Leitung zwischen zwei Grundkörperschichten. Die neutrale Faser der Leitung liegt in diesem Fall in einer zur Aufbaurichtung orthogonalen Ebene, entspricht der horizontalen Integration des Armablagenkonzepts in Abbildung 5.1 und wird im folgenden mit *Integration zwischen zwei Schichten* bezeichnet.
- Der zweite Fall ist die Integration der Leitung über mehrere Grundkörperschichten. Die neutrale Faser der Leitung weist in diesem Fall einem Richtungsanteil in der Aufbaurichtung des

Grundkörpers auf. Dieser Fall entspricht der geeigneten Integration des Armablagenkonzepts in Abbildung 5.1. Ein Sonderfall ist die Ausrichtung der neutralen Faser parallel zur Aufbaurichtung, die der vertikalen Integration von Abbildung 5.1 entspricht. Diese stellt allerdings keinen gesonderten Fertigungsschritt dar. Im Folgenden wird dieser Fall mit *Integration über mehrere Schichten* bezeichnet.

Die Integration zwischen zwei Schichten und die Integration über mehrere Schichten werden im Folgenden detaillierter betrachtet. Aus diesem Grund wird die Visualisierung durch Abbildung 5.3 eines möglichen Zustands der Fälle zur Leitungsintegration in den Grundkörper genutzt, um die initialen Fertigungsschritte zu konkretisieren. In Abbildung 5.3 a) ist ein Zustand während der Leitungsintegration zwischen zwei Schichten und in Abbildung 5.3 b) ist ein Zustand über mehrere Druckschichten hinweg mit der Handhabung einer Leitung, blau dargestellt, visualisiert. Wirkelemente und Wirkgrößen zur Positionierung sind zur Verbesserung der Übersichtlichkeit nur teilweise dargestellt. Im Folgenden wird die Benennungskonvention gewählt, dass die Leitungen aus der Positioniereinrichtung *austreten* und in den Grundkörper *eintreten*. Abbildung 5.3 a) visualisiert den Zustand der Integration der Leitung zwischen zwei Druckschichten während des Grundkörperaufbaus. Die Grundkörpergeometrie wird schichtweise aufgebaut. Zur Integration zwischen zwei Druckschichten ist die Integration einer Leitung ohne das parallele Fortführen des FFF-Verfahrens zum Grundkörperaufbau möglich.

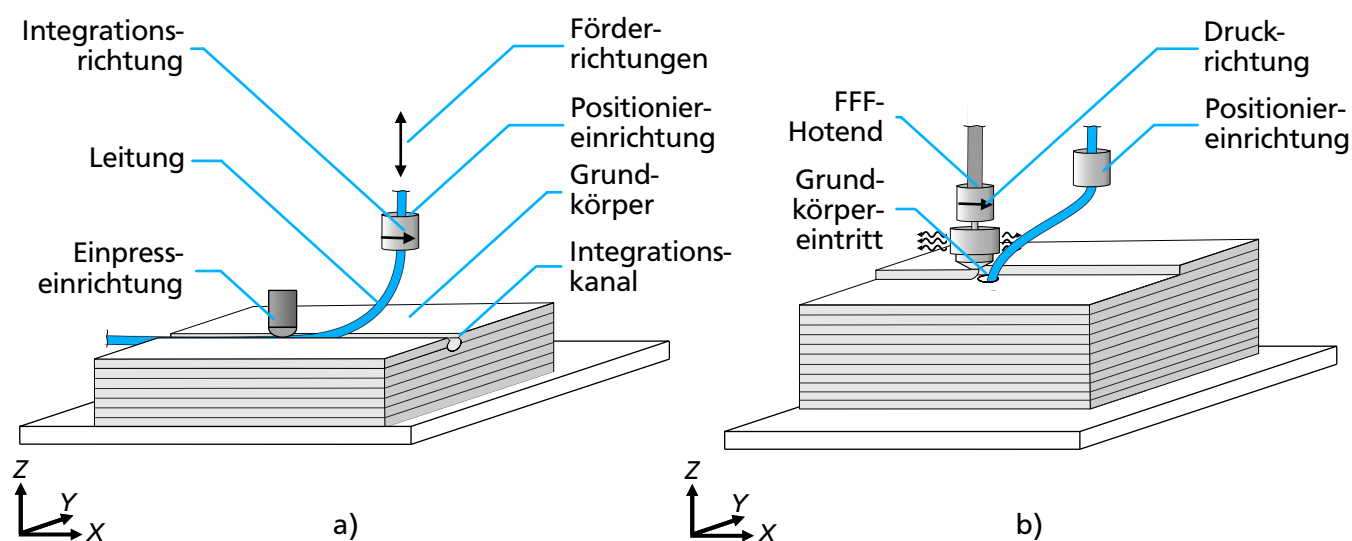


Abbildung 5.3: Initiale Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens zur Integration der Leitung in den Grundkörper zwischen zwei Druckschichten (Positioniereinrichtung angelehnt an Kirchner et al. (2022, S. 1)) in a) und über mehrere Druckschichten mit FFF-Prozessdarstellung in Anlehnung an Gebhardt et al. (2019b, S. 50) in b), eigene Abbildungen

Die Integration der Leitung wird durch mechanisches Einlegen zwischen zwei Druckschichten ohne Erwärmung der Leitung möglich, indem das Materialvolumen des Grundkörpers in den Bereichen der späteren Position der Leitung als Hohlraum vorgesehen wird. Dieser Bereich bildet einen Kanal in welchen die Leitung zuerst eingelegt wird, indem eine Positioniereinrichtung die Leitung über den Grundkörper führt. Anschließend wird die Leitung in den Kanal durch eine Einpresseinrichtung

---

eingepresst. Die Positionier- und die Einpresseinrichtung sind schematisch dargestellt und bilden die erforderlichen Wirkelemente zum Aufbringen der erforderlichen Wirkgrößen des Fertigungsschritts. Durch das Spannen der Leitung ist es möglich, diese als Gerade zwischen Leitungseintritt und -austritt anzunehmen (vgl. 5.1.3). Mit dem Verfahren der Positioniereinrichtung ist eine Längenänderung der Leitung, angenommen als Verbindungsgerade von Leitungseintritt und Leitungsausstritt möglich. In diesem Fall wird die Länge der Leitung zwischen Eintritt und Austritt entsprechend der resultierenden Längendifferenz erhöht oder reduziert. Die Erhöhung der Leitungslänge wird als *Vorfördern* bezeichnet, während das Reduzieren der Leitungslänge als *Rückfördern* aufgefasst wird. Mit der Beschreibung der Integration zwischen zwei Schichten unterscheidet sich das 3DConFil-Verfahren beispielsweise von den durch Espalin et al. (2016) geschilderten Einlegeverfahren.

In Abbildung 5.3 b) ist die Integration über mehrere Druckschichten mit einer schematischen Darstellung des Hotends und einer Druckrichtung zum Durchstoßpunkt der Leitung durch die letztgedruckte Schicht dargestellt. Das Hotend bildet die Wirkelemente für das FFF-Verfahren ab und stellt die dafür erforderlichen Wirkgrößen, beispielsweise zur Erwärmung des Kunststoffes. Die Integration über mehrere Druckschichten erfordert eine simultane Handhabung der Leitung während des Grundkörperaufbaus. Für die Verlegung über mehrere Druckschichten wird vorausgesetzt, dass ein Durchstoßpunkt des Kanals und der Leitung in der jeweils zuvor gedruckten und in der aktuell gedruckten Druckschicht existiert (stetiger Leitungsverlauf). Ein Auftrennen der Leitung für die jeweilige Druckschicht wird aufgrund der Anzahl der Trenn- beziehungsweise Fügeprozesse und den damit einhergehenden Schnittstellen nicht in der Entwicklung berücksichtigt.

Die Integration über mehrere Druckschichten ist durch eine partielle Integration der Leitung möglich. Während des Aufbaus der Druckschichten wird die Leitung bereichsweise durch Umdrucken mittels des Hotends integriert ohne die Leitung aufzutrennen. Das bedeutet, dass die Leitung mit dem Bauteil während des Druckprozesses verbunden ist. Während des Aufbaus der gesamten Grundkörperschicht wird die Position des Leitungsaustritts durch Verfahren der Positioniereinrichtung und damit der Leitungsverlauf verändert, sodass der gesamte Druckbereich für die FFF-Düse erreichbar ist. Die Position des Durchstoßpunkts der Leitung ist innerhalb der Grundkörperschicht frei wählbar und geneigte sowie vertikale Verläufe innerhalb des Grundkörpers sind möglich.

Zum Aufbau der Druckschichten um die eintretende Leitung wird die FFF-Düse bis an den Eintrittspunkt der Leitung verfahren. Dafür ist die eindeutige Kenntnis über die Position der Leitung zur Kollisionsvermeidung und zur Verhinderung einer unzulässigen Erwärmung erforderlich. Die Leitung wird durch die Positioniereinrichtung gespannt und verläuft zwischen dem Eintritts- und dem Austrittspunkt. Die Positioniereinrichtung ist für das Biegen der Leitung in der Bewegungsrichtung der FFF-Düse zur Vergrößerung des Abstands nutzbar. Mit Verfahren der Positioniereinrichtung während die Leitung weiterhin gespannt bleibt und den geradenähnlichen Verlauf behält, wird der Abstand von Leitung und FFF-Düse möglichst groß. In diesem Zustand sind der Eintrittspunkt in das Bauteil und der Austrittspunkt aus der Positioniereinrichtung, zwischen denen die Leitung gespannt ist, bekannt. Der Verlauf der gespannten Leitung wird als eindeutig festgelegt angenommen. Abbildung 5.3 b) visualisiert schematisch diesen Umdruckprozess. Aufgrund der Ähnlichkeit des Leitungsverlaufs wird im Folgenden zur Verbesserung der Lesbarkeit dieser, von einer Geraden abweichende Verlauf, als *S-förmiger* Verlauf bezeichnet. Die Zugkraft wird durch Leitung in den

Grundkörper eingeleitet und kann dieses von der Bauplattform ablösen. Aufgrund der begrenzten Bauteilhaftung an der Bauplattform ist die Zugkraft nicht beliebig einstellbar, sondern ist bauteil- und druckprozessabhängig begrenzt.

Die beschriebene Handhabung der Leitung und die Konkretisierung der Leitungsintegration zwischen zwei Schichten und über mehrere Schichten wird im Folgenden durch die Betrachtung der Kanalgeometrien erweitert. Im Anhang A.2 sind dem Negativ der Außendurchmesser der Leitung entsprechende Kanalgeometrien betrachtet, welche mit stoffschlüssigen und reibkraftschlüssigen Lösungen verglichen und festgelegt wurden. Die Vorteile der Klemmverbindung bestehen in der integrierten Fertigbarkeit während des Bauteilaufbaus, der Nutzung des bereits verarbeiteten Kunststoffes, den Formgestaltungsmöglichkeiten, durch welche die Haltekraft beeinflusst wird, und der Formstabilität auch in Randbereichen des Bauteils. Weiterhin wird die Relativbewegung zwischen Leitung und Bauteil, beispielsweise durch Vibrationen, verhindert.

Nachteile bestehen in der Kopplung von Haltekraft und Einpresskraft, einer möglichen mechanischen Beschädigung des Mantels während des Einpressens und des Gestaltungsaufwands in der Bauteilkonstruktion. In Abbildung 5.4 ist eine mögliche Kanalgeometrie für die Integrationsfälle dargestellt. Zur Integration zwischen zwei Schichten ist durch die geschickte Wahl der Kanalform, im Vergleich zu bisher bekannten Lösungen zur Metallobjectintegration (vgl. Espalin et al. 2016), eine flächige mechanische Verbindung zwischen Grundkörper und Leitung mit zusätzlicher Zentrierung möglich (vgl. Kirchner et al. 2022, S. 12), die in Abbildung 5.4 a) visualisiert ist.

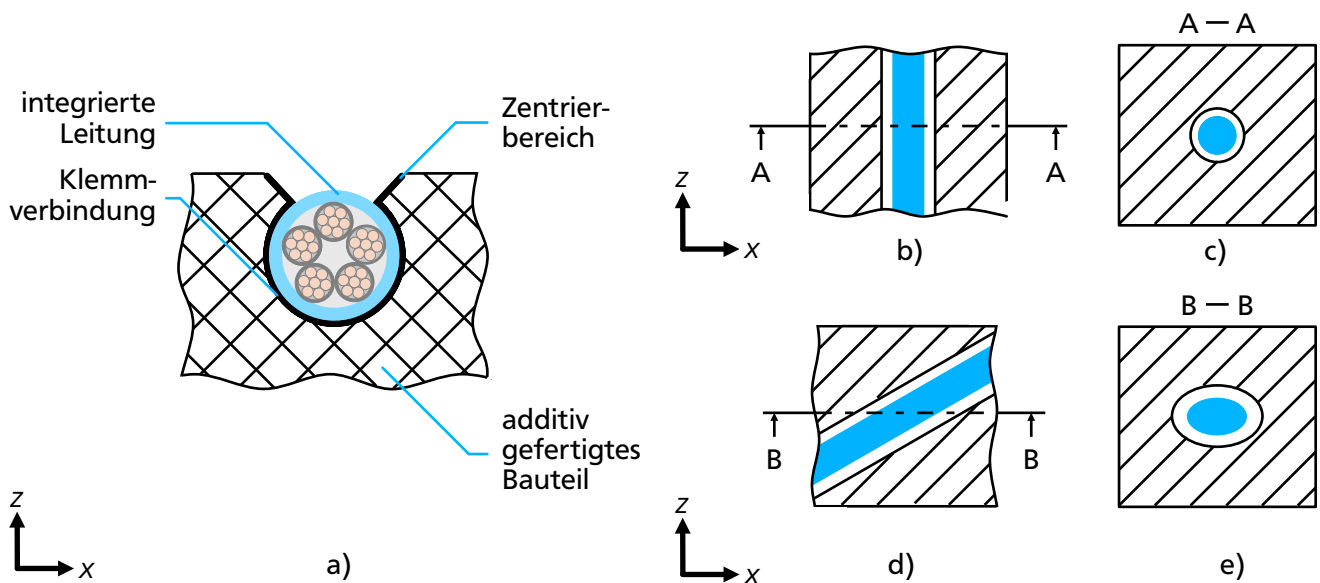


Abbildung 5.4: Klemmkanalgeometrie zur Integration zwischen zwei Schichten in Anlehnung an Kirchner et al. (2022, S. 12) (ohne Zentrierbereich (vgl. Espalin et al. 2016)) in a) und Kanalgeometrien zur Integration über mehrere Schichten für einen vertikalen Leitungsverlauf in b). Die kreisrunde Durchstoßfläche der Druckschichten in c), die Kanalgeometrie eines schrägen Verlaufs durch das Bauteil in d) und der zugehörigen elliptischen Durchstoßfläche in e), eigene Abbildungen a) bis e)



---

Die Lösung ist in Abbildung 5.4 a) als Draufsicht auf den Kanalquerschnitt dargestellt. Die Kanalform besteht aus zwei Bereichen zur mechanischen Verbindung von Leitung und Grundkörper. Der erste Bereich erfüllt die Zentrierfunktion zur Positionierung der Leitung vor dem Einpressen, ist trichterförmig ausgeführt und weist an der Durchstoßfläche der obersten Grundkörperschicht einen größeren Flankenabstand im Vergleich zum Leitungsdurchmesser auf. Dadurch wird die Positionierung der Leitung über dem Kanal vereinfacht.

Der Abstand zwischen den Zentrierflanken wird orthogonal zur neutralen Faser des Kanals in negativer Z-Richtung bis zu einem Abstand verkleinert, der unterhalb des Leitungsdurchmessers liegt. Die Leitung wird entlang des Kanals im oberen Zentrierbereich positioniert. Anschließend ist durch eine Kraft in negativer Z-Richtung das Einpressen der Leitung in den zweiten Kanalbereich mithilfe einer Einpresseinrichtung möglich. Die auf die Leitung aufgebrachte Z-Kraft wird entlang der schiefen Ebene der Zentrierflanken aufgeteilt und ermöglicht die Zentrierung der Leitung über der neutralen Faser des Kanals.

Die Einpresskraft wird so gewählt, dass die Leitung über den Zentrierbereich in den Grundkörper gepresst wird und im zweiten Kanalbereich positioniert wird. Der zweite Kanalbereich wird etwas kleiner als der Leitungsdurchmesser gewählt, um die Kraftleitung durch eine Klemmverbindung zwischen Grundkörper und integrierter Leitung zu ermöglichen (vgl. auch Espalin et al. 2016; Kirchner et al. 2022). Die Integration der Leitung ist entlang des Kanals und damit der Integrationsrichtung durch gekoppeltes Verfahren von Positionier- und Einpresseinrichtung möglich.

An die Beschreibung der Kanalgeometrie zur Integration zwischen zwei Schichten schließt nachfolgend die Betrachtung der Kanalgeometrie anhand der Abbildungen 5.4 b) bis e) für die Leitungsin-  
tegration über mehrere Schichten an. Aufgrund des biegeschlaffen Verhaltens der Leitungen ist der Verlauf und die Position außerhalb des Grundkörpers durch die Position der Positioniereinrichtung und durch das Aufbringen einer Zugkraft einstellbar. Unterschieden wird in einen vertikalen Verlauf, visualisiert in Abbildung 5.4 b) und in einen geneigten Verlauf, welcher in Abbildung 5.4 d) dargestellt ist. Die blau dargestellten Leitungen werden mit einem kreisrunden Querschnitt angenommen. Die Geometrie einer Durchstoßfläche bei vertikaler Verlegung entspricht aus diesem Grund einem Kreis (Abbildung 5.4 c), während bei einem geneigten Verlauf bei horizontaler Schnittebene entsprechend Abbildung 5.4 e) eine elliptische Durchstoßfläche des Kanals entsteht.

Die räumliche Ausdehnung der Leitung am Eintrittspunkt verhindert ein Überfahren des Leitungseintrittsbereichs durch die Druckdüse und ein Umdrücken der Leitung ist zur Kollisionsvermeidung notwendig. Ein Zustand während der Integration über mehrere Schichten ist in Abbildung 5.5 visualisiert. In Abbildung 5.5 a) ist eine Schnittebene parallel zur X-Z-Ebene dargestellt. Das Hotend ist in der Endposition der Druckbahn am Rand des Kanals. Die Leitung wird durch die Positioniereinrichtung zur Abstandserhöhung gebogen. In Abbildung 5.5 b) ist die Detailansicht um die Düsenspitze visualisiert. In dieser Relativposition von Hotend und Leitung befinden sich Bauteile der Düse über der Leitung und es würde ohne Biegung der Leitung bereits zur Kollision kommen. Aus dieser Betrachtung folgt die Festlegung, dass spezifisch für die räumliche Ausdehnung der FFF-Druckdüse ein Sicherheitsabstand zur Leitung erforderlich ist. Dieser Abstand verhindert das Umdrücken der Leitung für eine formschlüssige Verbindung über mehrere Schichten.

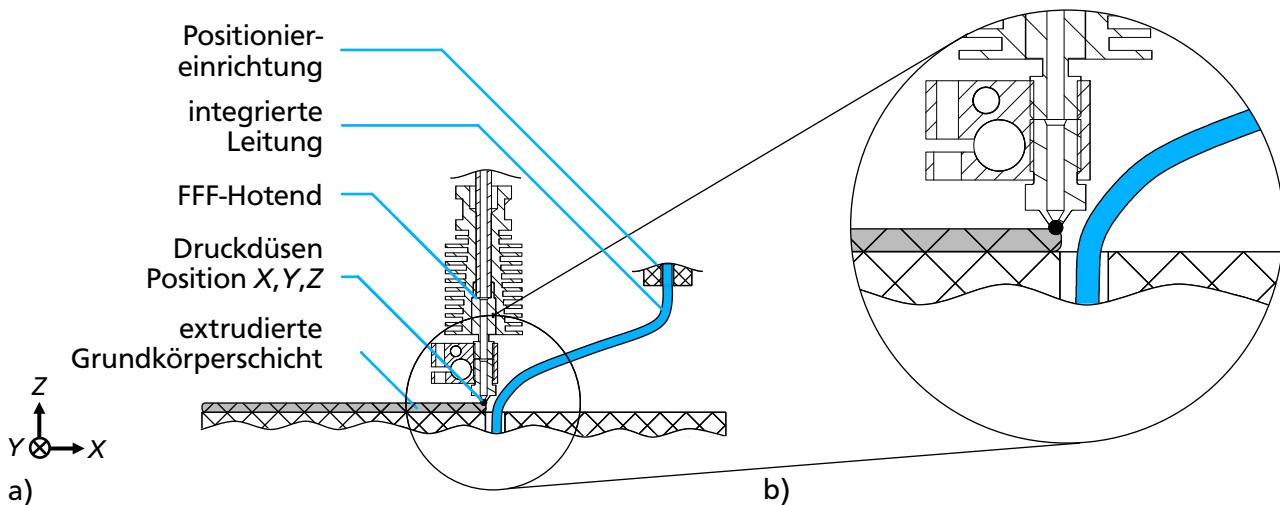


Abbildung 5.5: Schnittdarstellung der Integration über mehrere Druckschichten in a) mit einer Detailansicht eines möglichen Kontaktbereichs von Hotend und Leitung in b), eigene Abbildungen

Mit der bisherigen Konkretisierung der Fertigungsschritte besteht eine Möglichkeit zur Integration von kontinuierlichen flexiblen Funktionsträgern. Die in Abschnitt 5.1.3 erfolgte Abschätzung zum Leitungsverhalten ermöglichte die initiale Ableitung der Fertigungsschritte. Aufgrund des vielversprechenden Ansatzes für die Integration von elektrischen Leitungen, optischen Leitungen und flexiblen Hohlleitungen durch das Alleinstellungsmerkmal, dass die integrierten Leitungen keinen hohen Temperaturen während der Fertigung des Bauteils ausgesetzt sind, befindet sich die Verfahrensidee des 3DConFil-Verfahrens als hiAM derzeit in einem Patentierungsprozess (vgl. Kirchner et al. 2022).

Mit der Ableitung der initialen Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens wurden Annahmen getroffen, die bisher nicht im spezifischen Kontext des 3DConFil-Verfahrens überprüft wurden. Weiterhin wurde bei der bisherigen Entwicklung keine Einschränkung der Leitungen, beispielsweise des Außendurchmessers, vorgenommen. Diese freie Wahl der integrierten Leitungen ist für die Entwicklung eines Fertigungsmaschinenprototyps nicht zielführend. Im folgenden Abschnitt wird eine Auswahl der weiter betrachteten Leitungen anhand einer Marktrecherche durchgeführt. Das bisher auf Annahmen basierende Verhalten der Leitungen während der initialen Fertigungsschritte zur Leitungsintegration wird anschließend experimentell überprüft.

## 5.2 Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens auf Basis des experimentellen Leitungsverhaltens ausgewählter Leitungen

In diesem Abschnitt werden die bisherigen Annahmen zur Ableitung der leitungsintegrierenden Fertigungsschritte überprüft und anschließend das 3DConFil-Verfahren erweitert. Vorbereitend findet in Abschnitt 5.2.1 anhand einer Übersicht kommerziell erhältlicher kontinuierlicher flexibler Leitungen eine Auswahl dieser zur experimentellen Absicherung des Leitungsverhaltens und zur Spezifikation der Fertigungsmaschine statt.

---

## 5.2.1 Auswahl der berücksichtigten Leitungen

Die integrierbaren Leitungen sind in ihren Eigenschaften sehr vielfältig und Parameter wie beispielsweise der Außendurchmesser oder die Anzahl der Adern bei elektrischen Leitungen liegen in einem breiten Wertebereich vor und stellen verschiedene Formen der Funktion *Leiten* bereit. Die Leitungsfunktionen werden abgeleitet anhand der Art der Leitung. Unterscheiden lassen sich Energieleiter, Signalleiter und Stoffleiter (vgl. Pahl et al. 2007, S. 248). Im Rahmen dieser Arbeit werden elektrische und optische Leitungen sowie Hohlleiter weiter betrachtet. Ein Alleinstellungsmerkmal des Verfahrens ist die Verwendung standardisierter am Markt und nicht speziell für das Verfahren entwickelter und hergestellter Leitungen.

Verfügbare Leitungen werden für aktuelle industrielle Einsatzzwecke entwickelt, hergestellt und vertrieben. Diese Einsatzzwecke geben damit den Rahmen der Eigenschaften der Leitungen vor, die während dieser Entwicklung nutzbar sind. Im Rahmen des 3DConFil-Verfahrens werden Leitungen mit rotationssymmetrischem Aufbau betrachtet. Leitungsformen wie beispielsweise Twin Kabel und Flachbandkabel werden zur Komplexitätsbeherrschung aufgrund deren asymmetrischen Querschnitts nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung der berücksichtigten Referenzleitungen wurde eine Stichprobe verfügbarer Leitungen ermittelt. Als Repräsentation des Markts wurden beispielsweise das Unternehmen RS Components GmbH (vgl. RS Components GmbH 2023) und die eku Kabel & Systeme GmbH & Co (vgl. eku Kabel & Systeme GmbH & Co. KG 2023) berücksichtigt. Die vollständige Liste ist digital abrufbar (vgl. Steffan 2023). Die betrachteten Leitungen teilen sich in Leitungen für Stoffe, optische und elektrische Signale und Energien auf. Zur Auswahl der Leitungen werden die Eigenschaften des Außendurchmessers und der Anzahl unabhängiger Verbindungen verwendet. Für elektrische Leitungen entspricht jede isolierte Ader einer unabhängigen Verbindung. Bei optischen Leitungen werden als unabhängige Verbindungen die Faseranzahl und bei Hohlleitungen einzelne Kanäle aufgefasst. In Abbildung 5.6 ist ein Auszug der während der Auswahl der Referenzmaterialien berücksichtigten Leitungen anhand ihres Durchmessers über der Anzahl der unabhängigen Verbindungen aufgetragen. Der Auszug umfasst die Leitungen mit einem Durchmesser zwischen ca. 2 mm und 8 mm und einer Anzahl unabhängiger Verbindungen unter 50. Eine ermittelte Leitung wird durch ein Symbol repräsentiert.

Die Verteilung der optischen und elektrischen Leitungen führt zu dem Ergebnis, dass die Anzahl der unabhängigen Leiterelemente von elektrischen Leitungen bei einem Durchmesser von 7,8 mm bis zu 25 unabhängige Verbindungen zur Signalübertragung beträgt, während für optische Leitungen bei einem Durchmesser von 7,9 mm bis zu 144 unabhängige Verbindungen in der Stichprobe verfügbar sind. Für die Auswahl der Referenzleitungen steht die Abdeckung eines möglichst breiten Anwendungsbereichs im Vordergrund, der bereits in einem Durchmesserbereich von 2 mm bis 8 mm möglich ist. Aus diesem Bereich werden Funktionsträger zur Leitung elektrischer und optischer Energie und Stoffen ausgewählt, die in Tabelle A.5 im Anhang A.10 aufgeführt sind. Im folgenden Abschnitt wird zu Beginn der Versuchsumfang zur Überprüfung des Leitungsverhaltens beschrieben und die Versuchsergebnisse werden ausgewertet. Anhand der Erkenntnisse wird das 3DConFil-Verfahren erweitert.

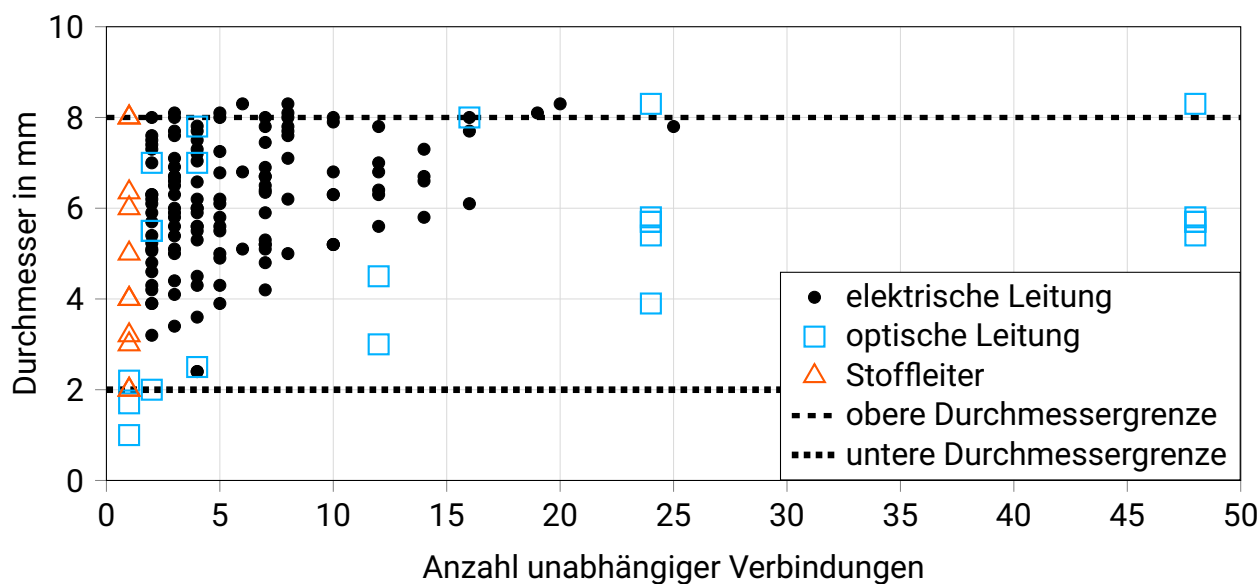


Abbildung 5.6: Auszug der Stichprobe flexibler, kontinuierlicher Funktionsträger zur Leitung von optischen und elektrischen Energien sowie Stoffen (vgl. Steffan 2023) mit der oberen Grenze des Außendurchmessers als gestrichelte Linie und der unteren Grenze der berücksichtigten Außendurchmesser als punktierte Linie in den Bereichen einer Verbindungszahl unter 50 und einem Außendurchmesser zwischen ca. 2 mm und 8 mm, eigene Abbildung

## 5.2.2 Experimentelle Bestimmung der Leitungsverläufe

Die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration basieren auf Annahmen über das biegeschlaffe Verhalten der Leitungen entsprechend der Literatur (vgl. Abschnitt 5.1.3). Ein Beispiel ist der S-förmige Verlauf zwischen zwei Einspannungen, der sich unter geringerer Zugkraft stärker ausprägt und unter Erhöhung der Zugkraft einer Geraden annähert. Darauf basiert die definierte Positionierung der Leitung innerhalb des Bauraums der Fertigungsmaschine zwischen den beiden Einspannungspunkten des Leitungsaustritts aus der Positioniereinrichtung und der des Eintritts in den Grundkörper.

Die Überprüfung ist prinzipiell durch die Modellierung der Leitungen oder experimentell möglich. Zur Modellierung biegeschlaffer Materialien sind im Stand der Forschung vielfältige Betrachtungen von metallischen Litzen (vgl. Arena et al. 2016, S. 267 bis S. 277), Garnen (vgl. Gafurov et al. 2018, S. 1 bis S. 10), Kabeln und Schläuchen (vgl. Grégoire et al. 2007, S. 694 bis S. 707) und der experimentellen Untersuchung sowie der Finite-Elemente-Analyse von Hochvoltleitungen (vgl. Bönig 2016, S. 155 f.) verfügbar. Zur Nutzung der im Stand der Forschung mathematisch beschriebenen Zusammenhänge sind mehrere Materialkennwerte der Leitungen, zum Beispiel die Biegesteifigkeit, notwendig. Diese Informationen sind in der Regel in verfügbaren Herstellerinformationen, vgl. Informationen des Angebots anhand der Verweise bei Steffan (2023), nicht beschrieben. Aus diesem Grund wird das Verhalten der Leitungen experimentell bestimmt, die Gültigkeit der Annahmen überprüft und die Erkenntnisse zur Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens und der Fertigungsmaschinenentwicklung verwendet. Für die Festlegung des Prüfumfanges werden die Messpositionen anhand von Überlegungen zu Leitungsverläufen bestimmt, die in Abbildung 5.7 visualisiert sind.

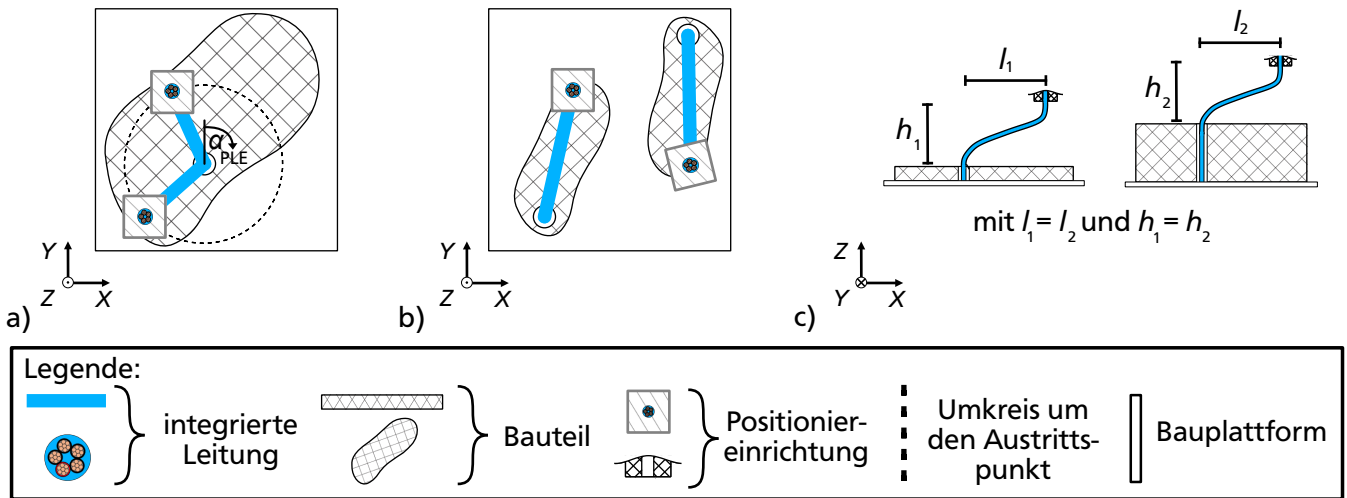


Abbildung 5.7: Annahmen zur Reduktion der experimentellen Überprüfung des Leistungsverhaltens mit einer bezüglich des Austrittspunkts bestehenden Winkelunabhängigkeit in a), der Positionsunabhängigkeit des Bauteils in b) und der Unabhängigkeit bezüglich des Abstands in Z-Richtung zwischen Bauteiloberfläche und Positioniereinrichtungsaustritt in c), eigene Abbildungen a) bis c)

Während des Drucks besteht die Möglichkeit, mit der Positioniereinrichtung relativ zum Eintrittspunkt in den Grundkörper den Verlauf der Leitung einzustellen. Damit ergeben sich verschiedene Abstände horizontal und vertikal zwischen dem Austrittspunkt der Positioniereinrichtung und dem Eintrittspunkt in den Grundkörper. Während den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration wird keine Torsion auf die Leitung aufgebracht. Weiterhin wird nicht erwartet, dass starke Eigenspannungen vorliegen, sodass der Verlauf der neutralen Faser der Leitung in der Ebene, in der Eintritts- und Austrittspunkt liegen, angenommen wird. Aufgrund dieser zweidimensionalen Betrachtung des Leitungsverlaufs in der Ebene lässt sich diese Ebene um die auf dem Eintrittspunkt in das Bauteil parallel zur Z-Achse stehende Achse rotieren.

In Abbildung 5.7 a) ist ein Grundkörper mit der quadratisch dargestellten Positioniereinrichtung und der blau eingefärbten Leitung in zwei, um diese Achse rotierten Positionen dargestellt. Der Leitungsverlauf ist unabhängig von dem Rotationswinkel  $\alpha_{PLE}$ . Damit reduziert sich die zu prüfende Anzahl der Druckzustände auf eine Ebene, die den Eintrittspunkt und den Austrittspunkt schneidet und orthogonal auf der letztgefertigten Grundkörperschicht steht. Weiterhin ist die Relativposition von Eintrittspunkt und Austrittspunkt für den Leitungsverlauf relevant.

In Abbildung 5.7 b) sind zwei Bauteile mit Positioniereinrichtung und Leitung an zwei unterschiedlichen Positionen visualisiert. Die Relativposition ist unabhängig von der Bauteilposition und erfordert keine zusätzliche experimentelle Überprüfung.

In Abbildung 5.7 c) ist der Leitungsverlauf für zwei unterschiedliche Zeitpunkte während des Integrationsschritts über mehrere Schichten dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung in Zustand 2 ist der Grundkörperaufbau im Vergleich zum linken Teil im Zustand 1 bereits fortgeschritten. Zu beiden

Zeitpunkten sind die Abstände zwischen dem Eintrittspunkt und dem Austrittspunkt mit  $l_1 = l_2$  und  $h_1 = h_2$  in der dargestellten Schnittebene gleich. Der Leitungsverlauf wird als unabhängig von dem bestehenden vorherigen Leitungsverlauf innerhalb des Grundkörpers angenommen und wird nicht gesondert überprüft.

Abschließend erfolgt die Festlegung der Stufung der Relativposition des Leitungsaustritts zum Leitungseintritt. Die Krümmungsbereiche der Leitung sind bei geringem vertikalen Abstand und darauf bezogenem großen horizontalen Abstand des Leitungsaustritts klein. Dadurch ist der Biegeradius ebenfalls klein. Dies stellt im Vergleich zu einer Leitungsaustrittsposition mit großem vertikalen und kleinem horizontalen Abstand zum Leitungseintritt einen kritischeren Fall für die Führung des freien Leitungsbereichs dar.

Aus diesem Grund werden die Abstände zwischen den Messpositionen progressiv gesteigert. Durch das verwendete Portalsystem ist der größtmögliche Abstand zwischen Eintritt und Austritt auf  $h=180$  mm und  $l=260$  mm festgelegt. Die Zugkräfte werden von 1,4 N bis 5,4 N variiert. Die Zugkräfte werden aufgrund des möglichen Abtrennens des Grundkörpers von der Bauplatzform begrenzt. Die Parameterbereiche der überprüften Leitungsverläufe sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Tabelle der variierten Parameter im Rahmen der experimentellen Untersuchung der Leitungsverläufe

Parameter	Startwert	Endwert	Verteilung
Abstand der Einspannung horizontal ( $l$ )	10 mm	260 mm	10 mm; 20 mm; 40 mm; 80 mm; 160 mm; 260 mm
Abstand der Einspannung vertikal ( $h$ )	10 mm	180 mm	10 mm; 20 mm; 31,5 mm; 40 mm; 80 mm; 180 mm
Zugkraft	1,4 N	5,4 N	1,4 N; 3,4 N; 5,4 N
integrierte Leitungen	2,4 mm	6,7 mm	Typenbezeichnungen und technische Daten im Anhang A.10 in Tabelle A.5

Anhand der beschriebenen Überlegungen wird der Leitungsverlauf in der Ebene, die den Eintrittspunkt und den Austrittspunkt schneidet und orthogonal auf der letztgefertigten Grundkörperschicht steht, bestimmt. Die geometrische Lage von Objekten in einer Ebene ist optisch erfassbar. Zur Bestimmung der Leitungsverläufe ist ein Prüfaufbau mit den erforderlichen Funktionen zur Abbildung der Wirkelemente von Grundkörpereintritt und Positioniereinrichtungsaustritt, der definierten Einstellung der Relativposition dieser, sowie dem Aufbringen einer Zugkraft als Wirkgröße erforderlich. Als System zur Positionierung ist ein Portalsystem, beispielsweise einer FFF-Fertigungsmaschine nutzbar, welches um die zusätzlichen Wirkgrößen und Wirkelemente erweitert wird. Für den Prüfaufbau wird das Portalsystem einer bereits vorhandenen FFF-Fertigungsmaschine am Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (*pmd*) verwendet.

Zur Abbildung des Leitungseintritts wird ein am Prüfaufbau montierbarer Grundkörper additiv gefertigt, in dem das eine Leitungsende in einem Kanalabschnitt geklemmt wird. Neben dem Leitungseintritt während des Fertigungsschritts über mehrere Schichten ist es ebenfalls möglich, dass die Leitungsintegration zwischen zwei Schichten innerhalb des Bauteils endet. Aus diesem Grund wird der Kanalverlauf mit Übergang zwischen horizontalem Verlauf und geneigtem Verlauf sowie der vertikale Kanalverlauf betrachtet. Die Gestaltung des Übergangs wird durch einen geneigten Verlauf entlang eines Kreisbogenabschnitts mit dem minimalen Biegeradius der Leitung ausgeführt. Der Kanaldurchmesser wird mit dem dreifachen Durchmesser der Leitung durch die Berücksichtigung der während des 3DConFil-Verfahrens bestehenden FFF-Düsenausdehnung festgelegt. In Abbildung 5.8 sind die Grundkörper beider Kanalverläufe in der Schnittansicht und als isometrische Ansicht dargestellt. In Abbildung 5.8 a) ist der Übergang von einem horizontalen Kanalabschnitt in einen geneigten Kanalabschnitt als Schnittansicht mit der Darstellung der neutralen Faser der Leitung visualisiert.

Neben dem in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Zentrierbereich ist eine Kanalverengung am Übergangspunkt dargestellt. Erste händische Geometrietests zeigten, dass in diesem Bereich eine höhere Klemmkraft erforderlich ist, um die Klemmverbindung von Leitung und Grundkörper zu erhalten. Abbildung 5.8 b) visualisiert den mit Durchgangsbohrungen versehenen Grundkörper als isometrische Ansicht. In Abbildung 5.8 c) ist der montierbare Grundkörper mit vertikalem Leitungsverlauf als Schnittansicht mit neutraler Faser dargestellt. Abbildung 5.8 d) visualisiert den Grundkörper mit vertikalem Verlauf in der isometrischen Darstellung.

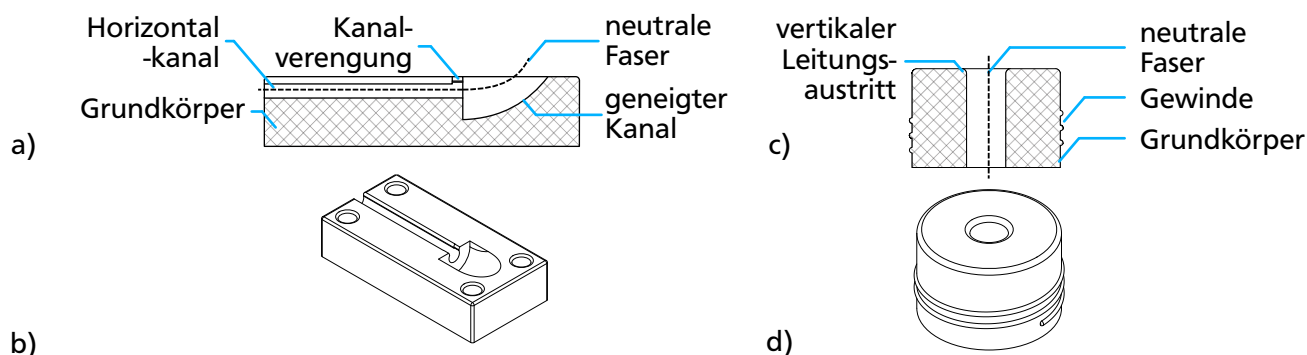


Abbildung 5.8: Grundkörper zur experimentellen Bestimmung des Leitungsverlaufs bei horizontaler Einspannung als Schnittansicht in a), als isometrische Ansicht in b) und vertikaler Einspannung als Schnittansicht in c) und als isometrische Ansicht in d), eigene Abbildungen a) bis d)

Mit unterschiedlichem Abstand zwischen Eintritt und Austritt der Leitung sind unterschiedliche Längen erforderlich. Aus diesem Grund wird die Leitung durch die Positioniereinrichtung geführt. Bisher wurde die Positioniereinrichtung schematisch dargestellt. Mit einer Ausführung des Austrittsbereichs als Kante, an der die Leitung die Positioniereinrichtung verlässt, wirken abhängig von Austrittswinkel und Zugkraft hohe Reibungskräfte auf den Leitungsmantel. Durch die Integration einer Laufrolle im Kantenbereich rollt die Leitung am Austritt der Positioniereinrichtung ab, sodass die Reibkräfte

reduziert werden. Zum Aufbringen einer definierten Zugkraft wird das noch freie Ende mit einem Totgewicht verbunden. Der Prüfaufbau und die Durchführung der Messungen sind in Anhang A.3 beschrieben. Die Messpositionen und ein beispielhafter Leitungsverlauf innerhalb des Prüfaufbaus mit der Anordnung einer Auswahl der Messpositionen ist in Abbildung 5.9 schematisch dargestellt.

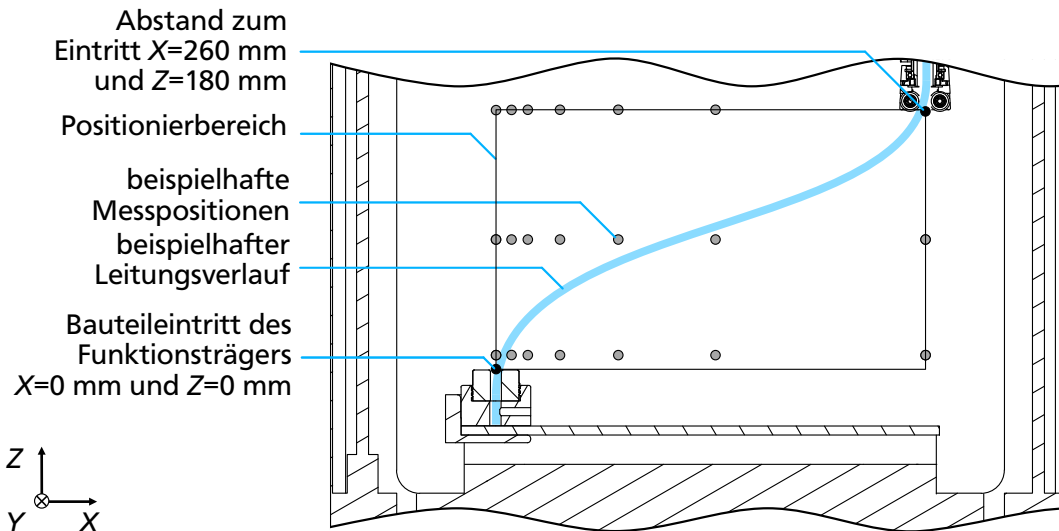


Abbildung 5.9: Beispielhafte Messpositionen der experimentellen Bestimmung des Leitungsverlaufs, eigene Abbildung

### 5.2.3 Auswertung der experimentell ermittelten Leitungsverläufe

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, anhand der Auswertung der Leitungsverläufe die Annahmen aus Abschnitt 5.1 zu überprüfen. Ein Beispiel ist der S-förmige Verlauf zwischen den Einspannungen unter geringer Zugkraft und der Änderung hin zu einer Geraden bei Erhöhung der Zugkraft. Diese Überlegungen werden durch die experimentell ermittelten Leitungsverläufe überprüft.

Die Auswertung der Experimentalergebnisse wird qualitativ anhand der optischen Aufnahme des Leitungsverlaufs für die in Tabelle 5.3 aufgeführten Parameterkonfigurationen und den in Abbildung 5.8 dargestellten Eintrittsbereichen der Grundkörper durchgeführt. Die Geometrie der Kanäle wird an die spezifische Leitung angepasst. Für die Positioniereinrichtung bestehen während des späteren Drucks eine Vielzahl möglicher Positionen. Die genutzten optischen Aufnahmen zur Ableitung der Erkenntnisse dieses Abschnitts sind digital abrufbar (vgl. Steffan 2023).

Zur Abschätzung des Leitungsverhaltens wurden repräsentative Aufnahmen ausgewählt und im folgenden qualitativ ausgewertet. Für das Leitungsverhalten ist die Relativposition von Austritt aus der Positioniereinrichtung und dem Grundkörpereintritt relevant. Im Folgenden werden Randbereiche der Relativpositionen betrachtet. Diese sind einerseits große Abstände in X-Richtung im Vergleich zu kleinen Abständen in Z-Richtung und andererseits kleine Abstände in X-Richtung im Vergleich zu großen Abständen in Z-Richtung. Zusätzlich wird der Einfluss der Zugkraft auf die Leitung geprüft.



In Abbildung 5.10 sind vier Leitungen bei einem  $X$ -Abstand von 260 mm und einem  $Z$ -Abstand von 31,5 mm abgebildet. Im jeweils linken Bereich des Bildausschnitts tritt die Leitung aus der Positioniereinrichtung aus und weist einen Krümmungsbereich auf. Dieser geht in einen geradenähnlichen Verlaufsabschnitt über, der an einen zweiten Krümmungsbereich schließt, bevor die Leitung in den vertikalen Kanalabschnitt innerhalb des Grundkörpers eintritt. Dadurch bildet sich der S-förmige Verlauf aus, der für das 3DConFil-Verfahren als ausreichend punktsymmetrisch beschreibbar ist.

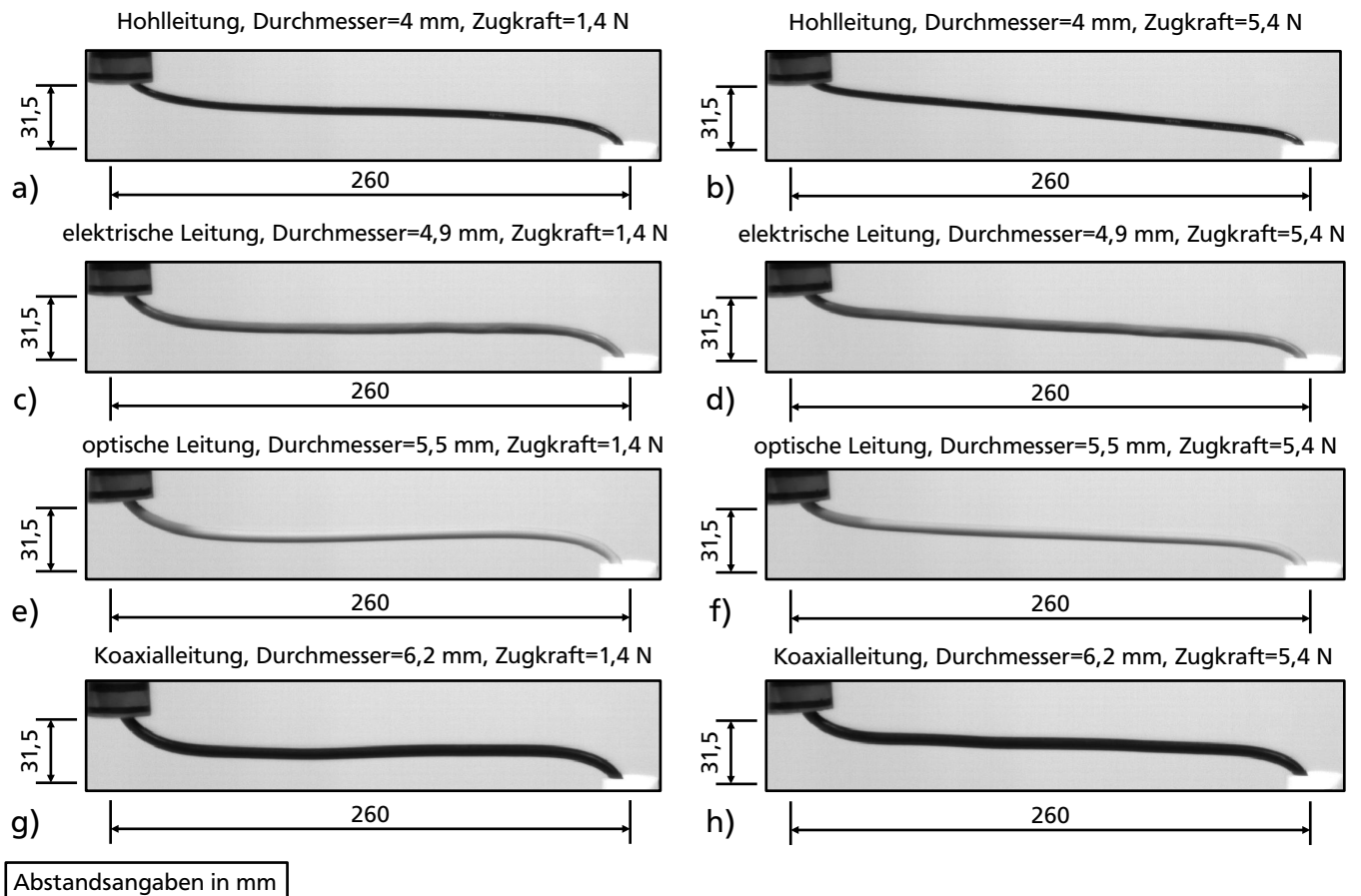


Abbildung 5.10: Leitungsverläufe bei Zugkräften von 1,4 N und 5,4 N zwischen vertikalem Grundkörpereintritt und Leitungsausritt einer Hohlleitung in a) und b), einer elektrischen Leitung in c) und d), einer optischen Leitung in e) und f) sowie einer Koaxialleitung in g) und h), eigene Abbildungen a) bis h)

Eine höhere Zugkraft führt zu einer Verkürzung der Krümmungsbereiche und zu einer Verlängerung des geradenähnlichen Verlaufsabschnitts. In Abbildung 5.10 a) ist eine eingespannte Hohlleitung mit einem Durchmesser von 4 mm unter einer Zugkraft von 1,4 N dargestellt. Diese Leitung weist unter 1,4 N einen ausgeprägten Krümmungsbereich im Vergleich zu Abbildung 5.10 b) unter einer Zugkraft von 5,4 N auf. Dieses Leitungsverhalten ist für eine elektrische Leitung mit größerem Durchmesser in den Abbildungen 5.10 c) und d) analog erkennbar. In den Abbildungen 5.10 e) und f) sind die Verläufe einer optischen Leitung und in den Abbildungen 5.10 g) und h) die Verläufe einer Koaxialleitung dargestellt und es ist eine ähnliche aber geringere Änderung erkennbar.

In jeder Bildspalte der Abbildung 5.10 nimmt von oben nach unten die Biegesteifigkeit der Leitung zu und die Leitungskrümmung ist ausgeprägter. Bereits bei geringen Zugkräften von 5,4 N sind die Krümmungen der Leitungen auch unter dem Eigengewicht der Leitung gering ausgeprägt und die Leitungen sind bei dieser Relativposition im Rahmen der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens nutzbar. Die Änderung des freien Leitungsverlaufs durch eine Erhöhung der Zugkraft nimmt mit steigender Biegesteifigkeit ab. Die Leitung verläuft über die Grundkörperkante mit dem geringsten Abstand zur Positioniereinrichtung.

In Abbildung 5.11 sind eine optische Leitung und eine Koaxialleitung bei einem X-Abstand von 40 mm und den Z-Abständen von 31,5 mm, 80 mm und 180 mm bei einer Zugkraft von 1,4 N abgebildet. Im jeweils linken Bereich des Bildausschnitts tritt die Leitung aus der Positioniereinrichtung aus und tritt in den vertikalen Kanalabschnitt innerhalb des Grundkörpers ein. Bei kleinen Z-Abständen ist die Länge der Krümmungsbereiche bezogen auf die gesamte freie Leitungslänge groß. Bei diesen Fällen und den Fällen mit großem Z-Abstand, mit bezogen auf den freien Leitungsbereich kleinen Krümmungsbereichen, verläuft der freie Leitungsteil geradenähnlich. Die Leitungsverläufe weisen für diese Relativpositionen bei geringeren Zugkräften einen ausreichend geradenähnlichen Verlauf zur Durchführung der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens auf.

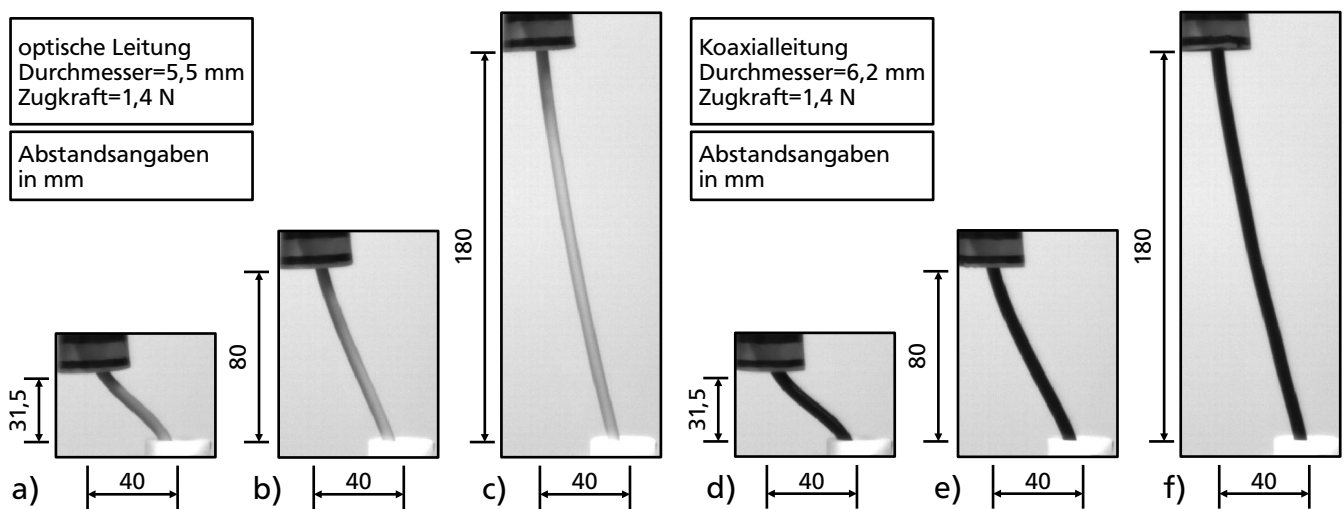


Abbildung 5.11: Leitungsverläufe unter einer Zugkraft von 1,4 N zwischen vertikalem Grundkörpereintritt und Leitungsaustritt mit variiertem vertikalen Abstand für eine optische Leitung in a), b) und c) sowie einer Koaxialleitung in d), e), und f), eigene Abbildungen von a) bis f)

Abschließend wird nach der Betrachtung des Eintritts der Leitung in einen vertikalen Kanalabschnitt innerhalb des Grundkörpers das Leitungsverhalten bei Eintritt in einen horizontalen Kanalabschnitt betrachtet. In Abbildung 5.12 sind die Leitungsverläufe einer optischen Leitung bei einem X-Abstand von 80 mm und einem Z-Abstand von 80 mm in Abbildung 5.12 a), sowie einer elektrischen Leitung bei einem X-Abstand von 130 mm und den Z-Abständen von 31,5 mm, 80 mm und 180 mm unter einer Zugkraft von 1,4 N dargestellt. Im Vergleich zu den bisher betrachteten Leitungsverläufen

unterscheidet sich der horizontale Kanalabschnitt in der Orientierung der neutralen Faser der Leitung am Eintrittsbereich. Die Leitung wird im Vergleich zu einem vertikalen Eintritt in den Grundkörper bei gleicher Relativposition von Eintritt und Austritt stärker gekrümmt.

Bisher besteht die Annahme, dass die Änderung des Leitungsverlaufs durch diese unterschiedliche Krümmung zwischen den Verläufen der Kanalabschnitte gering ist und während des Fertigungsschritts zur Leitungsintegration über mehrere Schichten keiner expliziten Berücksichtigung bedarf. In Abbildung 5.12 a) ist die ausgeprägte Krümmung der optischen Leitung am Eintritt in den Grundkörper durch die hohe Biegesteifigkeit visualisiert. In den Abbildungen 5.12 b), c), und d) ist diese Krümmung für eine biegeweichere elektrische Leitung geringer ausgeprägt. Anhand dieser Erkenntnisse ist die Erhöhung des minimalen Abstands von FFF-Düse und Leitung für Leitungen mit hoher Biegesteifigkeit eine Möglichkeit, die Verarbeitbarkeit während den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration sicherzustellen. Die Festlegung ist spezifisch für die verarbeitete Leitung und die Geometrie der eingesetzten Düse zu treffen.

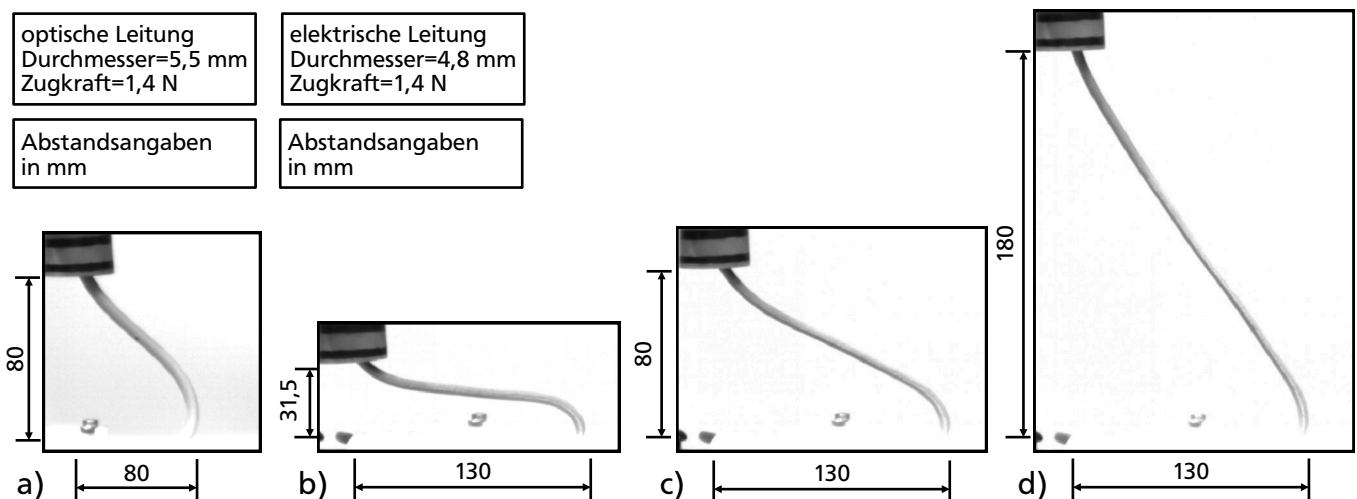


Abbildung 5.12: Leitungsverläufe bei einer Zugkraft von 1,4 N zwischen horizontalem Grundkörpereintritt und Leitungsaustritt für eine optische Leitung in a) und mit variiertem vertikalen Abstand für eine elektrische Leitung in b), c) und d), eigene Abbildungen a) bis d)

Abschließend werden anhand der experimentellen Auswertung Rückschlüsse für die weitere Konkretisierung des 3DConFil-Verfahrens abgeleitet. Die Annahmen des Leitungsverhaltens zwischen dem Austritt aus der Positioniereinrichtung und dem Eintritt in den Grundkörper werden anhand der experimentellen Bestimmung teilweise bestätigt. Die Leitungsverläufe unterscheiden sich für unterschiedliche Relativpositionen durch den Einfluss des Eigengewichts der Leitung. Die Ausprägung der Leitungskrümmung steigt mit der Biegesteifigkeit an und der Leitungsverlauf weicht von der Verbindungsgeraden zwischen Eintritt und Austritt ab. Für die überprüften Leitungen ist die Durchführung der Fertigungsschritte bereits bei geringen Zugkräften unter 6 N für den eingesetzten Prüfaufbau möglich. Die neutralen Fasern der Leitungen weichen bei unterschiedlichen Werten nur gering voneinander ab, sodass die Lage der Leitung innerhalb des Bauraums zur Verfahrensdurchführung abschätzbar ist. Ein Trennen des Grundkörpers von der Bauplattform wird bei diesen Kräften nicht

---

erwartet. Die erforderliche Zugkraft ist vom Aufbau der Leitungsführung innerhalb des gewählten Aufbaus der Positioniereinrichtung abhängig. Diese Abhängigkeit besteht durch unterschiedliche Reibkräfte zwischen der Leitung und den Bauteilen zur Leitungsführung und ist entsprechend für das verwendete System festzulegen.

Bei dem Eintritt in einen horizontalen Kanalabschnitt wurde bei biegesteifen Leitungen ein freier Leitungsverlauf ermittelt, für die Parameterkombinationen vorliegen können, die eine Erhöhung des Abstands von FFF-Düse und Leitung erfordern. Hierzu ist die Prüfung der spezifischen, zu integrierenden Leitung erforderlich. Dies ist für verschiedene spezifische Kombinationen aus Relativposition, Biegesteifigkeit der Leitung, der Geometrie der FFF-Düse sowie der Zugkraft zu ermitteln. Eine Möglichkeit ist die Nutzung des beschriebenen Prüfaufbaus.

Anhand der experimentellen Untersuchungen des Leitungsverhaltens werden die bisherigen initialen Fertigungsschritte zur Leitungsintegration des 3DConFil-Verfahrens als durchführbar erachtet. Im folgenden Abschnitt werden Möglichkeiten zum Übergang zwischen diesen aufgezeigt und Fertigungsschritte zum Eintritt in und Austritt aus den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration beschrieben.

#### 5.2.4 Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens

Die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten und über mehrere Schichten wurden konkretisiert und anhand experimenteller Untersuchungen überprüft. Bisher liegen die einzelnen Kanalabschnitte für einen horizontalen, geneigten und vertikalen Leitungsverlauf innerhalb des Grundkörpers vor. Zur umfassenderen Nutzbarkeit des gestalterischen Potentials der freien Leitungsintegration innerhalb eines additiv gefertigten Bauteils werden die bestehenden Leitungsverläufe um Kanalabschnitte zum Übergang zwischen den Kanalabschnitten und damit der bestehenden Fertigungsschritte erweitert.

In Abbildung 5.13 sind drei Übergänge zwischen den Kanalabschnitten innerhalb des Grundkörpers dargestellt. Abbildung 5.13 a) visualisiert den Übergang eines horizontalen Kanalabschnitts in einen geneigten Kanalabschnitt. Beide Kanalarten werden direkt aneinandergesetzt. Der Übergang in den intendierten Kanalwinkel  $\gamma$  ist mit dem Biegeradius  $r_B$  unter Einhaltung des minimalen Biegeradius einstellbar. Der Wechsel von dem Fertigungsschritt der Integration zwischen zwei Schichten in den Fertigungsschritt der Integration über Schichten hinweg erfolgt nach dem Einpressen der Leitung bis in den Bereich des geneigten Kanalabschnitts. Dieser Abschnitt bildet für die Integration über mehrere Schichten den Durchstoßpunkt durch die oberste Bauteilschicht und der weitere Grundkörperaufbau ist möglich.

Abbildung 5.13 b) visualisiert einen Übergang von einem vertikalen in einen weiteren, in Richtung der Y-Achse versetzten vertikalen Kanalabschnitt. Der Wechsel zwischen diesen Abschnitten findet während des gleichen Fertigungsschritts statt, sodass ein stetiger Übergang der Kanalformen mit dem Biegeradius  $r_B$  unter Einhaltung des minimalen Biegeradius der Leitung möglich ist. Entsprechend des Leitungsverhaltens der spezifischen integrierten Leitung sind während des Übergangs unterschiedliche Kanaldurchmesser möglich, dargestellt durch  $d_{\text{Kanal\_geneigt}}$  und  $d_{\text{Kanal\_vertikal}}$ .

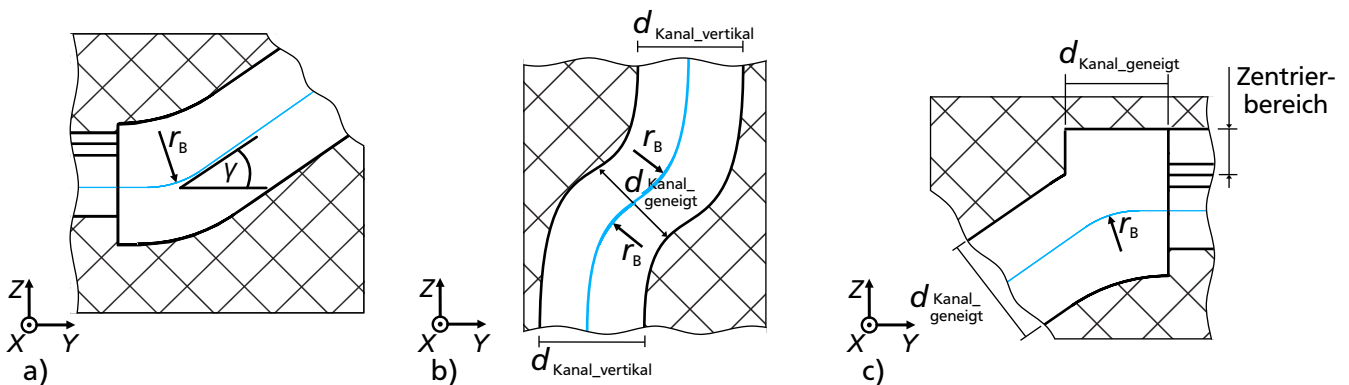


Abbildung 5.13: Übergänge zwischen einem horizontalen Kanalabschnitt in einen geneigten Kanalabschnitt in a), einem vertikalen Kanalabschnitt in einen versetzten vertikalen Kanalabschnitt in b) und von einem geneigten Kanalabschnitt in einen horizontalen Kanalabschnitt in c), eigene Abbildungen a) bis c)

Die beschriebenen Kanalübergänge werden durch den Übergang von einem geneigten Kanalabschnitt in einen horizontalen Kanalabschnitt ergänzt. Der geneigte Kanalabschnitt besteht bis die neutrale Faser mit einer Krümmung im Bereich des minimalen Biegeradius in den horizontalen Kanal überführt wird und sich der horizontale Kanalabschnitt direkt anschließt. Dieser Übergang ist in Abbildung 5.13 c) dargestellt. Der horizontale Kanal ist zusätzlich über den Durchstoßpunkt des geneigten Kanals mit  $d_{\text{Kanal\_geneigt}}$  verlängert. Dadurch wird der geneigte Kanal während des Aufbaus des Zentrierbereichs des horizontalen Kanalabschnitts durch das FFF-Verfahren nicht verschlossen. Der Übergang zwischen den Fertigungsschritten findet nach dem Aufbau des horizontalen Kanals statt. Der Austrittspunkt der Leitung befindet sich am Durchstoßpunkt des geneigten Kanals und das Einpressen der Leitung in den horizontalen Kanal ist möglich. Das nachfolgende Schließen der Kanalöffnungen und der Grundkörperaufbau ist durch das FFF-Verfahren in diesem begrenzten Überhangsbereich ohne Stützstruktur (sogenanntes engl. *bridging*) möglich.

Mit dieser Betrachtung sind die möglichen Kanalübergänge und der Wechsel zwischen den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration abgeschlossen. Nachfolgend wird die Erweiterung der Fertigungsschritte für den Eintritt in und den Austritt aus den hybriden Fertigungsschritten beschrieben. Zuerst wird der Eintritt in einen Fertigungsschritt zur Leitungsintegration betrachtet. Das 3DConFil-Verfahren erfordert definierte Positionen von Leitungseintritt und Leitungsausritt sowie das Aufbringen einer Zugkraft. Der Beginn eines Fertigungsschrittes zur Leitungsintegration ist möglich, wenn die Leitung von einem definierten Punkt aus spannbar ist. In den bisherigen Betrachtungen ist die Leitung mit dem Grundkörper verbunden. Das Einspannen der Leitung ist alternativ durch die Fertigungsmaschine durchführbar. Der Fertigungsschritt der Leitungseinspannung wird aus diesem Grund den bisherigen Fertigungsschritten hinzugefügt.

Nach der Beschreibung des Eintritts in die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration wird der Austritt aus diesen beschrieben. Die integrierte Leitung ist ab dem ersten Fertigungsschritt zur Leitungsintegration mit dem Grundkörper verbunden. Durch ein Auftrennen der Leitung ist es möglich, die Verbindung von Bauteil und Positioniereinrichtung zu lösen und beispielsweise wieder

die Fertigung mit einem FFF-Fertigungsschritt fortzuführen. Die Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens werden um den Fertigungsschritt der Leitungstrennung erweitert. In Abbildung 5.14 ist eine schematische Übersicht der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens dargestellt. Diese sind in die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration und in die Fertigungsschritte zum Übergang in und aus den Schritten zur Leitungsintegration neben dem FFF-Fertigungsschritt gegliedert.

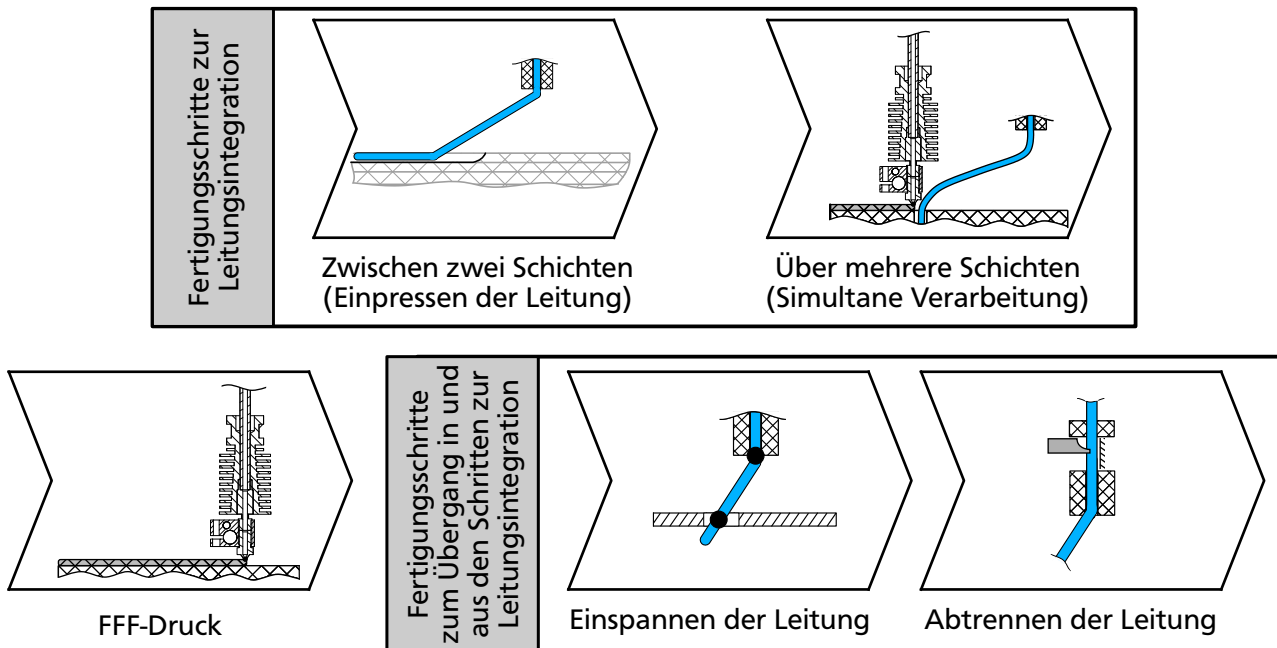


Abbildung 5.14: FFF-Druck, erweiterte Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens zur Leitungsintegration und zum Übergang in und aus den Fertigungsschritten der Leitungsintegration, eigene Abbildung

Mit der Beschreibung der Übergänge zwischen den hybriden Fertigungsschritten und dem Eintritt in diese bzw. dem Austritt aus diesen ist die Erweiterung der Fertigungsschritte für das 3DConFil-Verfahren abgeschlossen. Die entwickelten Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens weisen die folgenden Potentiale und Charakteristika auf (vgl. auch Abschnitt 5.1).

- Die größtmögliche Gestaltungsfreiheit zur Leitungsintegration wird durch horizontale, geneigte und vertikale Leitungsabschnitte sowie deren Übergang ineinander möglich. Mit den beschriebenen Fertigungsschritten und den Kanalverläufen wird ein großer Teil des gestalterischen Potentials des 3DConFil-Verfahrens bereits erschlossen.
- Die konkretisierten Fertigungsschritte und Kanalverläufe ermöglichen die Einhaltung der Spezifikationen der integrierten Leitungen, beispielsweise durch die Berücksichtigung des minimalen Biegeradius der integrierten Leitung.
- Die Verbindung von Grundkörper und Leitung wird anhand der Gestaltung horizontaler Kanalabschnitte durch eine Klemmverbindung erreicht. Bei geneigten und vertikalen Leitungsverläufen ist der Kanaldurchmesser aufgrund der geometrischen Düsenausdehnung größer im

---

Vergleich zum Leitungsdurchmesser. Die Kanalform ermöglicht die Einhaltung eines Sicherheitsabstands von FFF-Düse und Leitung, sodass die Fertigung ohne Kollisionen und Wärmeschäden möglich ist.

- Anhand der experimentellen Überprüfung des Leitungsverhaltens wurden für die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration geeignete elektrische und optische Leitungen sowie Hohlleitung ermittelt. Die erforderlichen Zugkräfte zum Spannen der Leitungen befinden sich in einem Bereich unter 6 N. Die Verbindung von Grundkörper und Bauplattform ist zur Leitung dieser Kraft geeignet. Der Durchmesser der berücksichtigten Leitungen befindet sich im Bereich von 2,4 mm bis 6,6 mm. Mit dem Prüfaufbau besteht eine Lösung zur automatisierten Zuführung der Leitungen.
- Die überprüften Leitungen sind kommerziell hochverfügbar. Charakteristische Eigenschaften, beispielsweise der minimale Biegeradius, sind bekannt und ggf. bestehende Standards oder Zertifizierungen sind dokumentiert.

Es werden die an das 3DConFil-Verfahren gestellten Anforderungen in Tabelle 5.2 nicht verletzt. Im folgenden Abschnitt werden die erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente zur Durchführung der Fertigungsschritte ermittelt und dadurch die Vorbereitung zur Fertigungsmaschinenentwicklung abgeschlossen.

## 5.3 Wirkgrößen des 3DConFil-Verfahrens

Nach der Vervollständigung der Fertigungsschritte werden die initialen Wirkgrößen und Wirkelemente für die Durchführung der Fertigungsschritte abgeleitet. In Abschnitt 5.3.1 werden die erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten beschrieben. Daran schließt die Betrachtung des Fertigungsschritts zur Integration über mehrere Schichten in Abschnitt 5.3.2 an. Abschließend werden in Abschnitt 5.3.3 die Fertigungsschritte zum Einspannen und Abtrennen der Leitung berücksichtigt.

### 5.3.1 Integration zwischen zwei Schichten

Zur Ermittlung der Wirkgrößen und Wirkelemente werden Zustände während des Fertigungsschritts herangezogen. Weiterhin erfolgt die Betrachtung aus mehreren Raumrichtungen. In Abbildung 5.15 sind die Zustände für den Fertigungsschritt zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten schematisch visualisiert. In Abbildung 5.15 a) ist die Handhabung und das Einpressen der Leitung in einen horizontalen Kanalabschnitt mit neutraler Faser in  $X$ -Richtung dargestellt. In der  $X$ - $Z$ -Ebene wird die Leitung durch die Positioniereinrichtung als Wirkelement geführt. Hierzu sind Zugkräfte in  $X$ -,  $Y$ - und  $Z$ -Richtung erforderlich. Die Leitung verläuft frei unter Zugspannung bis zur Grundkörperoberfläche und wird dort durch die Einpresskraft, übertragen durch das Wirkelement der Einpresseinrichtung, in den Kanal eingepresst. Durch die mechanische Verbindung der Leitung mit dem Grundkörper werden die Zugkräfte sowie die Einpresskraft überlagert in den Grundkörper eingeleitet. Der gesamte Grundkörper mit der Kontaktfläche zur Bauplattform ist nicht dargestellt. Die bisher beschriebenen Kräfte werden über die Verbindung von Grundkörper und Bauplattform

durch diese abgestützt. Mit einer Positionsänderung der Positioniereinrichtung ist eine Änderung der Länge der Verbindungsgeraden von Leitungseintritt und Leitungsausritt möglich. In diesem Fall wird die Leitung entsprechend der Längendifferenz durch die Positionsänderung entweder vor- oder zurück gefördert. Hierzu wird die Förderkraft  $F_{\text{Förderung}}$  als Wirkgröße benötigt.

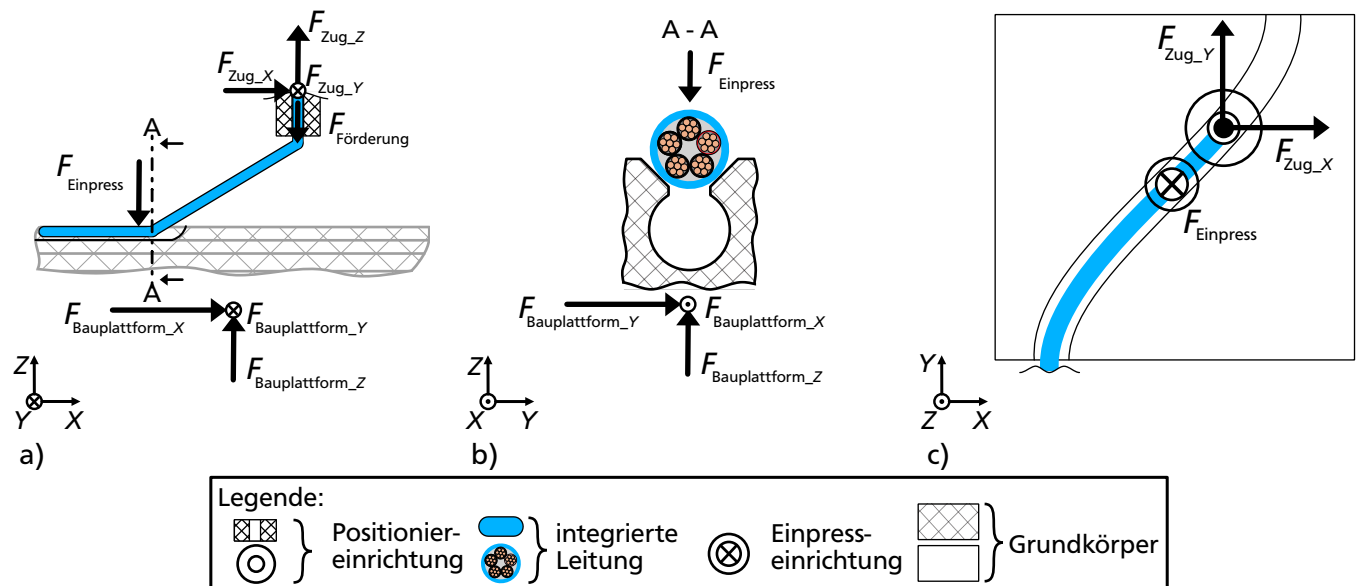


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der Wirkgrößen und Wirkelemente zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten als Ansicht auf die X-Z-Ebene in a), als Schnittansicht in b) und als Ansicht auf die X-Y-Ebene in c), eigene Abbildungen a) bis c)

In Abbildung 5.15 b) ist die Schnittansicht A von Abbildung 5.15 a) dargestellt. Diese zeigt die Position der Leitung in dem Zentrierbereich des Kanals und die in negativer Z-Richtung wirkende Einpresskraft. Zusätzliche Wirkgrößen und Wirkelemente ergeben sich aus dieser Abbildung nicht. In Abbildung 5.15 c) ist die Sicht auf die X-Y-Ebene dargestellt. Der Verlauf der Leitung und des horizontalen Kanalabschnitts ist in der X-Y-Ebene S-förmig gekrümmt. Dadurch wird das gestalterische Potential der horizontalen Leitungsintegration visualisiert. Zusätzliche Wirkgrößen und Wirkelemente ergeben sich aus dieser Abbildung aufgrund der punktförmig wirkenden Einpresskraft auf die Leitung nicht. Im folgenden Abschnitt wird der Fertigungsschritt zur Leitungsintegration über mehrere Schichten betrachtet.

### 5.3.2 Integration über mehrere Schichten

Die Wirkgrößen und Wirkelemente werden analog zum vorherigen Abschnitt anhand eines Zustands während des Fertigungsschritts durch die Betrachtung aus mehreren Raumrichtungen abgeleitet. Der Fertigungsschritt zur Leitungsintegration über mehrere Schichten ist schematisch in Abbildung 5.16 dargestellt. Für die erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente des FFF-Verfahrens wird ein Hotend als eine etablierte Lösung zur Nutzung des bereits bestehenden fertigungstechnologischen Wissens dargestellt.



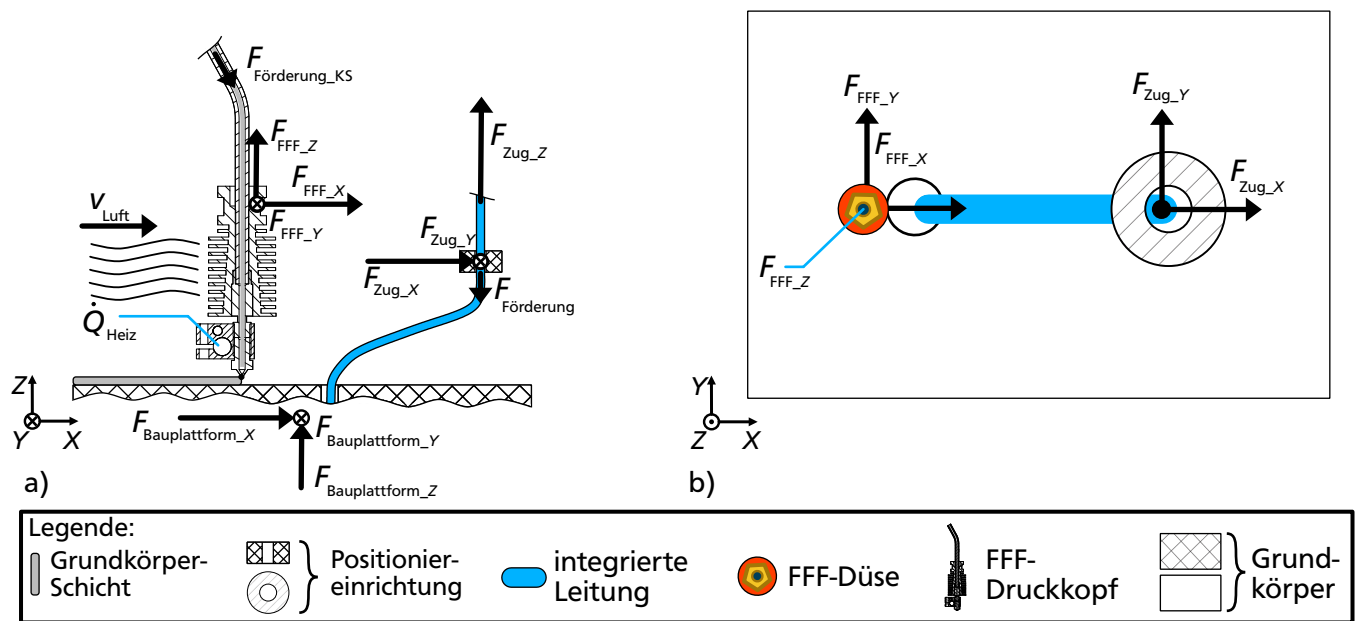


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung der Wirkgrößen und Wirkelemente zur Leitungsintegration über mehrere Schichten als Ansicht auf die X-Z-Ebene in a) und auf die X-Y-Ebene in b), eigene Abbildungen

In Abbildung 5.16 a) ist die simultane Grundkörperfertigung und die Handhabung der Leitung visualisiert. Zum dargestellten Zeitpunkt wird eine Grundkörperschicht in X-Richtung extrudiert und die Leitung in X-Richtung zum Austritt der Positioniereinrichtung gespannt. Die Kräfte werden in den drei Raumrichtungen durch die Bauplatzform abgestützt. Für das FFF-Verfahren sind die Wirkgrößen zur Positionierung der Düse in den Raumrichtungen X, Y und Z eingetragen. Weiterhin wird für die Extrusion ein Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  und ein Luftstrom  $v_{\text{Luft}}$  zur Kühlung der Kunststoffzuführung dargestellt. Die Grundkörperschicht entsteht aus der örtlichen Ablage und Verbindung des Kunststoffes, der durch Extrusion des Kunststofffilaments unter der Förderkraft  $F_{\text{Förderung\_KS}}$  mit der vorherigen Schicht verbunden wird.

Zur Positionierung der Leitung sind die Zugkräfte in X-, Y- und Z-Richtung erforderlich. Mit einer Positionsänderung ist während dieses Fertigungsschritts eine Längenänderung der Leitung möglich. Diese wird als Massenstrom der Leitung  $\dot{m}_{\text{Leitung}}$  aufgefasst und durch die Leitungsförderung mithilfe der Kräfte  $F_{\text{Zug\_Z}}$  und  $F_{\text{Förderung}}$  ermöglicht. Weitere Wirkgrößen und Wirkelemente ergeben sich nicht. In Abbildung 5.16 b) ist die Sicht auf die X-Y-Ebene ohne die Kräfte  $F_{\text{Förderung}}$  und  $F_{\text{Zug\_Z}}$  zur Verbesserung der Übersichtlichkeit dargestellt. Aufgrund des Leitungsverhaltens ist die Ausbildung des Leitungsverlaufs unabhängig von der Richtung der Verbindungslinie zwischen Eintritt und Austritt. In dieser Ansicht ist der notwendige Abstand von integrierter Leitung und FFF-Düse aufgrund der räumlichen Ausdehnung sichtbar.

### 5.3.3 Fertigungsschritte zum Übergang in und aus den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration

Abschließend werden als schematische Darstellung die Fertigungsschritte der Leitungseinspannung in Abbildung 5.17 a) und der Leitungstrennung in Abbildung 5.17 b) betrachtet. Zur Leitungseinspannung ist die Fixierung eines Leitungsendes beispielsweise am Portalsystem oder einem bereits gefertigten Bauteil erforderlich. Der Fixierungspunkt stellt für die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration den ersten Eintrittspunkt der Leitung dar. Zur Positionierung der Leitung ist die bereits erforderliche Positioniereinrichtung nutzbar, welche die Leitung oberhalb des Einspannbereichs positioniert. Die Einspannung stützt die auf die Leitung wirkenden Zugkräfte ab. Die Wirkgrößen werden mit  $F_{\text{Klemm}_X}$ ,  $F_{\text{Klemm}_Y}$  und  $F_{\text{Klemm}_Z}$  bezeichnet und durch die Wirkelemente, beispielsweise von Klemmflächen, übertragen.

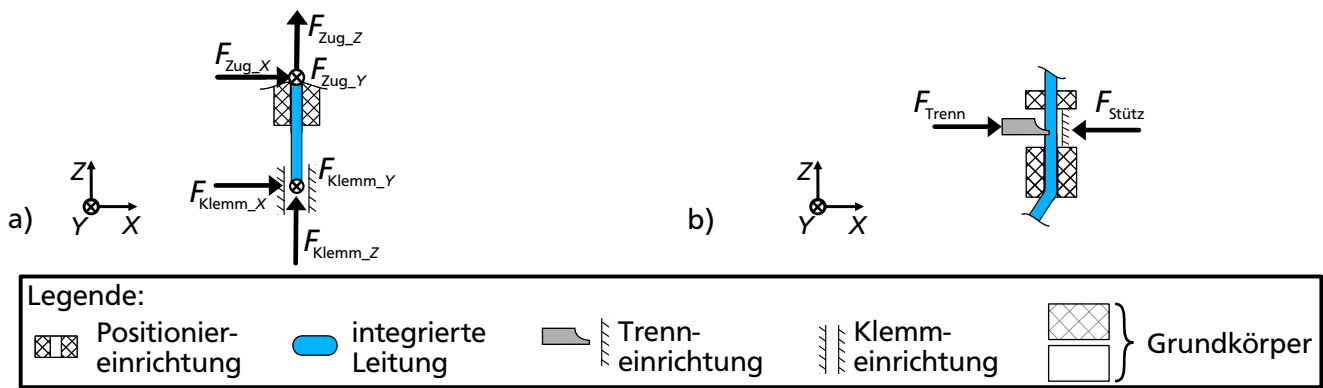


Abbildung 5.17: Wirkgrößen der Fertigungsmaschine zur initialen Einspannung der Leitung in a) und zur Abtrennung der Leitung in b), eigene Abbildungen

In Abbildung 5.17 b) ist der Fertigungsschritt zur Leitungstrennung in der Ansicht auf die X-Z-Ebene dargestellt. Das Auftrennen der Leitung ist durch verschiedene Trennverfahren möglich. Bei mechanischen, schneidenden Trennverfahren ist das Leitungsende zur weiteren Konfektionierung nutzbar, sodass keine thermischen oder chemischen Trennverfahren betrachtet werden und die Wirkgröße einer mechanischen Trennkraft gewählt wird. Zur Leitungstrennung ist die Trennkraft in mindestens einer Raumrichtung erforderlich und wird ohne Richtungsspezifikation aufgrund der Darstellung mit  $F_{\text{Trenn}}$  bezeichnet. Diese Kraft führt bei einem biegeschlaffen Material zu einer Verformung. Eine Trennung ist unter Abstützung der Trennkraft möglich und bildet die weitere Wirkgröße  $F_{\text{Stütz}}$ . Mit der Betrachtung dieses Fertigungsschritts wird die Ermittlung der Wirkgrößen und Wirkelemente abgeschlossen.

Die ermittelten Wirkgrößen und Wirkelemente sind in der Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die Wirkgrößen werden durch die Fertigungsmaschine während der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens zur erfolgreichen Durchführung bereitgestellt und stellen damit Anforderungen an die Entwicklung der Fertigungsmaschine dar. Ebenfalls sind die Wirkgrößen mit Teilen der Fertigungsmaschine verknüpft (vgl. Abschnitt 3.3.3). Aus diesem Grund werden anhand der Wirkgrößen die Entwicklungstätigkeiten für einen Funktionsprototyp als erste Produktgeneration abgeleitet.

Tabelle 5.4: Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens

Fertigungsschritte	Gestalterische Potentiale	Wirkgrößen	Wirkelemente
Leitungsintegration zwischen zwei Schichten	Horizontaler Leitungsverlauf innerhalb eines additiv gefertigten Bauteils entlang einer Geraden oder einer, um eine Achse gekrümmte Kurve in einer zur X-Y-Ebene parallelen Ebene	$F_{Zug\_X}$ $F_{Zug\_Y}$ $F_{Zug\_Z}$ $F_{Förderung}$ $F_{Einpress}$ $F_{Bauplattform\_X}$ $F_{Bauplattform\_Y}$ $F_{Bauplattform\_Z}$	Umschlossene Führung der Leitung zur Vorgabe der rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade, ausgenommen die Rotation um die Z-Achse, eine Einpresseinrichtung zum Aufbringen einer Druckkraft in Z-Richtung und eine Leitungszuführung
Leitungsintegration über mehrere Schichten	Geneigter und vertikaler Leitungsverlauf innerhalb eines additiv gefertigten Bauteils entlang einer Geraden oder einer um eine oder zwei Achsen gekrümmten Kurve mit steigender Z-Höhe innerhalb des Bauteils	$F_{FFF\_X}$ $F_{FFF\_Y}$ $F_{FFF\_Z}$ $F_{Förderung\_KS}$ $v_{Luft}$ $Q_{Heiz}$	FFF-Komponenten und umschlossene Führung der Leitung zur Vorgabe der rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade, ausgenommen die Rotation um die Z-Achse und eine Leitungszuführung
Fertigungsschritte zum Übergang in und aus den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration	Beginn und Ende der integrierten Leitung innerhalb des additiv gefertigten Bauteils	$F_{Klemm\_X}$ $F_{Klemm\_Y}$ $F_{Klemm\_Z}$ $F_{Trenn}$ $F_{Stütz}$	Klemmelemente zur Übertragung der Klemmkraft, ein mechanisches Trennelement und eine Leitungsführung zur Kraftabstützung

---

## 5.4 Entwicklung einer Fertigungsmaschine für das 3DConFil-Verfahren

Das in Abschnitt 5.2.4 als Abfolge von Fertigungsschritten beschriebene hybrid-integrierende additive 3DConFil-Verfahren und die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Wirkgrößen und Wirkelemente werden durch das Zusammenwirken aus physischen Komponenten (Hardware) und digitalen Komponenten (Software), bestehend aus der Firmware der Fertigungsmaschine und dem digitalen Pre-Prozess, ermöglicht. Die Bauteilfertigung nach dem 3DConFil-Verfahren erfordert Entwicklungen der physischen Komponenten, deren Umfang in Abschnitt 5.4.1 festgelegt und mittels Anforderungen dokumentiert ist. Die Ergebnisse sind in den Abschnitten 5.4.2 bis 5.4.4 beschrieben. Die Festlegung des Entwicklungsumfangs und der Anforderungen an die digitalen Komponenten erfolgt in Abschnitt 5.4.5. In Abschnitt 5.4.6 wird anhand der digitalen Softwarekette die Lösung für das 3DConFil-Verfahren festgelegt und die digitalen Komponenten zur Steuerungsbefehlgenerierung beschrieben.

### 5.4.1 Der physische Entwicklungsumfang

Der Entwicklungsbedarf im Hardwarebereich besteht in der Bereitstellung der initialen Wirkgrößen durch die Wirkelemente. Für die erste Maschinengeneration liegt der Entwicklungsfokus auf der Leitungshandhabung und der Fertigung erster Bauteile. Die Leitungshandhabung stellen bestehende FFF-Fertigungsmaschinen nicht bereit. Aufgrund des neuen Anwendungsfalls der Leitungshandhabung wird erwartet, dass zur Funktionserfüllung neben der Gestalt- und Prinzipvariation auch die Neuentwicklung von Teilsystemen als Alternative erforderlich ist. Zu Beginn werden die Teilsysteme entsprechend der Produktgenerationsentwicklung (vgl. Abschnitt 3.1.5) auf zielführende Variationsarten überprüft, um den Entwicklungsaufwand zu reduzieren.

Je nach Variationsart wird, sofern keine Übernahmevariation möglich ist, für die Lösungsentwicklung ein alternierend divergentes Entwicklungsvorgehen mit einem konvergenten Entwicklungsvorgehen kombiniert. Als divergente Entwicklungsmethode wird an mehreren Stellen des Entwicklungsprozesses die systematische Variation (vgl. Ehrlenspiel et al. 2017, S. 563 bis S. 587; Ponn 2016, S. 719 bis S. 726; Pahl et al. 2007, S. 78) eingesetzt. Zur Einschränkung des Lösungsraums werden die jeweiligen Anforderungen herangezogen. Prinzipiell stehen weitere Methoden hierzu zur Verfügung (vgl. Ehrlenspiel et al. 2017, S. 641 bis S. 654; Ponn 2016, S. 728 bis S. 732). Als Orientierung zur Teilsystementwicklung dient das Vorgehensmodell der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 30 f.).

Für die differenzierte Weiterentwicklungsmöglichkeit und die Adaptierbarkeit der Teilsysteme für neue Produktgenerationen wird eine modulare Gestaltung angestrebt. Neben der modularen Gestaltung der Teilsysteme ist eine einfache Demontage und Entnahme aus dem Gesamtsystem zur Verbesserung der Wartbarkeit erstrebenswert. Dies wird bei der Gestaltung der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen berücksichtigt. Im Rahmen der Entwicklung sind keine Teilsysteme festgelegt. Aus diesem Grund erfolgt deren Festlegung neben den Teilsystemen zur Leitungshandhabung. Hierzu zugeordnete Teilsysteme sind beispielsweise das Portalsystem und die Steuerungsplatinen. Die entwickelte Fertigungsmaschine entspricht einem Prototyp, sodass im Folgenden die erste Generation einer 3DConFil-Fertigungsmaschine mit *Funktionsprototyp* bezeichnet wird.

Der beschriebene Entwicklungsumfang wird in Form von Anforderungen an den Funktionsprototyp dokumentiert. Ein Auszug der Anforderungsliste mit den wichtigsten Anforderungen an den Funktionsprototyp ist in Tabelle 5.5 aufgeführt. Im Rahmen des Entwicklungsprojekts erfolgte die Konkretisierung, Differenzierung und Erweiterung der Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teilsysteme. Die Anforderungsliste ist in Tabelle A.4 in Anhang A.9 angegeben.

Tabelle 5.5: Auszug der Anforderungsliste der 3DConFil-Fertigungsmaschine

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
Fertigungs- maschine (F)	F1	FF	Mindestfunktionsumfang	Erzeugung der Wirkgrößen zur Durchführung der Fertigungsschritte zur Leitungsintegration des 3DConFil-Verfahrens.
	F2	ZF	erweiterter Funktionsumfang	Erzeugung der Wirkgrößen zum automatisierten Einspannen und Trennen der Leitung.
	F3	FF	Entwicklungsaktivitäten	Die durchgeführten Entwicklungsaktivitäten werden auf 3DConFil-spezifische Komponenten fokussiert. Zur weiteren Aufwandsreduktion werden, sofern geeignet, Übernahmevariationen der Komponenten bevorzugt.
	F4	ZF	Modularität und Erweiterbarkeit	Ein Ziel ist die Entwicklung der 3DConFil-spezifischen Teilsysteme in Form von Modulen. Damit wird die Weiterentwicklung einzelner Teilsysteme auf Basis experimenteller Erkenntnisse und die Adaptierbarkeit auf andere Systeme zur Erschließung neuer gestalterischer Potentiale sichergestellt.
	F5	W	Wartbarkeit	Die Gestaltung der Teilsysteme ermöglicht die Wartbarkeit bei möglichst geringem Wartungsaufwand.

## 5.4.2 Konzeption und Gestaltung des Funktionsprototyps

In diesem Abschnitt wird das Portalsystem zur Bereitstellung von Positionierkräften und die Hardware-Komponenten für das FFF-Verfahren ausgewählt. Anschließend wird die Leitungshandhabung für den Funktionsprototyp konzeptioniert und damit die Teilsysteme festgelegt. Nachfolgend wird anhand des Druckkopfs ein Beispiel für die Gestaltung der Teilsysteme gegeben. Der Abschnitt schließt mit einer Übersicht des gefertigten Funktionsprototyps.

## Auswahl des Portalsystems

Zur Entwicklung des Funktionsprototyps wird zu Beginn das Portalsystem festgelegt. Dieses bildet die Rahmenstruktur für die weiteren Teilsysteme und stellt die Kräfte zur Positionierung in X-Richtung, Y-Richtung, und Z-Richtung. Mit dem Begriff Portalsystem werden die Komponenten zur Stellung der Kräfte zur Positionierung bezeichnet. Für die Bereitstellung dieser Kräfte sind mehrere kinematische Ausführungen möglich, die in Abbildung 5.18 dargestellt sind.

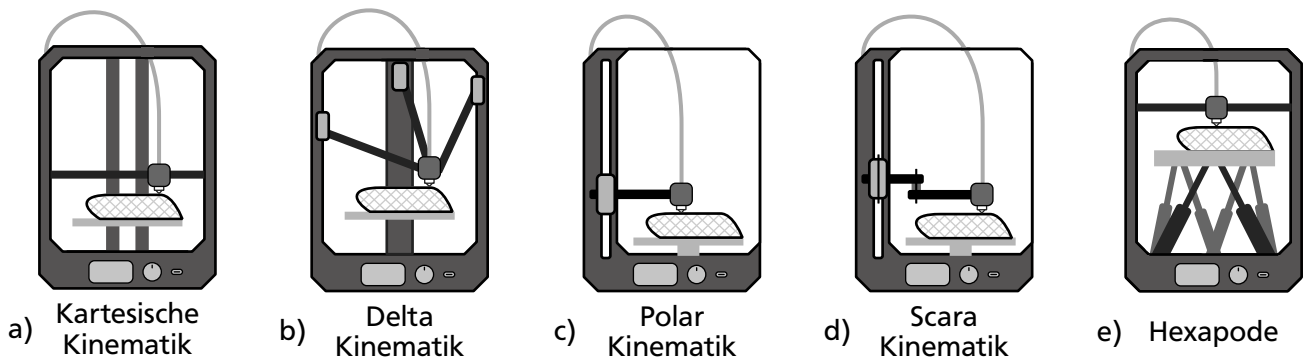


Abbildung 5.18: Schematische Darstellung von Portalsystembauweisen für FFF-Fertigungsmaschinen in Anlehnung an Lachmayer et al. (2020a, S. 107) von a) bis d) und als schematische Darstellung unter Anlehnung an Ma et al. (2021, S. 1228) in e), eigene Abbildungen a) bis e)

Verbreitete Arten der Kinematik für Portalsysteme zur Bereitstellung des FFF-Verfahrens sind die kartesische Kinematik und die Deltakinematik. Bei einer kartesischen Kinematik in Abbildung 5.18 a) werden die drei translatorischen Freiheitsgrade auf die Bauplattform sowie die Werkzeughalterung aufgeteilt und stehen orthogonal zueinander. Bei der Deltakinematik in Abbildung 5.18 b) ist das Werkzeug an einem Effektor befestigt, welcher mit Stäben an drei Schlitten montiert ist. Für jeden Schlitten besteht ein translatorischer Freiheitsgrad entlang der Achse der Befestigungstürme. Eine weitere Kinematik besteht in einer Polarkinematik (Abbildung 5.18 c)) mit einer drehbaren Bauplattform und einer in Richtung der Z-Achse sowie in der X-Y-Ebene oberhalb der Bauplattform verschiebbaren Werkzeughalterung. Aufgrund der geringen kommerziellen Verfügbarkeit wird diese Kinematik zurückgestellt.

Eine engl. *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (Scara) Kinematik (Abbildung 5.18 d)) besteht in der Regel aus einem in Z-Richtung verstellbaren Ausleger mit zwei Gelenken, an dessen Ende das Werkzeug befestigt ist (vgl. Lachmayer et al. 2020a, S. 106 f.). Anhand dieser Gestaltung ist die bewegte Masse im Vergleich zu den anderen Portalsystemen gering und ermöglicht hohe Bewegungsgeschwindigkeiten. Ist der Ausleger an der Z-Achse mit einem um 360° drehbaren Gelenk ausgeführt, steigt der Bewegungsbereich stark an. Am Mittelpunkt des Bewegungsbereichs besteht eine Totzone durch die Führung des translatorischen Z-Freiheitsgrads. Ungeeignet ist diese Kinematik für schwere Lasten aufgrund des ansteigenden Biegemoments mit steigendem Abstand zur Z-Achse.

Der Einsatz einer Hexapode (Abbildung 5.18 e)) zur Bewegung der Bauplattform ermöglicht das Stellen der 6 Freiheitsgrade und ist bezogen auf die anderen Kinematiken das System mit dem

---

höchsten Komplexitätsgrad. Beispielhaft ist bei der von Ma et al. genutzten Hexapode die Bauplattform an sechs Stäben befestigt. Jeweils zwei Stäbe laufen an der Bauplattform als Stabpaar zusammen. Die drei Stabpaare sind mit der Bauplattform an drei, um 120° versetzte Punkte um die Bauplattform verteilt. Durch die hohe Komplexität der Kinematik steigt der Aufwand zur Ansteuerung des Systems. Gleichzeitig steigt der erforderliche Bauraum mit längeren Verfahrwegen im Vergleich zu den anderen Kinematiken an. (vgl. Ma et al. 2021, S. 1225 bis S. 1228) Damit wird diese Kinematik zurückgestellt. Zur Reduktion des Entwicklungsaufwands wird für das Portalsystem eine Übernahmevariation gewählt und als Ausgangspunkt ein kommerziell vertriebenes Portalsystem ausgewählt.

Während beispielsweise eine kartesische Kinematik gegenüber einer vergleichbaren Deltakinematik bei dem dynamischen Anfahren von Positionen geringere Ausprägungen für Schwingungen aufweisen, liegen die Führungen in der Ebene des Befestigungsschlittens für das Werkzeug. Zur Gestaltung der neuen Teilsysteme wird ein größeres Bauvolumen der im Bauraum angeordneten Teilsysteme durch den Funktionsanstieg erwartet. Mit größerem Bauvolumen wird ein höherer Abstand zu den Führungen erforderlich, welcher längere Kraftleitungswege und damit einen Zielkonflikt zwischen der Steifigkeit der Portalsystemkonstruktion und dem verfügbaren Bauvolumen für die entwickelten Teilsysteme darstellt. Bei der Deltakinematik verlaufen die Stäbe von der Montageplatte des Werkzeugs, dem Effektor, unmittelbar in den oberen Bereich des Portalsystems. Dies führt zu einer größeren Gestaltungsfreiheit des Werkzeugs sowie der Leitungsführung. Allerdings werden höhere Ausprägungen von Schwingungen erwartet.

Für die erste Generation des Funktionsprototyps wird die gestalterische Freiheit im oberen Halbraum der Montageplatte im Vergleich zu einer geringeren Ausprägung von Schwingungen höher priorisiert. Damit wird als Portalsystem das Deltasystem gewählt. Die Grenzen des Bauraums sind eine Limitation für die Größe der fertigen Bauteile, sodass ein Portalsystem mit möglichst großem Bauvolumen und hoher Verfügbarkeit gewählt wird. Zum Zeitpunkt der Entscheidung stellt das Deltamodell Predator des Herstellers Anycubic (vgl. Anycubic Technology Co., Ltd 2022) eine zielführende Lösung dar. Das Portalsystem dieses Modells ist als 3D-Modell in Abbildung 5.19 dargestellt.

### **Komponenten für das FFF-Verfahren**

Für das FFF-Verfahren wird die als *Hotend* bezeichnete Einheit zum Aufschmelzen und Konditionieren des Kunststoffes von dem Portalsystem aufgrund der hochfunktionsintegrierten Bauweise nicht übernommen. Gestalterische Änderungen sind an dieser Komponente nur unter hohem Aufwand möglich, sodass im Rahmen einer Übernahmevariation ein E3Dv6 Hotend (vgl. E3D-Online Ltd. 2022) eingesetzt wird. Die Komponenten zur FFF-Filamentförderung umfassen die Fördereinheit und die Verschlauchung aus Polytetrafluorethylen (PTFE), die von dem Predatormodell übernommen werden. Zur Filamentspeicherung wird die Drahtform auf Rollen aufgrund der hohen kommerziellen Verfügbarkeit und durch die Übernahme des Hotends sowie der FFF-Fördereinheit übernommen. Weiterhin wird die Funktion und das Lösungsprinzip der beheizten Bauplattform beibehalten. Im Rahmen einer Gestaltvariation werden Aufbau und Schnittstellen an die weiteren Teilsysteme des 3DConFil-Verfahrens angepasst.

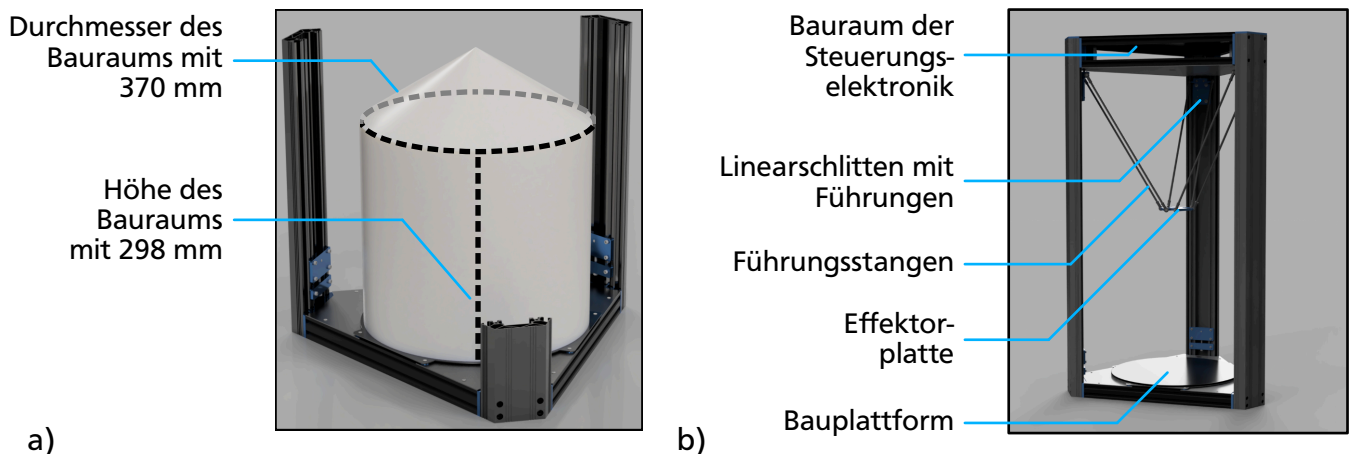


Abbildung 5.19: CAD-Modelle des Portalsystems zur Teilsystemintegration des 3DConFil-Verfahrens mit dargestelltem Bauraum im Originalzustand a) und der Bezeichnung der Komponenten in b), eigene Abbildungen

## Funktionen zur Leitungshandhabung

Die Leitungshandhabung umfasst die mechanischen Teilsysteme zur Bereitstellung der Wirkgrößen (vgl. Abschnitt 5.3). Anhand der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens sind die Wirkgrößen der Fertigungsmaschine zur Handhabung der Leitung das Bereitstellen einer Zugkraft in X-, Y-, und Z-Richtung, einer Förderkraft, einer Einpresskraft sowie die Kräfte zum Klemmen und Trennen der Leitung. Diese Wirkgrößen stellen die Ausgangsfunktionen der Teilsysteme der Fertigungsmaschine dar (vgl. Gramlich 2013, S. 126). Damit ergeben sich bereits die Funktionen *Leitung positionieren*, *fördern*, *einpressen*, *einspannen* und *trennen*. Innerhalb eines Teilsystems erforderliche Funktionen sind nicht unmittelbar erkennbar. Für die Funktion *Leitung fördern* werden weitere Funktionen aufgrund der komplexen Handhabung biegeschlaffer Leitungen ermittelt.

Während der Fertigungsschritte zur Leitungsintegration findet die Vorförderung und Rückförderung der Leitung statt. Zur Bereitstellung dieser Funktion ist eine Fördereinheit erforderlich. Die geförderte Leitungslänge wird in einem Leitungsspeicher abgelegt und wieder entnommen. Dieser Leitungsspeicher wird durch die Funktion *leiten* mit der Fördereinheit bzw. der Positioniereinrichtung verbunden. Damit ergeben sich die weiteren Funktionen *Leitung speichern* und *leiten*. Für die Konzeption der Leitungshandhabung wird die Speicherfunktion näher beleuchtet.

Anhand der Auswahl des Portalsystems ist der Bauraum festgelegt. Der durch eine Änderung der Relativposition von Leitungseintritt und Leitungsausgang erforderliche Vor- und Rückförderweg zur Einstellung der freien Leitungslänge wird mit 400 mm anhand der Bauraumdiagonale von 523 mm abgeschätzt. Das Einspeichern und Ausspeichern der Leitung durch Vorfördern und Rückfördern führt zum Wechsel von Zugbereichen und Druckbereichen in axialer Richtung der Leitung mit der Richtungsumkehr. Durch das biegeschlaffe Verhalten der Leitung tritt in den Druckbereichen Beulen oder Knicken auf, sofern die Leitung nicht radial geführt ist.



---

Die innerhalb des Grundkörpers verbleibende, integrierte Leitungslänge wird mit bis zu 5 m konservativ abgeschätzt. Die Leitungslänge entspricht der entnommenen Länge aus dem Speicher. Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnung der Speichermengen und der unterschiedlichen Förderrichtungen werden zwei Speicher eingesetzt. Die gesamte Leitungslänge wird in einem Hauptspeicher gespeichert während die Speichermenge durch die Relativpositionsänderung von Leitungseintritt und Leitungsausritt in einem Zwischenspeicher aufgenommen und wieder freigegeben wird.

Vor der Ermittlung der Teillösungen wird die Funktion *Leitung positionieren* eingehender betrachtet. Diese wird durch Kräfte in den Raumrichtungen in  $X$ ,  $Y$ , und  $Z$ , beispielsweise durch ein Portalsystem erfüllt. Während der Fertigungsschritte zur Leitungsintegration sind weitere Kräfte zur Positionierung der FFF-Komponenten erforderlich. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit der Funktionsintegration von Leitungspositionierung und des Hotends in einem Teilsystem zur Nutzung von Synergieeffekten durch die mehrfache Verwendung der bestehenden Portalsystemfunktionen überprüft.

### **Integration von FFF-Komponenten und Positioniereinrichtung**

Die Integration der Funktionen zur Leitungspositionierung und der FFF-Komponenten erfordert ein Teilsystem, das am Effektor des Portalsystems montiert ist und den bisherigen Druckkopf ersetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Relativpositionen von FFF-Düse und Leitungsausritt sind zusätzliche Freiheitsgrade erforderlich. Eine erste abstrakte Beschreibung, bspw. eines Drehfreiheitsgrads, besteht nach Kirchner et al. (2022). Zur Ermittlung eines Konzepts für dieses Teilsystem werden die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration betrachtet.

Zur Ableitung der erforderlichen Freiheitsgrade wird zuerst die Integration über mehrere Schichten, also der FFF-Grundkörperaufbau mit simultaner Leitungshandhabung, anhand Abbildung 5.20 betrachtet und anschließend die Integration zwischen zwei Schichten durch das Einpressen der Leitung berücksichtigt. In Abbildung 5.20 a) ist in der Draufsicht eine Position einer kombinierten Einheit aus FFF-Düse und Leitungsausritt nahe am Leitungseintritt in das Bauteil visualisiert. Die FFF-Düse (in Rot dargestellt) befindet sich an einer negativen  $X$ -Position relativ zum Leitungsausritt aus der Positioniereinrichtung. Die Relativposition des Leitungsausritts zwischen Bauteileintritt und FFF-Düse ist so gewählt, dass eine Kollision zwischen FFF-Düse und Leitung vermieden wird. In Abbildung 5.20 b) ist eine Druckposition dargestellt, die weiter vom Leitungseintritt in den Grundkörper entfernt ist und bezogen auf den Leitungseintritt in positiver  $X$ -Richtung liegt. Der Leitungsausritt ist so gewählt, dass die gespannte Leitung nicht mit der FFF-Düse bei Verfahrenswegen in diesem Bauteilbereich kollidiert.

Diese Überlegungen sind für eine beliebige Kombination der Projektionen von Leitungseintritt, Leitungsausritt und der FFF-Düsenposition auf die Oberfläche der Bauplattform durchführbar. Unter Betrachtung der Verbindungsgeraden von Leitungseintritt und Leitungsausritt tritt keine Kollision auf, sofern sich die FFF-Düse nicht auf dieser Geraden oder in einem Bereich um die Gerade befindet. Diese Annahme gilt nicht, wenn sich die FFF-Düse oberhalb des Eintritts der Leitung in den Grundkörper befindet. Diese Kollisionsmöglichkeit ist durch einen Abstand zwischen Kanalwand und Leitung vermeidbar. Für die Gestaltung des Druckkopfs bedeutet diese Überlegung, dass jeder Punkt auf der Bauplattform mit ausreichendem Kollisionsabstand um den Leitungseintritt mittels FFF-Verfahren

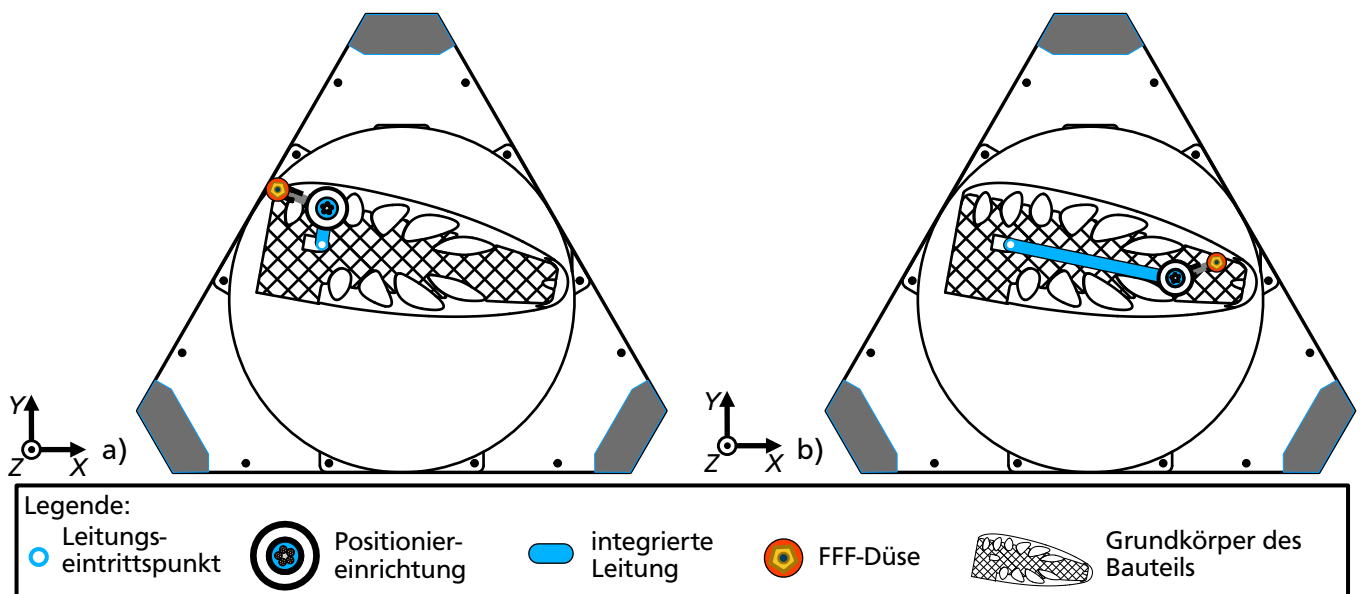


Abbildung 5.20: Mögliche Relativpositionen von Leitungsaustritt der Positioniereinrichtung und der FFF-Düse mit gespannter Leitung zum Leitungseintritt in ein Beispielbauteil in der Draufsicht für verschiedene Druckpositionen in a) und b), eigene Abbildungen

bedruckt werden kann, wenn die FFF-Düse einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Achse des Leitungsaustritts aufweist. Mit diesem Freiheitsgrad ist die Integration der Leitung über mehrere Schichten hinweg möglich. Durch die Integration des Hotends und der Positioniereinrichtung in einem Druckkopf führt jeder Verfahrensweg zum Druck einer Kunststoffbahn zu einer Biegung und Änderung der freien Länge der Leitung entsprechend der Änderung der Relativposition zwischen Leitungseintritt und Leitungsaustritt. Aufgrund der hohen Anzahl der FFF-spezifischen Verfahrenswege steigt die Anzahl der Biegewechselereignisse an. Hierbei ist die Änderung des freien Leitungsverlaufs von der Änderung der Relativposition abhängig, sodass bei kleinen Positionsänderungen kleine Änderungen im Verlauf des freien Leitungsabschnitts auftreten.

Weiterhin variiert die Anzahl der Biegewechselzyklen stark entsprechend der Gestaltung des Grundkörpers und korreliert mit der Anzahl der Schichten, bei denen die Leitung über mehrere Schichten hinweg verlegt wird und an welcher Stelle die Leitung aus der jeweiligen Grundkörperschicht austritt. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Biegewechselereignisse abgeschätzt. Die Abschätzung basiert darauf, dass die Verfahrenswege der FFF-Düse genutzt werden, um die Anzahl der Bewegungen um den Leitungsaustritt zu ermitteln. Der Bauraum wird in Bereiche eingeteilt und ein Bereichswechsel der Düsenposition wird als Biegewechselereignis interpretiert.

Die Abschätzung ist in Anhang A.5 beschrieben und ergibt eine Anzahl der Biegewechselereignisse in der Größenordnung von  $10^5$  Ereignissen. Aufgrund der regelmäßig beschleunigten Positionswechsel während des FFF-Verfahrens wird dieser Wert mit der Zyklenzahl von Schleppketten als Beispiel für elektrische Leitungen verglichen. Hochflexible Leitungen für Schleppketten weisen bei geringem Biegeradius hohe überstehbare Biegewechselzyklenzahlen auf. Die Zyklenzahl für Schleppketten

liegt in der Größenordnung  $>10^6$  (vgl. Bör 2018, S. 27 f.; HELU KABEL GmbH 2015, S. 158), sodass die Verarbeitbarkeit der Leitungen mit dem Konzept des funktionsintegrierten 3DConFil-Druckkopfs für möglich befunden wird. Anhand dieser Ergebnisse ist die Einschränkung der kommerziell erhältlichen Leitungsauswahl möglich.

Die bisherigen Betrachtungen führen zu den Festlegungen, dass die FFF-Düse und die Leistungspositionierung in einem Druckkopf integriert werden und der Druckkopf einen Drehfreiheitsgrad für die FFF-Düse um den Leitungsaustritt aufweist. Nachfolgend wird das Einpressen der Leitung in den Grundkörper betrachtet. Die Integration der Leitung zwischen zwei Schichten beginnt mit dem Einbringen der Leitung entlang einer festgelegten, ebenen Kurve. Die Leitung wird kontinuierlich durch die Leistungsdüse am Druckkopf entlang der Bahn zugeführt, während sie unter Spannung gehalten und durch das Einpresswerkzeug in den Kanal der Leitung eingepresst wird. Das Einpresswerkzeug verläuft innerhalb des Kanals, sodass der tiefste Werkzeugpunkt unterhalb der letztgedruckten Bauteilschicht liegt. Der durch das Einpressen ermöglichte Formschluss positioniert und fixiert die Leitung kontinuierlich innerhalb des Bauteils. Die Druckphase endet bei Erreichen des letzten Einpresspunkts des Werkzeugs.

Die Start- und Endpunkte des Einpressens können innerhalb oder außerhalb des Bauteils liegen. Mit dem Abschluss der Druckphase ist der Übergang in eine Verlegung über mehrere Schichtebenen in positive Z-Richtung oder das Abtrennen der Leitung möglich. In Abbildung 5.21 ist das Einbringen der Leitung in einer additiv gefertigten zur Bauplattform parallelen Schicht dargestellt. In diesem Beispielfall wird die Leitung auf einer Bahn von Außen in das Bauteil, im inneren Volumen auf zwei durch einen Kreisbogen verbundenen Geradenstücke und aus dem Bauteil heraus, eingebracht.

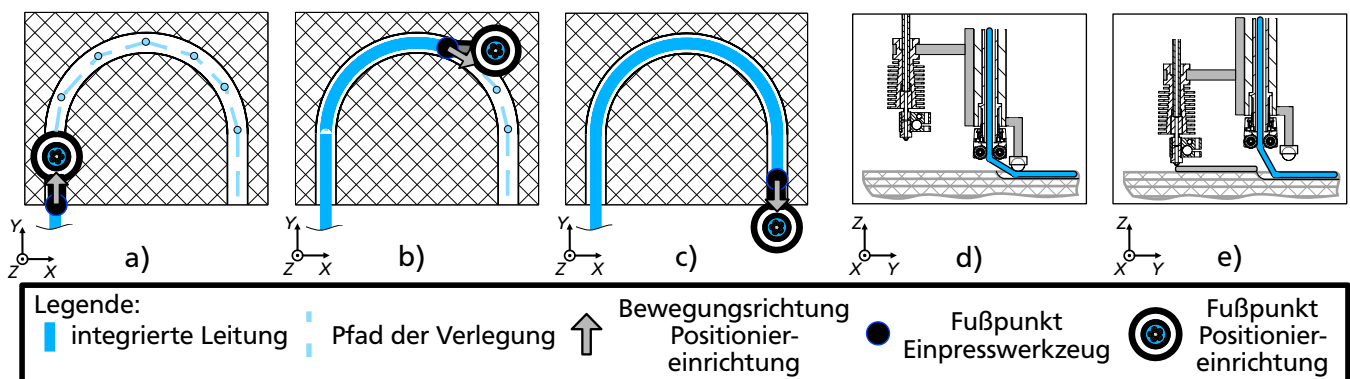


Abbildung 5.21: Schematische Darstellungen der Integration der Leitung bei horizontalem Kanalverlauf am Bauteileintritt in a) bei Kurvenfahrt in b) und am Austritt aus dem Bauteil in c). Hotend- und Einpresswerkzeugposition zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten in d) und über mehrere Schichten in e), eigene Abbildungen a) bis e)

In Abbildung 5.21 a) ist die Positioniereinrichtung und die Einpresseinrichtung mit außerhalb des Betrachtungsbereichs gespannter Leitung zum Zeitpunkt des Eintritts in den Grundkörper dargestellt. Die Positioniereinrichtung befindet sich über dem partiell gedruckten Grundkörper und das Einpresswerkzeug stellt die erste Verbindung der Leitung mit dem Grundkörper her. Die Verfahrenwege werden analog zu den Verfahrenwegen des FFF-Verfahrens erstellt. Dadurch wird der Kanalverlauf

---

durch Geraden approximiert und ist als hellblaue, unterbrochene Linie dargestellt. Die Anfangsbeziehungsweise Endpunkte der Geraden sind als hellblaue, schwarz umrandete Punkte visualisiert, die auf der Mittellinie des Leitungskanals liegen und durch die Positioniereinrichtung nacheinander angefahren werden.

Das Einpresswerkzeug befindet sich in einer spezifischen Winkelstellung, sodass sich das Einpresswerkzeug über der gespannten Leitung befindet. Die Winkelstellung wird ermittelt, indem das Einpresswerkzeug am Anfangspunkt der Geraden so gedreht wird, dass Positioniereinrichtung und Einpresswerkzeug auf der Geraden liegen und die Positioniereinrichtung eine geringere Entfernung zum Endpunkt der Geraden aufweist. Am Anfangspunkt wird der Winkel entsprechend der Bewegungsrichtung, der den Anfangs- und Endpunkt der jeweilig abgefahrenen Geraden verbindet, eingestellt.

Abbildung 5.21 b) bildet einen Zwischenzustand während des Einpressens der Leitung ab. Durch die Approximation der Kanalmittellinie durch Geradenstücke entsteht eine Verdrehung der Positioniereinrichtung in Bezug zur Kanalrichtung. Diese Abweichung von der Kanalmittellinie sinkt mit höherer Geradenzahl und stellt unter der Genauigkeit bestehender Slicer keine Restriktion des Verfahrens dar. Die Abweichung ist in der Abbildung überhöht dargestellt und wird im Folgenden nicht detaillierter betrachtet. Der Endpunkt der Integration zwischen zwei Schichten des 3DConFil-Verfahrens ist in Abbildung 5.21 c) visualisiert. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Einpresswerkzeug innerhalb des Kanals am letzten Endpunkt einer Geraden. Für den hier dargestellten Beispielfall befindet sich die Positioniereinrichtung bereits außerhalb des Grundkörpers. Anhand der Betrachtung wird deutlich, dass die Integration zwischen zwei Schichten durch ein Einpresswerkzeug mit einem rotatorischen Freiheitsgrad um den Leitungsaustritt möglich ist.

Die Kombination von FFF-Düse, Positioniereinrichtung und Einpresseinrichtung erfordert die Möglichkeit des Wechsels zwischen den Fertigungsschritten zur Leitungsintegration. Die Integration über mehrere Schichten erfordert als tiefsten Punkt die FFF-Düse für das Aufbringen des Kunststoffes. Die Durchführung des Fertigungsschritts zur Integration der Leitung zwischen zwei Schichten erfordert das Einpresswerkzeug als tiefsten Punkt. Dies wird beispielsweise durch eine in Z-Richtung einstellbare FFF-Düse möglich. In Abbildung 5.21 d) ist das Hotend in einer oberen Stellung dargestellt, sodass das Einpresswerkzeug der tiefste Punkt des Druckkopfs ist. In Abbildung 5.21 e) ist die FFF-Düse der tiefste Punkt des Druckkopfs und die Integration über mehrere Schichten ist möglich. Mit diesen Festlegungen ist die Konzeption des neuen 3DConFil-Druckkopfs abgeschlossen und im folgenden Abschnitt wird die Konzeption des Gesamtsystems beschrieben.

### **Konzept des Funktionsprototyps**

Nach der Ermittlung möglicher Teillösungen für den funktionsintegrierten Druckkopf werden anhand einer Recherche Teillösungen für die weiteren Funktionen zur Leitungshandhabung ermittelt und diese kombiniert. Zur Förderung der Kombination wurde zur systematischen Suche ein Ordnungsschema eingesetzt (vgl. Gericke et al. 2021a, S. 281 bis S. 285). Ziel ist es, die Teilsysteme modular für differenzierte Weiterentwicklungsmöglichkeiten in neuen Produktgenerationen zu gestalten. Die Teilfunktionen sind in Anhang A.4 zusammen mit etablierten Teillösungen dargestellt und beschrieben.

Ein Beispiel ist die Fördereinheit des kontinuierlichen Filaments und deren besondere Anforderungen aufgrund der hohen Zahl von Richtungswechseln ohne eine Beschädigung der Leitung. In Abbildung 5.22 sind die gewählten Teillösungen des Leitungshauptspeichers als Übernahmevariation des FFF-Filamentspeichers, des mechanischen Zwischenspeichers als Prinzipvariation einer Rolle und dem PTFE-Führungsschlauch als Übernahmevariation der FFF-Filamentleitung dargestellt. Zusätzlich wird die Leitungsumlenkung als Gestaltvariation eines Trageilschuhs und die integrierte Positionier- und FFF-Einheit als Skizze mit dem Portalsystem dargestellt. Für diese Teilsysteme besteht eine festgelegte Reihenfolge aufgrund der Leitungsführung durch das Gesamtsystem. Das Teilsystem zur Einspannung der Leitung ist unterhalb der Bauplattform zur Leitungsintegration ab geringen Aufbauhöhen des Grundkörpers ohne Einschränkung des Bauraums angeordnet.

Für die Teilsysteme der Leitungsförderung und Leitungstrennung besteht ein Zielkonflikt zwischen den möglichen Positionen. In der Abbildung 5.22 sind mehrere Platzhalter zur Markierung von möglichen Einbaupositionen am Portalsystem dargestellt. Durch das biegeschlaffe Verhalten der integrierten Leitungen ist es zielführend, den Antrieb des kontinuierlichen Filaments möglichst am Ende der Förderstrecke, vor dem Leitungsaustritt zu integrieren. Dadurch wird die Länge der Leitung unter Druckspannung minimiert. Durch die Funktionsintegration des 3DConFil-Druckkopfs führt die Anordnung des Teilsystems zur Leitungsförderung zu einer weiteren Erhöhung des Gewichts am Effektor des Portalsystems. Aus diesem Grund wird die Leitungsförderung an der Deckenplatte vorgesehen. An dieser Stelle ist das Portalsystem durch die Deckenplatte besonders steif und zur Abstützung der Reaktionskräfte durch die Leitungsförderung geeignet. Die Streckenlänge zwischen Fördersystem und 3DConFil-Druckkopf, auf welcher die Leitung unter Druckspannung steht, ist mittels eines PTFE-Schlauchs realisierbar.

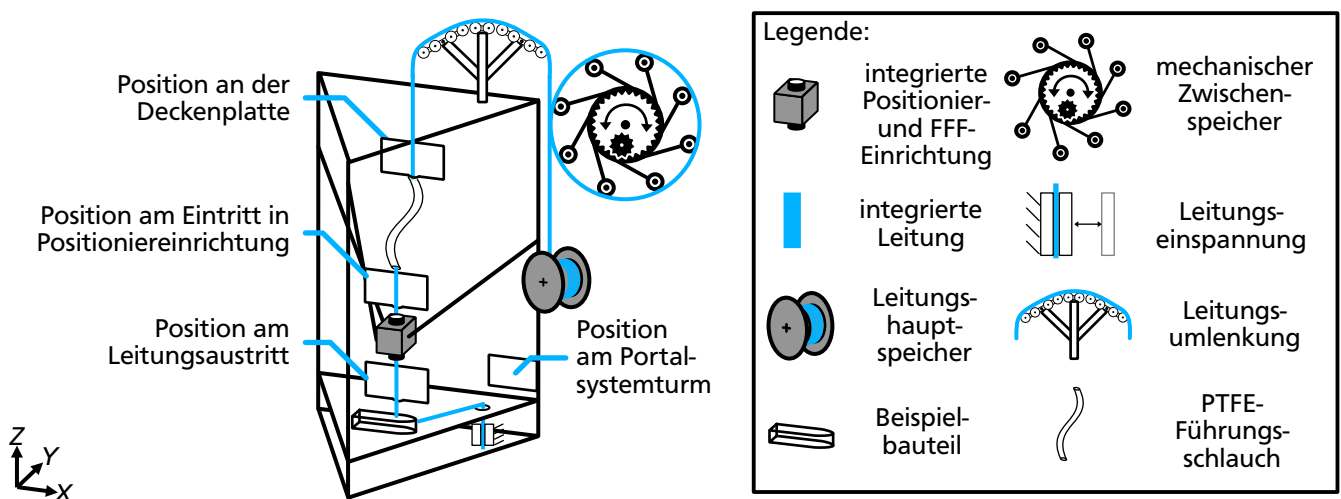


Abbildung 5.22: Positionen der Teilsysteme mit freien Positionen für die Leitungsförderung und die Leitungstrennung, eigene Abbildung

Die Position der Trenneinheit beeinflusst die Leitungslänge zwischen dem Grundkörpereintritt und dem Austritt aus der Trenneinheit, die nach der Fertigung des Bauteils zur Konfektionierung nutzbar ist. Für eine möglichst kurze Länge der Leitung sind die Positionen oberhalb und unterhalb der

---

Positioniereinrichtung geeignet. An diesen Positionen erhöht sich das Gewicht am Effektor des Portalsystems. Eine weitere Unterscheidung besteht in der Relativposition zur Leitungsförderung. Bei Positionen vor der Leitungsförderung ist nach der Leitungstrennung das Einfädeln in die Fördereinheit erforderlich. Bei Positionen nach der Fördereinheit schiebt die Fördereinheit die Leitung durch die nachgelagerten Teilsysteme durch. Die Position des Trennsystems wird auf die Position an der Deckenplatte nach der Fördereinheit oder die Position an einem Portalsystemturm eingegrenzt. Für die Entwicklung des Teilsystems ist diese Eingrenzung aufgrund der ähnlichen Schnittstellen bereits ausreichend. Damit ist die Konzeption des Funktionsprototyps abgeschlossen und im folgenden Abschnitt wird die Teilsystemgestaltung am Beispiel des 3DConFil-Druckkopfs beschrieben.

### 5.4.3 Teilsystemgestaltung anhand des 3DConFil-Druckkopfs

In diesem Abschnitt werden die Funktionen und der Aufbau des integrierten 3DConFil-Druckkopfs vorgestellt. Dem Teilsystem Druckkopf sind die Wirkgrößen der Kräfte zur Leitungspositionierung in den Raumrichtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ , der zur Hotend-Positionierung in den Raumrichtungen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ , die Funktionen des Hotends sowie das Aufbringen der Einpresskraft auf die Leitung zugeordnet. Für jede dieser Teilfunktionen werden im Folgenden Teillösungen vorgestellt und durch die kinematische Kopplung von Einpresswerkzeug und Hotend erforderliche Teilfunktionen abgeleitet.

Die Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens erfordern während des Fertigungsschritts zur Integration über mehrere Schichten zum Grundkörperaufbau mittels FFF-Verfahren, dass die FFF-Düse der tiefste Punkt des Druckkopfs ist. Während der Integration der Leitung zwischen zwei Schichten ist es erforderlich, dass das Einpresswerkzeug den tiefsten Punkt des Druckkopfs bildet. Während des Einpressens tritt das Einpresswerkzeug in den Zentrierbereich des Kanals ein, sodass ein Teil des Werkzeugs in negativer  $Z$ -Richtung unterhalb der Grundkörperoberfläche liegt. Unter Nutzung einer Positioniereinrichtung für beide Funktionsträger ist eine relative Höhenänderung zwischen Einpresswerkzeug und FFF-Düse mit dem Wechsel zwischen den Fertigungsschritten erforderlich.

Eine weitere Teilfunktion anhand der kinematischen Kopplung ergibt sich aus der Relativposition von Leitungsaustritt und Einpresswerkzeug während des Fertigungsschritts der Integration zwischen zwei Schichten und der Relativposition zwischen Leitungsaustritt und FFF-Düse während des Fertigungsschritts der Integration über mehrere Schichten. Die Relativposition von Einpresswerkzeug und FFF-Düse wird um den Leitungsaustritt eingestellt. Der Leitungseintrittspunkt liegt in der Fläche des Grundkörpers. Für eine bestmögliche Ausrichtung von FFF-Düse und Leitung zueinander ist ein Rotationswinkel dieser um Leitungseintritt um mindestens  $360^\circ$  erforderlich. Das Umdrucken der Leitung ist bei einem geringeren Winkelbereich durch die Erhöhung des Kanaldurchmessers und das Biegen der Leitung zur Erhöhung des Abstands zur FFF-Düse möglich. Eine vorherige Gestaltung des Druckkopfs wurde während des Patentierungsprozesses publiziert (vgl. Kirchner et al. 2022, S.10).

Mit den abgeleiteten Teilfunktionen werden die eingesetzten Teillösungen beschrieben. Begonnen wird mit dem Effektor, der die Schnittstelle zum Portalsystem bildet. Das Einstellen der Relativpositionen der Werkzeuge zum Leitungsaustritt ist für den Druckkopf konstruktiv bestimmend und wird zuerst durchgeführt. Eine Lösung ist die Rotation der Werkzeuge auf Bahnen um den Leitungsaustritt. Die Leitung verläuft durch Effektor und Druckkopfachse bis zum Leitungsaustritt am unteren Ende.

Der Leitungsaustritt ist entsprechend der Positioniereinrichtung zur Überprüfung des Leitungsverhaltens gestaltet und weist vier Rollen mit Achsen in einer parallelen Ebene der X-Y-Ebene auf, welche zusätzlich um die Z-Achse drehbar gelagert sind (vgl. Abschnitte 5.2.2 und A.3). Die Teilfunktionen für das FFF-Verfahren werden durch die Integration des E3Dv6-Hotends (vgl. E3D-Online Ltd. 2022) bereitgestellt. Der rotatorische Freiheitsgrad von Einpresswerkzeug und Hotend um die Achse der Leitungsführung ist durch eine Wälzlagerung ausgeführt. Die Hülse zur Befestigung der FFF-Düse ist mit einer angestellten O-Lagerung ausgeführt, die durch das Verschrauben von Achse und Effektor vorgespannt wird. Eine Schnittansicht des Druckkopfs ist in Abbildung 5.23 ohne Knickschutz und bspw. Überwurfmutter am Anschlussgewinde dargestellt.

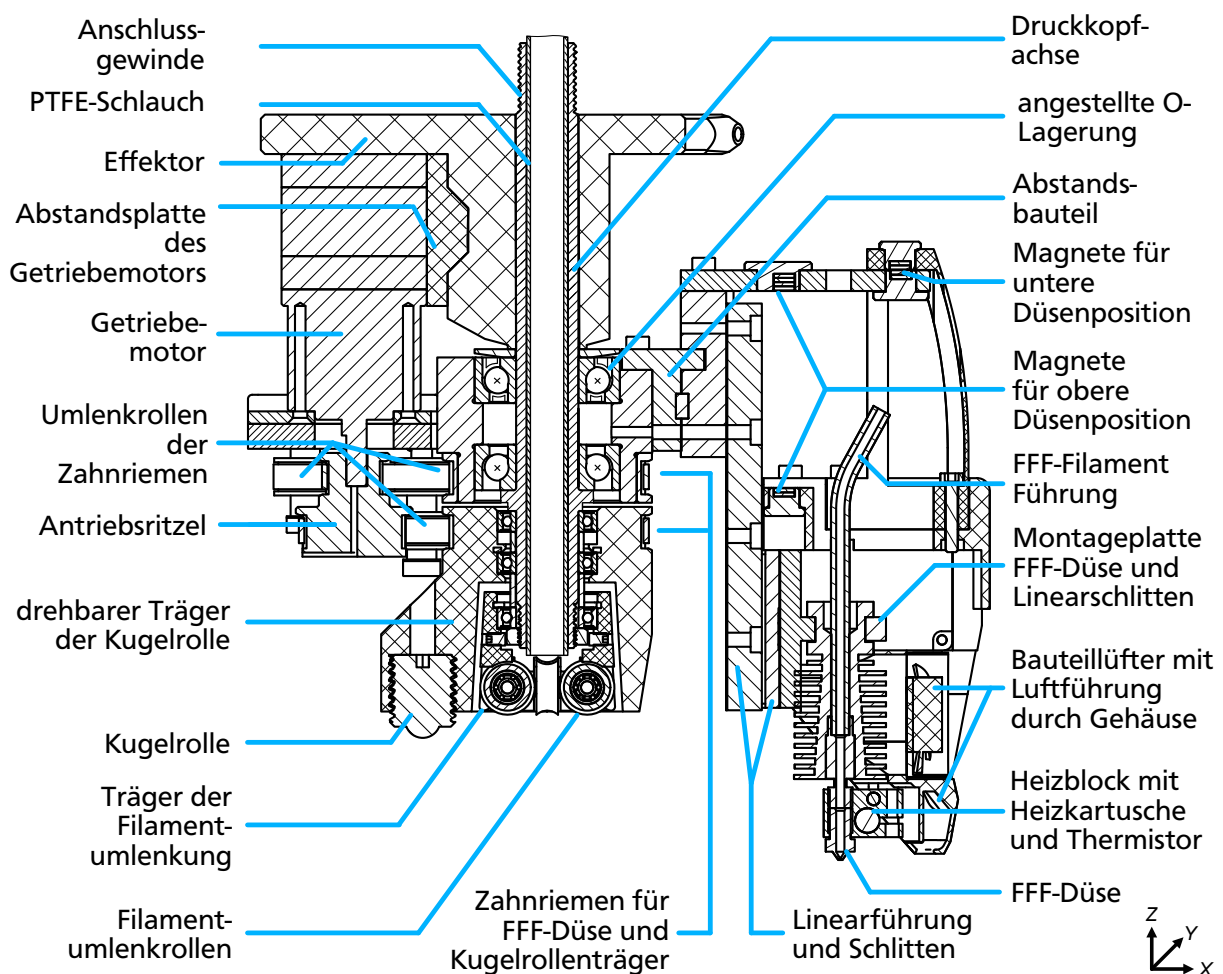


Abbildung 5.23: Schematische Schnittansicht des Druckkopfs für das 3DConFil-Verfahren, eigene Abbildung

Während der Integration zwischen zwei Schichten wird das Einpresswerkzeug hinter der Leitung durch den Zentrierbereich des Kanals geführt und stellt den tiefsten Punkt des Druckkopfs dar. Das Hotend wird während dieses Fertigungsschritts nicht eingesetzt. Während der Integration über mehrere Schichten wird das Hotend verwendet und das Einpresswerkzeug nicht. Das bedeutet, dass



eine Steuerung der Rotationsfreiheitsgrade von Einpresswerkzeug und Hotend nicht gleichzeitig erforderlich ist. Dadurch sind beide Freiheitsgrade miteinander koppelbar und es ist ein Antrieb ausreichend. Für die Einstellung einer definierten Position der kinematisch gekoppelten Werkzeuge ist es erforderlich, dass die Kombination aus Antrieb und weiteren Komponenten bewegungstreu ist. Hierzu werden Zahnriemen eingesetzt, deren Übersetzungen mit den Durchmessern von Antriebsritzel und Abtriebsrad für beide Werkzeuge einzeln festgelegt werden. Als Antrieb wird ein Schrittmotor entsprechend den Portalsystemmotoren aufgrund der gleichen Steuerungslösung mit Planetengetriebe zur Erhöhung des verfügbaren Drehmoments trotz kompakter Bauweise eingesetzt.

Das Einpresswerkzeug leitet eine Kraft in negativer Z-Richtung in die Leitung ein. Wird der Druckkopf und damit das Einpresswerkzeug gleichzeitig entlang der Kanalachse verfahren, bewegt sich das Werkzeug entlang des Leitungsmantels. Diese Bewegung führt zu einer Reibkraft am Einpresswerkzeug in der Ebene des Kontaktpunkts von Einpresswerkzeug und Leitung mit parallel zur Richtung der Einpresskraft stehendem Normalenvektor. Die Richtung der Reibkraft ist der Bewegungsrichtung des Einpresswerkzeugs entgegengesetzt.

Zur Vermeidung von Beschädigungen des Leitungsmantels und zur Reduktion der Kräfte wird eine Kugelrolle als Einpresswerkzeug verwendet. Die räumliche Ausdehnung dieser Kugelrolle ist deutlich geringer im Vergleich zum Hotend. Die Integrierbarkeit des Hotends ist auf einer Bahn mit größerem Radius um die Leitungsführungsachse aufgrund des größeren Bauvolumens des Druckkopfs möglich. Die FFF-Düse ist in der Höhe mit einer Linearführung verstellbar ausgeführt. In der unteren Position ist die FFF-Düse der tiefste Punkt des Druckkopfs. In der oberen Position ist die Kugelrolle zum Einpressen der Leitung der tiefste Punkt. Die Haltekraft in der oberen und unteren Hotendposition wird durch Dauermagnete bereitgestellt. In Abbildung 5.24 sind die Druckkopfpositionen des CAD-Modells dargestellt.

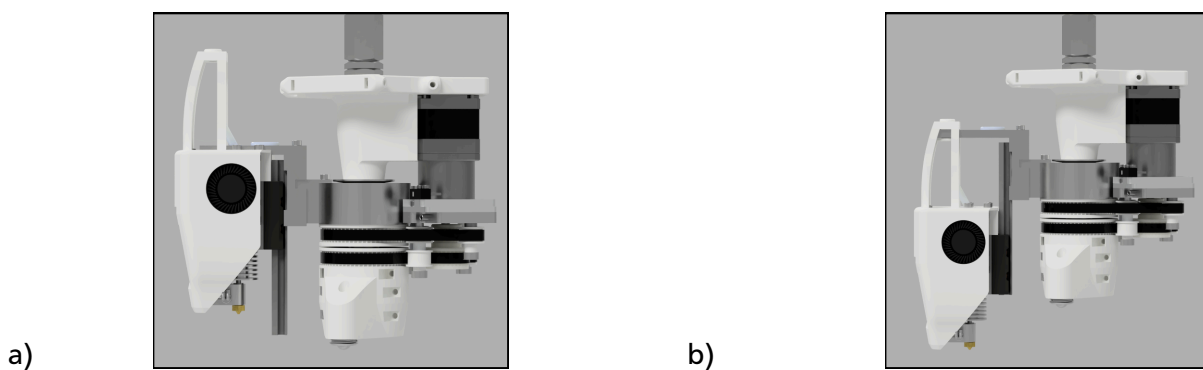


Abbildung 5.24: CAD-Modell in den Positionen des Hotends am 3DConFil-Druckkopf mit der Position zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten in a) und zur Integration über mehrere Schichten in b), eigene Abbildungen

Die Höhenverstellung des Hotends am Druckkopf wird durch einen Werkzeugwechsel ausgelöst, der einen Ausleger am Rahmen des Prototyps nutzt. Das Hotend wird durch das Berühren dieser Kante relativ zu den weiteren Bauteilen des Druckkopfs in die obere oder untere Position verschoben, bis die Düse magnetisch in Position gehalten wird. In Abbildung 5.24 a) ist das Hotend in der



oberen Position zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten dargestellt. Die Kugelrolle ist der tiefste Punkt des Druckkopfs. In Abbildung 5.24 b) ist das Hotend in der unteren Position zur Leitungsintegration über mehrere Schichten visualisiert. In dieser Position ist die FFF-Düse der tiefste Punkt des Druckkopfs, liegt ca. 35 mm unterhalb des Leitungsaustritts und befindet sich auf einer Kreisbahn um die Austrittsachse mit einem Durchmesser von ca. 141 mm.

Die Druckkopfgestaltung weist neue Freiheitsgrade durch das rotierbare Hotend und das rotierbare Einpresswerkzeug auf. Zur Beschreibung des Maschinenzustands wird die Festlegung des Drehwinkels beschrieben. Das Koordinatensystem und der Koordinatenursprung sind in Abbildung 5.25 innerhalb des Bauraums des Funktionsprototyps mit einer beliebigen Position des Druckkopfs dargestellt. Die Steuerung der Maschine basiert auf einem festgelegten Koordinatensystem, welches während des Verfahrens änderbar ist.

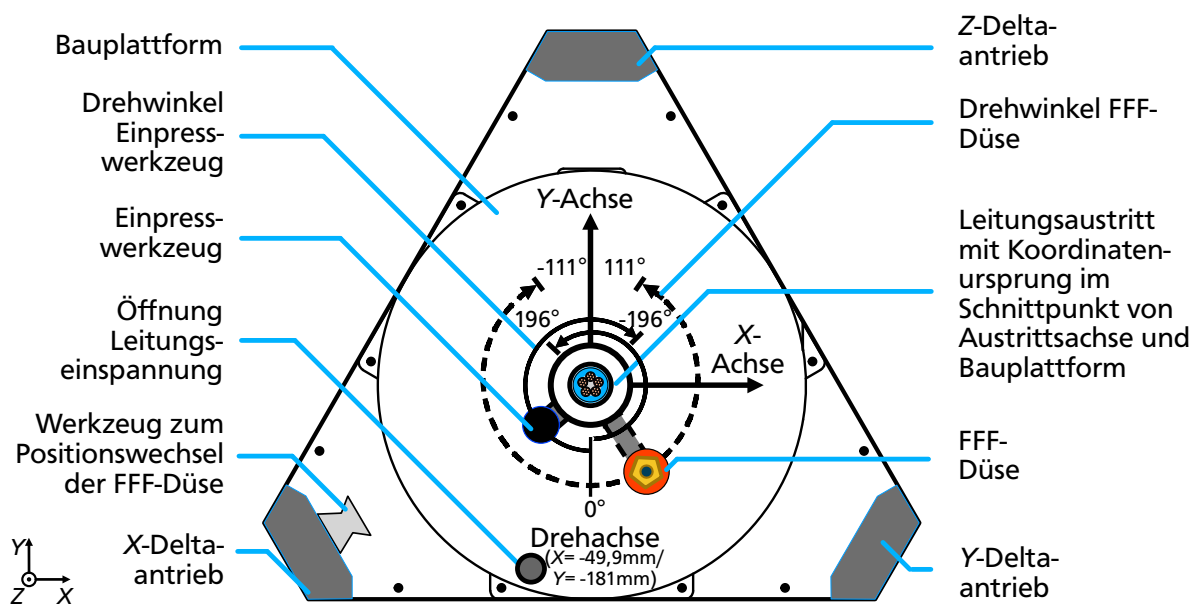


Abbildung 5.25: Koordinatensystem und Drehfreiheitsgrade des Druckkopfs als schematische Darstellung, eigene Abbildung in Anlehnung an Steffan et al. (2023a, S. 3)

Die Wahl des Koordinatensystems und dessen Ursprung beeinflusst die Steuerungsbefehle während der einzelnen Druckphasen. Im Rahmen des 3DConFil-Verfahrens wird nach Steffan et al. für die Bewegung des Druckkopfs durch das Portalsystem ein kartesisches Koordinatensystem gewählt. Der Ursprung liegt im Mittelpunkt der runden Bauplattform des Portalsystems. Die X-Achse ist parallel zur Portalsystemkante mit dem kürzesten Abstand zur Öffnung der Leitungseinspannung. Die Z-Koordinate  $Z = 0$  mm liegt auf der Bauplattformoberfläche. In diesem Koordinatensystem liegt der Mittelpunkt der Öffnung des Einspannsystems bei  $X = -49,9$  mm,  $Y = -181$  mm und  $Z = 0$  mm. Hinzu kommt die Drehung der FFF-Düse und des Einpresswerkzeugs in einem mitbewegten Koordinatensystem. (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 2 f.)

Die Drehachse dreht um den Achsmittelpunkt der Positioniereinrichtung, die mit dem Verfahren des Druckkopfs in den drei Raumrichtungen mitwandert. Die Drehachse wird nach Steffan et al. für

---

den Winkel der FFF-Düse und den Winkel des Einpresswerkzeugs verwendet. Die 0° Position des Drehwinkels ist auf jeder Druckkopfposition auf der jeweiligen zur Y-Achse parallelen negativen Richtung und wird mit dem Uhrzeigersinn positiv gezählt. Damit ergibt sich für die FFF-Düse ein Drehbereich von  $-111^\circ$  bis  $111^\circ$  und für das Einpresswerkzeug von  $-196^\circ$  bis  $196^\circ$ . (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 2 f.)

Mit der Gestaltung des Teilsystems Druckkopf und der Festlegung des Koordinatensystems aufgrund der neuen Freiheitsgrade der Fertigungsmaschine wird der Funktionsprototyp des 3DConFil-Verfahrens beschrieben. Die weiteren entwickelten Teilsysteme sind in Anhang A.6 aufgeführt.

#### 5.4.4 Der 3DConFil-Funktionsprototyp

In den Abschnitten 5.4.2 bis 5.4.3 und in den Anhängen A.4 und A.6 wurde von der Auswahl des Portalsystems über die Konzeption die Gestaltung der Teilsysteme beschrieben. Für den sicheren und robusten Betrieb des Funktionsprototyps ist eine Schutzeinrichtung in Form einer Einhausung vorgesehen. Mit dieser wird der Eingriff in bewegte Teilsysteme verhindert und die Verbesserung der Druckbedingungen des FFF-Verfahrens durch die Reduktion der Umgebungsbedingungen, beispielsweise Zugluft, ermöglicht. Die Steuerungselektronik zur Verarbeitung der verfahrensspezifischen Steuerungsbefehle ist im erweiterten oberen Bereich der Einhausung angeordnet. Aufgrund der Schnittmenge zur additiven Fertigung und dem Einsatz von Schrittmotoren in den Teilsystemen wird ein Duet3-Mainboard mit einem 3HC-Expansionboard (vgl. Duet3D Limited 2024) unter Nutzung der Firmware RepRap 3.X (vgl. RepRap contributors 2020) eingesetzt. Die Bildschirmdarstellung der Steuerungsoberfläche ermöglicht ein Raspberry Pi 3 (vgl. Raspberry Pi Ltd. 2023).

Die Einhausungskomponenten werden mit dem Portalsystem verbunden. Für die Steuerung des Funktionsprototyps wird ein berührungsempfindlicher Flachbildschirm mit drahtloser Tastatur-Maus-Kombination an einem Handbedienteil vorgesehen und mit Steuerungstastern zur Maschinensteuerung während des Einrichtbetriebs erweitert. Die Einhausung ist in Abbildung 5.26 von zwei verschiedenen Ansichten dargestellt. In Abbildung 5.26 a) ist der Zugang zum Bauraum und in Abbildung 5.26 b) der Zugang zum Zwischenspeicher und den Hauptspeichern von FFF-Druckfilament und integrierter Leitung (Rendering vorveröffentlicht (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 3)) visualisiert. Das Handbedienteil ist über einen Ausleger zur Seite schwenkbar und in der Höhe verstellbar ausgeführt.

Ein automatisiertes Trennsystem wurde in Form einer Variation des Klemmsystems gestaltet. Dieses ist im Rahmen dieser Entwicklung innerhalb des Funktionsprototyps aufgrund der zusätzlichen Komplexität in der Leitungsführung nicht integriert. Trennpositionen sind zwischen der Leitungsfördereinheit und dem Druckkopf sowie am Rahmen des Portalsystem zielführend. Die Montage und Demontage der Teilsysteme ist mit etabliertem Werkzeug möglich und in dem bisherigen Testbetrieb ist deren Wartbarkeit gegeben. Im Zuge der Einsatzzeit werden detaillierte Rückschlüsse möglich.

Mit der Gestaltung und Fertigung des Funktionsprototyps wird die physische Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit beendet. In Bezug auf den Entwicklungsaufwand wurden das Portalsystem, die FFF-Komponenten und der Leitungshauptspeicher als Übernahmevariation übernommen. Die Teilsysteme zur Leitungsförderung, Leitungsführung und -umlenkung wurden im Rahmen einer Gestaltvariation

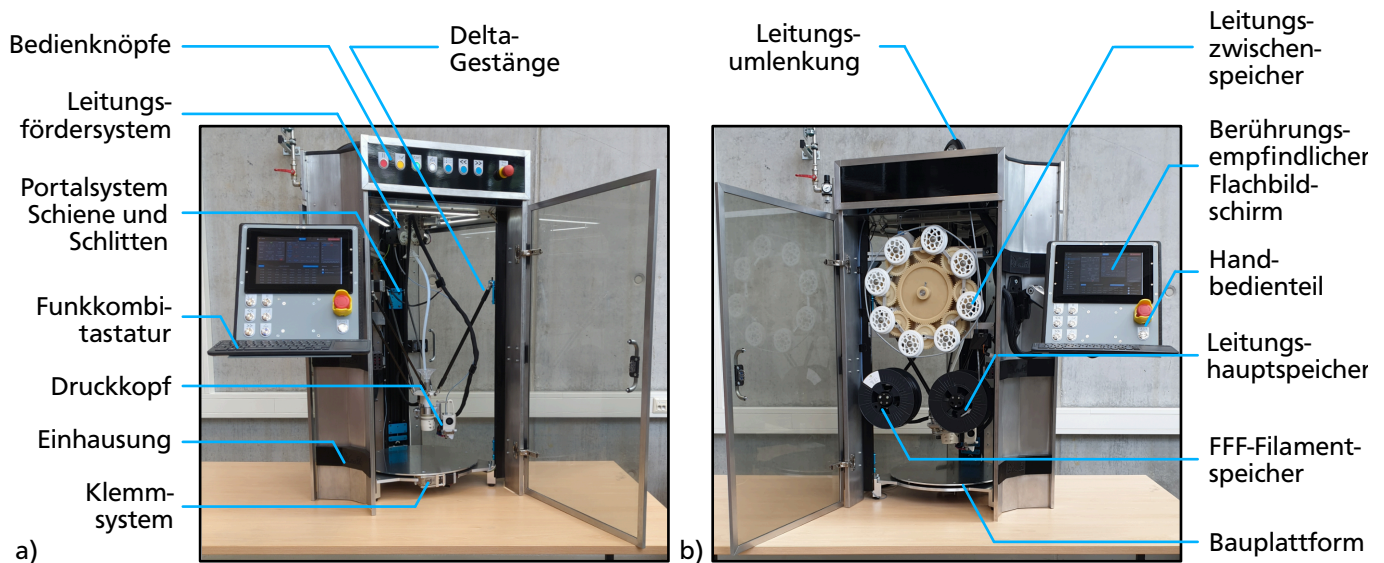


Abbildung 5.26: Funktionsprototyp mit den Kernkomponenten des 3DConFil-Verfahrens, bestehend aus dem Druckkopf, der Leitungs-fördersystem, dem Zwischen- und dem Hauptspeicher in der Einhausung zur Reduktion von Umgebungseinflüssen anhand des Zugangs zum Bauraum in a) und zum Zwischen- und dem Hauptspeicher in b), eigene Abbildungen

an die erforderlichen Wirkgrößen angepasst. Der Funktionsprototyp stellt die geforderten Wirkgrößen zur Durchführung der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens bereit. Aufgrund der Integration von FFF-Komponenten, der Positioniereinrichtung und der Einpresseinrichtung in einem Druckkopf besteht ein Modul zur Adaptierung, beispielsweise für weitere Portalsysteme. Durch diese Integration liegt das Gewicht des Druckkopfs an der Grenze der mit dem Portalsystem stellbaren Kräfte. Aufgrund der Lagerung der Deltakinematik tritt ein Verkippen des Druckkopfs auf, sodass das Bauvolumen der fertigmöglichen FFF-Bauteile begrenzt ist. Hierzu bestehen die Möglichkeiten der Änderung der eingesetzten Lager, einer Versteifung der Portalsystemstangen oder der Wechsel auf ein alternatives Portalsystem. Aufgrund der Gestaltung des Druckkopfs sind neben Portalsystemen mit Deltakinematik zusätzlich Portalsysteme mit kartesischer Kinematik geeignet. Die Fertigungsmaschine verletzt keine der gestellten Anforderungen (vgl. Tabelle 5.5). Im Folgenden wird der digitale Entwicklungsumfang und die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens beschrieben.

### 5.4.5 Der digitale Entwicklungsumfang

In diesem Abschnitt wird der Entwicklungsumfang der digitalen Komponenten und die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens beschrieben. Anschließend wird die Erstellung der hybrid-integrierten additiv gefertigten Bauteile und der Aufbau des Programms zur Generierung der Steuerungsbefehle, des 3DConFil-Parsers, dargelegt. Das Entwicklungsziel der digitalen Komponenten ist die Bereitstellung der für das 3DConFil-Verfahren spezifischen Steuerungsbefehle für beliebige Bauteilgeometrien, Leitungsverläufe und Leitungen bei möglichst hoher Automatisierung der einzelnen Schritte. Dieses Ziel und weitere Randbedingungen werden im Folgenden ausgeführt und in Anforderungsform in Tabelle 5.6 dokumentiert.

Eine Anforderung besteht im Funktionsumfang der Software zur Bereitstellung von Steuerungsbefehlen für verschiedene Bauteilgeometrien und Leitungen. Diese Befehle beinhalten beispielsweise Logiken für die Leitungshandhabung bestehend aus Verfahrenswegen unter Berücksichtigung der Kollisionsvermeidung sowie der Vorförderung bzw. Rückförderung der Leitung. Diese stellt eine Festforderung aufgrund des hohen Einflusses auf die realisierbaren Verfahrenspotentiale dar. Neben dem bisherigen Umfang wird das Fertigungsverfahren im Rahmen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung erweitert und optimiert. Diese Weiterentwicklungen führen zu neuen Funktionen der Software und zu neuen Produktgenerationen der Fertigungsmaschine. Aus diesen Entwicklungsbestrebungen wird die Anforderung der Erweiterbarkeit von Softwarekomponenten abgeleitet.

Zur Reduktion des Entwicklungsaufwands wird, sofern möglich, die Nutzung bereits bestehender Software angestrebt. Die Nutzung ist beispielsweise im Bereich der bestehenden Software der digitalen FFF-Prozesskette gegeben. Aus dieser Integrierbarkeit folgt die Schnittstellenkompatibilität zu vorgelagerten und nachgelagerten Softwareschritten. Die Steuerungsbefehle werden an die Maschinensteuerung in Form von G-Codes übermittelt. Die Variationsvielfalt aus der Bauteilgeometrie, der Bauteilorientierung und den Werkzeugpfaden der FFF-Düse führt zu druckauftragsspezifischen Steuerungsbefehlen in der jeweiligen Steuerungsdatei. Zur Fertigung eines FFF-Bauteils ist durch die hohe Steuerungsbefehlanzahl eine händische Anpassung mit vertretbarem Aufwand nicht zielführend und fehleranfällig, sodass die automatisierte Steuerungsbefehlgenerierung (vgl. bestehende Software, bspw. Cura (Ultimaker B.V. 2023)) erforderlich ist.

Zusätzlich zur Nutzung wird die 3DConFil-spezifische Software und deren Softwareumgebung aufgrund neuer Optimierungen, Fehlerbehebungen und der Verbesserung der Quelltextstruktur stetig weiterentwickelt. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Modifikation der 3DConFil-spezifischen Software bzw. der Schnittstellen als Reaktion auf Weiterentwicklungen der Softwareumgebung. Damit ist die zeitpunktungebundene und bereichsweise Wartbarkeit der 3DConFil-spezifischen Software eine Schlüsseleigenschaft. Eine weitere Verbesserung der Wartbarkeit ist durch die Lesbarkeit der Software in Klartextform möglich. Zur Sicherstellung der Flexibilität und Adaptierbarkeit der Software wird die Nutzung von engl. *open source* lizenzierter Software angestrebt.

Tabelle 5.6: Anforderungsliste des 3DConFil-Verfahrens zur Softwarekette

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
3DConFil-spezifische Software (S)	S1	FF	Funktionsumfang	Erzeugung der Steuerungsbefehle für verschiedene Referenzmaterialien.
	S2	FF	Erweiterbarkeit	Die Funktionen der Softwarekomponenten sind für Verfahrenserweiterungen modifizierbar.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle 5.6 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
	S3	FF	Integrierbarkeit	Die Softwarekomponenten nutzen Funktionen bestehender Software im Bereich des FFF-Verfahrens zur Aufwandsreduktion.
	S4	FF	Schnittstellenkompatibilität	Die Integrierbarkeit wird durch Schnittstellen zu vorgelagerten und nachgelagerten digitalen Prozessschritten kompatibel.
	S5	FF	Automatisierbarkeit	Die Erstellung der Steuerungsbefehle erfolgt automatisiert ohne händische Korrekturen.
	S6	FF	Wartung	Die Wartung der Softwarekomponenten ist zeitungebunden und abschnittsweise möglich.
	S7	W	Lesbarkeit	Die Gestaltung der Implementierung der Softwarekomponenten ermöglicht die Überprüfung des Quellcodes.
	S8	ZF	Softwarelizenz	Die eingesetzte und entwickelte Software ist im Rahmen eines open source Ansatzes vollständig einsehbar und modifizierbar. Die verwendete Software ist ohne Kauflizenz verfügbar.

#### 5.4.6 Digitale Komponenten zur Steuerungsbefehlgenerierung

Als Ausgangspunkt für die Softwareentwicklung der digitalen Komponenten wird aufgrund des Einsatzes des FFF-Verfahrens die digitale Prozesskette der additiven Fertigung (vgl. Abschnitt 2.2) gewählt. Zu Beginn wird die digitale Softwarekette auf einen geeigneten Eingriffspunkt überprüft. Daran schließt sich die Beschreibung der Softwareschnittstellen, die Betrachtung der Konstruktion der leitungintegrierten Bauteile sowie die Erstellung der Steuerungsbefehle an.

##### Die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens

Das 3DConFil-Verfahren basiert für den Grundkörperaufbau auf dem FFF-Verfahren. Aus diesem Grund wird die digitale Prozesskette des FFF-Verfahrens herangezogen, um durch eine Modifikation dieser Prozesskette die Steuerungsbefehle des 3DConFil-Verfahrens zu erzeugen. Zur Ermittlung einer Lösung der Steuerungsbefehlgenerierung sind in Anhang A.7 die verschiedenen Eingriffspunkte in die digitale Prozesskette identifiziert und der Entwicklungsaufwand abgeschätzt. Anhand dieser Abschätzung bei Eingriff in die jeweiligen digitalen Prozesssteile wurde zur Generierung der 3DConFil-spezifischen Steuerungsbefehle die Modifikation eines für das FFF-Verfahren erstellten

G-Codes ausgewählt. Die digitale 3DConFil-Prozesskette besteht aus der Modellierung des hybrid-integrierten additiv gefertigten Bauteils in etablierter CAD-Software (bspw. von Autodesk Fusion 360 (vgl. Autodesk Inc. 2023a) und Inventor (vgl. Autodesk Inc. 2023b) oder Siemens NX (vgl. Siemens AG 2024)).

Das exportierte Schnittstellenmodell wird in etablierter Slicersoftware (bspw. Cura (vgl. Ultimaker B.V. 2023)) für den Druck vorbereitet und alle FFF-spezifischen Verfahrensparameter festgelegt. Der erstellte G-Code wird über eine für das 3DConFil-Verfahren entwickelte Software modifiziert und einer bestehenden, konfigurierten Maschinensteuerung zugeführt. Das Entwicklungskonzept stellt die Integrierbarkeit der Entwicklungen in die bestehende digitale Prozesskette des FFF-Verfahrens sicher und ist bezüglich der Schnittstelle zu anderer Slicersoftware und Maschinenfirmware kompatibel. Die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens ist in Abbildung 5.27 visualisiert.

Die zwischen der Slicersoftware und der Maschinensteuerung entwickelte Softwarekomponente nutzt den FFF-spezifischen G-Code zur Berechnung der für das 3DConFil-Verfahren notwendigen Steuerungsbefehle und wird im Folgenden mit *3DConFil-Parser* bezeichnet. Der modifizierte und erweiterte G-Code wird auf dem vorbereiteten Funktionsprototyp importiert und das 3DConFil-Verfahren kann durchgeführt werden. Nach der Fertigung sind, ähnlich dem FFF-Verfahren, Post- und Nachbearbeitungsprozesse, beispielsweise das Abtrennen und Konfektionieren der integrierten Leitung, möglich und die Prozesskette schließt mit dem gefertigten Bauteil. Im Folgenden wird die Konstruktion der Bauteile mit dem Ziel der Unterscheidung neu zu treffender Festlegungen beschrieben. Der Abschnitt schließt mit einem Überblick über die Parsersoftware.

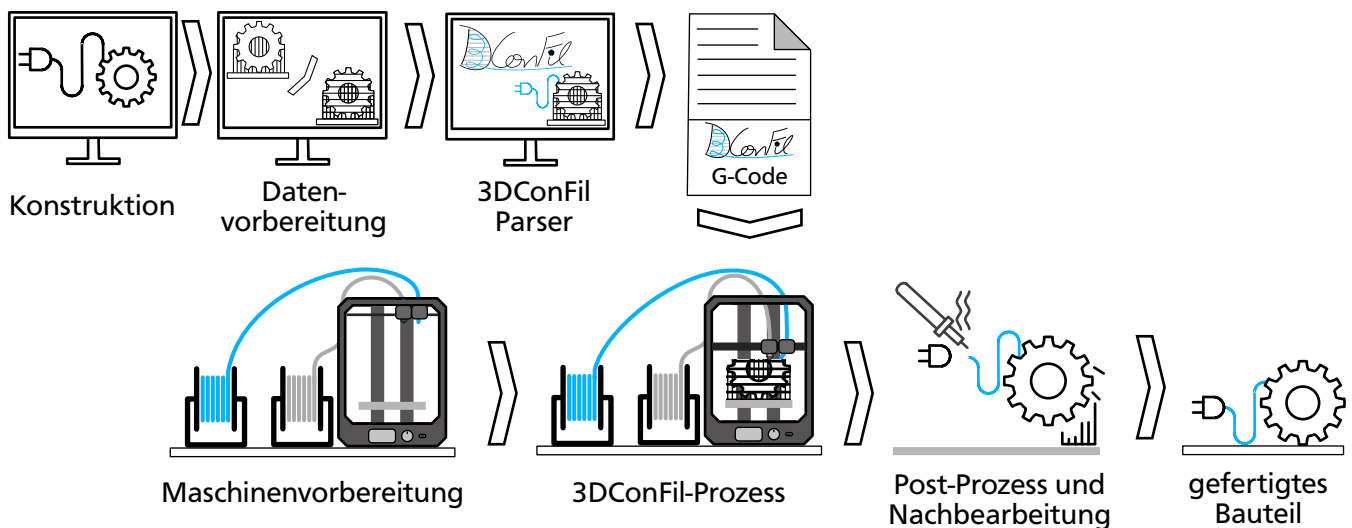


Abbildung 5.27: Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens: Verknüpfung der digitalen Prozesskette mit der Fertigungsmaschine, den Halbzeugen und dem Druckprozess mit schematischer Darstellung der additiven Prozesskette angelehnt an Kumke (2018, S. 10) adaptiert für das 3DConFil-Verfahren, eigene Abbildung

---

## Konstruktion der hybrid-integrierten additiven Bauteile

Das 3DConFil-Verfahren erfordert analog dem FFF-Verfahren zur Durchführung ein digitales Produktmodell. Für die digitale Modellierung des Bauteils werden aus diesem Grund CAD-Softwarelösungen eingesetzt. Dieses digitale Produktmodell ist der Ausgangspunkt für die Teile der digitalen Prozesskette. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Software Fusion 360 (vgl. Autodesk Inc. 2023a) verwendet. Die Modellierung ist auch mit anderer vergleichbarer CAD-Software (Softwarebeispiele sind Siemens NX (vgl. Siemens AG 2024) und Inventor (vgl. Autodesk Inc. 2023b)) möglich.

Für das 3DConFil-Verfahren wird während der Konstruktion die Geometrie des additiv gefertigten Grundkörpers sowie die Kanalform und der Kanalverlauf festgelegt. Die Erstellung des Grundkörpers entspricht der des FFF-Verfahrens mit den entsprechenden Berücksichtigungen zur Fertigbarkeit (vgl. Abschnitt 2.2.2) und den Verfahrensrestriktionen (vgl. Abschnitt 2.4). Nachfolgend wird der gewünschte Leitungsverlauf durch das Bauteilvolumen als Linie modelliert, entlang derer die verschiedenen Kanalformen entsprechend des hybriden Fertigungsschritts extrudiert werden. Neben den gestalterischen Möglichkeiten werden in diesem Schritt Maschinenrestriktionen, beispielsweise der verfügbare Bauraum, beachtet. Die Unterstützung der Kanalgestaltung ist zum Beispiel durch ein engl. *Add-In* in der CAD-Software möglich.

Die Bauteilorientierung während der späteren Fertigung legt die Fertigungsschritte zur Leitungsintegration und damit die Kanalgeometrien und die Orientierungen der Kanalgeometrien innerhalb des Bauteils fest. Dadurch ist die Berücksichtigung der Bauteilorientierung während der hybrid-integrierenden additiven Fertigung notwendig. Gleichzeitig beeinflusst die Art der Modellierung, wie das Bauteil durch bestehende Slicer-Software interpretiert wird und damit den erstellten G-Code.

Zur Unterscheidung nach Steffan et al. zwischen additiv gefertigtem Bauteil und integrierter Leitung sowie zur Aufwandsreduktion wird die Leitung nicht in vollem Durchmesser sondern als Leitungsrepräsentation in der CAD-Software modelliert. Der Außendurchmesser der Leitungsrepräsentation wird unabhängig von der integrierten physischen Leitung zu 0,33 mm festgelegt. Durch den geringen Außendurchmesser wird der Aufwand zur Generierung der 3DConFil-Steuerungsbefehle reduziert. (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 1 bis S. 147)

## Datenvorbereitung des 3DConFil-Verfahrens

Dieser Abschnitt wurde bereits im Whitepaper von Steffan et al. (2023a) zum Quellcode des 3DConFil-Parsers vorveröffentlicht. Zur Verbesserung des Verständnisses der Funktionsweise der digitalen Prozesskette wird an dieser Stelle ein Teil des Whitepapers wörtlich wiedergegeben.

”Wurde das Bauteil in der CAD-Software gestaltet und exportiert, erfolgt der Import in den nächsten Teil der digitalen Prozesskette, der Slicersoftware. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Slicer der Slicer Cura (Ultimaker B.V. 2023) aufgrund der open source Lizenz und der breiten Basis zur Weiterentwicklung genutzt. Im Rahmen der 3DConFil-Prozesskette wird der Slicer zur Positionierung und Orientierung [des Bauteils] innerhalb des Bauraums, der Einstellung aller FFF-Parameter, für den Aufbau des Grundkörpers und der Unterscheidung von Leitung und Grundkörper verwendet. Die

---

Unterscheidung erfolgt durch die Konfiguration der Druckerhardware mit zwei FFF-Extrudern. Der eine physisch existierende [sic] FFF-Extruder wird dem Modell des Grundkörpers zugewiesen und ein nicht physisch existierender [sic] FFF-Extruder wird der Leitungsrepräsentation zugewiesen. Damit entstehen während des Slicingprozesses zwei Verfahrensbereiche. Der eine Verfahrensbereich ist für die Extrusion des Materials des Grundkörpers und damit dem physisch existierenden FFF-Extruder zugewiesen, der andere Verfahrensbereich der Leitungsrepräsentation und damit dem physisch nicht existierenden FFF-Extruder.

Die Zuweisung der beiden Extruder zu den jeweiligen Körpern während des Slicingprozesses führt zu einem Werkzeugwechsel zwischen den Extrudern zu genau dem Zeitpunkt, bei dem der Verfahrenswegwechsel zwischen der Leitungsrepräsentation und dem Grundkörper stattfindet. [Dieser Wechsel ermöglicht die Identifikation der Verfahrensbahnen von der Leitungsrepräsentation und dem Grundkörper.] Nachfolgend lassen sich dadurch die G-Code Befehle der Leitungsrepräsentation und des Grundkörpers voneinander trennen. Dieses Vorgehen führt durch die ausgeführten Werkzeugwechselbefehle zu den Schlüsselinformationen für die Interpretation des FFF-spezifischen G-Codes im 3DConFil-Parser, die beispielsweise zur Identifikation der Integrationsart verwendet werden.

Nach erfolgter Zuweisung werden der Grundkörper und der Leitungsverlauf ausgewählt und mit der Funktion *Merge Models* [Hervorhebung im Originaltext] korrekt zueinander ausgerichtet. Nach der Konfiguration [der FFF-Parameter] wird das Slicing des Bauteils durchgeführt und nach Prüfung der FFF-Druckbarkeit des Grundkörpers und der korrekten Approximation der Leitungsrepräsentation als G-Code exportiert und ist für den Import des 3DConFil-Parsers nutzbar.”(Steffan et al. 2023a, S. 6)

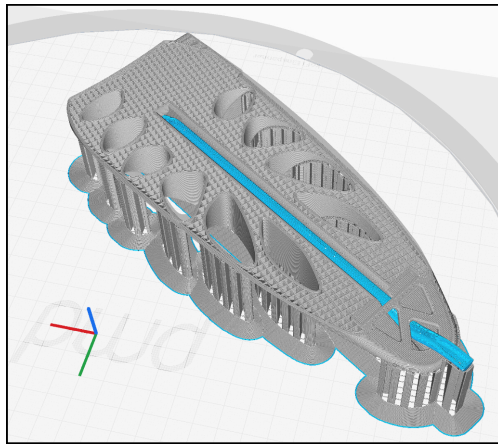
In Abbildung 5.28 a) ist ein für den Druck vorbereitetes 3DConFil-Bauteil dargestellt. Anhand der in Cura mit unterschiedlichen Farben visualisierten Kunststoffstränge wird die Materialzuweisung zu dem physisch existierenden FFF-Extruder des Grundkörpers in grau und die des nicht physisch existierenden FFF-Extruders in blau sichtbar.

### **Aufbau des 3DConFil-Parsers**

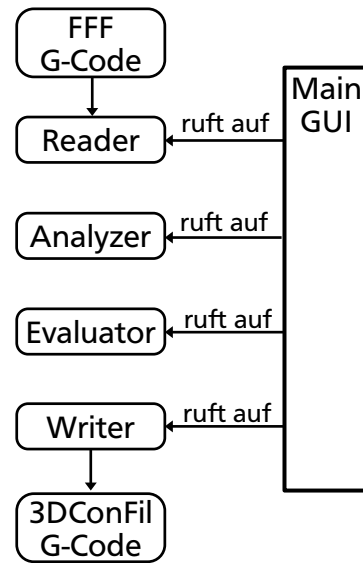
In der digitalen Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens folgt nach Steffan et al. auf den Slicer der 3DConFil-Parser. Dieser liest den für das FFF-Verfahren erstellten G-Code ein, erweitert diesen um die verfahrensspezifischen Befehle und exportiert wieder eine Datei mit G-Code für die Maschinensteuerung des Funktionsprototyps. Die Funktionen des 3DConFil-Parsers umfassen die Hauptfunktionen des Imports und des Exports von G-Code, die Analyse der Steuerungsbefehle aus dem Slicer und die Berechnung der Steuerungsbefehle zur Erweiterung. Der Parser ist in der unter einer open source Lizenz nutzbaren höheren Programmiersprache Python 3.9.9 (vgl. Python Software Foundation 2024) implementiert. (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 1 bis S. 147)

Die Konfiguration ist über eine grafische Benutzeroberfläche durchführbar, welche gleichzeitig die verschiedenen Module aufruft. Die Module werden sequenziell durchlaufen und liefern jeweils die Eingangsdaten für die nächste Softwarefunktion. (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 3 und S. 7 bis S. 12) Die modulare Struktur des Parsers ist in Abbildung 5.28 b) mit den Skripten (als Softwarefunktionen bezeichnet) *Reader*, *Analyzer*, *Evaluator* und *Writer* dargestellt (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 7 bis S. 9).





a)



b)

Abbildung 5.28: Geslichtes 3DConFil-Bauteil in der Slicer-Software Cura (Ultimaker B.V. 2023) in a) und vereinfachtes Strukturdiagramm des 3DConFil-Parsers angelehnt an Steffan et al. (2023a, S. 9) in b), eigene Abbildungen

Das Einlesen des G-Codes und dessen Speicherung in einer für die weiteren Softwaremodule nutzbaren tabellarischen Form wird nach Steffan et al. durch den *Reader* und der Verwendung einer Konfigurationsdatei ausgeführt. Der erstellte Datensatz wird an die Softwarefunktion *Analyzer* übergeben. Die Hauptaufgabe des Analyzers ist die Rekonstruktion des Leitungsverlaufs aufgrund der während des Slicing-Prozesses durchgeführten Approximation der Bauteile und deren Position. Zusätzlich zur Rekonstruktion wird der hybride Fertigungsschritt identifiziert. Der *Evaluator* verwendet die Ausgabedateien von Reader und Analyzer und errechnet anhand dieser und Logiken zur Leitungshandhabung die neuen Steuerungsbefehle. Die letzte Hauptfunktion des 3DConFil-Parsers wird durch den *Writer* bereitgestellt. Ausgehend von der Ausgabe des Evaluators erstellt der Writer den G-Code für den Funktionsprototyp. Das Skript der Main GUI verbindet die grafische Benutzeroberfläche, das Datenmanagement des G-Codes und die Aufrufe der Softwarefunktionen. Die Funktionen werden nach Möglichkeit in eigene Dateien der Programmiersprache Python beispielsweise zur besseren Erweiterbarkeit und Wartbarkeit gespeichert. Der 3DConFil-Parser mit dem implementierten Quellcode ist zusammen mit weiteren Informationen bspw. zur Bauteilorientierung in Form eines Whitepapers dokumentiert. (vgl. Steffan et al. 2023a, S. 1 bis S. 147)

- Die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens ermöglicht die Modellierung des Leitungsverlaufs für beliebige Leitungen innerhalb des Grundkörpers in etablierter CAD-Software. Das Slicing des Bauteils wird mit einer FFF-spezifischen Software durchgeführt und stellt keine Einschränkung in den integrierbaren Leitungen dar. Die Erzeugung der Steuerungsbefehle ist entsprechend der Leitungsspezifikationen modifizierbar.
- Aufgrund des Eingriffs in den G-Code und der Anpassbarkeit der Logiken zur Erzeugung der Steuerungsbefehle sind die Softwarekomponenten für die Verfahrenserweiterung geeignet.

- 
- Die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens nutzt bis auf den 3DConFil-Parser bestehende Software für die digitale Prozesskette des FFF-Verfahrens.
  - Der Eingriffspunkt befindet sich an der Schnittstellendatei der Steuerungsbefehle in Form von G-Code. Der 3DConFil-Parser stellt die erweiterten Steuerungsbefehle in Form von G-Code bereit, sodass die Verarbeitung durch konfigurierte Firmware für FFF-Fertigungsmaschinen möglich ist.
  - Die Steuerungsbefehle werden durch den entwickelten 3DConFil-Parser automatisiert erzeugt, welcher auf der höheren Programmiersprache Python unter einer open source Lizenz basiert.
  - Die Funktion des Parsers basiert auf Unterfunktionen, deren Anpassung individuell und zu verschiedenen Zeitpunkten möglich ist. Damit ist die Wartbarkeit des Parsers gegeben.

Anhand der Ausgestaltung der digitalen Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens und der Implementierung des 3DConFil-Parsers werden keine der in Tabelle 5.6 gestellten Anforderungen verletzt. Damit wird die Entwicklung der digitalen Komponenten im Rahmen dieser Arbeit abgeschlossen.

## **5.5 Nutzung der gestalterischen Möglichkeiten des 3DConFil-Verfahrens am Beispiel einer Armablage**

Die initiale Idee zur Entwicklung des 3DConFil-Verfahrens ist die freie Integration von Leitungen innerhalb eines Bauteils. Eine erste Produktidee ist eine leitungsintegriert gefertigte Armablage, die in Abschnitt 5.1 bereits zur Visualisierung der Potentiale des 3DConFil-Verfahrens mit der freien Verlegung einer biegeschlaffen, kontinuierlichen Leitung schematisch dargestellt ist. In diesem Abschnitt wird die Produktidee der Armablage als mit dem 3DConFil-Verfahren fertigmachen Demonstrator konkretisiert.

Die Hauptfunktion der Armablage ist die Abstützung der Gewichtskraft des Arms. In modernen Anwendungen wird die Informationsvermittlung und Steuerung des umgebenden Boardsystems immer wichtiger, deren Integration den Komfort und die Sicherheit steigert (vgl. Knauf Industries 2021). Die Bedienelemente werden im Ablagebereich der Hand positioniert. Elemente zur Informationsvermittlung werden zusätzlich im gleichen Bereich aufgrund der angenommenen freien Sichtlinie angeordnet. Aufgrund unterschiedlicher Armphysiologien besteht ein weiterer möglicher Mehrwert in der individuellen Anpassung der Armablage an den Nutzer.

Neben der genannten Nutzung werden durch die gestalterischen 3DConFil-Potentiale in Form der verfahrensinduzierten Eigenschaften beispielsweise ein geringes Gewicht, eine einfache Montierbarkeit und eine kompakte Bauweise möglich. Die Lebensdauer wird aufgrund des Prototypcharakters und dessen Fokus auf die Funktionsintegration zurückgestellt. Aufgrund der Darstellung des Verfahrenspotentials besteht zusätzlich die Anforderung, dass der Leitungsverlauf innerhalb des Grundkörpers mindestens einen Verlaufsabschnitt der Leitungsintegration zwischen zwei Schichten und einen Verlaufsabschnitt der Leitungsintegration über mehrere Druckschichten hinweg beinhaltet.

---

Die Hauptfunktion der Armablage ist die Leitung mechanischer Kräfte von der Ablagefläche hin zur Anbindung an eine weitere Tragstruktur, beispielsweise einen Sitz. Weitere Funktionen sind die Aufnahme von Nutzersignalen zur Steuerung der Bordsysteme und die Leitung dieser bis zur Schnittstelle, beispielsweise ebenfalls an der Tragstruktur. Für die Interaktion mit dem Nutzer werden Signale, beispielsweise haptische, akustische und visuelle Signale genutzt. Zur Aufnahme der Steuerungssignale des Nutzers werden zur haptischen, akustischen und optischen Interaktion ein Drei-Wege-Schalter (vgl. SIP Scootershop GmbH 2022), ein LED-Taster (vgl. Metzler GmbH 2022) und ein rundes Liquid Crystal (LC)-Display (vgl. Waveshare Electronics 2022) ausgewählt. Die Signalverarbeitungseinheit bildet ein Arduino Nano (vgl. Arduino.cc 2022a). Das Betriebskonzept besteht darin, dass die Navigation durch das Informationssystem mit dem Drei-Wege-Schalter möglich ist, der durch den Taster freigegeben wird, um nicht intendierte Eingaben zu verhindern. Das Display ermöglicht beispielsweise die iconbasierte Anzeige des jeweiligen Navigationspunkts, für welchen eine Eingabe wirksam wird. Durch die Bauteilauswahl und das Betriebskonzept ist die Mindestanzahl der unabhängigen elektrischen Leitungen festgelegt. Die Anforderungen zur Leitungsintegration und der Anzahl von sieben unabhängigen Verbindungen erfüllt beispielsweise die Schleppeketteneinleitung mit einer Ummantelung aus Polyurethan (PUR), Helukabel 49587 (vgl. HELU KABEL GmbH 2015, S. 189), dessen Verarbeitbarkeit mit dem 3DConFil-Verfahren abgesichert wurde.

Nach der Festlegung der integrierten Komponenten werden die Integrationsmöglichkeiten mittels des 3DConFil-Verfahrens überprüft. Die Komponenten liegen einzeln vor und werden in einem manuellen Montageprozess nach der Bauteilfertigung mit der innerhalb des Grundkörpers verlaufenden Leitung verbunden. Zur Gestaltung der Armablage wird in Anlehnung an die Montage an einem Sitz die Festlegung getroffen, dass die Armablage am hinteren Ende die mechanische und elektrische Schnittstelle aufweist und im Handbereich die Komponenten angeordnet sind. Der Drei-Wege-Schalter wird mit dem Daumen bedient, während der Taster mit Mittel- oder Zeigefinger betätigt werden kann. Die Gestaltung des Grundkörpers ist im Bereich der mechanischen Schnittstelle als Rechteck ausgeführt, das im Bereich der Biegung in ein an einen T-Träger angelehntes Querschnittsprofil übergeht. Aufgrund des Demonstratorcharakters des 3DConFil-Verfahrens wird auf eine detailliertere mechanische Betrachtung verzichtet. Während der Gestaltung wurden zur Materialersparnis und Druckzeitreduktion einzelne Bereiche ausgespart. Diese sind nicht nur innerhalb des Bauvolumens sondern bis zum Durchbruch der Auflagefläche zur zusätzlichen Belüftung des Arms geführt und an bionischen Strukturen orientiert. Die unter Nutzung der Verfahrenspotentiale des 3DConFil-Verfahrens gestaltete Armablage ist in Abbildung 5.29 in mehreren Zuständen als CAD-Modelle und als reales Bauteil dargestellt.

Der Demonstrator ist mit der Anordnung der Schnittstellen in unmontiertem Zustand als CAD-Modell in Abbildung 5.29 a) und in fertiggestelltem Zustand als CAD-Modell in Abbildung 5.29 b) dargestellt. Die integrierte Leitung stellt die elektrische Energie- und Signalleitung bereit. Diese verläuft von der mechanischen Schnittstelle innerhalb des additiv gefertigten Grundkörpers zum Handablagebereich der Armablage. Der Leitungsverlauf beginnt mit einem Integrationsbereich zwischen zwei Schichten. Dieser geht in einen Integrationsbereich über mehrere Druckschichten über und ermöglicht die Verlegung der Leitung in den Bereich der Auflagefläche in Form einer Wendel. Der Leitungsverlauf geht anschließend in einen Integrationsbereich zwischen zwei Druckschichten über, der vom Ende der Wendel bis zu einem Hohlraum innerhalb des Handbereichs der Armablage entlang einer Geraden

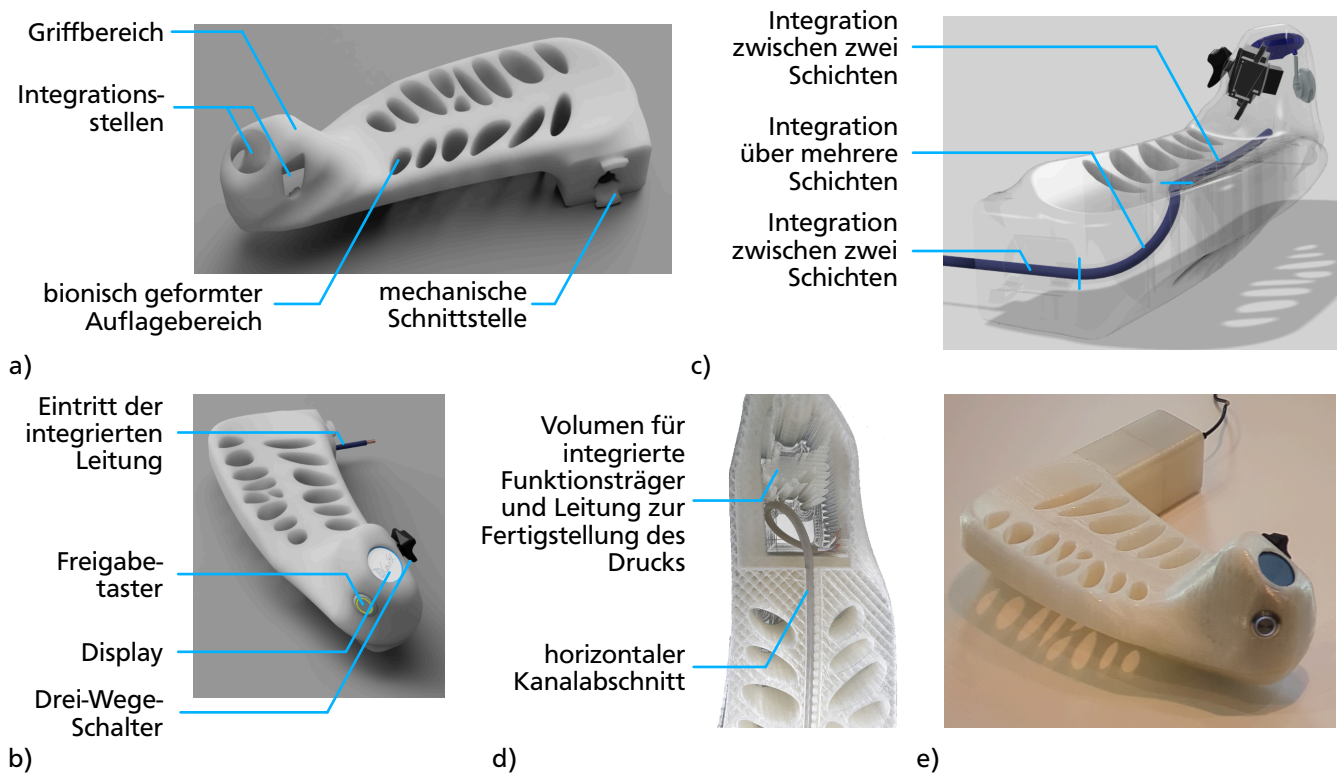


Abbildung 5.29: Gestaltung der durch das 3DConFil-Verfahren fertigmachen Armablage mit integrierter Leitungsführung in unkonfektioniertem Zustand des gedruckten Grundkörpers als CAD-Modell in a) mit dargestelltem Leitungsverlauf innerhalb des Bauteils als CAD-Modell in b), in montiertem Zustand als CAD-Modell in c), nach dem händischen Integrationsprozess der gefertigten Armablage in teilgedrucktem Zustand in d) und in endmontiertem Zustand in e), eigene Abbildungen a) bis e)

verläuft. Der Leitungsverlauf als CAD-Modell ist in Abbildung 5.29 c) dargestellt. Der Hohlraum ermöglicht während der Fertigung die Speicherung der Leitung zur Konfektion dieser mit den weiteren integrierten Funktionsträgern nach der Fertigstellung des Grundkörpers. In Abbildung 5.29 d) ist der Hohlraum in der Draufsicht nach der Leitungsintegration mit dem freien Leitungsabschnitt dargestellt. Nach der Fertigstellung der FFF-Fertigung werden der Schalter, der Taster und der Bildschirm mit der Leitung verbunden und montiert. Die fertiggestellte Armablage ist in Abbildung 5.29 e) visualisiert. Zum Zeitpunkt der Fertigung des Demonstrators ist die Kombination aus physikalischen und digitalen Komponenten des Funktionsprototyps für die Fertigung der Armablage nicht betriebsbereit. Aus diesem Grund wurde der Grundkörper auf einem baugleichen Portalsystem mit FFF-Druckkopf gefertigt und die Armablage anschließend konfektioniert. Die Gestaltung des Demonstrators ist für die Fertigung mit dem 3DConFil-Verfahren erfolgt und ist durch dieses fertigbar. Damit ist der Wissensaufbau zur Fertigungsmaschinenentwicklung abgeschlossen und im folgenden Kapitel wird die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung dargelegt.

---

# 6 Die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung

---

In diesem Kapitel wird ausgehend von der fertigungsintegrierenden Entwicklung (vgl. Abschnitt 3.3) und dem in Kapitel 4 abgeleiteten Forschungsbedarf der Berücksichtigung der Möglichkeiten durch den Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess eine Methode entwickelt, mit der die systematische Erweiterung der nutzbaren gestalterischen Verfahrenspotentiale möglich wird. In Abschnitt 6.1 werden das Ziel der Methode, der Ansatz zur Methodenentwicklung und der Rahmen der Anwendung beschrieben (vgl. Abschnitt 3.1). Diese Verfahrenspotentiale bilden den Ausgangspunkt der Modellierung des Zusammenhangs zwischen den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften und den geforderten Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine sowie der Verknüpfungen dieser innerhalb der Fertigungsmaschine in Abschnitt 6.2. Im Rahmen der Schritte des in Abschnitt 6.3 vorgestellten Vorgehensmodells wird die systematische Anwendung der Modelle weiter gefördert.

## 6.1 Ziel, Ansatz und Anwendungsrahmen der Methode

In diesem Abschnitt wird die Entwicklungsbasis der Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung dargelegt. Diese besteht aus dem Ziel der Methode sowie dem Ansatz und dem Anwendungsrahmen. Die Entwicklungsbasis bildet den Ausgangspunkt für die Modellierung des Zusammenhangs von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften und der Fertigungsmaschinenentwicklung.

### 6.1.1 Ziel der Methode

Die Gestaltung der Fertigungsmaschine beeinflusst wesentlich die verfahrensinduzierten Eigenschaften der gefertigten Bauteile während den Fertigungsschritten. Änderungen an den Wirkelementen und Wirkgrößen der Fertigungsmaschine führen damit zu Veränderungen der fertigbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften (vgl. Abschnitt 3.3). Dieser Zusammenhang ist zur Erweiterung der fertigbaren gestalterischen Potentiale in Form der verfahrensinduzierten Eigenschaften nutzbar. Die Identifikation der erforderlichen Informationen für die Nutzung dieses Zusammenhangs ist durch die komplexen Wechselwirkungen der Fertigungsprozesse, den verwendeten Halbzeugen und der durch die Fertigungsmaschine bereitgestellten Wirkgrößen und Wirkelemente nur erschwert möglich.

Das Ziel der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung ist die methodische Überführung von Anforderungen zur Erweiterung gestalterischer Potentiale in Anforderungen an die Fertigungsmaschine. Die Berücksichtigung dieser Anforderungen im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung

---

ermöglicht die zielgerichtete, potentialgetriebene Entwicklung der Fertigungsmaschine. Zur Erreichung des Ziels wird in den folgenden Abschnitten der Ansatz und der Anwendungsrahmen der Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung beschrieben.

## 6.1.2 Ansatz und Anwendungsrahmen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung

Der Ansatz der Methode besteht in der Nutzung der Verbindung von Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess und Produktentwicklungsprozess durch den Produktlebenslauf (vgl. Abschnitt 3.2). Die Bauteile des Produkts weisen entsprechend dem Fertigungsverfahren, der Fertigungsmaschine und den eingesetzten Halbzeugen verfahrensinduzierte Eigenschaften auf (vgl. Abschnitt 3.3). Verfahrensinduzierte Eigenschaften von denen eine positive Nutzungsmöglichkeit durch Gestaltungsmöglichkeiten für die Produktentwicklung bekannt sind, werden als gestalterische Potentiale aufgefasst (vgl. Abschnitt 1.1). Ausgehend von innovativen Lösungsideen sind Anforderungen an Produkte mit deren verfahrensinduzierten Eigenschaften möglich, die eine Erweiterung der bisher nutzbaren Eigenschaften im Produktentwicklungsprozess darstellen.

Diese geforderten gestalterischen Potentiale sind in Form von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften beschreibbar und stellen die notwendigen Eingangsinformationen für die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung dar. Die Forderung der Erweiterung ist einerseits durch die Entwicklungsaufgabe möglich und entspringt einer Produktidee. Dieser Initiierungsfall wird als *market pull*-Initiierung der Methodendurchführung betrachtet. Ein weiterer Initiierungsfall ist durch einen *technology push*-Ansatz möglich. In diesem Fall liegt keine direkte Produktidee vor, sondern die positiven verfahrensinduzierten Eigenschaften sind bekannt und sollen beispielsweise für eine neue Fertigungsmaschinengeneration erweitert werden. Im Folgenden werden die geforderten verfahrensinduzierten Eigenschaften zur Erweiterung der nutzbaren gestalterischen Potentiale unabhängig von der Initiierung als *verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaften* bezeichnet.

Nach der Beschreibung der Eingangsinformationen wird das angestrebte Ergebnis der Methode mit dem Ziel der Förderung des Entwicklungsprozesses der Fertigungsmaschine dargelegt. Für die Entwicklung einer Fertigungsmaschine besteht, analog zur Produktentwicklung, eine Anforderungsliste an die Fertigungsmaschine. Die Anforderungsliste wird entsprechend der Entwicklungsaufgabe, dem Entwicklungskontext und weiteren Informationen erstellt und ist in der Literatur detailliert beschrieben (vgl. Bender et al. 2021a, S. 178 bis S. 209). Die Fertigungsmaschine beeinflusst durch die bereitgestellten Wirkgrößen und die Eigenschaften der Wirkelemente den Fertigungsprozess (vgl. Gramlich 2013, S. 86 bis S. 92), sodass diese Soll-Eigenschaften in Form von Anforderungen an die Fertigungsmaschine nutzbar sind. Die Wirkgrößen und Wirkelemente werden durch verschiedene Teilsysteme der Fertigungsmaschine bereitgestellt. Die Anforderungen in Form *verfahrensprinziprelevanter Soll-Eigenschaften* der Fertigungsmaschine und deren Zuordnung zu den Teilsystemen der Fertigungsmaschine bilden das Ergebnis der Methode.

Die Methode ist auf die Förderung der Entwicklung von Produkten zur Umsetzung von Fertigungsverfahren, den Fertigungsmaschinen, ausgerichtet. Die Methode wird so gestaltet, dass die Durchführung

mit verschiedenen Konkretisierungsgraden der eingehenden Informationen möglich ist. Die Zielgruppe der Methode sind Personen mit Expertenwissen im Bereich der Produktentwicklung aufgrund der Nutzungsmöglichkeiten der Ergebnisse der Methode. Aus diesem Grund wird Expertenwissen im Bereich der Produktentwicklung vorausgesetzt. Weitere wichtige Eigenschaften der Methode sind die Anwendbarkeit auf komplexe Fertigungsverfahren, beispielsweise hybrid-integrierender additiver Fertigungsverfahren, zur Identifikation der erforderlichen Informationen für die Maschinenentwicklung. Die Informationen sollen für Neuentwicklungen und Weiterentwicklungen einsetzbar sein.

Mit der Beschreibung der Eingangsinformationen und des Methodenergebnisses in Form von Anforderungen ist die Anbindung an die Konstruktionsmethodik des Produktentwicklungsprozesses und des Fertigungsmaschinenentwicklungsprozesses gegeben. In Abbildung 6.1 wird die in Kapitel 3 und Kapitel 4 verwendete Darstellung der Verbindung von Produktentwicklungsprozess, Produktlebenslauf, Fertigungsmaschine und Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess genutzt. Der Informationsfluss der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung ist als blauer Pfeil visualisiert.

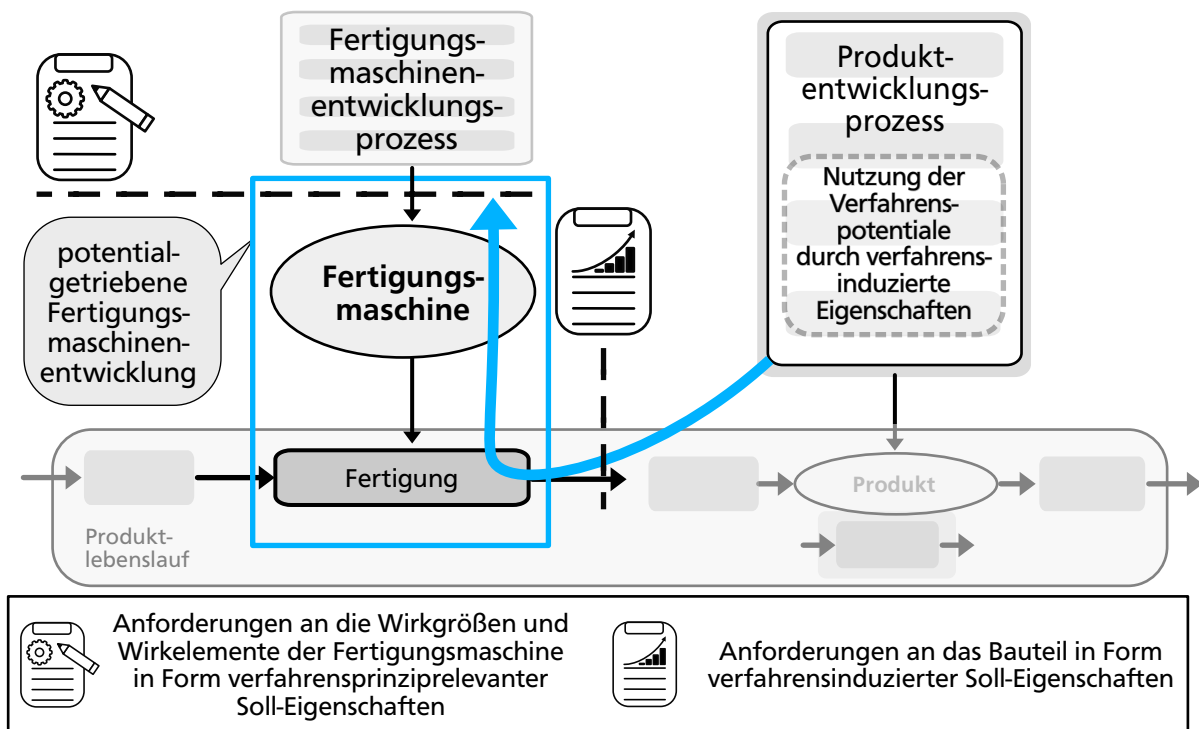


Abbildung 6.1: Übersicht der Verknüpfung von Anforderungen an die verfahrensinduzierten Eigenschaften (Verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaften) und den nutzbaren Anforderungen im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung (Verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften). Der Informationsfluss ist in Form des blauen Pfeils visualisiert. Schematische Darstellung von Produktentwicklungsprozess und Produktlebenszyklus in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und Kirchner et al. (2021, S. 467 f.), eigene Abbildung

Im Folgenden wird die Idee zur Verknüpfung der Informationen dargelegt. Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen den verfahrensinduzierten Eigenschaften und der Fertigungsmaschine ba-

---

siert auf der Rückverfolgung der Wechselwirkungen von Halbzeug und Fertigungsmaschine während des Fertigungsprozesses. Hierbei wird die eigenschaftsbasierte Beschreibung aller Modellelemente verwendet (vgl. Abschnitt 3.3). Das Verfahrensprinzipmodell (VP-Modell) (vgl. Roos 2018, S. 58) soll als Bindeglied zwischen dem gefertigten Bauteil mit den geforderten verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften und der Fertigungsmaschine mit den daraus abgeleiteten verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Wirkgrößen und Wirkelemente eingesetzt werden.

Diese Verknüpfung bildet das Modell auf dem die Methode aufbaut, auf dem der Informationsfluss basiert und diese werden in Abschnitt 6.2 beschrieben. Innerhalb des VP-Modells werden die Verfahrensprinzipien bzw. die Wirkzusammenhänge der jeweiligen Fertigungsprozesse darstellbar (vgl. Roos 2018, S. 58). Für die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung wird angenommen, dass die Fertigungsschritte während der Durchführung festgelegt sind. Die mit der Methode erarbeiteten verfahrensprinziprelevanten (Soll-) Eigenschaften sind den Bereichen der Fertigungsmaschine nicht zugeordnet, sodass diese Zuordnung nachfolgend in Abschnitt 6.2.3 betrachtet wird.

## **6.2 Modellierung des Zusammenhangs von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften und der Fertigungsmaschinenentwicklung**

Im Rahmen der fertigungsintegrierenden Entwicklung liegt der Fokus auf der Nutzung des Fertigungsprozesses für die Anwendung der fertigbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften bei gegebenen Wirkgrößen und Wirkelementen. Dies entspricht einem Vorgehen von der linken zur rechten Seite des VP-Modells (vgl. Abschnitte 3.3.3 und 4). Dabei beinhaltet das fertigungstechnologische Wissen die Wirkzusammenhänge für den betrachteten Verfahrensschritt (vgl. Roos 2018, S. 57 f.). Durch die Berücksichtigung der Fertigungsmaschinenentwicklung sind die Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine beeinflussbar und ermöglichen so die Änderung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des gefertigten Bauteils. Die Verbindung durch die Wirkzusammenhänge ist von den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften zu den erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine, den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften nutzbar. Dies entspricht einem Vorgehen von rechts nach links innerhalb des VP-Modells. Die festgelegten verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine sind in Form von Anforderungen dokumentierbar.

### **6.2.1 Modellierung von Fertigungsverfahren mit einem Fertigungsschritt**

Die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften sind die Eingangsinformationen der Methode. Sie werden durch die Wechselwirkungen (Wirkzusammenhänge) der Wirkelemente von Halbzeugen und Fertigungsmaschine sowie den durch die Fertigungsmaschine bereitgestellten Wirkgrößen im Rahmen des Fertigungsprozesses erzeugt. Die Wirkzusammenhänge, die Wirkelemente und Wirkgrößen werden mit dem VP-Modell eigenschaftsbasiert dargestellt (vgl. Roos 2018, S. 57 bis S. 67). Der beschriebene Zusammenhang aus Modellelementen und deren Verknüpfungen ist in Abbildung 6.2 abgebildet.



Ausgehend von einer zu erweiternden verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft, blau innerhalb des Bauteils markiert, wird diese zu den beeinflussenden Wirkzusammenhängen zurückverfolgt. Die Wirkzusammenhänge sind durch fertigungstechnologisches Wissen beschreibbar (vgl. Roos 2018, S. 57). Visualisiert ist diese Aufteilung in Abbildung 6.2 durch die blauen Pfade zu dem Halbzeug und der Fertigungsmaschine. Die geforderten Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine werden für ein spezifisches Halbzeug festgelegt und in Form der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften an die Fertigungsmaschine dokumentiert.

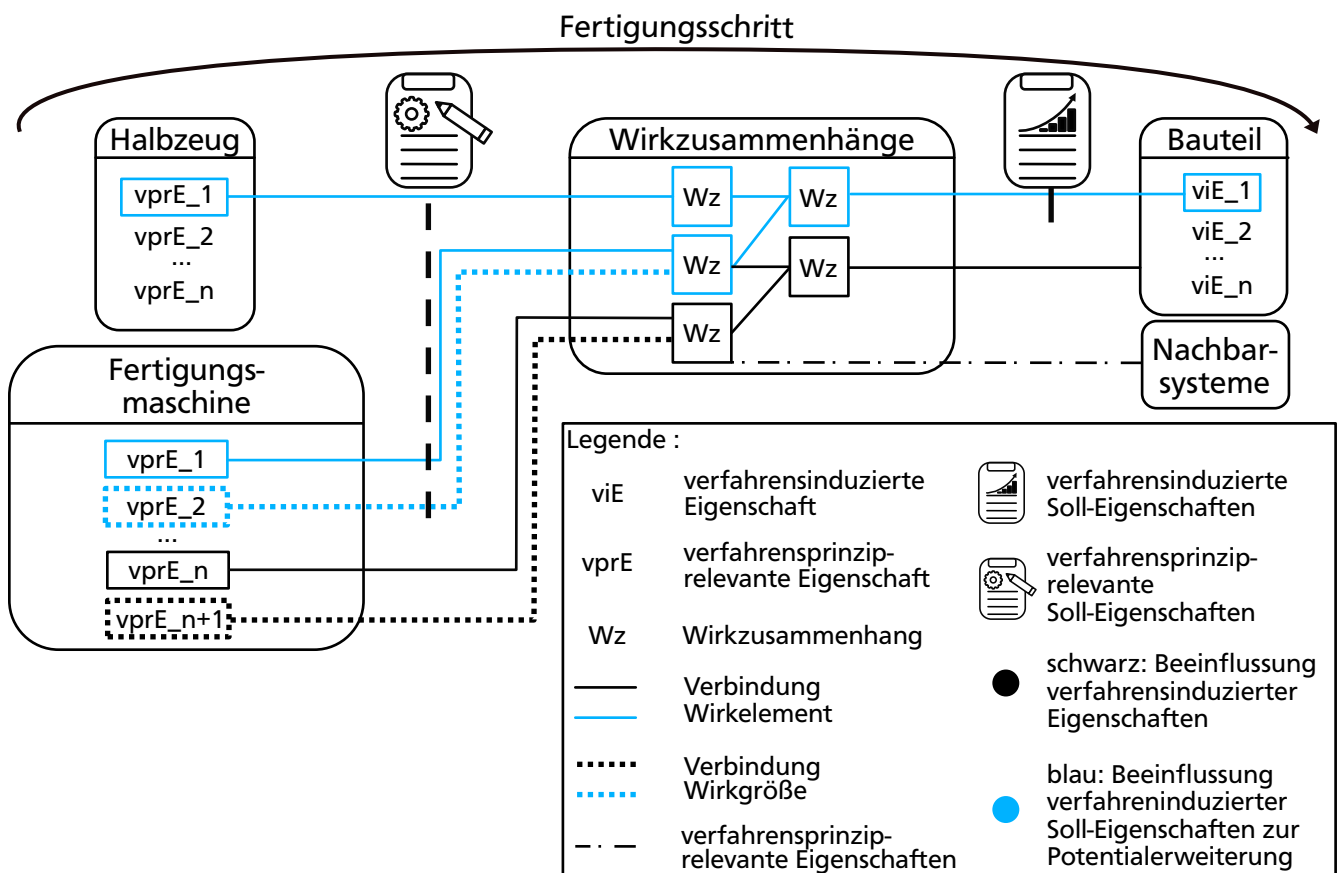


Abbildung 6.2: Verknüpfung von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine innerhalb eines Fertigungsschritts unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells nach (vgl. Roos 2018, S. 58) mit der Darstellung in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

Die blauen Pfade von den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften des Bauteils zu den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine entsprechen dem Informationsfluss, der in Abbildung 6.1 dargestellt ist. Besteht beispielsweise für einen Fertigungsschritt eine Gleichung zur quantitativen Beschreibung der Wirkzusammenhänge ist ebenfalls die Ableitung quantifizierter potentialgetriebener Anforderungen an die Fertigungsmaschine möglich. Weiterhin wird darauf

---

hingewiesen, dass zur Erzeugung der Wirkgrößen und Wirkelemente im Zuge zunehmender Mechatronisierung des Systems Fertigungsmaschine Anforderungen neben den physikalischen auch an digitale Komponenten, sofern vorhanden, gestellt werden.

Werden die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften in den Wirkzusammenhängen nachverfolgt, liegt eine Kombination aus den Wirkelementen der Halbzeuge und der Maschine vor. Diese besteht aus zumindest einer verfahrensinduzierten Eigenschaft, die mit mindestens einer verfahrensprinziprelevanten Eigenschaft des Halbzeugs und der Fertigungsmaschine verknüpft ist. Aufgrund der Komplexität der Wirkzusammenhänge ist eine verfahrensinduzierte Eigenschaft in der Regel durch mehrere verfahrensprinziprelevante Eigenschaften beeinflussbar. Das Erreichen der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften ist prinzipiell durch eine Kombination der Änderung von Halbzeugen und der Fertigungsmaschine möglich. Neben den verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften sind weitere Randbedingungen durch den Entwicklungskontext und weitere Anforderungen möglich.

Zur weiteren Fortführung der Methode und der Ableitung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine ist zu diesem Zeitpunkt die Festlegung der Halbzeugeigenschaften und damit der Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine erforderlich. Die Festlegung erfolgt durch eine für den Entwicklungskontext spezifische Entscheidung, zu der die Berücksichtigung von Informationen anhand beispielsweise vorgelagerter und nachgelagerter Fertigungsschritte oder des Produktnutzungsprozesses möglich ist. Ein Beispiel ist die eingeschränkte Materialauswahl, sofern die Materialeigenschaften in der Bauteilnutzung erforderlich sind. Die Entscheidung ist fallspezifisch durch den Einfluss des Entwicklungskontexts und der beteiligten Stakeholder zu treffen. Zur Befähigung der Entscheidung sind, falls benötigt, leistungsfähige Methoden in der Literatur mit beispielsweise einer Nutzwertanalyse (vgl. Lindemann 2009, S. 285 f.) oder der Punktbewertung (vgl. VDI 2225 Blatt 3 1998, S. 1 bis S. 18) bekannt und in Sammlungen zusammengestellt (vgl. Lindemann 2009, S. 285 bis S. 291; Ehrlenspiel et al. 2017, S. 642 bis S. 654; Wartzack 2021, S. 307 bis S. 334). Mit der Festlegung der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Halbzeuge und den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften stehen die erforderlichen Informationen fest und anhand der Wirkzusammenhänge des Fertigungsschritts ist die Ableitung möglicher Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine durchführbar.

Ein Fertigungsschritt umfasst in der Regel eine Vielzahl von Wirkzusammenhängen zwischen den Wirkelementen bzw. den Wirkgrößen. Dadurch sind Emergenzphänomene bzw. Interdependenzen (vgl. Ropohl 2009, S. 75) möglich. Aus diesem Grund führt die Erweiterung einer oder mehrerer verfahrensinduzierter Eigenschaften zu einer Änderung mehrerer Wirkgrößen und oder Wirkelementen der Fertigungsmaschine. Die Nutzung des VP-Modells ermöglicht eine checklistenähnliche Aufbereitung der Informationen (vgl. Roos 2018, S. 61), sodass eine systematische Berücksichtigung aller potentialbeeinflussenden Wirkzusammenhänge gefördert wird.

Die abgeleiteten Wirkgrößen und Wirkelemente sind in Form von Anforderungen beschreibbar und dokumentierbar. Diese Anforderungen sind direkt im Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess durch die Erweiterung der Detaillierung weiterer Anforderungen in klassischen Dokumenten einsetzbar. Im folgenden Abschnitt wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die Verknüpfung von Fertigungsmaschineneigenschaften und beeinflussbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften darzustellen.

## Informationsaufbereitung zur Potentialerweiterung und der Fertigungsmaschinenentwicklung

Die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung nutzt das Verfahrensprinzipmodell für die Überführung der verfahreninduzierten Soll-Eigenschaften in die verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften durch die Rückverfolgung der verfahreninduzierten Eigenschaften anhand der Wirkzusammenhänge. Hierbei werden die Einflussmöglichkeiten auf die verfahreninduzierten Eigenschaften durch die verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften identifiziert. Einmal identifizierte Einflussmöglichkeiten lassen sich für zukünftige Erweiterungen der fertigbaren verfahreninduzierten Eigenschaften nutzen. Im Folgenden wird eine Darstellungsform vorgestellt, mit welcher die Nutzbarkeit bereits bekannter Einflussmöglichkeiten möglich wird. Es handelt sich bei den Einflussmöglichkeiten um Verknüpfungen, die durch eine Matrixdarstellung visualisierbar und dokumentierbar sind. Die Zuordnungsmatrix enthält in den Feldern des Hauptteils das zugehörige VP-Modell bzw. dessen Verknüpfungen. Auch das darin beschriebene fertigungstechnologische Wissen ist in der Matrix zuordbar. In Abbildung 6.3 ist eine allgemeine Beschreibung der Matrixdarstellung visualisiert.

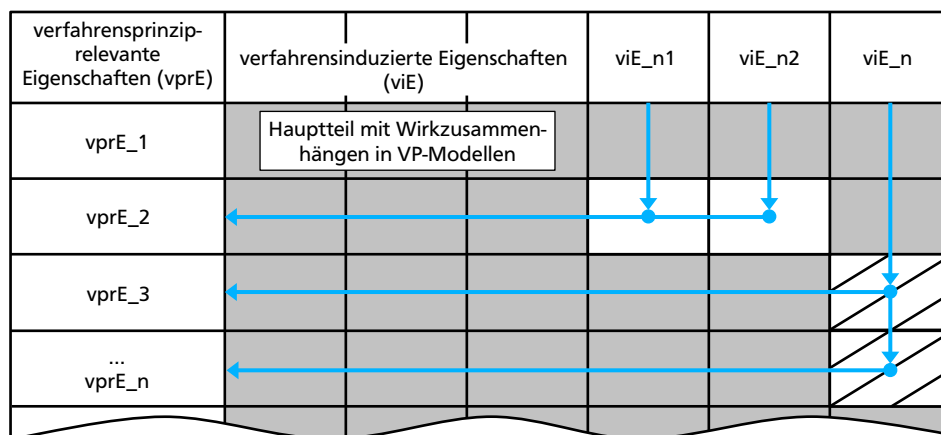


Abbildung 6.3: Zuordnungsmatrix mit den Verknüpfungen der verfahreninduzierten Bauteileigenschaften und den verfahrensprinziprelevanten Fertigungsmaschineneigenschaften, eigene Abbildung

Der Gliederungsteil enthält in der Gliederungsspalte die verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine für die betrachteten Fertigungsschritte. Diese können die Wirkgrößen oder Wirkelemente beschreiben. Die im Rahmen der Fertigungsschritte beeinflussten verfahreninduzierten Eigenschaften sind in der Gliederungszeile aufgeführt. Der Hauptteil bietet in den Kreuzungsfeldern Raum für die Zuordnung der im Rahmen des VP-Modells beschriebenen Wirkzusammenhänge. Hierbei ist es nicht erforderlich, dass in jedem Feld Wirkzusammenhänge vorhanden sind, sodass manche Felder frei bleiben. Die Verknüpfungen sind in Abbildung 6.3 durch blaue Pfeile und blaue Kreise dargestellt. Aufgrund des Ausgangspunkts der verfahreninduzierten Eigenschaften verlaufen die Pfeile zu den verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften.

Im Fall der Beeinflussung einer verfahreninduzierten Eigenschaft durch mehrere Wirkgrößen bzw. Wirkelemente befinden sich mehrere ausgefüllte Felder in der betreffenden Spalte. Dieser Fall ist in

---

Abbildung 6.3 durch die beiden schraffierten Felder visualisiert. Weiterhin ist der Fall möglich, dass mehrere verfahrensinduzierte Eigenschaften durch eine Wirkgröße beeinflusst werden. Dieser Fall ist mit den beiden weißen Feldern in Abbildung 6.3 dargestellt.

An dieser Stelle wird weiterführend auf einen zusätzlichen Effekt der Änderung von Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine eingegangen. Neben der Erfüllung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften ist durch die Emergenz der Wirkzusammenhänge die Änderung oder Erweiterung anderer verfahrensinduzierter Eigenschaften möglich. Diese sind prinzipiell im Rahmen der Produktentwicklung nutzbar und stehen für die Entwicklung innovativer Produkte zur Verfügung. Die Berücksichtigung dieser neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften ist beispielsweise im Rahmen der bereits bestehenden fertigungsintegrierenden Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 3.3) möglich und stellt einen zweiten Pfad zur Nutzung der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften dar. Im folgenden Abschnitt wird die Betrachtung mehrere Fertigungsschritte dargelegt.

## 6.2.2 Modellierung von Fertigungsverfahren mit mehreren Verfahrensschritten

Fertigungsverfahren bestehen aus einem oder mehreren Fertigungsschritten. Die Fertigungsschritte werden aneinander gereiht und bilden die Prozesskette des Fertigungsverfahrens (vgl. Abschnitt 3.3). Für einen betrachteten Fertigungsschritt besteht nach Roos ein vorheriger Fertigungsschritt, von dem das Halbzeug mit den verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften übergeben wird. Innerhalb des betrachteten Fertigungsschritts werden verfahrensinduzierte Eigenschaften erzeugt. Für den nachfolgenden Fertigungsschritt sind ebenfalls verfahrensprinziprelevante Eigenschaften erforderlich. Während des betrachteten Fertigungsschritts ist es nicht erforderlich alle verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften für den folgenden Fertigungsschritt zu erzeugen. (vgl. Roos 2018, S. 53 f.)

Die Festlegung, welche Fertigungsschritte betrachtet werden, ist frei wählbar und damit an den Entwicklungsfokus anpassbar. Im Rahmen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung ist es zielführend, die Fertigungsschritte zu betrachten, welche durch die Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine beeinflusst werden und die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften erzeugen. In Abbildung 6.4 ist ein Ausschnitt einer schematischen Abfolge von verschiedenen Fertigungsschritten in Anlehnung an die Modellierung einer Prozesskette nach Roos (2018, S. 54) dargestellt. Die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften werden in dieser spezifischen Darstellung während des ersten und dritten Schritts erzeugt. Damit sind die VP-Modelle bzw. die Wirkzusammenhänge dieser Fertigungsschritte relevant. Dieses Vorgehen stellt eine Auswahl der betrachteten Fertigungsschritte dar und reduziert damit den Modellierungsaufwand.

In Abbildung 6.4 stellt das beispielhafte produktbeschreibende Modell der Fertigungsmaschine für drei Fertigungsschritte sowohl Wirkgrößen und Wirkelemente bereit. Die Beeinflussung ist durch identische oder unterschiedliche Wirkgrößen und Wirkelemente im jeweiligen Fertigungsschritt möglich. Anforderungen an die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften sind für Bauteile am Ende der Prozesskette stellbar und es werden die erzeugenden Fertigungsschritte ermittelt. In Abbildung 6.4 bedeutet das, dass geforderte verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaften durch den ersten und dritten Fertigungsschritt erzeugt und damit diese weiterbetrachtet werden.

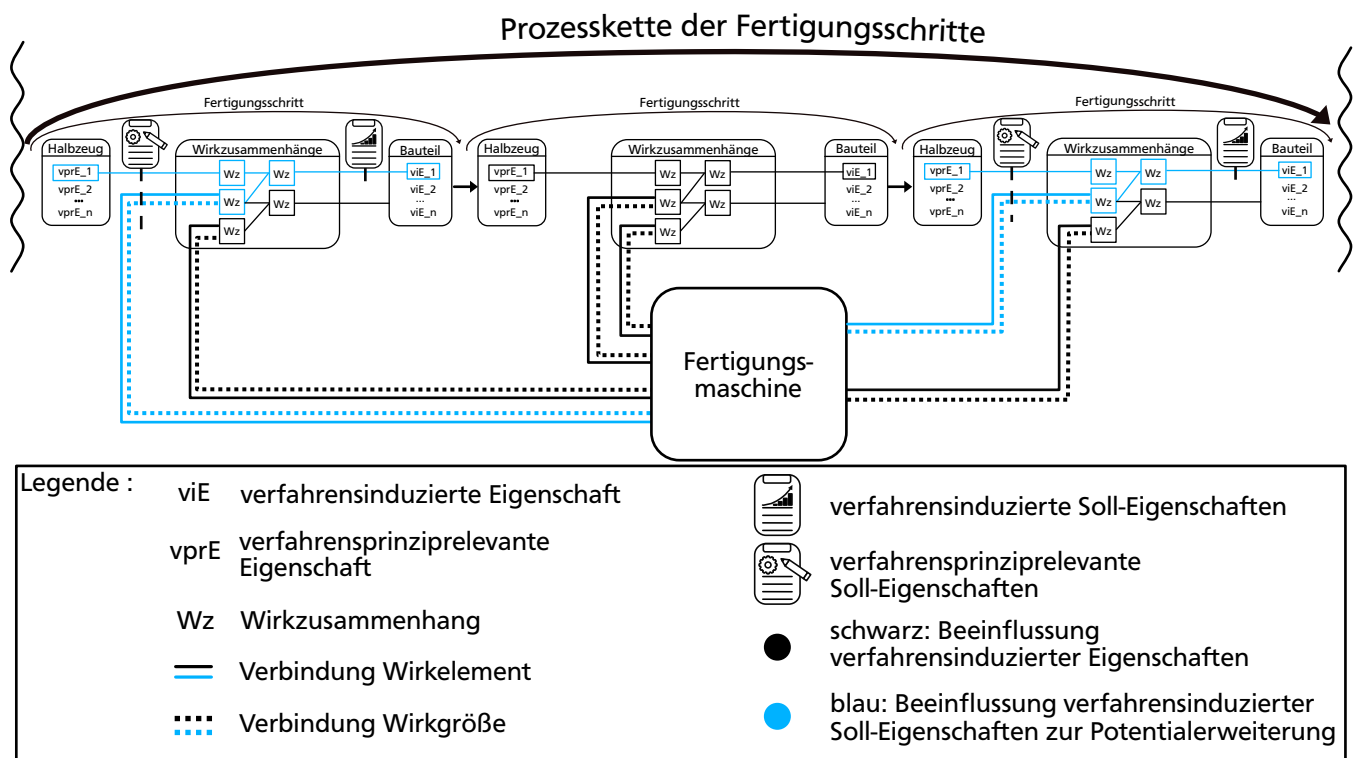


Abbildung 6.4: Verknüpfung von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine für aufeinanderfolgender Fertigungsschritte in Anlehnung an die Prozesskettenmodellierung nach Roos (2018, S. 54) mit der Darstellung des Verfahrensprinzipmodells ohne Nachbarsysteme in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

Die in Abbildung 6.4 dargestellten Verknüpfungen visualisieren den Fall, dass eine Fertigungsmaschine sämtliche relevanten Fertigungsschritte zur Beeinflussung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften bereitstellt. Ein Beispiel dieses Falls besteht in Kapitel 5 mit dem 3DConFil-Verfahren, dessen Fertigungsschritte durch eine einzelne Fertigungsmaschine bereitgestellt werden. Weiterhin ist es möglich, dass mehrere Fertigungsmaschinen Teile der Prozesskette bereitstellen.

Die Zuordnung der Einflussmöglichkeiten ist durch die Fertigungsverfahren gegeben. Jeder Fertigungsschritt wird durch ein Verfahren ermöglicht und dem Verfahren sind die Wirkgrößen und Wirkelemente der jeweiligen Fertigungsmaschine zugeordnet (vgl. Gramlich 2013, S. 86 f.). Das bedeutet, dass ausgehend von einer verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft die Identifikation der beeinflussenden Fertigungsmaschinen anhand deren am Verfahren beteiligten Wirkgrößen und Wirkelemente möglich ist. Analog zur Betrachtung eines einzelnen Fertigungsschritts ist zur Informationsaufbereitung die Nutzung einer Matrixdarstellung möglich. Die Betrachtung neuer Fertigungsschritte führt zu den folgenden vier verschiedenen Erweiterungsmöglichkeiten der Zuordnungsmatrix:

1. Mit der Berücksichtigung eines neuen Fertigungsschritts werden weitere verfahrensinduzierte Eigenschaften relevant und die Spalten der Matrix werden entsprechend erweitert.

2. Mit der Berücksichtigung eines neuen Fertigungsschritts werden weitere Wirkgrößen und Wirkelemente relevant und die Zeilen der Matrix werden entsprechend erweitert.
3. Neue Wirkzusammenhänge zwischen in der Matrix bereits enthaltenen verfahrensinduzierten Eigenschaften und Wirkgrößen werden berücksichtigt und zuvor leere Felder des Hauptteils werden ausgefüllt.
4. Berücksichtigte Wirkzusammenhänge und damit bereits gefüllte Felder des Hauptteils werden erweitert.

In Abbildung 6.5 ist die um weitere Fertigungsschritte erweiterte Zuordnungsmatrix dargestellt. Die Matrix umfasst neue verfahrensinduzierte Eigenschaften im rechten Teil, welche die zuvor bereits bekannten oder neue verfahrensprinziprelevante Eigenschaften beeinflussen. Anhand dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die Interdependenzen für komplexe Verfahren zunehmen. Mit dieser Verknüpfung wird bei Änderung der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine einerseits beschreibbar, welche neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften für die Produktentwicklung nutzbar werden. Dies stellt einen zweiten Pfad neben dem der Nutzung in der Fertigungsmaschinenentwicklung dar, dessen Resultat im Rahmen der fertigungsintegrierenden Entwicklungsmethodik (vgl. Abschnitt 3.3) einsetzbar ist. Andererseits ist die Identifikation von ungewollten Wechselwirkungen zielgerichtet möglich.

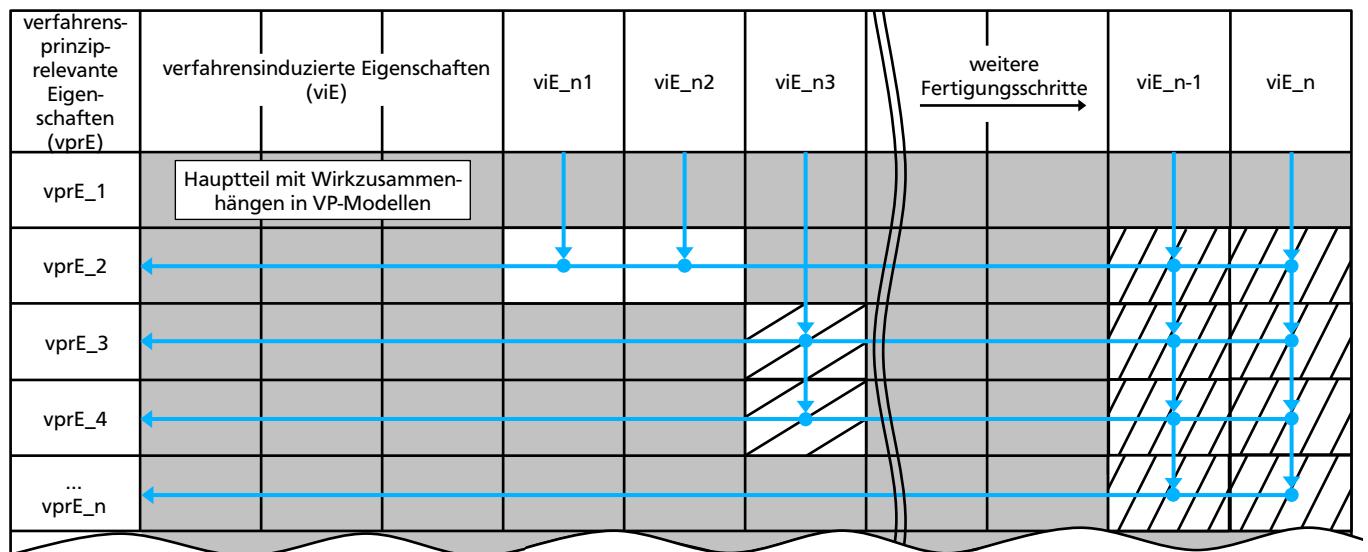


Abbildung 6.5: Mit weiteren Fertigungsschritten erweiterte Zuordnungsmatrix von verfahrensinduzierten und verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften, eigene Abbildung

Mit der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Eigenschaften des gefertigten Bauteils und den beeinflussenden Eigenschaften der Fertigungsmaschine für zusammenhängende Fertigungsschritte ist die Basis zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage vorhanden. Der folgende Abschnitt beschreibt die Bearbeitung der zweiten Forschungsfrage. Die systematische Durchführung der beschriebenen Schritte wird in Abschnitt 6.3 in einem Vorgehen eingeordnet, um die erste und zweite Forschungsfrage zu beantworten.

---

### 6.2.3 Verknüpfungen innerhalb der Fertigungsmaschine

Die Anforderungen an die gesamte Fertigungsmaschine anhand eines oder mehrerer Fertigungsschritte sind während des Entwicklungsprozesses der Fertigungsmaschine im Rahmen einer neuen Produktgeneration oder einer Neuentwicklung unmittelbar nutzbar. Unterschiede zwischen Neu- und Weiterentwicklung ergeben sich hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Informationen. Sind diese nicht vorhanden ist deren Erarbeitung während des jeweiligen Methodenteils zur Erarbeitung der spezifischen Informationen möglich.

Bisher liegen die Informationen ausgehend von den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften in Form verfahrensprinziprelevanter Soll-Eigenschaften vor. Nachfolgend wird eine Möglichkeit zur Überführung der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften in die Anforderungen der Teilsysteme der Fertigungsmaschine aufgezeigt. Zur Überführung wird die Modellierung der Fertigungsmaschine als technisches System betrachtet. Für ein technisches System ist die Unterteilung in Teilsysteme möglich, die miteinander in Wechselwirkung stehen (vgl. Kapitel 3). Nachfolgend wird zwischen Wirkgrößen und Wirkelementen der Fertigungsmaschine aufgrund deren Beschreibung unterschieden.

Die Wirkgrößen der Fertigungsmaschine entsprechen den Ausgangsgrößen ihrer Funktionsstruktur (vgl. Gramlich 2013, S. 126). Die Ausgangsgröße wird durch die Wechselwirkung der verschiedenen Teilfunktionen des technischen Systems der Fertigungsmaschine erzeugt (vgl. Pahl et al. 2007, S. 44 f.). Eine etablierte Möglichkeit zur Darstellung der Wechselwirkungen stellt die Funktionsstruktur (vgl. Krause et al. 2021, S. 336; Pahl et al. 2007, S. 44 bis S. 48) der Fertigungsmaschine dar. Die Verfügbarkeit der Funktionsstruktur ist zu diesem Zeitpunkt beispielsweise bereits durch die Erstellung während der Konzeption der Fertigungsmaschine (vgl. VDI 2221 Blatt 1 2019, S. 36 f.; Krause et al. 2021, S. 336) bzw. der modularen Gestaltung der Fertigungsmaschine (vgl. Krause et al. 2021, S. 359) gegeben. Ist die Funktionsstruktur nicht oder teilweise verfügbar, ist diese durch ein bestehendes Vorgehen in der erforderlichen Detaillierung ableitbar (vgl. Pahl et al. 2007, S. 44 bis S. 48 und S. 242 bis S. 255). Anhand der Wirkgrößen ist neben der Identifikation der beeinflussenden Hauptfunktion auch die Ermittlung der an dieser beteiligten Teilfunktionen möglich.

Die Wirkelemente der Fertigungsmaschine treten zum Beispiel zur Bereitstellung der Wirkgrößen während des Fertigungsprozesses mit den Wirkelementen des Halbzeugs in Wechselwirkung. Die Wirkelemente sind Bauteilen der Fertigungsmaschine zugeordnet, die mit weiteren Bauteilen der Fertigungsmaschine oder dem Halbzeug interagieren. Ein Beispiel ist die Leitung von mechanischer Energie durch mehrere miteinander gekoppelte Bauteile. Die Darstellung der Interaktion von Bauteilen ist durch die Baustruktur bzw. im Kontext modularer Produkte die Produktstruktur der Fertigungsmaschine möglich (vgl. Feldhusen et al. 2013b, S. 251).

Im Falle einer Anpassungskonstruktion wird davon ausgegangen, dass die Baustruktur besteht (vgl. Gericke et al. 2021c, S. 247) oder ähnlich dem Fall einer Neukonstruktion anhand prinzipieller Lösungen festgelegt und während der Konstruktion ergänzt wird (vgl. Pahl et al. 2007, S. 196 f.). Mit der Baustruktur ist der einfache Zugriff auf die Verknüpfungen zwischen den Baugruppen und den Bauteilen entsprechend dem erforderlichen Detaillierungsgrad möglich.

In Abbildung 6.6 sind die Elemente einer Produktarchitektur in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 277) dargestellt. Im linken Bereich ist die Funktionsstruktur, die aus der Hauptfunktion des technischen Systems und der Aufteilung in Teilfunktionen besteht. Im rechten Teil ist die Produktstruktur bestehend aus dem Produkt, in diesem Fall spezifisch für die Fertigungsmaschine, den Modulen und den jeweils zugeordneten Bauteilen enthalten. Funktionsstruktur und Produktstruktur sind durch die im Rahmen des Entwicklungsprozesses festgelegten technischen Lösungen miteinander verknüpft.

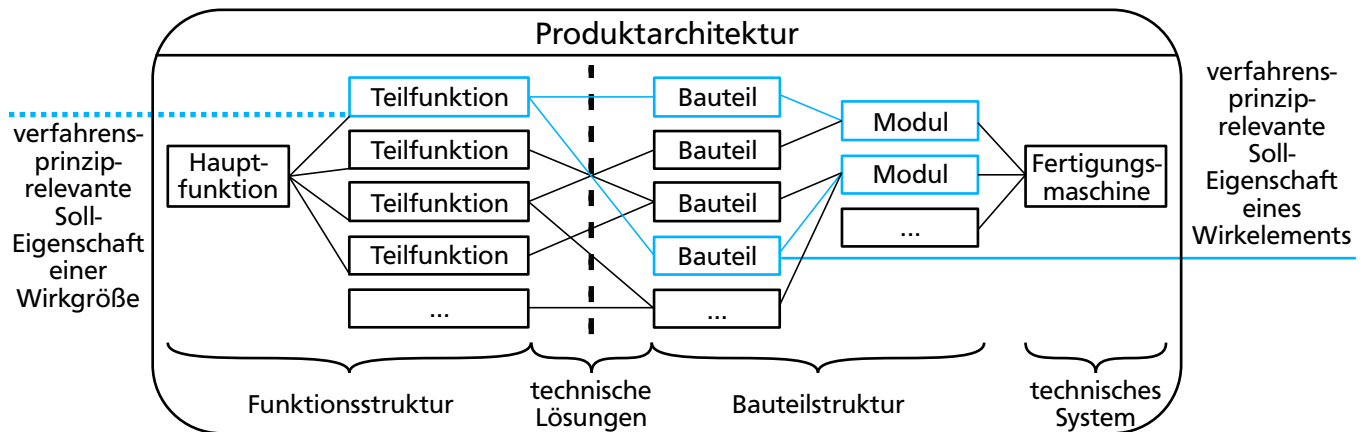


Abbildung 6.6: Verknüpfung von verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine mit den Teilfunktionen anhand von Eigenschaften der Wirkgrößen und den Bauteilen anhand von Eigenschaften der Wirkelemente in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 257) mit der Verknüpfung durch technische Lösungen in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 277) in Unterscheidung von der modularen Produktentwicklung mit der Bezeichnung der Baustruktur nach der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 10) in Anlehnung an Lindemann (2009, S. 45), eigene Abbildung

Die in der Funktionsstruktur abgebildeten Funktionen und die zugehörigen Bauteile, welche die Funktionen ermöglichen, sind durch die gewählten technischen Lösungen miteinander verknüpft (vgl. Feldhusen et al. 2013b, S. 277). Die Produktarchitektur stellt diese Verknüpfung von physischer Struktur und funktionaler Struktur her (vgl. Krause et al. 2021, S. 336 f.; Ulrich et al. 1995, S. 131 bis S. 133). Für die Fertigungsmaschine ist damit die zielgerichtete Rückverfolgung von Wirkgrößen und Wirkelementen und die Überführung der Anforderungen an die einzelnen Elemente der Fertigungsmaschine möglich. Das bedeutet, dass die Identifikation der für die Maschinenentwicklung relevanten Teilsysteme mit dem Ausgangspunkt der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften die gesamte Fertigungsmaschine umfasst. Anhand der bisherigen Ausführungen wird die systematische Ermittlung der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften und die Zuordnung dieser mit bestehenden oder ableitbaren etablierten Modellen der Fertigungsmaschine möglich. Damit ist der Teil der Methode zur Bereitstellung der benötigten Informationen für die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung abgeschlossen. Der Fokus in der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung besteht in der Zuordnung der spezifischen Anforderungen an die Teilsysteme der Fertigungsmaschine. Im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung sind diese Informationen nutzbar, indem direkt die beteiligten Bauteile und Baugruppen identifiziert und die Anforderungen



---

zugeordnet werden. Daran schließt sich der Abgleich der bestehenden Eigenschaften der Fertigungsmaschine mit den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften an. Bei diesem Abgleich ist die Unterscheidung in folgende zwei Fälle möglich:

1. Die Fertigungsmaschine stellt bereits die verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften bereit und es sind keine Änderungen erforderlich.
2. Die Fertigungsmaschine stellt die verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften nicht vollständig bereit und es wird der Entwicklungsrahmen festgelegt.

Anhand dieser Gegenüberstellung ist der teilsystemspezifische Entwicklungsbedarf der Fertigungsmaschine beschrieben und ist beispielsweise im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung zur Festlegung der Variationsart nutzbar. In diesem Abschnitt wurde die Verknüpfung der verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften an die Wirkgrößen und Wirkelemente unter Nutzung der Produktarchitektur mit den Teilsystemen und Bauteilen der Fertigungsmaschine erarbeitet. Mit der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Elementen innerhalb der Fertigungsmaschine ist die zweite Forschungsfrage beantwortet. Die systematische Durchführung wird mit der Einordnung in ein Vorgehen im folgenden Abschnitt 6.3 weiter gefördert.

## **6.3 Vorgehen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung**

Die Erweiterung der in der Produktentwicklung nutzbaren Potentiale durch verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaften und deren Verknüpfungen mit den Wirkelementen und Wirkgrößen der Fertigungsmaschine wurde in den vorherigen Abschnitten beschrieben. Die Anforderungen an die Fertigungsmaschinenentwicklung sind systematisch über die beschriebenen Zusammenhänge ableitbar. Die Methode wird hierzu durch ein Vorgehen zur Durchführung vervollständigt, sodass auch die erste Forschungsfrage beantwortet ist. Hierzu wird das Vorgehen zweckmäßig in mehrere Schritte unterteilt, die in Abbildung 6.7 visualisiert und im Folgenden beschrieben sind.

### **Festlegung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften**

Die zu erweiternden verfahrensinduzierten Eigenschaften eines bekannten gestalterischen Verfahrenspotentials bilden den Ausgangspunkt für die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung. Das Fertigungsverfahren ermöglicht in der Regel Wertebereiche der verfahrensinduzierten Eigenschaften, welche durch eine Fertigungsmaschine nur teilweise realisierbar und damit im Rahmen eines Produktentwicklungsprozesses nutzbar sind (vgl. Kapitel 4). Die Wertebereiche sind veränderbar bzw. erweiterbar und legen die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften fest. Mit diesen sind die beabsichtigten verfahrensinduzierten Eigenschaften in Form von Bauteilen fertigbar und stellen wiederum die erweiterte Nutzung des ursprünglichen gestalterischen Verfahrenspotentials dar.

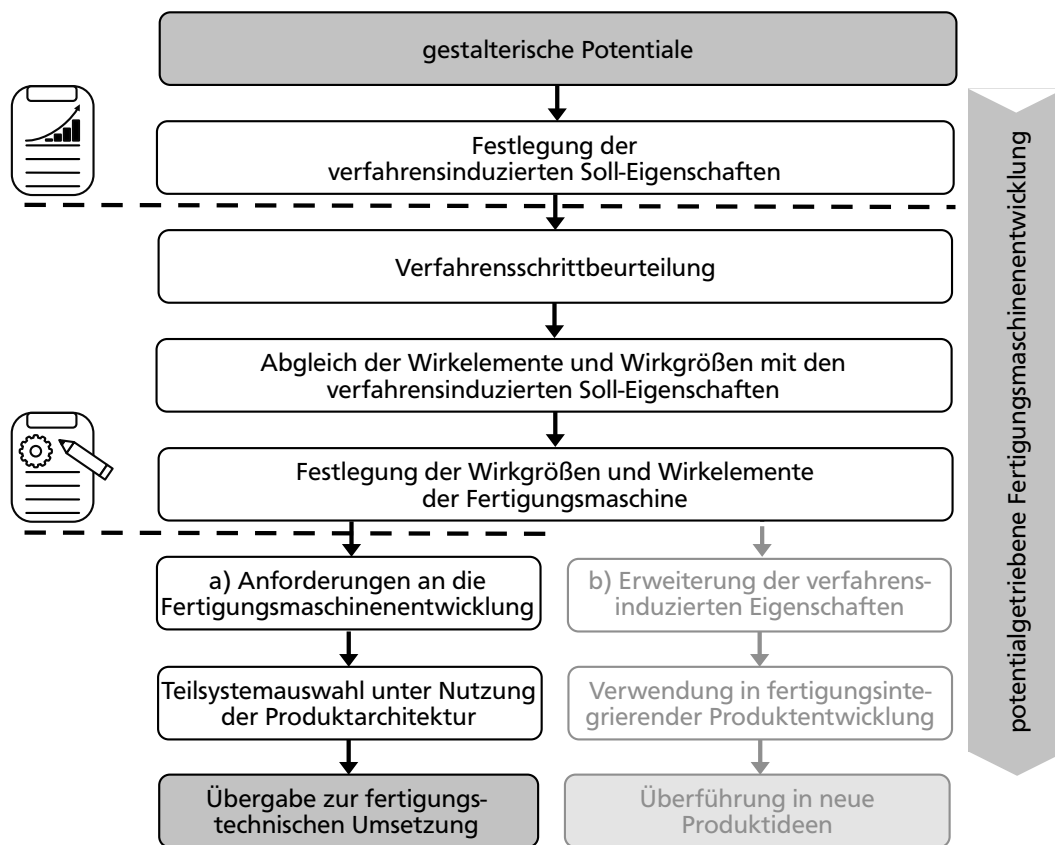


Abbildung 6.7: Vorgehen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung zur Erweiterung nutzbarer verfahrensinduzierter Eigenschaften, eigene Abbildung

## Verfahrensschrittbeurteilung

Der nachfolgende Schritt ist die Festlegung der betrachteten Fertigungsschritte. Für die potentialgetriebene Fertigungsmaschinenentwicklung werden die Schritte betrachtet, welche einen Einfluss auf die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften aufweisen oder mit anderen Fertigungsschritten verknüpft sind. Verknüpfungen bestehen in erforderlichen verfahrensprinziprelevanten bzw. verfahrensinduzierten Eigenschaften von Fertigungsschritten mit Einfluss auf die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften. Entsprechend des spezifischen Anwendungsfalls ist die Einschätzung beeinflussender Fertigungsschritte möglich. Das Ergebnis dieses Schritts ist die Verfahrensschrittbeurteilung und die Festlegung der weiter betrachteten Fertigungsschritte.

## Abgleich der Wirkelemente und Wirkgrößen mit den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften

Der Schritt Abgleich der Wirkelemente und Wirkgrößen mit den verfahrensinduzierten Eigenschaften beginnt mit der getroffenen Auswahl der betrachteten Fertigungsschritte und es erfolgt die Rückverfolgung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften innerhalb der Wirkzusammenhänge. Die Wirkzusammenhänge sind anhand des bereits verfügbaren fertigungstechnologischen Wissens beschreibbar oder werden spezifisch erarbeitet.

---

Ziel dabei ist die Beschreibung aller Einflüsse auf die durch die Fertigungsschritte beeinflussten verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften. Diese Detaillierung wird durch die Anwendung des VP-Modells, dessen Strukturierung und dessen Zuordnungsmöglichkeit für fertigungstechnologisches Wissen möglich (vgl. Abschnitt 3.3.3). Elementar sind die durch Detaillierung der Verfahrensprinzipien erreichten neuen Erkenntnisse über die Verknüpfung von Wirkelementen und Wirkgrößen (verfahrensprinziprelevante Eigenschaften) mit den verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften unter Nutzung beispielsweise einer Zuordnungsmatrix.

### **Festlegung der Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine**

Aufgrund dieser Erkenntnisse des vorherigen Schritts kann die Auswahl der berücksichtigten Fertigungsschritte gezielt ausgearbeitet, zuvor als relevant beurteilte Fertigungsschritte zurückgestellt und andere vorgezogen werden. Mit der Ausarbeitung ist die Identifikation neuer Wirkzusammenhänge möglich, sodass neue Fertigungsschritte in den Betrachtungsrahmen aufgenommen werden. Mit dem Vorliegen einer zufriedenstellenden Lösung ist die Festlegung der Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine (verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften) möglich. Diese sind als Anforderungen an den Fertigungsmaschinenentwicklungsprozess einsetzbar. Dies stellt den nächsten Schritt in Pfad a) dar. Sind durch die verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften weitere im Rahmen der Produktentwicklung interessante verfahrensinduzierte Eigenschaften aufgetreten, ist deren weiterführende Nutzung über den Pfad b) möglich.

### **Anforderungen an die Fertigungsmaschinenentwicklung - Pfad a)**

In Pfad a) besteht die Möglichkeit, die Anforderungen an die Maschinenentwicklung für die gesamte Fertigungsmaschine und der Teilsystemauswahl unter Nutzung der Produktarchitektur zur Entwicklung der Fertigungsmaschine zu überführen. Hierfür werden die Baustruktur und die Funktionsstruktur im Rahmen der Produktarchitektur genutzt. Entwicklungsspezifisch ist die Detaillierung der Zuordnung frei wählbar. Abgeschlossen wird der Pfad durch die Übergabe der zugeordneten verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften in Form von Anforderungen an die fertigungstechnische Umsetzung.

### **Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften - Pfad b)**

In Pfad b) werden die Änderungen der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch festgelegte Wirkgrößen und Wirkelemente innerhalb der Wirkzusammenhänge im Rahmen der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung berücksichtigt. Dies entspricht dem Vorgehen der fertigungsintegrierenden Entwicklung im VP-Modell. Durch die Emergenz der Wirkzusammenhänge ist das Auftreten zusätzlicher Veränderungen der verfahrensinduzierten Eigenschaften möglich, welche neben den intendierten verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften zu einer zusätzlichen Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des Bauteils führen. Diese sind wiederum für innovative Produkte möglicherweise nutzbar (vgl. Gramlich 2013, S. 139 f.). Dieser Pfad schließt mit diesen neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften und deren Überführung in neue Produktideen durch Verwendung im Rahmen der fertigungsintegrierenden Entwicklung.

---

## 7 Anwendung der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung

---

In diesem Kapitel werden nach der Verfahrens- und Funktionsprototypentwicklung sowie der Erarbeitung der Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung die Erkenntnisse auf Beispiele des 3DConFil-Verfahrens angewandt. In Abschnitt 7.1 wird die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung zur Ableitung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine zur Integration von Leitungen mit geringerem Durchmesser eingesetzt und initial verifiziert. Anschließend wird in Abschnitt 7.2 für das 3DConFil-Verfahren eine Möglichkeit der Verfahrenserweiterung ohne Anpassung der Wirkelemente des Funktionsprototyps vorgestellt und im Rahmen einer Gleitlageranwendung in Abschnitt 7.3 überprüft. Abschließend wird in Abschnitt 7.4 die Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch neue Freiheitsgrade der Bauplattform dargelegt.

### 7.1 Initiale Verifikation anhand der Durchmesserreduktion integrierbarer Leitungen

In diesem Abschnitt wird die Methode zur Ableitung von Anforderungen an die Fertigungsmaschine und der Zuordnung zu den Teilsystemen anhand eines Beispiels zur Erweiterung der nutzbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften des 3DConFil-Verfahrens zur Leitungsintegration zwischen zwei Druckschichten dargelegt. Das 3DConFil-Verfahren stellt Fertigungsschritte zur Integration einer flexiblen elektrischen, optischen oder stoffbezogenen Leitung in ein additiv gefertigtes Bauteil bereit (vgl. Abschnitt 5.1). Während der initialen Entwicklung wurde die Integration von Leitungen mit einem Durchmesser zwischen 2,4 mm bis 6,7 mm überprüft (vgl. Abschnitte 5.2 und A.10).

Die Erweiterung des nutzbaren Potentials besteht in der Integration von Leitungen mit einem kleineren Durchmesser bis 1 mm. Die Leitung wird in einen additiv gefertigten Kanal innerhalb des Bauteils eingelegt, dessen Geometrie der Leitungsintegration zwischen zwei Schichten entspricht (vgl. Abschnitt 5.3.1). Die Anforderungen zur Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften werden mit den Bereichsforderungen BF:  $D_{\text{Leitungsdurchmesser}}$  zwischen 1 mm bis 6,7 mm und BF:  $D_{\text{Kanal Durchmesser}} \geq 1 \text{ mm}$  festgelegt. Diese Anforderungen quantifizieren die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften zur Integration von Leitungen mit dem Durchmesser von 1 mm und bilden neben dem fertigungstechnologischen Wissen die Eingangsinformationen zur Methodendurchführung.

Ausgehend von den in den Abschnitten 3.3 und 5.2.4 beschriebenen Fertigungsschritten des FFF-Verfahrens und des 3DConFil-Verfahrens werden die zur Erzeugung der verfahrensinduzierten Soll-

---

Eigenschaften erforderlichen Fertigungsschritte ausgewählt. Die Leitung wird in den Kanalabschnitt innerhalb des Grundkörpers eingepresst. Die Kanalgeometrie ermöglicht die Leitungsintegration zwischen zwei Schichten durch eine zerstörungsfreie Klemmverbindung der Leitung mit dem Bauteil und ist durch die geometrischen Parameter des Leitungsverlaufs innerhalb des Grundkörpers in Form von Eigenschaften beschreibbar.

Der Grundkörper wird durch das FFF-Verfahren aufgebaut, sodass dieser die verfahrensinduzierten Eigenschaften dieses Verfahrens aufweist. Während des Einpressens der Leitung in den horizontalen Kanalabschnitt treten die Wirkelemente der Leitung und des Kanalabschnitts mit den Wirkelementen der Fertigungsmaschine unter der Wirkgröße der Einpresskraft in Wechselwirkung. Aus diesem Grund werden der Fertigungsschritt des FFF-Verfahrens und der Fertigungsschritt zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten betrachtet. Mit dieser Festlegung ist die Verfahrensschrittbeurteilung abgeschlossen. In den folgenden Abschnitten werden anhand dieser Fertigungsschritte die Anforderungen an die Fertigungsmaschine abgeleitet.

### 7.1.1 Beeinflussung während der Grundkörperfertigung

Im Fertigungsschritt der additiven Grundkörperfertigung mittels FFF-Verfahren wird die untere Grenze der Anforderung mit einem Kanaldurchmesser von 1 mm Nennmaß betrachtet. Das für dieses Beispiel ausgeführte VP-Modell ist bis zu den abgeleiteten Anforderungen an die Fertigungsmaschine als verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Erweiterung der nutzbaren verfahrensinduzierten Eigenschaft als Soll-Eigenschaft ist rechts schematisch visualisiert.

Für die Fertigung des Kanals innerhalb des Grundkörpers zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten stellt das FFF-Verfahren den Aufbau des Bauteils dar und legt die Wirkzusammenhänge fest. Wirkelemente sind beispielsweise der Kühlkörper sowie die Extrusionsdüse. Wirkgrößen bestehen im zugeführten Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , den Kräften zur Positionierung der Düse  $F_{\text{FFF}}$  in den drei Raumrichtungen und der Förderkraft  $F_{\text{Förderung\_KS}}$  zur Zuführung des Kunststofffilaments. Diese Wirkgrößen sind im mittleren Bereich in Abbildung 7.1 dargestellt. Das verwendete Halbzeug, das Kunststofffilament, sowie der 3DConFil-Funktionsprototyp werden in diesem Beispiel nicht verändert und sind im linken Bereich visualisiert. Das Wirkelement Extrusionsdüse ist zusammen mit den Hotend-Komponenten dargestellt. Die weiteren Wirkelemente zur Bereitstellung der Wirkgrößen sind nicht graphisch wiedergegeben. Die zur Beeinflussung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft relevanten Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine sind identifiziert, sodass im nachfolgenden Vorgehensschritt die Festlegung der Anforderungen durchgeführt wird.

Unterhalb des VP-Modells in Abbildung 7.1 sind zwei Ausschnitte der neuen Kanalgeometrie mit 1 mm Nennmaß dargestellt, die bereits zur Fertigung durch das FFF-Verfahren in Druckschichten aufgeteilt sind. In der linken Darstellung ist die verfahrensinduzierte Eigenschaft der Schichthöhe  $h_s$  mit 0,2 mm visualisiert. Diese Schichthöhe entspricht der verfahrensinduzierten Eigenschaft, die mit den Wirkgrößen einer Vielzahl kommerziell verfügbarer Fertigungsmaschinen fertigbar ist (vgl. Anycubic Technology Co., Ltd 2022; Prusa Research a.s. 2022; Markforged Inc. 2023). Bei diesem Beispiel wird deutlich, dass die geometrische Auflösung des Leitungskanals durch das FFF-Verfahren bei der verfahrensinduzierten Eigenschaft einer Schichthöhe von 0,2 mm nicht ausreichend ist.

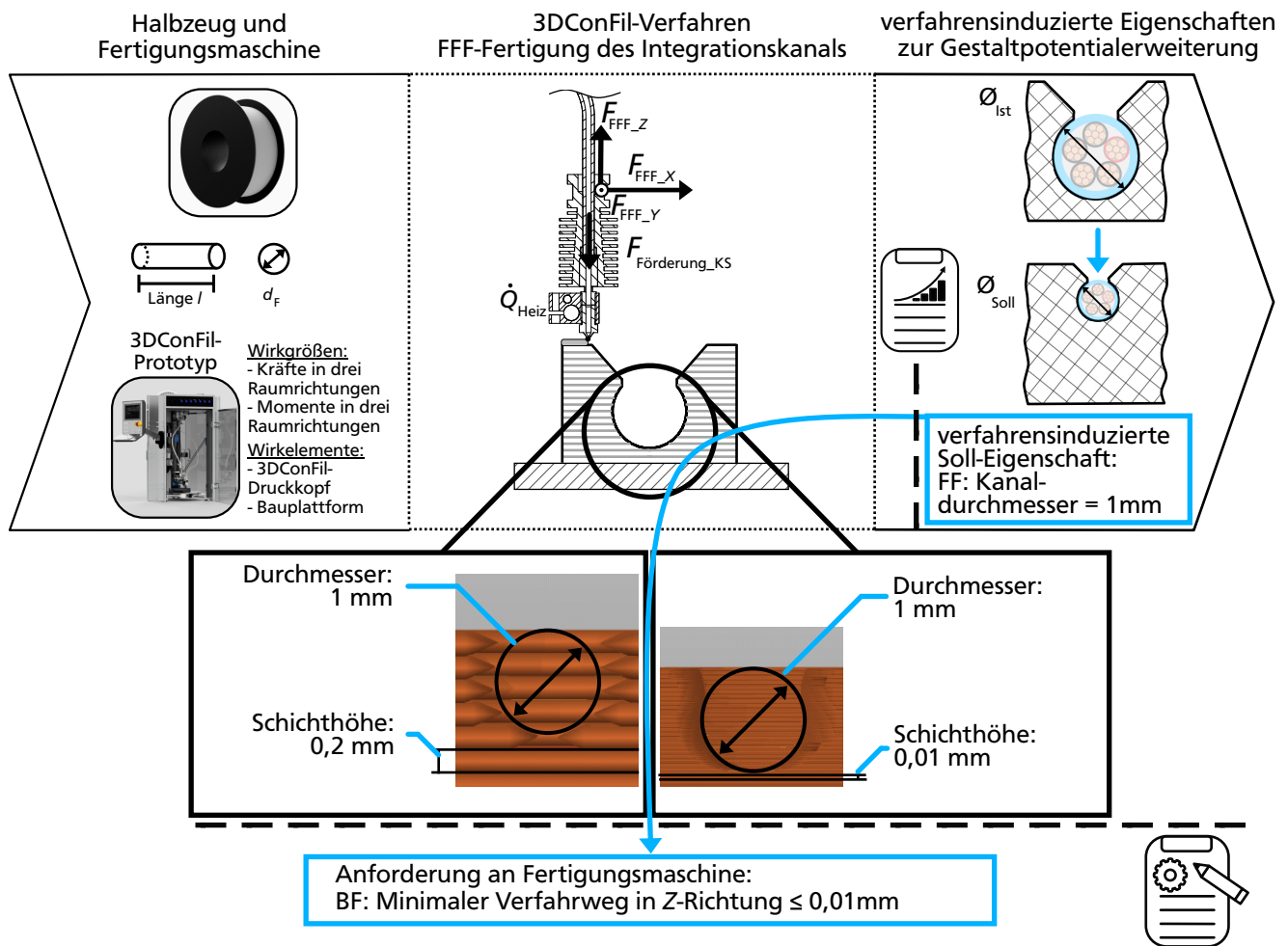


Abbildung 7.1: Verknüpfung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den Anforderungen an die Fertigungsmaschine am Beispiel der Integration von Leitungen mit kleinerem Durchmesser für den vorgelagerten FFF-Fertigungsschritt zur Fertigung des horizontalen Kanalabschnitts unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

Die Klemmwirkung wird aufgrund der fehlenden Ausbildung des Klemmbereichs nicht erreicht. Im Vergleich dazu ist im rechten Bauteilausschnitt der Leitungskanal bei einer Schichthöhe von 0,01 mm dargestellt. Dieser Wert wurde durch die iterative Überprüfung der geometrischen Auflösung der Kanalkontur ermittelt. Bei diesem Wert bilden die Grundkörperschichten die Kanalgeometrie zur Klemmung der Leitung ausreichend ab. Diese Forderung ist anhand bisheriger Forschung im Bereich der Mikrokanäle mit Auflösungen unterhalb von 100  $\mu\text{m}$  (vgl. Quero et al. 2021, S. 3727) mit dem FFF-Verfahren realisierbar. Die geforderte Schichthöhe erfordert die Positioniergenauigkeit der FFF-Düse im gleichen Wertebereich, sodass die verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaft der Fertigungsmaschine der Verfahrensweg in Z-Richtung mit  $\leq 0,01\text{ mm}$  ist. Diese Soll-Eigenschaft stellt anhand dieses Beispiels die Bereichsforderung an die Fertigungsmaschine dar und der zweite Fertigungsschritt wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

## 7.1.2 Beeinflussung während der Integration zwischen zwei Schichten

Nach dem Aufbau des Grundkörpers folgt der Fertigungsschritt der Integration zwischen zwei Schichten mit dem Einpressen der Leitung in den horizontalen Kanalabschnitt. Zur Integration der Leitung wird diese mit der ersten Generation des Funktionsprototyps durch eine Kugelrolle eingepresst. Für den Fall der Integration entlang einer Geraden ist in Abbildung 7.2 das VP-Modell dargestellt.

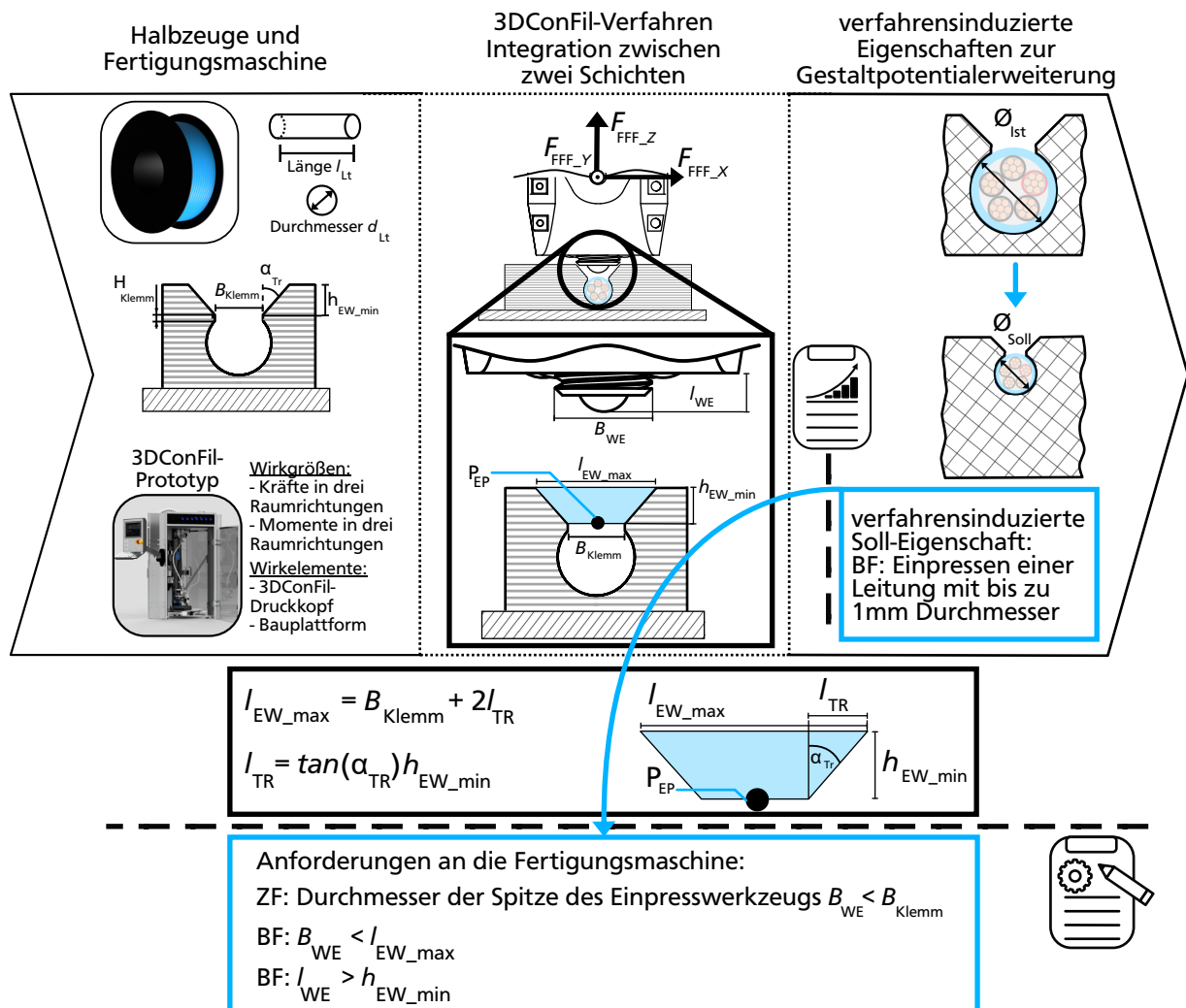


Abbildung 7.2: Verknüpfung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den Anforderungen an die Fertigungsmaschine am Beispiel der Integration von Leitungen mit kleinerem Durchmesser zwischen zwei Schichten für den Fertigungsschritt der Integration zwischen zwei Schichten unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

Die verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaft ist analog zur Betrachtung des vorherigen Fertigungsschritts im rechten Teil der Abbildung hervorgehoben. Der Wirkzusammenhang dieses Fertigungsschritts besteht darin, dass die Leitung durch den Druckkopf in den trichterförmigen Zentrierbereich

---

des Kanals eingelegt wird. Anschließend wird die Leitung mittels einer Kugelrolle in den Kanal eingepresst. Hierzu werden die Wirkgrößen zur Positionierung des Druckkopfs in den drei Raumrichtungen  $F_{\text{FFF}}$  genutzt. Die Abmaße des Wirkelements Kugelrolle sind mit  $B_{\text{WE}}$  und  $l_{\text{WE}}$  in der Schnittansicht beschrieben und werden als Fertigungsmaschineneigenschaften festgelegt. Zur Sicherstellung des vollständigen Einpressens der Leitung ist es erforderlich, dass die Kugelrolle bis zum Punkt  $P_{\text{EP}}$  in den Zentrierbereich verfahren wird. Der Punkt ist im mittleren Bereich des VP-Modells dargestellt. Der Zentrierbereich ist geometrisch beschreibbar. Damit sind die relevanten Wirkgrößen und Wirkelemente ermittelt und die Festlegung der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine folgt.

Die Wirkgrößen der Fertigungsmaschine sind zur Positionierung und zur Aufbringung der Einpresskraft erforderlich. Im Vergleich zur Integration von Leitungen mit größerem Durchmesser sind die erforderlichen Kräfte geringer und werden im Folgenden nicht eingehender betrachtet. Das Wirkelement der Fertigungsmaschine besteht in der Kugelrolle, die mit der Leitung in Kontakt kommt. Der tiefste Punkt der Kugelrolle wird bis zum Punkt  $P_{\text{EP}}$  verfahren. Bei diesem Eintauchen in den Kanalbereich des Bauteils soll keine Kollision des Wirkelements mit dem Grundkörper erfolgen. Hieraus folgen geometrische Anforderungen an das Wirkelement Einpresswerkzeug der Fertigungsmaschine. In Abbildung 7.2 ist die geometrische Beschreibung des Zentrierbereichs in der Schnittebene orthogonal zur Kanalachse aufgeführt. Der Punkt  $P_{\text{EP}}$  liegt um den Wert des Gestaltungsparameters  $h_{\text{EW}_{\text{min}}}$  in Z-Richtung unterhalb der Bauteiloberfläche. Daraus ergibt sich für die aktuelle technische Lösung des Funktionsprototyps, dass der tiefste Punkt der Kugel mindestens  $h_{\text{EW}_{\text{min}}}$  tiefer als die restlichen Komponenten liegen muss. Diese verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaft ist in Form der Anforderung BF:  $l_{\text{WE}} > h_{\text{EW}_{\text{min}}}$  beschreibbar. Die räumliche Ausdehnung in der X-Y-Ebene der Kugelrolle über die Länge  $l_{\text{WE}}$  bei der Breite  $B_{\text{WE}}$  muss innerhalb des Trichtervolumens liegen. Die Anforderungen sind über die möglichen Öffnungsbreiten des Zentrierbereichs beschreibbar.

Der Wirkzusammenhang ist entsprechend Abbildung 7.2 beschreibbar. Die verfahrensinduzierte Eigenschaft des integrierbaren Leitungsdurchmessers ist mit den Parametern des Kanalprofils während der Integration zwischen zwei Schichten verknüpft. Diese Verknüpfung ist zusätzlich mit der Verknüpfung der minimalen Schichthöhe in der Matrixdarstellung visualisierbar. In Abbildung 7.3 ist der Auszug einer Tabelle für das 3DConFil-Verfahren dargestellt.

In den ersten beiden Spalten sind die verfahrensinduzierten Eigenschaften des FFF-Verfahrens in Anlehnung an die Eigenschaften der additiven Fertigung mit den Zugprobeneigenschaften (vgl. De Bernardez et al. 2023, S. 119 bis S. 121) und der geometrischen Abbildungsgenauigkeit in Abhängigkeit der Schichthöhe (vgl. Abschnitt 2.4) aufgeführt. In der letzten Spalte ist die verfahrensinduzierte Eigenschaft der Leitungsintegration zwischen zwei Schichten eingetragen. Die Verbindung zu den Eigenschaften der Breite und Höhe des Einpresswerkzeugs als Wirkelement der Fertigungsmaschine ist in Abbildung 7.2 mit der mathematischen Beschreibung der Geometrie des Zentrierbereichs dargelegt. Die Schichthöhe des FFF-Verfahrens beeinflusst die Oberflächengeometrie entsprechend Abbildung 7.1 und ist in der Matrix durch die Verbindung von Schichthöhe und minimalem Verfahrensweg in der Aufbaurichtung Z visualisiert.



<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>verfahrensinduzierte Eigenschaften (viE)</span> <span>verfahrensprinziprelevante Eigenschaften (vprE)</span> </div>	Bauteilfestigkeit 	geometrische Abbildungsgenauigkeit 	Geometrie des Zentrierbereichs 
Breite des Einpresswerkzeugs $B_{WE}$	←	←	$l_{EW,max} = B_{Klemm} + 2l_{TR}$ $l_{TR} = \tan(\alpha_{TR}) h_{EW,min}$
Höhe des Einpresswerkzeugs $l_{WE}$	←	←	$l_{EW,max} = B_{Klemm} + 2l_{TR}$ $l_{TR} = \tan(\alpha_{TR}) h_{EW,min}$
minimaler Verfahrenweg in Z-Richtung	←		

Abbildung 7.3: Auszug der Matrixdarstellung von Verknüpfungen zwischen den verfahrensinduzierten Eigenschaften des Bauteils und der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften des Funktionsprototyps für die Leitungsintegration zwischen zwei Schichten des 3DConFil-Verfahrens mit der Bauteilfestigkeit nach De Bernardes et al. (2023, S. 119 bis S. 121), eigene Abbildung

### 7.1.3 Teilsystemzuordnung der Anforderungen

Im Anschluss an die Ableitung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine werden diese den Teilsystemen des Funktionsprototyps zugeordnet. Die Zusammenhänge innerhalb des Funktionsprototyps lassen sich in Form der Funktionsstruktur bzw. der Baustruktur darstellen. Für das Beispiel des 3DConFil-Verfahrens wird die Z-Position des austretenden Kunststoffes durch die Position der Düse festgelegt. Ein Ausschnitt der Produktarchitektur mit blau gefärbten mechanischen potentialbeeinflussenden Elementen der Funktionsstruktur und Baustruktur ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Positionierung in Z-Richtung stellt die relevante Wirkgröße dar. Ausgangspunkt in der Produktarchitektur ist die Funktion *FFF-Düsenaustritt in Richtung der Z-Achse positionieren*.

Ausgehend von dieser relevanten Wirkgröße sind die funktionstragenden Bauteile bzw. Baugruppen feststellbar. Relevante Baugruppen sind das Portalsystem und der Druckkopf. Beispielsweise ist der Druckkopf mit dem Effektor des Portalsystems verbunden. Das Portalsystem stellt die Kräfte an den Effektor über das Verfahren von Schlitten, die durch Kugelgelenke und Portalstangen mit dem Effektor verbunden sind. Die Kraft zur Verstellung der rollend gelagerten Schlitten wird mit einem Zahnriemen entlang der Führungsprofile aufgebracht, wobei der Antrieb des Riemens durch die Antriebsritzeln auf den Wellen der drehmomentbereitstellenden Schrittmotoren erfolgt. Das Einpresswerkzeug erfüllt die Teilfunktion *Kraft auf Leitung in negativer Z-Richtung aufbringen* und ist mit dem Bauteil Kugelrolle als technische Lösung verknüpft. Das Bauteil ist der Baugruppe Druckkopf zugeordnet. Die Analyse und Nutzung der aufgezeigten Wechselwirkungen innerhalb der Fertigungsmaschine findet im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung statt.

Ein möglicher Auslegungsbereich des Portalsystems ist beispielsweise die Position des Effektors und damit des Druckkopfs sowie der FFF-Düse von die Positioniergenauigkeit der drei Antriebsschlitten durch die Wechselwirkungen des Deltaaufbaus. Im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung

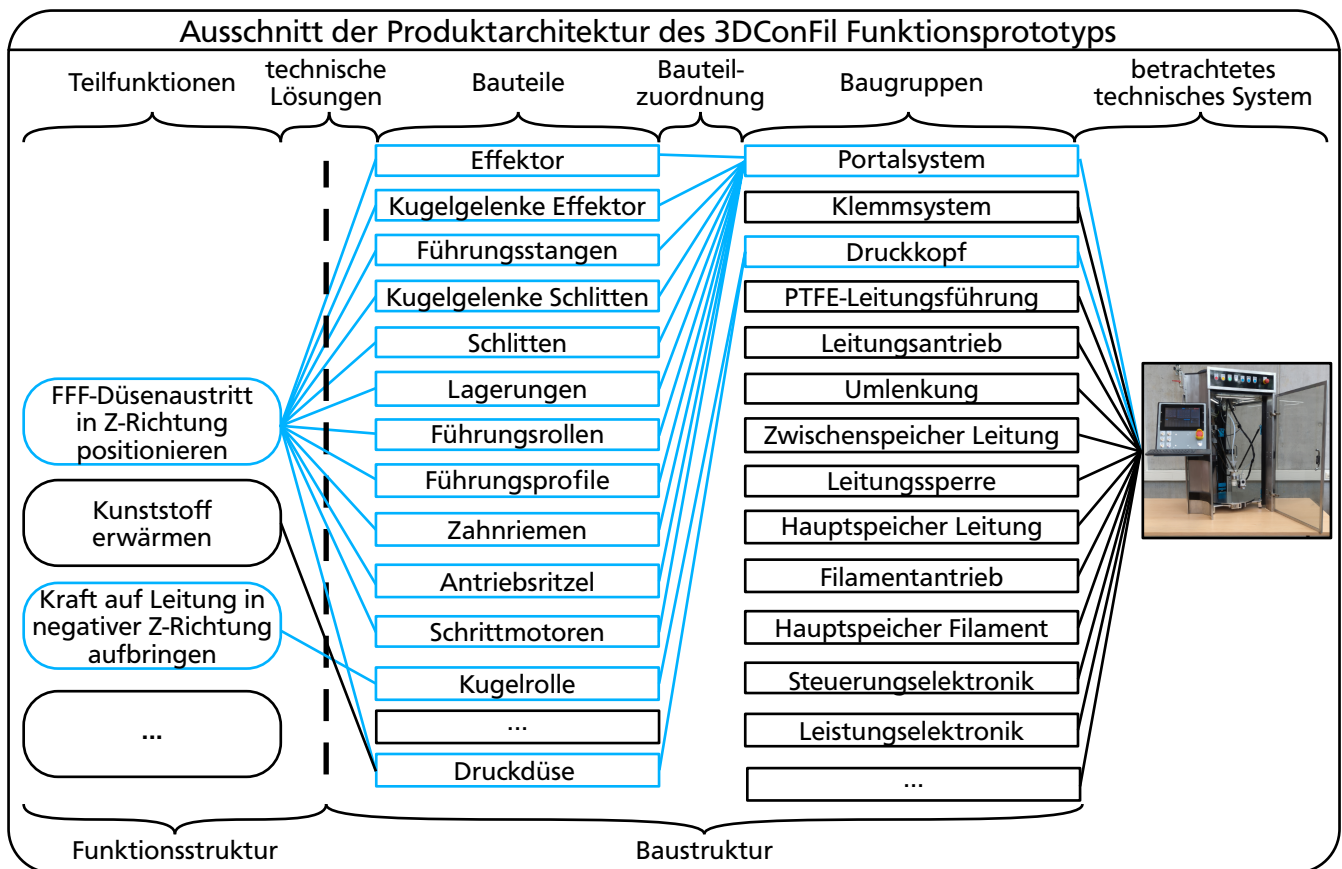


Abbildung 7.4: Teildarstellung der Produktarchitektur des 3DConFil-Funktionsprototyps als Visualisierung der potentialbeeinflussenden Funktionen und Bauteile. Mit der Darstellungsform in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 257) mit der Verknüpfung durch technische Lösungen in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 277) in Unterscheidung von der modularen Produktentwicklung mit der Bezeichnung der Baustuktur nach VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 10) in Anlehnung an Lindemann (2009, S. 45), eigene Abbildung

ist die Anforderung an die Z-Höhe der Schicht über die Deltakinematik in die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Effektors detaillierbar. Dies trifft auch auf das Einpresswerkzeug zu. Beispiele sind die Änderung der Geometrie der Kugelrolle zu kleineren Abmaßen oder die Wahl eines anderen Wirkprinzips zum Einpressen der Leitung in den Kanal. Mit der Produktarchitektur sind die relevanten Bauteile markiert, die zur Funktionserfüllung beitragen und somit zu berücksichtigen sind. Für die weitere Lösungsentwicklung stehen etablierte Entwicklungsvorgehen beispielsweise im systematischem Kontext mit der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019) oder erfahrungsbasiert (vgl. Abschnitt 3.1.4) zur Verfügung.

Anhand des Beispiels der Ableitung von Anforderungen an die Fertigungsmaschine zur Integration von Leitungen mit geringerem Durchmesser wurde die Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung angewendet und initial verifiziert. Durch die Anwendung wurden verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften ermittelt, die von dem Funktionsprototyp des

---

3DConFil-Verfahrens in der ersten Generation nicht unmittelbar erfüllt werden, sodass zur Realisierung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften die Weiterentwicklung des Funktionsprototyps erforderlich ist. Im folgenden Abschnitt wird die Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften mit den bestehenden verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften des Funktionsprototyps unter Nutzung des Modells der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung dargelegt.

## 7.2 Erweiterung nutzbarer Potentiale der Funktionsintegration

In diesem Abschnitt wird eine Möglichkeit zur Erweiterung integrierbarer Funktionen unter Nutzung der bestehenden Wirkgrößen und Wirkelemente des Funktionsprototyps herausgearbeitet. Das 3DConFil-Verfahren ermöglicht die Fertigung von leitungsintegrierten Bauteilen. Die Funktionen des *Leitens* optischer und elektrischer Energien bzw. Signale sowie von Stoffen werden in das Bauteil integriert. Mit der Nutzung weiterer physikalischer Effekte sind neben der einzelnen Funktion *Leiten* weitere Funktionen, beispielsweise zum Beheizen oder Kühlen von Bauteilen durch die Wärmeübertragung mit geleiteten Stoffen oder die Detektion magnetischer Objekte durch die Nutzung des induktiven Verhaltens stromdurchflossener Leitungen möglich. In diesem Abschnitt wird eine Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens zur Integration weiterer Funktionen durch die Integration zusätzlicher Bauteile erarbeitet. Bei der Lösungsentwicklung werden bestehende Wirkgrößen und Wirkelemente für einen geringeren Entwicklungsaufwand bzgl. des Funktionsprototyps bevorzugt.

Zur Lösungsableitung wird die Kombinierbarkeit von Leitungen mit weiteren Funktionsträgern betrachtet. Die integrierten Leitungen enden innerhalb des Bauteils, an dessen Bauteiloberfläche oder liegen außerhalb des Bauteilvolumens frei. An den Leitungsenden ist die Verbindung mit verschiedenen Funktionsträgern von einer Kupplung zu einer weiteren Leitung bis zu Aktoren und Sensoren möglich. Die Funktionsträger werden mit den Leitungsenden verbunden und ermöglichen die Bereitstellung einer Vielzahl von Funktionen. Aufgrund der Verbindung mit den Leitungsenden werden diese im Folgenden als *Endapplikationen* bezeichnet. Die Endapplikationen in Form von Verbindungen, beispielsweise elektrische Stecker, erfüllen grundlegend die Funktionen *Verknüpfen* sowie *Leiten*. Weitere mögliche Funktionen sind *Speichern*, *Wandeln* und *Umformen*. Für das 3DConFil-Verfahren stellt die Verarbeitungs- und Integrationsmöglichkeit von Endapplikationen in den leitungsintegrierten Bauteilen eine Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration dar (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1165). Die erweiterten gestalterischen verfahrensinduzierten Eigenschaften umfassen beispielsweise die Position der neuen Funktionserfüllung, die Orientierung innerhalb des Bauteils und die mechanische Verbindung der Funktionsträger mit dem Bauteil.

Zur Erschließung dieses Potentials wird in diesem Abschnitt das 3DConFil-Verfahren um die Integrationsmöglichkeit von Endapplikationen erweitert. Anhand möglicher Funktionen der Endapplikationen für die integrierbaren Leitungen wird eine Übersicht der kommerziell verfügbaren Applikationen ermittelt und eine Beschreibungsmöglichkeit der Variantenvielfalt an Endapplikationen festgelegt. Diese ist Ausgangspunkt einer Adaption der 3DConFil-Verfahrensschritte unter Beibehaltung der Integrationsschritte der flexiblen Leitungen. Mit der Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung werden die daraus folgenden Anforderungen an die Wirkgrößen und die Gestalt der Wirkelemente der physischen Komponenten des Funktionsprototyps abgeleitet.

---

## 7.2.1 Variantenvielfalt von Endapplikationen

Die Endapplikationen führen zu Erweiterungsmöglichkeiten für elektrische, mechanische und stoffbezogene Leitungen. Weiterhin stehen standardisierte, kommerziell verfügbare Endapplikationen im Fokus. Eigenentwicklungen, welche mit dem erweiterten 3DConFil-Verfahren integriert werden können, bleiben davon unberührt und die Erweiterung der Integrationsmöglichkeiten ist im Nachgang durch die Eigenentwicklungen ohne Einschränkung möglich. Zur Ermittlung einer Übersicht kommerziell verfügbarer Endapplikationen werden frei zugängliche Beschaffungsmöglichkeiten ohne besondere Zugangsvoraussetzungen berücksichtigt, sodass keine Einschränkungen in der Auswahl der nutzbaren Endapplikationen bestehen. In der im Anhang A.8 aufgeführten Tabelle A.3 sind die zur Ermittlung der Endapplikationen genutzten Beschaffungsquellen zusammengefasst.

Die Anpassung der Funktionsbereitstellung an die Anforderungen des Produkts und der Umgebung führt zu einer drastischen Vielfalt von Endapplikationen. Beispielsweise für den Anwendungsfall der Verbindung zweier elektrischer Leitungen im KFZ-Bereich unter der zusätzlichen Anforderung an die Dichtigkeit gegenüber dem Eindringen flüssiger Medien der Umgebung nach IP67 (vgl. ISO 20653 2023, S. 2 bis S. 6) werden bei dem Marktanbieter RS Components GmbH zum Zeitpunkt der Suche 508 verschiedene Spezifikationen und Bauformen angeboten (vgl. RS Components GmbH 2022). Unterscheidungsmöglichkeiten in den Spezifikationen treten für die elektrische Verbindung im Bereich der Stromstärke, der Spannung, der Dichtigkeit, der Montage, und Zusatzfunktionen beispielsweise der Zugentlastung auf. Entsprechend der Anordnung der Kontakte der Leitungen bestehen verschiedene Formen der äußeren Geometrie, welche zum Beispiel ähnlich zu einem Zylinder oder einem Rechteck ist. Die Endapplikationen für optische Leitungen, stoffbezogene Leitungen und für Aktoren und Sensoren erweitern die Anzahl möglicher Endapplikationen zusätzlich.

Eine spezifische Gestaltung der Fertigungsschritte führt, bedingt durch die große Variantenvielfalt der Endapplikationen, zu hoher interner Vielfalt. Die interne Vielfalt beschreibt die Anzahl von beispielsweise Bauteilen, Prozessen und Fertigungsmitteln, welche zur Variantenbereitstellung notwendig sind und zu Kosten- sowie Komplexitätssteigerungen führen (vgl. Krause et al. 2018, S. 35). Erstrebenswert ist die Bereitstellung der Varianten bei möglichst geringer interner Komponentenvarianz, beschrieben durch die technischen Merkmale (vgl. Krause et al. 2018, S. 74 f.). Als Lösungsansatz wird eine modulare Produktstruktur nach dem Konzept der Produktlebensphasen als *make-to-order* gewählt (vgl. Krause et al. 2018, S. 105 f.). Aus diesem Grund wird anhand der Analyse typischer Endapplikationen eine geometrische Beschreibungsmöglichkeit abgeleitet, welche zur Adaption des Verfahrens und der Wirkgrößen sowie Wirkelemente verwendet werden.

Zur Ableitung einer Integrationsmöglichkeit mit geringer interner Komplexität wird die Einhüllende von Endapplikationen betrachtet. In Abbildung 7.5 a) ist eine Übersicht von möglichen Endapplikationen dargestellt, die einen Auszug möglicher Endapplikationen darstellen. Diese Formen von Endapplikationen sind unabhängig ihrer Funktion durch eine geometrische Einhüllende beschreibbar, deren Berücksichtigung beispielsweise zur Übertragung von Handhabungskräften erforderlich ist. In Abbildung 7.5 b) sind für einen Toslinkstecker ein einhüllendes Rechteck mit den Kantenlängen  $h_{RE}$ ,  $b_{RE}$  und  $t_{RE}$  sowie in Abbildung 7.5 c) ein einhüllender Zylinder für einen Federkontaktstift mit den Abmaßen  $h_{Zyl}$  und  $d_{Zyl}$  visualisiert.

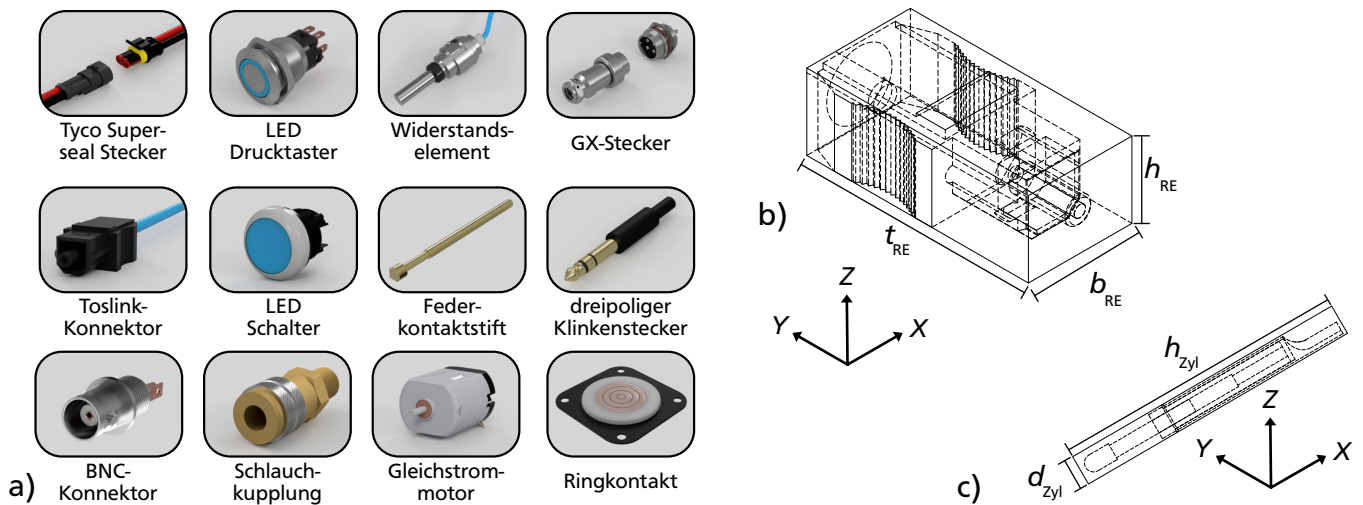


Abbildung 7.5: Beispiele für Endapplikationen in a), rechteckige Einhüllende mit Drahtmodell eines Toslink-Steckers in b) und zylindrische Einhüllende mit Drahtmodell eines Federkontaktstifts in c), eigene Abbildungen a) bis c)

Zur Integration der Endapplikation sind die Kontaktierung von Leitung und Endapplikation, die Positionierung innerhalb des Grundkörpers und die Herstellung einer mechanischen Verbindung von Endapplikation und Grundkörper erforderlich. Die Kontaktierung der Leitung mit der Endapplikation ist spezifisch für die jeweils eingesetzte Endapplikation. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl, Anordnung und Art der Verbindungen sind jeweils unterschiedliche Wirkgrößen mit unterschiedlichen Wirkelementen erforderlich. Im industriellen Umfeld werden die Fertigungsschritte von dedizierten, spezialisierten Maschinen beispielsweise für die automatisierte Abisolierung und das Crimpen elektrischer Leitungen (vgl. Schleuniger GmbH 2023b; Zoller & Fröhlich GmbH 2023), das Zusammenstellen von Kabelbäumen (vgl. Komax Holding AG 2023b) oder das automatisierte Verlöten von Steckerkontakten und den Leitungslitzen (vgl. Cosmic Corporation 2023) bereitgestellt. Das Ergebnis dieser abstrakteren Prüfung der erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente zur Herstellung der Leitungsverbindung verdeutlicht, dass es zu einem starken Anstieg der Funktionen der Fertigungsmaschine kommt.

Anhand der Anzahl zusätzlicher Wirkgrößen und Wirkelemente wird eine Integration dieser Fertigungsschritte in den Funktionsprototyp zurückgestellt. Sofern in einem späteren Anwendungsfall ausschließlich eine Endapplikation in hoher Stückzahl verarbeitet wird, ist eine Erweiterung weiterhin möglich. Für die weitere Entwicklung wird von dem Zustand ausgegangen, dass die Leitung vor Beginn der Bauteilfertigung mit der Endapplikation bereits vorkonfektioniert ist.

## 7.2.2 Integrationsmöglichkeit der Endapplikationen

Für die Handhabung und die mechanische Verbindung von Endapplikation und Leitung mit dem Grundkörper stellt die Verwendung der bereits von dem Funktionsprototyp gestellten Wirkgrößen

---

mit den hierzu vorhandenen Wirkelementen eine vorteilhafte Lösung aufgrund der Nutzung der bestehenden physikalischen Bauteile dar. Die bisherigen Wirkgrößen sind in Abschnitt 5.3 visualisiert. Die in Abbildung 7.5 dargestellten Endapplikationen als Repräsentation kommerziell verfügbarer Endapplikationen sind in ihrer geometrischen Ausdehnung mittels eines Hüllkörpers mit geringer Komplexität beschreibbar. Diese Formen verdeutlichen in Kombination mit der Kontaktanordnung die Unterscheidung in der Handhabung der Endapplikationen in Bezug auf die Rotationssymmetrie hinsichtlich einer Achse.

Während der Toslink-Stecker keine Rotationssymmetrie aufweist, besteht bei dem Federkontaktstift eine Rotationssymmetrie um die  $X$ -Achse. Bei einem Bauteil mit rotationssymmetrischer Funktionsfläche koaxial zur  $Z$ -Achse des Funktionsprototyps ist die Festlegung des Drehfreiheitsgrad um die  $Z$ -Achse zur Funktionserfüllung nicht erforderlich. Dadurch wird einerseits keine Wirkgröße zur Drehung um die  $Z$ -Achse und andererseits kein Wirkelement zur Übertragung der mechanischen Kraft benötigt, sodass sich der physikalische und digitale Entwicklungsbereich des Funktionsprototyps reduziert. Aufgrund der Endapplikationsvielfalt wird eine Rotationssymmetrie nicht vorausgesetzt, sodass im Folgenden die Festlegung der sechs Freiheitsgrade betrachtet wird, um die Integration möglichst vieler Endapplikationen zu ermöglichen.

Die Endapplikationen weisen unterschiedliche Geometrien zur Übertragung mechanischer Kräfte zur Handhabung auf. Zur Reduktion dieser Vielfalt, ausgehend von den spezifischen Geometrien, wird die Lösungsidee eines Integrationskörpers überprüft. Ziel ist eine standardisierte Schnittstelle zwischen dem Funktionsprototyp und der Endapplikation für die Übertragung der erforderlichen Wirkgrößen. Die Schnittstelle des Integrationskörpers zum Funktionsprototyp wird an die Geometrie der in Kontakt tretenden Bauteile zur Positionierung angepasst. Die Schnittstelle des Integrationskörpers zur Endapplikation ist spezifisch an die Geometrie der Endapplikation anpassbar und flexibel beispielsweise additiv fertigbar. Die Endapplikation ist mit der Leitung vorkonfektioniert und mit dem Integrationskörper verbunden.

Zur Verbindung von Integrationskörper und Grundkörper bestehen mehrere Verbindungsmöglichkeiten, die in den Abschnitten 5.1.4 und A.2 zur Integration der Leitung zwischen zwei Schichten beschrieben sind. Anhand der bisherigen Erkenntnisse über die Lösung zur Integration der Leitung zwischen zwei Schichten ist diese auch für die Herstellung der mechanischen Verbindung geeignet und erweiterbar. Am Integrationskörper ist beispielsweise das Anbringen von elastischen Spreizfedern möglich, die in Taschen innerhalb des additiv gefertigten Grundkörpers eingreifen. Diese Klemmverbindung ist durch einen Formschluss von Spreizfeder und Grundkörper erweiterbar und ermöglicht die Montage mit den Wirkgrößen des Portalsystems und der Bewegung des Druckkopfs. Der Integrationskörper wird in negativer  $Z$ -Richtung in den Grundkörper eingeführt und die Klemmverbindung montiert (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166 bis S. 1169).

Das Konzept der Integration von Endapplikationen mittels eines Integrationskörpers sowie die Fertigungsschritte zur Positionierung und Montage sind mittels Abbildung 7.6 dargelegt. In Abbildung 7.6 a) ist das Konzept des Integrationskörpers mit blau dargestellten Spreizfedern und vorkonfektioniertem GX-Stecker visualisiert. In Abbildung 7.6 b) ist der Integrationskörper mit der Leitung verbunden und der Druckkopf zu einem Zeitpunkt der Bewegung der Endapplikation über

dem teilgefertigten Grundkörper mit den erforderlichen Wirkgrößen dargestellt. In Abbildung 7.6 c) ist die Position von Druckkopf und Integrationskörper am tiefsten Punkt nach der Montage der Klemmverbindung visualisiert. Die Gestaltung der Tasche innerhalb des Grundkörpers ermöglicht die Montage durch das Einführen des Integrationskörpers mittels Verfahren in negativer Z-Richtung. Mit diesen Überlegungen sind die Fertigungsschritte zur Endapplikationsintegration festgelegt. Im folgenden Abschnitt erfolgt die Ableitung der Anforderungen an die Wirkgrößen und Wirkelemente.

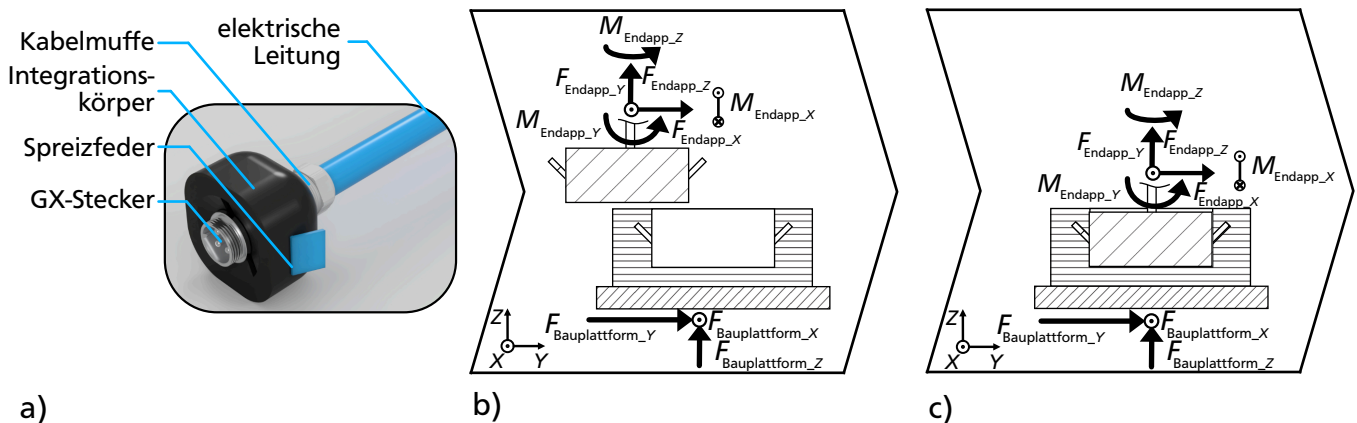


Abbildung 7.6: Funktionserweiterung durch Endapplikationen mit der Beherrschung der Variantenvielfalt durch einen Integrationskörper in a), mit der Darstellung der Wirkgrößen während eines Positionierprozesses in b) und dem Montageprozess des Integrationskörpers in der Tasche des Grundkörpers in c), eigene Abbildungen a) bis c)

### 7.2.3 Anforderungen an die Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine zur Endapplikationsintegration

Nach der Beschreibung des Integrationskörperkonzepts werden die Anforderungen an die Fertigungsmaschine mit der in Kapitel 6 beschriebenen Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung ermittelt. Zu Beginn werden die verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften festgelegt. Die Erweiterung der Möglichkeiten zur Funktionsintegration erfolgt durch die Integration von Endapplikationen in das gefertigte Bauteil. Die Endapplikationen erfüllen Funktionen, beispielsweise während der Nutzung, die durch die Verarbeitung mit dem 3DConFil-Verfahren nicht beeinflusst werden. Die Integration während des 3DConFil-Verfahrens ermöglicht ähnlich zur Integration der Leitung, eine Positionierung der Endapplikation innerhalb des Bauteilvolumens. Diese freie Positionierung des Orts und der Verbindung der Endapplikationen mit dem Grundkörper stellt die Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration dar. Diese verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaft wird als Festforderung zur freien Positionierung des Orts der Funktionserfüllung innerhalb des Bauteilvolumens festgehalten.

Nachfolgend werden die Fertigungsschritte zur Erfüllung dieser Anforderung ausgewählt. Vor der Verarbeitung der Endapplikationen werden diese mit der Leitung und dem Integrationskörper verbunden. Die Integration der Endapplikationen findet während dem Aufbau des additiv gefertigten Grundkörpers statt, um Integrationspositionen innerhalb des Grundkörpers zu ermöglichen, die

---

im weiteren Verlauf der Bauteilfertigung durch das hinzugefügte Material nicht mehr zugänglich sind. Die Integration in der  $X$ - $Y$ -Ebene ist während des Integrationsschritts zwischen zwei Schichten möglich. Die Durchführung ist zwischen zwei beliebigen Schichten möglich, sodass die Position der Endapplikation in  $Z$ -Richtung innerhalb des Bauteils in den Stufen der Schichthöhe festlegbar ist. Anhand der getroffenen Festlegung, dass die Konfektionierung der Leitung zur Verarbeitung während des 3DConFil-Verfahrens durchgeführt wird, findet die Integration der Endapplikation am Leitungsanfang oder Leitungsende bezogen auf die Fertigung innerhalb des Grundkörpers statt. Im Folgenden wird der Fall der Konfektionierung vor dem 3DConFil-Verfahren und die dadurch mögliche freie Integration der Endapplikation innerhalb des Bauteils betrachtet. Prinzipiell ist die Konfektionierung von Endapplikation und Leitung auch nach dem 3DConFil-Verfahren möglich. In diesem Fall ist die Endapplikationsintegration am Leitungseintritt beziehungsweise am Leitungsausgang aus dem Grundkörper möglich.

Die durch den Funktionsprototyp durchgeführten Fertigungsschritte sind die Handhabung des Integrationskörpers mit der Endapplikation und das Herstellen der mechanischen Verbindung von Integrationskörper und dem Grundkörper die weiterführend betrachtet werden. In Abbildung 7.7 ist das VP-Modell mit der vorkonfektionierten Kombination von Endapplikation, Integrationskörper und der zu integrierenden Leitung sowie das Kunststofffilament und dem Funktionsprototyp im linken Teil dargestellt. Im rechten Teil sind die erweiterten verfahrensinduzierten Eigenschaften innerhalb des gefertigten Bauteils durch die Integration der Endapplikation mit verbundener Leitung innerhalb des gefertigten Grundkörpers dargestellt. Im mittleren Teil sind entsprechend der 3DConFil-Prozessschritterweiterung in den Abbildungen 7.6 b) und c) die Wirkelemente der Fertigungsmaschine sowie die Wirkgrößen im oberen Teil für die Positionierung in der  $X$ - $Y$ -Ebene und im unteren Teil die Integration in das Bauteil dargestellt, die mit der Endapplikation und dem Integrationskörper interagieren.

Im linken Teil der Abbildung sind die Halbzeuge, die integrierte Leitung und der Integrationskörper mit Endapplikation sowie ein Ausschnitt der Fertigungsmaschine mit den zugeordneten Wirkgrößen und Wirkelementen visualisiert. Für beide Fertigungsschritte zur Endapplikationsintegration ist zur Durchführung dieser Prozesse die Festlegung der sechs Freiheitsgrade des Integrationskörpers mit dem Aufbringen entsprechender Kräfte und Momente notwendig. Diese werden durch die Fertigungsmaschine bereitgestellt und werden in Form der ersten beiden Anforderungen dokumentiert.

Während der Positionierung befinden sich die Wirkelemente der Fertigungsmaschine und das Halbzeug oberhalb der Grundkörperoberfläche, sodass ohne Kollision das Anfahren einer beliebigen Position in einer zur  $X$ - $Y$ -Ebene parallelen Ebene möglich ist. Diese Voraussetzung ist in Form des Parameters  $Z_{\min\_Endapp}$  in der Schnittansicht als Linie visualisiert. Während der Verbindung des Integrationskörpers mit dem Bauteil wird an die Wirkelemente der Fertigungsmaschine die Anforderung gestellt, dass die geometrische Ausdehnung der Wirkelemente oberhalb der letztgedruckten Grundkörperschicht oder innerhalb des Volumens der Integrationskörpertasche liegen.



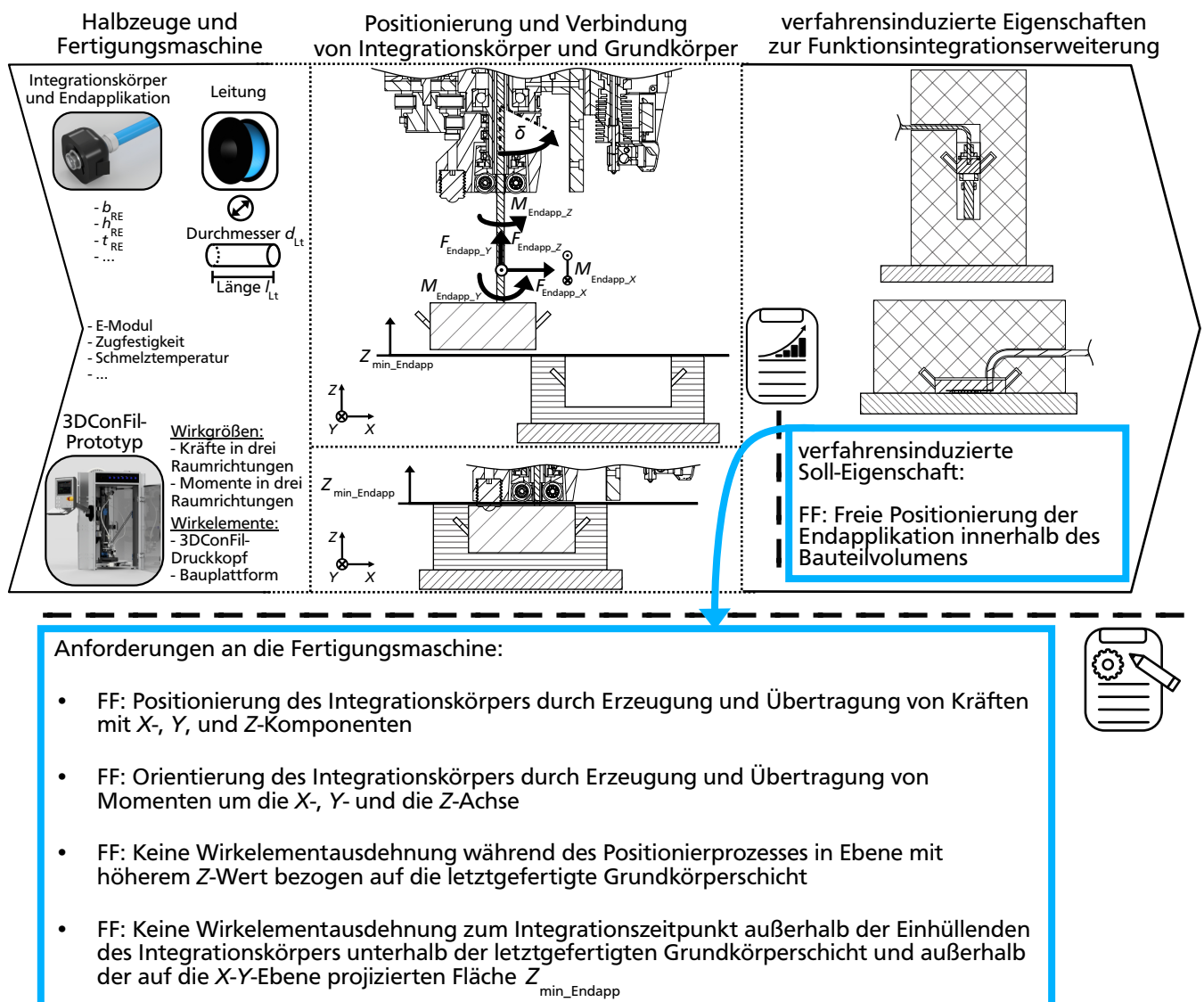


Abbildung 7.7: Ableitung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine anhand der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft zur freien Positionierung der Endapplikation innerhalb des Bauteilvolumens unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

## 7.2.4 Ableitung eines Integrationskörpers unter Nutzung bestehender Wirkgrößen und Wirkelemente des Funktionsprototyps

In diesem Abschnitt wird eine mögliche Lösung zur Erfüllung der durch die Methodenanwendung ermittelten Anforderungen dargestellt. Zur Positionierung und Rotation von Endapplikation und Integrationskörper sind die Wirkgrößen des Portalsystems, der Leitungsfördereinheit und des Druckkopfs nutzbar. Ein Leitungsende wird mit Endapplikation und Integrationskörper vorkonfektioniert. Das zweite freie Leitungsende bleibt unkonfektioniert und wird durch den Druckkopf während der Maschinenrüstung eingefädelt. Die integrierte Leitung ist für die Kraftübertragung an den

Integrationskörper über die Endapplikation durch die während der Konfektionierung hergestellte mechanische Verbindung nutzbar. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass die Leitung eine Zugkraft in Richtung der neutralen Faser überträgt und dadurch die Endapplikation mit dem Integrationskörper an den Druckkopf gezogen wird. Die erforderliche Kraft wird mit der Gewichtskraft und den Trägheitskräften abgeschätzt. Eine Beschädigung der Kontaktierung von Leitung und Endapplikation ist durch eine Zugentlastung verhinderbar. Zur Erzeugung dieser Zugkraft sind die Wirkgrößen und Wirkelemente des bestehenden Leitungsfördersystems durch das Rückfördern der Leitung in Richtung des Speichers nutzbar. Durch die Zugkraft wird die Kontaktfläche des Integrationskörpers an der als ebene, zur  $X$ - $Y$ -Ebene parallele Fläche approximierbare Kontaktfläche des Leitungsaustritts ausgerichtet. Dadurch ist die Übertragung von Momenten um die  $X$ -Achse und  $Y$ -Achse möglich.

Weiterhin führt das Einziehen der Leitung durch das Fördersystem entlang der neutralen Faser zu einer Kraft, die den Eintrittspunkt der Leitung in den Integrationskörper zum Leitungsaustritt am Druckkopf ausrichtet, sodass die translatorischen Freiheitsgrade vollständig festgelegt sind. Zur Festlegung des noch freien rotatorischen Freiheitsgrads um die  $Z$ -Achse sind die Wirkgrößen des Drehantriebs für die Positionierung des Einpresswerkzeugs und des Wirkelements der Kugelrolle nutzbar und können bspw. durch einen Formschluss übertragen werden.

In Abbildung 7.8 sind die verschiedenen Formen des Integrationskörpers für einen Federkontaktstift dargestellt. Der Federkontaktstift ist in Gelb, ein beispielhafter Integrationskörper ist in Blau und die integrierte Leitung ist in Grau visualisiert. In Abbildung 7.8 a) ist der konfektionierte Integrationskörper zur händischen Integration dargestellt. In dieser Variante wurde der Federkontaktstift auch im Rahmen der Gleitlageranwendung integriert (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166 bis S. 1169) (siehe auch Abschnitt 7.3). Der in Abbildung 7.8 b) visualisierte neu gestaltete Integrationskörper für das Wirkelement der Kugelrolle ermöglicht die automatisierte Integration der Endapplikation in den Grundkörper. Vor Druckbeginn wird der Integrationskörper mit der manuellen Steuerung der Leitungsförderung zum Austritt der Positioniereinrichtung geführt und so ausgerichtet, dass die ringförmige Aussparung um die Kugelrolle liegt. In Abbildung 7.8 c) ist der neu gestaltete Integrationskörper in der Positionierposition am Leitungsaustritt des Druckkopfs dargestellt.

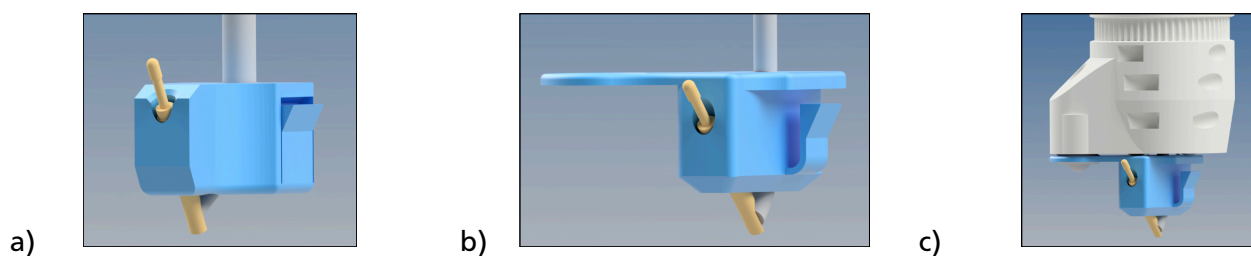


Abbildung 7.8: Integrationskörper für einen Federkontaktstift mittels händischer Integration, eingesetzt in einer Gleitlageranwendung (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166 bis S. 1169) in a), mittels automatisierter Integration mit dem Funktionsprototyp in b) und in der Positionierposition am Leitungsaustritt des Druckkopfs zur automatisierten Integration in c), eigene Abbildungen a) bis c)

## 7.2.5 Neue verfahrensinduzierte Eigenschaften durch einen Integrationskörper

Die Adaption der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens in Kombination mit dem Integrationskörper führt zu neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften, die im Rahmen der Produktentwicklung nutzbar sind. Dies ist darauf rückführbar, dass der Integrationskörper den gleichen Zustand der Einspannung am Ende der integrierten Leitung im Vergleich zum Einspannsystem darstellt (vgl. auch Abschnitt 5.3.3). Diese unterscheiden sich im Ort und dem Prozess zur Einstellung dieses Zustands. Mit dem Wechsel in und aus den hybriden Fertigungsschritten werden mehrere Einlegevorgänge während der Fertigung eines Bauteils möglich. In Kombination mit den beschriebenen Übergängen zwischen den hybriden Leitungsteilen werden weitere Gestaltungsmöglichkeiten der Bauteile verfügbar. In Abbildung 7.9 ist schematisch eine mögliche Bauteilgestaltung zu zwei Zeitpunkten während der Fertigung visualisiert.

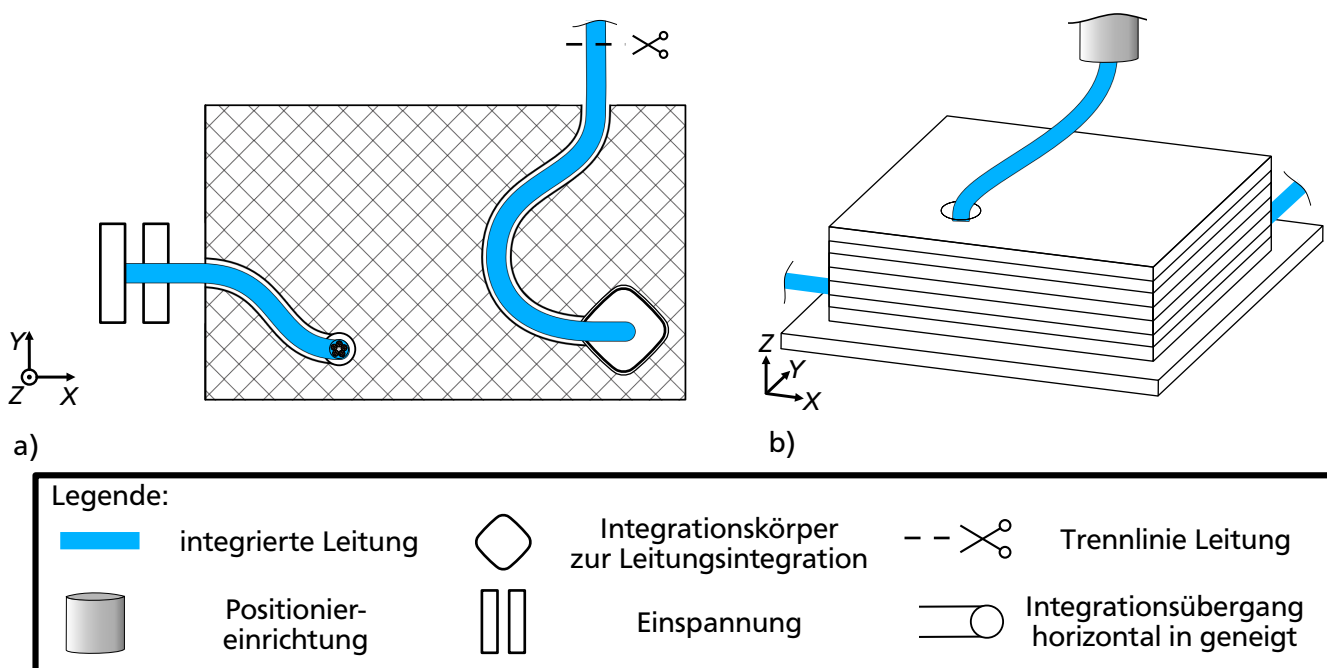


Abbildung 7.9: Neue Gestaltungsmöglichkeiten durch die Verwendung eines Integrationskörpers zur Integration mehrere Leitungsabschnitte in einer Ebene zusammen mit Einspann- und Trennprozess in a) und im weiteren Druckprozess anschließender Integration über mehrere Schichten in b), eigene Abbildungen

In Abbildung 7.9 a) ist der Zeitpunkt während der Fertigung dargestellt, zu dem die Integration zweier Leitungen in einer Bauteilebene erfolgt. Der rechte Abschnitt des Bauteils visualisiert einen Integrationskörper mit Integrationsbeginn innerhalb des Bauteils als Einspannung der Leitung mit direkt anschließender Integration zwischen zwei Schichten bis zu einem Trennprozess. Anschließend wird mit einer Einspannvorrichtung ein weiterer Abschnitt der Leitung zwischen zwei Schichten im Bauteil bis zum Übergang über Schichten hinweg integriert. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Leitungsintegration über mehrere Schichten. In Abbildung 7.9 b) ist die Fertigung zu einem späteren Zeitpunkt dargestellt und der zweite Leitungsabschnitt wird über mehrere Schichten integriert.

---

Im Zentrum der Integration von Endapplikationen standen bisher kommerziell verfügbare Komponenten. Die Erweiterung des Potentials der Funktionsintegration ist zusätzlich durch spezifische Entwicklungen möglich, die mit dem 3DConFil-Verfahren verarbeitbar sind. Die Entwicklungen sind im Bereich der integrierten Leitung zum Beispiel durch das Einbringen von Sensoren entlang eines Hohlleiters möglich, mit dem die Sensorik innerhalb des Bauteilvolumens eingebracht wird. Ein weiterer Entwicklungsbereich liegt bei den Endapplikationen, die durch Anpassung der äußeren Geometrie an den Druckkopf die Verarbeitung ohne Integrationskörper ermöglichen.

Mit den Endapplikationen wurde eine Erweiterungsmöglichkeit des 3DConFil-Verfahrens vorgestellt, die für die Nutzung mit den bestehenden Wirkgrößen und Wirkelementen des Funktionsprototyps geeignet ist. Die Kompatibilität wird durch die Gestaltung der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Halbzeuge, der Integrationskörper, ermöglicht. Im folgenden Abschnitt wird die Nutzung der erweiterten verfahrensinduzierten Eigenschaften mittels Endapplikationen im Rahmen einer Gleitlageranwendung dargelegt.

## **7.3 Nutzung der erweiterten verfahrensinduzierten Eigenschaften im Rahmen einer Gleitlageranwendung**

In diesem Abschnitt wird ein Anwendungsbeispiel zur Nutzung der gestalterischen Möglichkeiten durch die verfahrensinduzierten Eigenschaften des 3DConFil-Verfahrens im Bereich der Gleitlagercharakterisierung vorgestellt. Teile dieses Abschnitts wurden im Rahmen der 33. CIRP Design Conference veröffentlicht (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1164 bis S. 1169) und werden zur konsistenten Weiterentwicklung des Gleitlagergehäuses an dieser Stelle aufgegriffen. Ausgehend von den experimentellen Erkenntnissen wird das Gleitlagergehäuse in Abschnitt 7.3.5 hinsichtlich seiner Funktionen weiterentwickelt.

### **7.3.1 Einführung und Randbedingungen**

Gleitlager werden in unzähligen Produkten beispielsweise Werkzeugmaschinen (vgl. Hirsch et al. 2021, S. 1291), der Forschung für Flugtriebwerke (vgl. Mokhtari Molk Abadi 2020, S. 135 f.) bis hin zu Großwindanlagen (vgl. Rolink et al. 2020, S. 1 f.) und Dampfturbinen (vgl. Verstege et al. 2018, S. 815 bis S. 817) eingesetzt. Gleitlager sind unempfindlich gegenüber Stößen, ermöglichen hohe Drehzahlen und im Bereich der Flüssigkeitsreibung sehr geringen Verschleiß (vgl. Böge et al. 2021b, S. 849). Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit wird im Bereich der Gleitlagerforschung das elektrische Verhalten (vgl. Prashad 2006, S. 7 f. und S. 301 bis S. 423) und die sensorische Nutzbarkeit des Gleitlagers (vgl. Harder et al. 2022, S. 166 f.) untersucht. Ziel ist ein tieferes Verständnis des Schmierzustands bei vorgegebenen Lasten und neue Möglichkeiten zur vorausschauenden Instandhaltung zu entwickeln (vgl. Gao et al. 2022).

Am Institut *pmd* wird die sensorische Nutzbarkeit eines Gleitlagers durch Impedanzmessung untersucht. Die Impedanz des Gleitlagers im Betrieb ermöglicht Rückschlüsse auf den Schmierzustand und die wirkende Last auf das Gleitlager. (vgl. Harder et al. 2022, S. 166 f.) Für die Untersuchungen

entsprechend Steffan et al. wird ein vollumschließendes Kreiszyylinderlager in ein Prüfstandsgehäuse eingebaut. Während des Experiments werden auf das Gehäuse vertikale und horizontale Kräfte radial aufgebracht sowie die Wellenlage, die Impedanz, die Temperatur, die eingeleiteten horizontalen und vertikalen Kräfte von bis zu 1 kN und das Drehmoment zur Reibkraftabstützung erfasst. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1165 bis S. 1167) In Abbildung 7.10 ist das konventionell gefertigte Gleitlagergehäuse als Schnittansicht dargestellt.

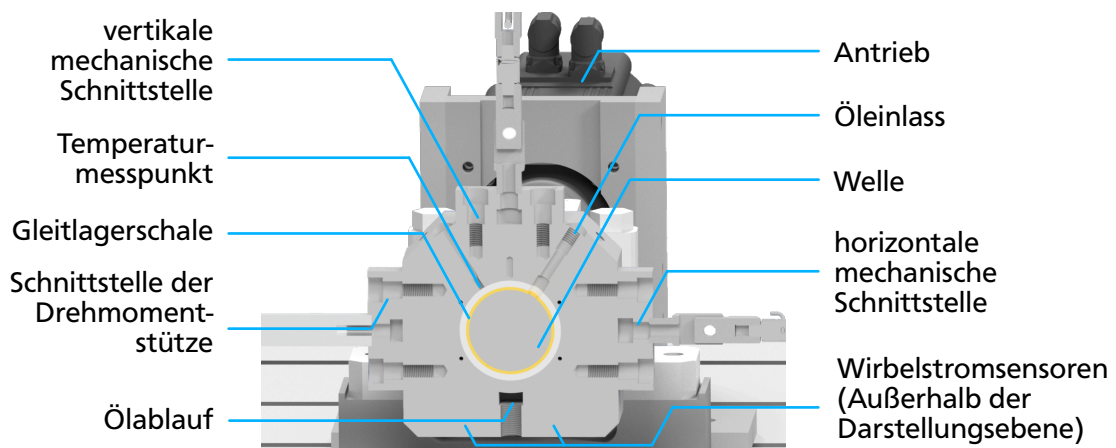


Abbildung 7.10: Schnittansicht des CAD-Modells des konventionellen Gleitlagergehäuses, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1166)

### 7.3.2 Anforderungsermittlung zur Verbesserung des Experimentalbetriebs

Die Verbesserungsmöglichkeiten zur Weiterentwicklung des Gleitlagergehäuses werden anhand der Analyse des konventionell gefertigten Gleitlagergehäuses im Experimentalbetrieb festgelegt. Anhand der Nutzung besteht Verbesserungspotential in der Integration der Kontaktierung der Gleitlagerschale zur Impedanzmessung und in der Temperaturmessung. Ziel der Gleitlagergehäuseentwicklung ist unter Nutzung der Verfahrenspotentiale des 3DConFil-Verfahrens die Verbesserung der Temperaturmessung und die Realisierung der Impedanzmessung. Zur Impedanzmessung wird ein Federkontaktstift zur Kontaktierung eingesetzt und im neu gestalteten Gleitlagergehäuse integriert. Hinzu kommt die leichte Montage des Federkontaktstifts. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1165 f.) Im Folgenden wird die Position für die Temperaturmessung abgeleitet und anschließend die weiteren Anforderungen in tabellarischer Form aufgelistet.

Zum Schutz der Lagerung vor Temperaturüberhöhungen wird eine Temperaturüberwachung möglichst nahe der Lastzone angestrebt (vgl. DIN 31692-2 1996, S. 1). Die Temperaturdaten können ebenfalls zur Charakterisierung des Zustands des Gleitlagers verwendet werden. Die aktuelle Messstelle der Temperatur befindet sich an der Oberseite des Gleitlagers an der Außenfläche der Gleitlagerschale und ist in Abbildung 7.10 markiert. Die Messstelle ist weit von der Lastzone entfernt und ermöglicht ungenaue, zeitverzögerte Messungen. Die Anforderungen an die Temperaturmessung werden anhand der Betriebszustände des Gleitlagers während des Experimentalbetriebs abgeleitet.

Der Ort der Lastzone des Gleitlagers ist vom Betriebszustand abhängig. Parameter sind beispielsweise die Drehzahl und der Betrag sowie die Richtung der Last. Im Folgenden wird die Abschätzung anhand einschlägiger Verfahren vorgenommen (vgl. Deters et al. 2018; DIN 31652-1 2017). In Abbildung 7.11 sind relevante geometrische Parameter und mögliche Orte der Lastzone dargestellt. Ausgehend von einer Kraft  $F$  in negativer  $Z$ -Richtung und gegebenen Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_J$  und  $\omega_F$  ist in Abbildung 7.11 a) der sich ausbildende Bereich des minimalen Schmierfilms visualisiert. Für eine geringere Winkelgeschwindigkeit entsprechend Abbildung 7.11 b) tritt die minimale Schmierfilmdicke entgegen der Richtung der Winkelgeschwindigkeit bei kleinerem Verlagerungswinkel  $\beta$  auf. Bleibt die Winkelgeschwindigkeit gleich während sich die Krafrichtung um  $45^\circ$  in Richtung der Winkelgeschwindigkeit ändert, wandert die minimale Schmierfilmdicke mit der Änderung der Krafrichtung. Dies ist in Abbildung 7.11 c) schematisch dargestellt.

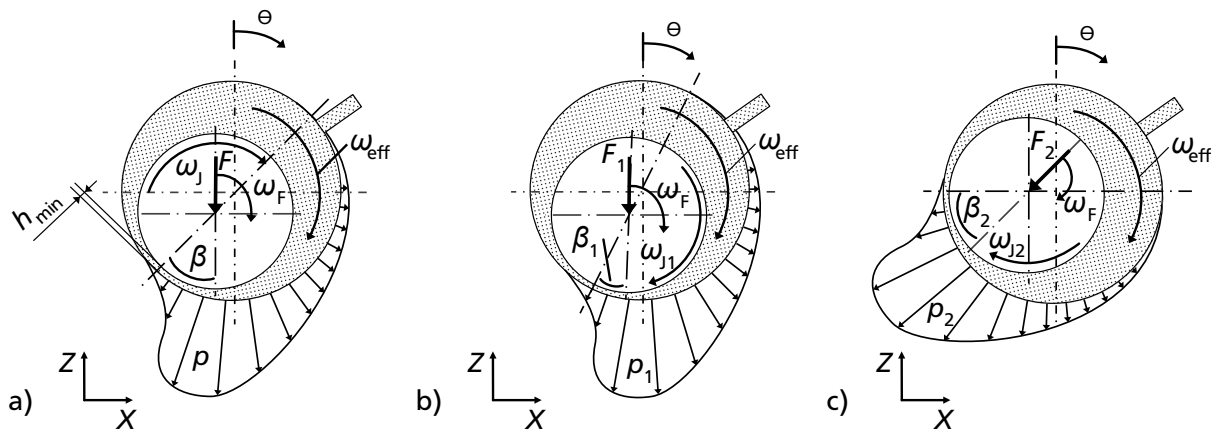


Abbildung 7.11: Kenngrößen eines Gleitlagers in Anlehnung an Deters et al. (2018, S. 540 bis S. 543) und der Norm DIN 31652-1 (2017, S. 5) zur Abschätzung des Temperaturmessbereichs mit einer vertikalen Last mit  $\omega_F = const.$  bei hoher Winkelgeschwindigkeit  $\omega_J$  in a), einer niedrigeren Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{J1} < \omega_J$  in b) und unter einer um  $45^\circ$  gedrehten Last bei der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{J2} = \omega_J$  in c), eigene Abbildungen a) bis c)

Die Lastzone liegt im Bereich der minimalen Schmierfilmdicke  $h_{min}$  (vgl. Deters et al. 2018, S. 540 f.). Der minimale Schmierspalt liegt bezogen auf die Lastrichtung um den Verlagerungswinkel  $\beta$  versetzt, dessen Richtung von  $\omega_{eff}$  abhängig ist. Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{eff}$  ist durch Gleichung 7.1 mit der Winkelgeschwindigkeit der Welle  $\omega_j$ , der Winkelgeschwindigkeit des Gehäuses  $\omega_B$  und der Winkelgeschwindigkeit der Last  $\omega_F$  bestimmbar (vgl. DIN 31652-1 2017, S. 4 f.). Während der Experimente steht das Gehäuse und es wird  $\omega_B = 0$  angenommen. Aus diesem Grund ist  $\omega_B$  in Abbildung 7.11 nicht dargestellt. Zur Abschätzung von  $\omega_{eff}$  nach Gleichung 7.1 (vgl. Deters et al. 2018, S. 540 f.; DIN 31652-1 2017, S. 4 f.) wird  $\omega_F$  betrachtet. Die Winkelgeschwindigkeit der Kraft für einen sich mit der Welle drehenden Beobachters beträgt  $-\omega_J$ . Diese Annahmen sind in den Gleichungen 7.2 zusammengefasst. Aus den Gleichungen 7.1 und 7.2 wird  $\omega_{eff}$  als positiv angenommen (vgl. Gleichung 7.3) und der Verlagerungswinkel wird positiv in Richtung  $\omega_J$  und die Lage von  $h_{min}$  unter einer vertikalen Kraft bei  $180^\circ + \beta$  mit der Krafrichtung als Referenz erwartet.

$$\text{effektive Winkelgeschwindigkeit:} \quad \omega_{\text{eff}} = \omega_J + \omega_B - 2\omega_F \quad (7.1)$$

$$\text{mit:} \quad \omega_F = -\omega_J; \omega_B = 0 \quad (7.2)$$

$$\text{führt zu:} \quad \omega_{\text{eff}} > 0 \quad (7.3)$$

Mit  $\omega_{\text{eff}} > 0$  bei einer Kraft unter dem Winkel von mindestens  $180^\circ$  aufgrund der Prüfstandskonfiguration wird  $h_{\text{min}}$  unter  $\Theta > 180^\circ$  erwartet. Eine Position des minimalen Schmierspalts über  $270^\circ$  hinaus ist aufgrund der Schmierstoffzuführung nicht optimal für den Betriebszustand des Gleitlagers und im festgelegten Betriebsbereich des Prüfstands nicht enthalten. Weiterhin wird durch diese Festlegung eine Richtungsumkehr des Antriebs nicht berücksichtigt. Anhand dieser Betrachtungen wird für die Temperaturmessung als Anforderung der Winkelbereich von  $180^\circ < \Theta < 270^\circ$  ermittelt (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1167). Neben den beschriebenen Anforderungen wurden weitere Anforderungen zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Gleitlagergehäuses unter den Experimentalbedingungen ermittelt und sind in Tabelle 7.1 beschrieben.

Tabelle 7.1: Anforderungen an das hybrid-integrierte additive Gleitlagergehäuse basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1165 bis S. 1167)

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
Gleitlageranwendung (G)	G1	FF	integrierte Impedanzmessung	Impedanzmessung durch eine elektrische Kontaktierung der Gleitlagerschale mittels Federkontaktstift.
	G2	FF	Temperaturschutz	Temperaturschutz des Gleitlagers entsprechend der deutschen Industrie-Norm DIN 31692-2 (1996).
	G3	ZF	Temperaturmessung	Aufnahme der Temperatur im Bereich $180^\circ < \Theta < 270^\circ$ an der Gleitlagerschale.
	G4	ZF	Kontaktierung Gleitlagerschale	Kontaktierung von Federkontaktstift und Gleitlagerschale ohne zusätzliche Montageschritte.
	G5	FF	Integration 3DConFil	Die Integration des Federkontaktstifts ist durch das 3DConFil-Verfahren möglich.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...



Tabelle 7.1 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Beschreibung
	G6	FF	Schnittstellenkompatibilität	Prüfstandkompatibilität für die Bereiche horizontale und vertikale Adapterplatten zur Lasteinleitung von je 1 kN über einen 12 mm Bolzen, Drehmomentschnittstelle durch M8 Schraubverbindung, Bohrungen für Wirbelstromsensoren, Ölzulauf und -ablauf, Materialkompatibilität des verarbeiteten Kunststoffes mit dem verwendeten Getriebeöl FVA3 (vgl. BP Europa SE 2020).

### 7.3.3 Konzeption und Gestaltung des hybrid-integrierten additiv gefertigten Gleitlagergehäuses

Für das erste Konzept des Gleitlagergehäuses werden nach Steffan et al. die Orte der mechanischen Schnittstellen der Krafteinleitungen und der Drehmomentableitung, des Ölzulaufs und -ablaufs, der Wirbelstromsensoren und der Gleitlagerschale übernommen. Die mechanischen Schnittstellen sind mit einer Bolzenverbindung und der Ölzulauf durch eine eingeschmolzene M12 Buchse ausgeführt. Die Wirbelstromsensoren werden in eingeschnittene M8 Feingewinde des Gleitlagergehäuses geschraubt und durch eine Kontermutter gesichert. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1165 bis S. 1167) Die mechanische Festigkeit der Kraftaufnahmen von je 1 kN der aus dem Kunststoff Polylactide (PLA) gefertigten Schnittstelle wurde zuvor in einem Vorversuch erfolgreich bis zu einer Kraft von 4316 N mit einem Prüfstand unter Nutzung des Hebelgesetzes getestet (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1167 f.). Dieser Prüfstand ist in Abbildung 7.12 schematisch dargestellt.

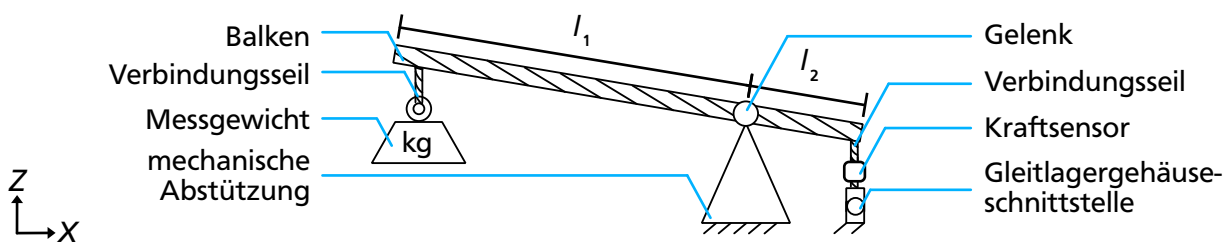


Abbildung 7.12: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Absicherung der Gleitlagerschnittstellen hinsichtlich der mechanischen Anforderung einer Zugkraft von 1 kN, eigene Abbildung übersetzt und basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1167)

Der Ablauf des Öls ist schwerkraftgetrieben an den beiden Rändern der Gleitlagerschale ausgeführt und die Integration der Gleitlagerschale ist durch einen Querpressverband möglich. Die additive Fertigung des Gehäuses unter Nutzung der Potentiale des 3DConFil-Verfahrens ermöglicht eine Integration des Federkontaktstifts im Bereich zwischen dem Ölzulauf und der mechanischen Schnittstelle zur Einleitung der horizontalen Kraft. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166) Zur Realisierung ist in Abschnitt 7.2 eine Möglichkeit im Bereich der Endapplikationen vorgestellt.



Zum Zeitpunkt der Gehäusefertigung ist die automatisierte Integration noch nicht möglich, sodass der Integrationskörper für die händische Integration während des Druckvorgangs gestaltet und eingesetzt wurde. Die Leitungsführung ist von dem integrierten Federkontaktstift radial aus dem Gehäuse möglich und mit dem Prüfstandsaufbau kompatibel. Der Bereich des Gleitlagergehäuses ermöglicht weiterhin die Integration des Federkontaktstifts unter Verwendung des größeren, zur automatischen Integration mittels des 3DConFil-Verfahrens geeigneten Integrationskörpers (vgl. Abschnitt 7.2.4). Dieser verbleibt ebenfalls im Gleitlagergehäuse und stellt die Positionierung des Federkontaktstifts während des Einsatzes im Prüfstand sicher.

Im Rahmen dieser Lösungsidee ist nach Steffan et al. die Orientierung des Federkontaktstifts ein weiterer Freiheitsgrad. Dieser ermöglicht die Erfüllung der Anforderung der Montagevereinfachung. Die Gleitlagerschale wird zur Montage und der Herstellung des Querspressverbands in das Gleitlagergehäuse eingepresst. Durch die Festlegung der Montagerichtung ist es möglich, den Federkontaktstift entgegen der Montagerichtung zu positionieren. Die Spitze steht aus der Montagefläche des Gleitlagergehäuses heraus, sodass das Einpressen der Gleitlagerschale gleichzeitig die Kontaktierung dieser durch den Federkontaktstift ermöglicht und keine zusätzlichen Montageprozesse notwendig sind. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166 f.) Die Verarbeitung der Leitung ist mit dem 3DConFil-Prototyp bereits möglich, während das initiale Einpressen händisch erfolgt. Die Leitung im Experiment ist das Helukabel 49586 (vgl. HELU KABEL GmbH 2015, S. 189).

Die sensorische Aufnahme der Temperatur im Winkelbereich von  $180^\circ$  bis  $270^\circ$  stellt den Ausgangspunkt für eine Lösungsermittlung dar. Für die Temperatursensorintegration wurden Messpositionen für mehrere Temperatursensoren über den relevanten Winkelbereich der Gleitlagerschale, visualisiert in Abbildung 7.13 a), sowie die Bewegung eines Sensors entlang der Gleitlagerschale, dargestellt in Abbildung 7.13 b) (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1167), überprüft.

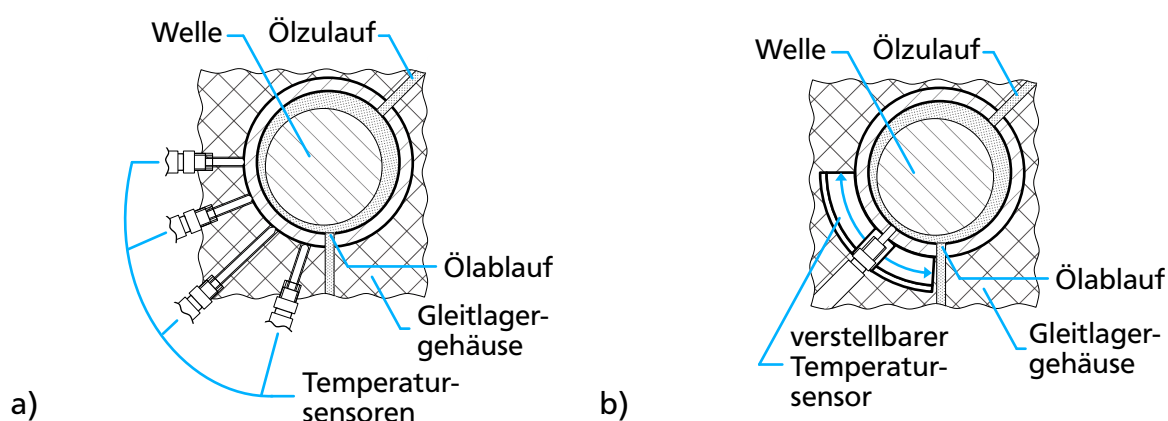


Abbildung 7.13: Lösungsideen zur Temperaturmessung an der Gleitlagerschale durch mehrere Messpositionen über den geforderten Winkelbereich als eigene Abbildung in a) und durch eine stufenlos veränderliche Messposition als eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1167) in b)

Für eine verbesserte Aufnahme des Temperaturfelds bei verschiedenen Betriebspunkten eignen sich nach Steffan et al. mehrere Messpositionen. Aufgrund der geometrischen Freiheit in der Gestaltung durch die additive Fertigung ist neben der flexiblen Einbringung von Bohrungen entlang des Umfangs die Umsetzung einer gekrümmten Führungsbahn mit Führungskörper des Temperatursensors möglich. Für das Gleitlagergehäuse wird der verstellbare Temperatursensor aufgrund der stufenlosen Verstellbarkeit gewählt. Zum Aufbringen der Verfahrkräfte ist ein Zugmittel entlang des Umfangs durch die Bereitstellung der für die Verschiebung optimalen Krafrichtung besonders vorteilhaft. Für das definierte Anfahren einer Messposition wird ein Zahnriemen als bewegungstreues Zugmittel eingesetzt, das in einem Führungskanal am Umfang des Gehäuses verläuft. Die Riemenspannung wird über das unter Zugkraft durchgeführte Einlegen des Riemens in die formschlüssigen Montagebereiche des Sensorschlittens eingestellt. Das Aufbringen der Verstellkräfte ist händisch oder automatisiert möglich und wird im Rahmen des experimentellen Konzepttests händisch umgesetzt. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1167)

Anhand der beschriebenen Lösungen wird das erste Konzept für den Druck auf einer regulären FFF-Fertigungsmaschine ausgestaltet. Die erforderlichen Schnittstellen werden radial am Umfang des Gehäuserings positioniert. Diese erste Version ist in Abbildung 7.14 mit den integrierten Komponenten als CAD-Modell in eingebauter Position dargestellt. Das gestaltete Gleitlagergehäuse wird gefertigt und im Gleitlagerprüfstand montiert (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1167 f.). Die Ergebnisse der Experimente werden im folgenden Abschnitt dargelegt.

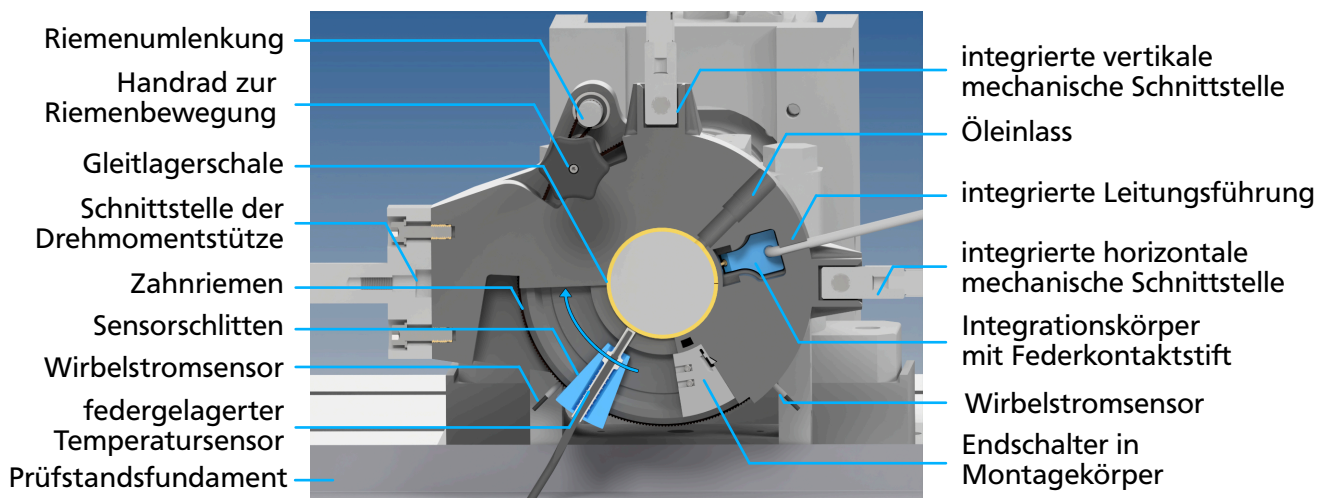


Abbildung 7.14: Erstes Konzept des Gleitlagergehäuses für den experimentellen Betrieb in der Einbauposition als CAD-Modell, eigene Abbildung übersetzt und basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1167)

### 7.3.4 Experimentaltest des hybrid-integrierten additiven Gleitlagergehäuses

Das gefertigte Gleitlagergehäuse wird experimentell im Prüfstand auf Funktionsfähigkeit getestet. In Abbildung 7.15 ist das erste Gestaltungskonzept im eingebauten Zustand dargestellt. Im Folgenden werden die Impedanzmessungen mit dem hybrid-integrierten Gleitlagergehäuse vorgestellt.

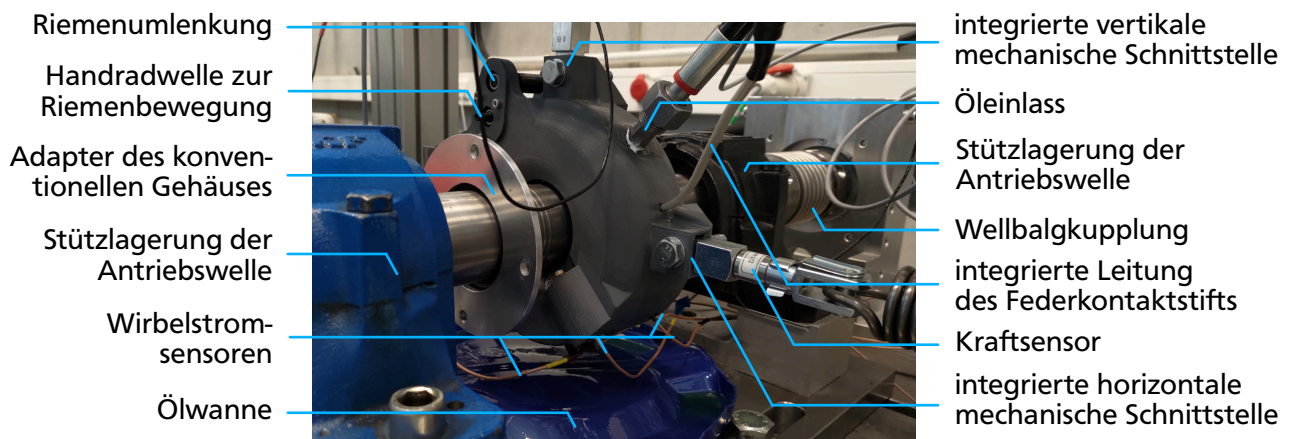


Abbildung 7.15: Erstes Gestaltungskonzept des Gleitlagergehäuses in eingebautem Zustand, eigene Abbildung

Die variierten Parameter der Impedanzmessungen sind die Drehzahl und die aufgeprägte Kraft in vertikaler Richtung (orthogonal zum Prüfstandsfundament) mit dem Ziel einer initialen Verifikation der Funktionsfähigkeit des Gleitlagergehäuses. Aufgrund der Kapazität des Ölspeichers stromabwärts nach dem Öl Ablauf ist die Versuchsdauer je Durchlauf auf ca. 120 s begrenzt. Aufgrund der Prüfstandsrestriktionen wird das Hochlaufverhalten zur initialen Verifikation verwendet. In Abbildung 7.16 ist die Impedanzmessung für eine Kraft von 300 N über verschiedenen Drehzahlen dargestellt. Die Impedanz wird durch die Nutzung einer Fast Fourier Transformation (FFT) berechnet. Für die Messung bei einer bestimmten Drehzahl wird zur Berechnung die Gesamtlänge der Messung in 0,001 s lange Intervalle eingeteilt, für welche die Impedanz errechnet wird. Anschließend werden die so ermittelten Impedanzwerte der Fenster gemittelt und bilden den im Diagramm dargestellten Wert.

Die Impedanz liegt nach Steffan et al. entsprechend Abbildung 7.16 bis zu einer Drehzahl von mindestens 400 Umdrehungen in der Minute bei sehr geringen Werten kleiner  $10 \Omega$ . Dieses Verhalten ist bei dem konventionellen Gleitlagergehäuse ähnlich und kennzeichnet den Bereich der Festkörperreibung. Ab 600 Umdrehungen in der Minute bis zu 1000 Umdrehungen in der Minute steigt die Impedanz auf  $2204 \Omega$  an. Ebenfalls steigt die Standardabweichung auf Werte zwischen  $452 \Omega$  bis  $532 \Omega$  an. (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1168 f.) Die hohe Standardabweichung ist, ähnlich zum konventionellen Gleitlagergehäuse, charakteristisch für das Mischreibungsgebiet. Abweichungen zwischen den Gleitlagergehäusen liegen darin, dass sich die Mischreibung bei dem additiv gefertigten Gleitlagergehäuse bei einer höheren Drehzahl einstellt. Ein möglicher Grund hierfür ist eine Verkippung der Gleitlagerschale im Gehäuse, welche mit dem bestehenden Versuchsaufbau nicht bestimmbar ist und einer weiterführenden Untersuchung bedarf.

Parallel zur Impedanzmessung wurde die Temperatur an der Gleitlagerschale im Bereich der minimalen Schmierfilmdicke  $h_{\min}$  gemessen. Im Vergleich zur Messung am konventionellen Gleitlagergehäuse besteht ein schnelleres Ansprechverhalten der gemessenen Temperatur. Dies ermöglicht einen Rückschluss auf eine geringere Wärmeleitung durch den Materialwechsel des Gleitlagergehäuses und den geringeren Abstand zum Messort an der Gleitlagerschale statt im Öl Ablauf. Anhand der experi-

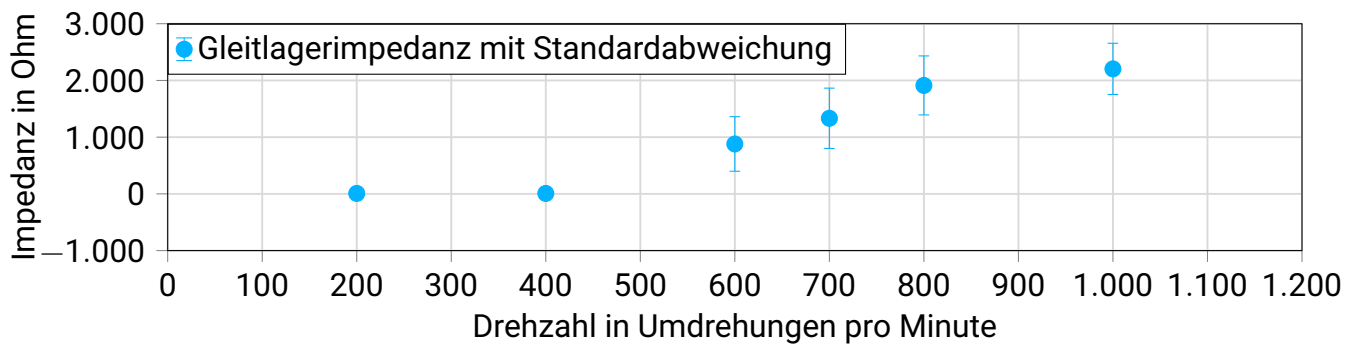


Abbildung 7.16: Impedanzwerte der Gleitlagerung im Mischreibungsbereich unter einer Z-Kraft von 300 N, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1168)

mentellen Untersuchungen konnte die Funktionsfähigkeit des additiv gefertigten Gleitlagergehäuses teilweise bestätigt werden (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1169). Die gestellten Anforderungen an das Gleitlagergehäuse in Tabelle 7.1 werden nicht verletzt. Aufgrund der Ergebnisse sind weiterführende Untersuchungen zu den Ursachen des Verhaltens des Gleitlagergehäuses, beispielsweise der Lagerverkipfung, erforderlich. Gleichzeitig bestehen Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich der Temperatursensorverstellung, der Montage der Wirbelstromsensoren und des Ölabflusses. Diese Möglichkeiten werden zur Weiterentwicklung des Gleitlagergehäuses genutzt und sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 7.3.5 Weiterentwicklung des hybrid-integrierten additiven Gleitlagergehäuses

In der Weiterentwicklung des Gleitlagergehäuses wird die Temperatursensorverstellung und die Montage der Wirbelstromsensoren verbessert. Die realisierte Lösung den Zahnriemen in einem Kanal des Gehäusekunststoffs zur Verstellung zu führen, ermöglicht keinen robusten Zustand, in welchem die Riemen Spannung hoch genug ist, um durch das Antriebsritzel ausreichend hohe Kräfte einzuleiten, während gleichzeitig die Reibkraft des Riemen am Führungskanal gering genug für eine zuverlässige Verschiebung des Sensorschlittens ist. Die Identifikation der gestalterisch beeinflussbaren Parameter zur Reduktion der Reibkraft lässt sich durch die Analyse der Parameter der Seilreibung durchführen. Diese wird mit Gleichung 7.4 mit dem Umschlingungswinkel  $\alpha$ , dem Reibkoeffizient der Materialpaarung  $\mu$  und den Seilkräften  $S_1$  und  $S_2$  angenommen (vgl. Gross et al. 2019, S. 260).

$$S_2 = S_1 e^{\mu\alpha} \quad (7.4)$$

Neben dem Umschlingungswinkel, welcher in der beschriebenen Ausführung bereits möglichst gering ist, kann der Reibungskoeffizient beeinflusst werden. Einerseits durch einen beschichteten Riemen oder durch die Beeinflussung des Führungskanals. Die Verwendung eines beschichteten Riemen wird als erste Maßnahme aufgrund der Verwendung einer Spezialkomponente, deren Verhalten erst im längeren experimentellen Einsatz empirisch beschreibbar ist, zurückgestellt. Zur Reduktion des Reibwerts des Führungskanals wurden die Lösungen der Einbringung von Schmiermittel in den Kanal, das Verwenden eines PTFE-Schlauchs als Führungskanal des Riemen und die Integration von Kugellagern am Umfang der Riemenführung berücksichtigt. Die Festlegung der durchgeführten

Änderung erfolgt durch die Überprüfung des bestehenden Gehäuses auf Integrierbarkeit und auf die Reduktion der Reibkraft. Die Riemenlaufbahnen liegen im Gleitlagergehäuse in Bereichen, welche die Integration aller Lösungen ermöglichen. Aus diesem Grund wurde zur Sicherstellung eines möglichst geringen Reibwerts bei möglichst geringem Verschleiß am Riemen die auf Gleitreibung basierenden Lösungen zurückgestellt und die Integration von Wälzlagern am Umfang gewählt. Diese Einschätzung der Lösungseigenschaften basiert auf den empirischen Erkenntnissen des Einsatzes von wälzgelagerten Umlenkrollen an den Teilsystemen des Leitungszwischenspeichers und der Leitungsumlenkung des 3DConFil-Prototyps (vgl. Abschnitte 5.4 und A.6). Diese Erkenntnisse werden mit einem Riemenspanner kombiniert. Die Riemenführung mit Riemenspanneinrichtung ist in Abbildung 7.17 a) als CAD-Modell dargestellt.

Die Montage der Wirbelstromsensoren erfolgt in der ersten Gestaltausführung des vorherigen Abschnitts von innen, indem die Leitungen durch die Gewindebohrungen geführt und das Sensorgehäuse im Gleitlagergehäuse verschraubt und mit einer Mutter gekontert wird. Dieser Montageprozess soll bedeutend durch eine Montage von außen verbessert werden. Hierzu wird eine Phase am Sensorgehäuse genutzt und ein Montagewerkzeug gestaltet. Der Sensor wird mit dem Werkzeug von außen auf die gewünschte Position geschraubt und anschließend mit einer Mutter gekontert. Die Tests mit der gedruckten zweiten Gestaltausführung bestätigen die vereinfachte und schnellere Montage der Wirbelstromsensoren, die in Abbildung 7.17 b) als CAD-Modell visualisiert ist. Das Gleitlagergehäuse mit den beschriebenen Verbesserungen ist in Abbildung 7.17 c) in gefertigter und montierter Form abgebildet. Die Fertigung erfolgte unter händischen Einlegesritten auf einem Anycubic Predator (vgl. Anycubic Technology Co., Ltd 2022) in standardisierter Ausführung. Mit dem weiterentwickelten Gleitlagergehäuse wird das Beispiel zur Nutzung der verfahrensinduzierten Eigenschaften unter zusätzlichem Einsatz von Endapplikationen mit vorhandenen Wirkgrößen und Wirkelementen abgeschlossen. Im folgenden Unterkapitel werden die nutzbaren verfahrensinduzierten Eigenschaften durch neue Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine erweitert.

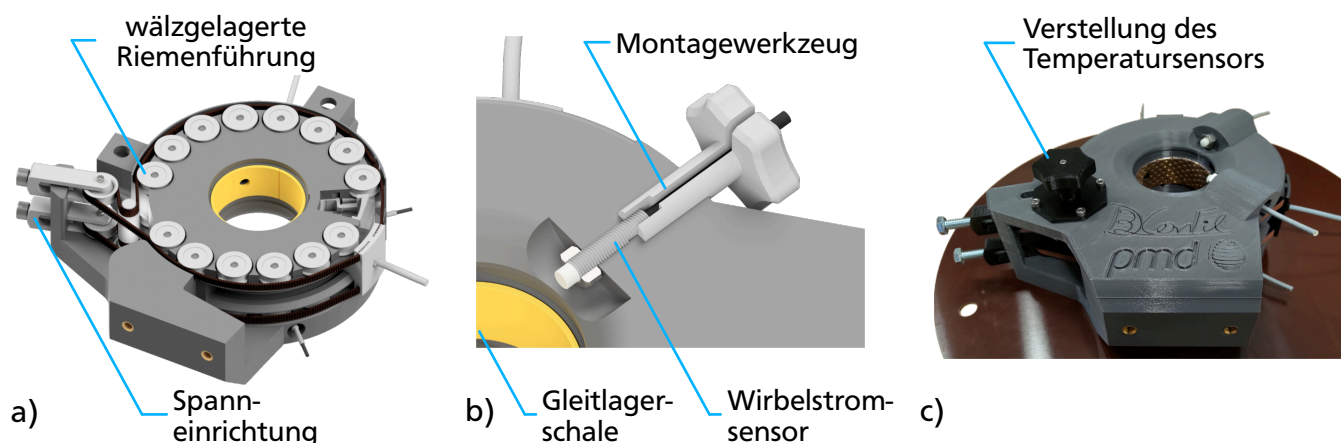


Abbildung 7.17: Verbesserungen des Gleitlagergehäuses nach Experimentalbetrieb unter der Reduktion der Riemenreibung durch Wälzlager an der Innenseite der Riemenlaufbahn mit Riemenspannsystem als CAD-Modell in a), äußerer Montagelösung und Montagewerkzeug der Wirbelstromsensoren als CAD-Modell in b) sowie als neu gefertigtes und montiertes Gleitlagergehäuse in c), eigene Abbildungen von a) bis c)



---

## 7.4 Neue verfahrensinduzierte Eigenschaften anhand einer kinematischen Erweiterung

In diesem Abschnitt wird nach der Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch die Adaption der Fertigungsschritte unter Beibehaltung der Wirkgrößen und Wirkelemente des Funktionsprototyps in Abschnitt 7.2 und der Nutzung dieser Eigenschaften im Rahmen einer Gleitlageranwendung in Abschnitt 7.3 die Erweiterung der Wirkgrößen des Funktionsprototyps dargelegt. Neben der Erweiterung der Fertigungsschritte wird die Gestaltung des Teilsystems zur Bereitstellung der erforderlichen Wirkgrößen vorgestellt.

### 7.4.1 Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften durch neue Wirkgrößen

Das 3DConFil-Verfahren nutzt den schichtweisen Bauteilaufbau des FFF-Verfahrens im Fall des Funktionsprototyps unter Einsatz eines kommerziell verfügbaren Portalsystems mit drei Achsen aufgrund der hohen Verfügbarkeit (vgl. Abschnitte 2 und 5.4.2). Mit diesen drei Achsen des Portalsystems ist das Stellen der Wirkgrößen in einem Umfang möglich, dass zwischen der Integration zwischen zwei Druckschichten und der Integration über mehrere Druckschichten bezüglich der Leitungshandhabung in Abschnitt 5.1.4 unterschieden wurde. Im Besonderen die Integration über mehrere Schichten führt durch die Druckdüsenausdehnung dazu, dass die Leitung keinen umliegenden Bauteilkontakt aufweist. Dadurch ist die Leitung innerhalb eines Kanals bei Integration über mehrere Schichten nicht kraftschlüssig verbunden (vgl. Abschnitt 5.1.4). Gleichzeitig stellt der größere erforderliche Kanaldurchmesser im Vergleich zum Einpresskanal bei der Integration zwischen zwei Schichten eine Restriktion in der Integration der Leitung innerhalb des Bauteilvolumens dar. Beispielsweise ist die Integration an den Außenwänden des Bauteils nicht beliebig möglich.

Aus diesem Grund wird eine Möglichkeit zur Erweiterung der verfahrensinduzierten Eigenschaften der gefertigten Bauteile durch die Integration der Leitung kraftschlüssig in beliebigen Orientierungen abgeleitet. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften werden durch die Erweiterung der Wirkgrößen des Funktionsprototyps möglich und sind damit für die Produktentwicklung nutzbar. Hierbei wird der in Abschnitt 5 dargelegte Ansatz des 3DConFil-Verfahrens beibehalten und beispielsweise kein Stoffschluss durch eingebrachten Klebstoff eingesetzt. Die kraftschlüssige Verbindung von Leitung und Grundkörper erfolgt in Form des Einpresskanals zur Integration zwischen zwei Druckschichten. Die für die Fertigungsschritte erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente werden durch den Funktionsprototyp bereits bereitgestellt. Die Differenzierung der Integrationsarten erfolgt aus der Unterscheidung, dass die Leitung bei der Integration über mehrere Schichten die jeweilige Druckebene parallel zur X-Y-Ebene durchstößt und dadurch umdrückt wird. Eine Druckebenenorientierung relativ zum Portalsystem ermöglicht neue verfahrensinduzierte Eigenschaften.

Die Änderung der Druckebenenorientierung ist während des Bauteilaufbaus möglich und am Markt (vgl. Verashape Sp. z o.o. sp.k. 2023) sowie in der Forschung (vgl. Oliveira et al. 2020, S. 185 bis S. 201) bereits dokumentiert. Das Verkippen der Bauplattform wird im Bereich des FFF-Drucks besonders zur Reduktion von Stützstrukturen eingesetzt (vgl. Wüthrich et al. 2021, S. 134 f.;

---

Oliveira et al. 2020, S. 185 bis S. 201). Diese Erweiterung der Kinematik führt zu neuen Möglichkeiten der Leitungsintegration für das 3DConFil-Verfahren, die im Folgenden von der Erweiterung der Fertigungsschritte über die Ermittlung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine bis zur Gestaltung des Teilsystems dargelegt wird.

### 7.4.2 Verfahrenserweiternde Fertigungsschritte zur Bauteilorientierung

Für das Ablegen der während des Abkühlprozesses noch formbaren extrudierten Kunststoffbahn wird in Schwerkraftrichtung ein festes Materialvolumen zur Abstützung benötigt. Durch die zuvor genannten Ansätze der kinematischen Erweiterung wird in Stützstrukturbereichen keine Zusatzstruktur erforderlich, sondern es wird der zuvor aufgebaute Bauteilbereich zur Eigengewichtsabstützung verwendet. Das bedeutet, der gefertigte Bauteilbereich ist kein Überhangsbereich über  $45^\circ$  bezogen auf die Richtung der Gravitationskraft (vgl. Wüthrich et al. 2021, S. 134 f.; Oliveira et al. 2020, S. 185 bis S. 201).

Für das 3DConFil-Verfahren ist diese Möglichkeit zur Abstützung von Kräften zusätzlich zu Gewichtskräften für das Einpressen der Leitungen in den Kanal zur Integration zwischen zwei Druckschichten einsetzbar. Die auf die Leitung über die eingepresste Länge eingeleitete Einpresskraft wird über das Bauteil und die Druckplattform abgeleitet. Durch eine Änderung der relativen Bauteilorientierung zum Druckkopf lassen sich Bereiche des gefertigten Bauteils einzeln aufbauen, sodass die Integration der Leitung zwischen zwei Schichten nicht wie bisher auf parallele Ebenen zur Bauplattform begrenzt ist, sondern beispielsweise geneigte Leitungsverläufe mit der Lösung der Integration zwischen zwei Schichten fertigbar sind. In Abbildung 7.18 sind verschiedene Zeitpunkte der Fertigung eines Demonstratorbauteils mit den erforderlichen Wirkgrößen dargestellt. Die bereits von dem Funktionsprototyp bereitgestellten Wirkgrößen sind die Kräfte der Bauplattform in den Raumrichtungen  $F_{\text{Bauplattform}}$ , der Zugkräfte in den Raumrichtungen durch die Positioniereinrichtung  $F_{\text{Zug}}$  und  $F_{\text{Förderung}}$  sowie der Einpresskraft  $F_{\text{Einpress}}$ . Zusätzlich ist das Verkippen der Bauplattform um die Achsen  $Y_{\text{KE}}$  und  $Z_{\text{KE}}$  möglich. Von den Teilabbildungen a) bis c) ist die Bauplattform in unterschiedlichen Winkeln verkippt, sodass die Ebene, in der die Leitung eingepresst wird, parallel zur  $X$ - $Y$ -Ebene des Portalsystems und damit zum Druckkopf steht.

Die Integration anhand der Form des Bauteils wird mit *konkaver Leitungsintegration*, angelehnt an eine konkave Linsenform, bezeichnet. Der Leitungsverlauf ist in drei Teile segmentiert und in diskrete FFF-Bauteilabschnitte unterteilt. Zur automatisierten Bauteilsegmentierung bestehen für weiterführende Arbeiten Ansätze für vier Achsen (vgl. Wu et al. 2020, S. 599 bis S. 610) und für fünf Achsen (vgl. Wu et al. 2020, S. 599 bis S. 610; Xu et al. 2019, S. 838 bis S. 850). Die Integration der Leitung erfolgt mit dem Fertigungsschritt der Integration zwischen zwei Schichten durch Einpressen. Das Bauteil wird zu Beginn der Fertigung mittels des FFF-Verfahrens bis zur ersten Integrationsschicht der Leitung gefertigt. Die Wirkgrößen und Wirkelemente zum Einpressen der Leitung sind ohne Änderung bei bestehendem Fertigungsschritt nutzbar.

In Abbildung 7.18 a) ist der Zeitpunkt nach Abschluss der Integration der Leitung in den ersten Kanalbereich dargestellt. Das Bauteil ist hierzu um  $25^\circ$  entgegen dem Uhrzeigersinn geneigt. Zur deutlicheren Darstellung der Bauteilorientierung relativ zum Druckkopf ist die Bauplattform zusätz-

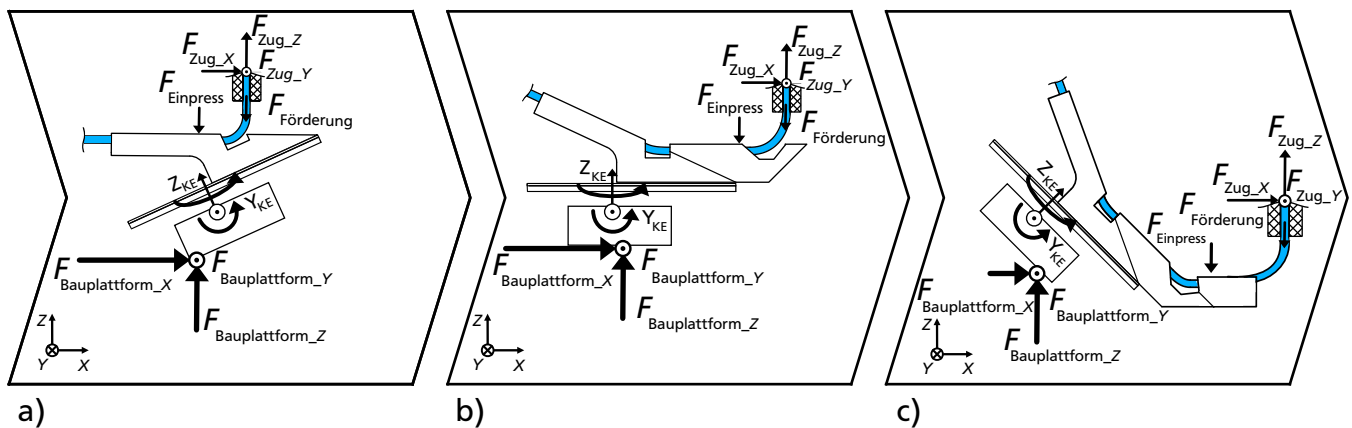


Abbildung 7.18: Fertigungsschritte zur Integration zwischen zwei Schichten unter Drehung des Werkstücks um die Y-Achse mit drei Kanalabschnitten unter einer Drehung von  $25^\circ$  entgegen dem Uhrzeigersinn zum Einpressen des ersten Abschnitts in a), von  $0^\circ$  zum Einpressen des zweiten Abschnitts in b) und von  $45^\circ$  zum Einpressen des dritten Abschnitts in c), eigene Abbildungen von a) bis c)

lich visualisiert. Nach dem Einpressen der Leitung in den ersten Kanalabschnitt wird der Aufbau des Grundkörpers mit dem Fertigungsschritt der Integration über mehrere Schichten bis zum Abschluss des zweiten Grundkörperteils fortgesetzt und anschließend das Bauteil um  $25^\circ$  im Uhrzeigersinn um die Y-Achse gedreht. Der Austrittspunkt der Leitung ist in diesem Fall der Austrittspunkt aus dem ersten Kanalteil. Der Druck dieses Bauteilbereichs ist nur möglich, wenn dieser Druckbereich nicht auf der Bauplattform liegt und damit eine Kollision von FFF-Düse und Bauplattform verhindert wird.

Nach der Fertigstellung des zweiten Bauteilbereichs erfolgt das Einpressen der Leitung in den zweiten Kanalteil. In Abbildung 7.18 b) sind das Bauteil und die Positioniereinrichtung nach Abschluss der Leitungsintegration in den zweiten Kanalbereich relativ zueinander und durch die Leitung verbunden dargestellt. Analog zur Abfolge von Abbildung 7.18 a) zu b) wird das Bauteil weiter aufgebaut. Nach der Fertigstellung des Grundkörpers wird das Bauteil um die Y-Achse im Uhrzeigersinn um  $45^\circ$  gedreht und die Leitung in den dritten Kanalbereich eingepresst. Dieser Zustand ist in Abbildung 7.18 c) visualisiert. Damit ist die Leitung in dem Beispielbauteil kraftschlüssig verbunden. Diese Art der Leitungsintegration ist auch für konvex gekrümmte Leitungsverläufe möglich.

### 7.4.3 Anforderungen an die kinematisch erweiterte Fertigungsmaschine

Ausgehend von der geforderten verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft zur kraftschlüssigen Leitungsintegration in verschiedenen Orientierungen innerhalb des Bauteilvolumens und der aufgezeigten möglichen Verfahrenserweiterung durch die Änderung der Aufbauebene des Bauteils während der Fertigung werden im Folgenden die Anforderungen an die Wirkgrößen der Fertigungsmaschine abgeleitet. Die Fertigungsschritte sind bereits festgelegt, sodass ein Verfahrensprinzipmodell für diese verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaft in Abbildung 7.19 erstellt und visualisiert ist.



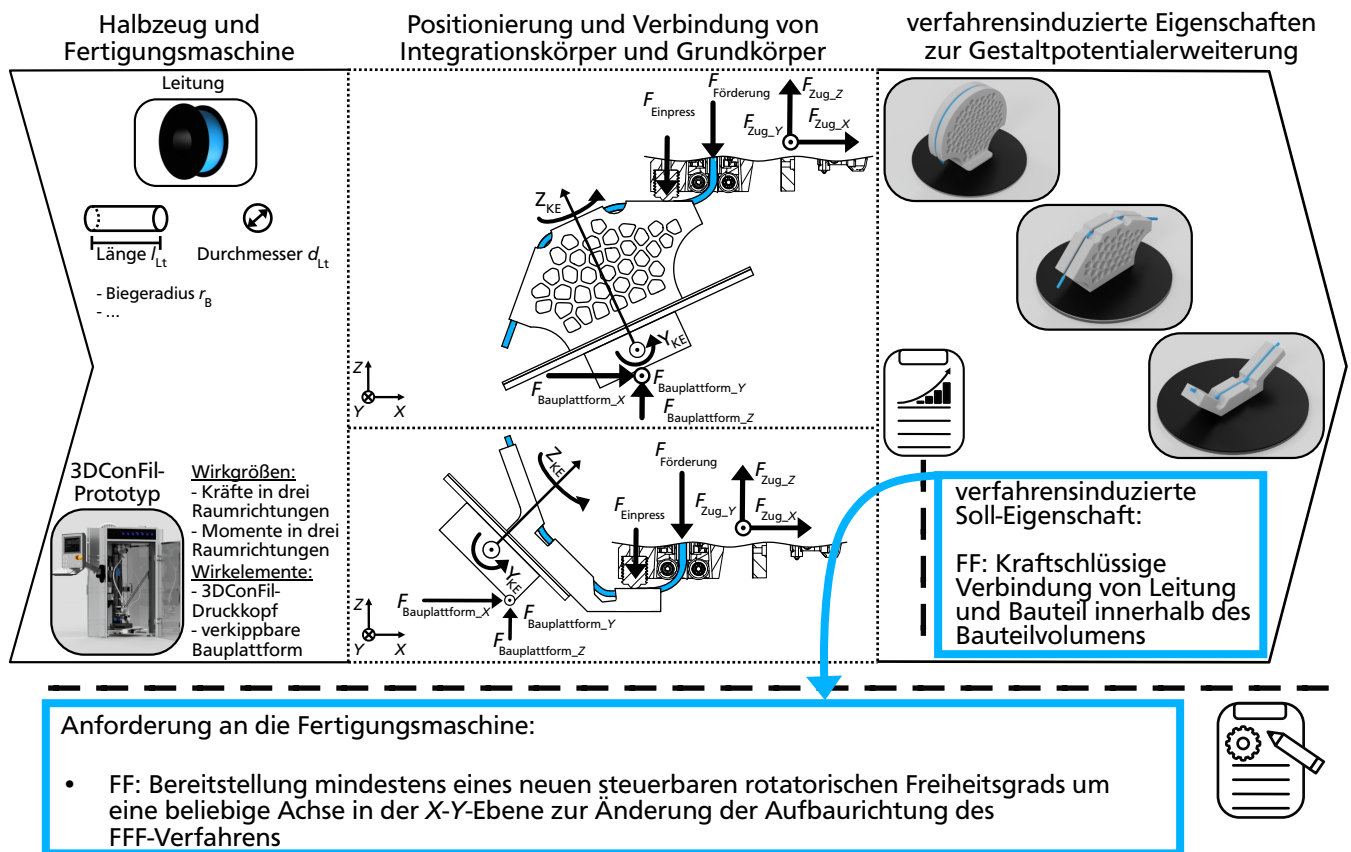


Abbildung 7.19: Ableitung der Anforderung an die Fertigungsmaschine anhand der verfahrensisinduzierten Soll-Eigenschaft zur kraftschlüssigen Integration der Leitung bei veränderlicher Bauteilorientierung unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung

Im linken Teil von Abbildung 7.19 ist die zu integrierende Leitung und der Funktionsprototyp mit den verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften dargestellt. Im rechten Teil sind die erweiterten verfahrensisinduzierten Eigenschaften in Form von drei Bauteilen visualisiert. Neben dem in Abbildung 7.18 vorgestellten konkaven Leitungsverlauf werden zwei Arten eines *konvexen Leitungsverlaufs* dargestellt. Zur Fertigung eines konkaven Leitungsverlaufs gehen die unterschiedlich orientierten Kanalsegmente nicht direkt ineinander über. Sie sind durch einen Bereich, an welchem die Leitung frei liegt, voneinander getrennt. Dadurch wird die Druckbarkeit bei geometrischer Ausdehnung der Druckdüse ohne Kollision ermöglicht und der minimale Biegeradius der Leitung eingehalten.

Angelehnt an diese Kanalabschnitte ist das mittlere Bauteil in einer konvexen Form gestaltet. Dieses Bauteil ist mit dem dargestellten weißen Grundkörper vor der Leitungsintegration mit dem FFF-Verfahren fertigbar. Die Leitung wird innerhalb eines abschnittsweisen Integrationschritts zwischen zwei Schichten jeweils in den Kanal eingepresst. Zwischen diesen freien Bereichen wird das Bauteil neu orientiert. Bei dieser konvexen Bauteilform ist keine parallele Leitungshandhabung während des Bauteilaufbaus erforderlich, sodass eine Kollision der Druckdüse mit dem Bauteil vermieden

---

wird. In diesem Fall ist ein kontinuierliches Einpressen bei simultaner Neuorientierung des Bauteils möglich. Dadurch wird das linke Bauteil im rechten Bereich von Abbildung 7.19 fertigbar. Damit sind die verfahrensinduzierten Eigenschaften im Rahmen der Produktentwicklung nutzbar.

Im mittleren Teil sind entsprechend den Abbildungen 7.18 a), b) und c) die Wirkgrößen mit einem Bauteil dargestellt. Im oberen Bereich des mittleren Abbildungsteils ist ein konvexes Bauteil zum Zeitpunkt während des Einpressens der Leitung in den rechten Kanalabschnitt visualisiert. Im unteren Bereich des mittleren Abbildungsteils ein konkaves Bauteil zum analogen Fertigungszeitpunkt. Die Verfahrenspotentiale sollen durch die Möglichkeit der kraftschlüssigen Leitungsintegration erweitert werden. In der bisherigen Entwicklung des 3DConFil-Verfahrens wurde die Lösung der Integration zwischen zwei Schichten und dem Einpressen der Leitung in einen Kanal vorgestellt. Durch eine Neuorientierung des Bauteils relativ zum Druckkopf wird die Aufbaurichtung des Bauteils verändert und so das Einpressen der Leitung innerhalb des Bauteils unabhängig zur Aufbaurichtung ermöglicht.

Die bestehenden Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens werden um den Schritt der Orientierungsänderung erweitert. Die hierfür erforderlichen neuen Wirkgrößen werden von der ersten Generation des Funktionsprototyps nicht bereitgestellt. Die Hauptanforderungen an den Funktionsprototyp zur Bereitstellung des erweiterten Verfahrens liegt in der kinematischen Erweiterung um eine in der X-Y-Ebene liegende Achse zur Bauteilorientierung. Die Festforderung an die Fertigungsmaschine zum Erschließen der beschriebenen verfahrensinduzierten Eigenschaften wird zur Bereitstellung mindestens eines, beispielsweise durch Momente steuerbaren, rotatorischen Freiheitsgrads um eine Achse in der X-Y-Ebene ermittelt und ist in Abbildung 7.19 dokumentiert. Alle weiteren erforderlichen Wirkgrößen werden bereits bereitgestellt.

Das in diesem Abschnitt beschriebene fertigungstechnologische Wissen bietet einen Einblick in die Möglichkeiten durch eine kinematische Erweiterung zusätzlich zu den beschriebenen Einsatzmöglichkeiten. Bezogen auf das FFF-Verfahren trifft dies beispielsweise auf die verbesserte Reparaturmöglichkeit von Bauteilen zu. Dieser Einblick erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Beispiele sind die Spezifizierung der Verfahrensgrenzen durch die Beschreibung des Einflusses der geometrischen Ausdehnung der FFF-Düse, die Auswirkungen einer Anstellung der Druckdüse oder die Adaption der softwaretechnischen Lösung. Mit der Abschätzung der neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften und der Ableitung der Anforderung wird der Nutzen für zukünftige Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten hoch, bezogen auf den Entwicklungsaufwand eines Teilsystems zur Bereitstellung der Wirkgrößen, eingeschätzt. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt eine technische Lösung für die kinematische Erweiterung des Portalsystems für den Funktionsprototyp vorgestellt.

#### **7.4.4 Gestaltung der kinematischen Erweiterung**

Zur Gestaltung der kinematischen Erweiterung ist die Kompatibilität mit dem bestehenden Portalssystem erforderlich. Zur Verbesserung der Einschätzung der Lösungseigenschaften wird eine im Stand der Forschung oder kommerziell verfügbare technische Lösung eingesetzt. Die kinematische Erweiterung von additiven Fertigungsmaschinen ist unterschiedlich aufgrund der Anzahl zusätzlicher Freiheitsgrade und der Bereitstellung dieser durch Bauplattform oder Druckkopf möglich.

Bekannte Lösungen sind das Drehen einer angewinkelten Druckdüse (vgl. Wüthrich et al. 2021, S. 140 f.), die Bewegung der Düse durch einen Roboterarm (vgl. Rieger et al. 2016, S. 652 bis S. 659) und die Drehung bzw. Verkippung der Bauplattform (vgl. Wüthrich et al. 2021, S. 134 f.; Tang et al. 2023, S. 2968 f.; Luo et al. 2020, S. 126083 f.). Unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Wirkgrößen und Wirkelemente des Funktionsprototyps erfolgt die kinematische Erweiterung um zwei rotatorische Freiheitsgrade, die durch die Bereitstellung von Momenten als Wirkgrößen steuerbar ausgeführt sind. Ein Freiheitsgrad wird zur Erfüllung der abgeleiteten Anforderung (vgl. Abbildung 7.19) um eine Achse der horizontalen X-Y-Ebene ausgeführt. Ein weiterer Freiheitsgrad wird als Drehfreiheitsgrad um die Z-Achse gewählt. Dieser Freiheitsgrad ist bauraumneutral integrierbar und ist für weitere Gestaltungsmöglichkeiten nutzbar.

Die Gestaltung der drehbaren und kippbaren Bauplattform ist in Abbildung 7.20 als Schnittdarstellung um die Kippachse dargestellt. Zur Bereitstellung der erforderlichen Wirkgrößen für die Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens wird das Verkippen um  $\pm 45^\circ$  um die Kippachse parallel zur X-Achse, sowie eine anschlusslose Drehbarkeit parallel zur Z-Achse vorgesehen. Zur Neigung der Bauplattform ist zusätzlicher Bauraum unterhalb dieser erforderlich. Die Türme des Portalsystems werden aus diesem Grund verlängert und durch eine adaptierte Basisplatte auf Stützfüßen miteinander verbunden. Auf der Basisplatte sind die Bauplattformstützen der Bauplattform montiert. Zwischen den zwei Lagerstellen in den Stützen ist die Kippplatte für den Kippfreiheitsgrad gelagert.

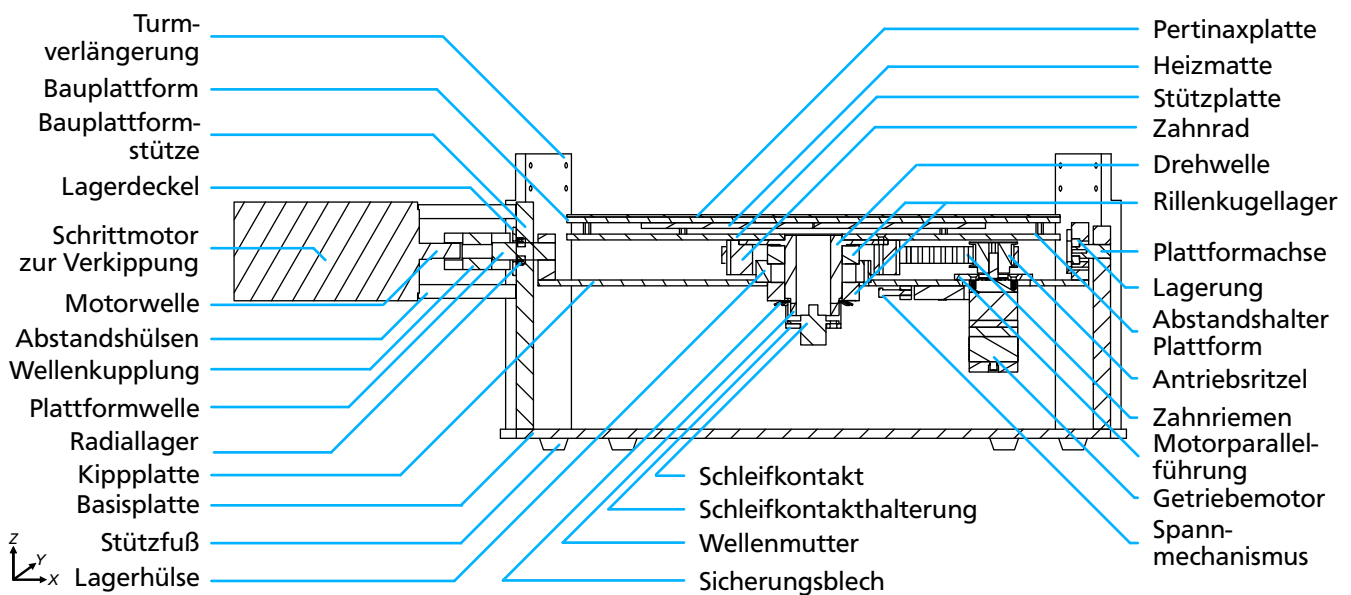


Abbildung 7.20: Schnittansicht der kippbaren Bauplattform zur kinematischen Erweiterung des Funktionsprototyps, eigene Abbildung

Auf der linken Seite in Abbildung 7.20 ist die Welle der Kippplatte mittels Rillenkugellager in der Bauplattformstütze gelagert und durch eine Wellenkupplung mit der Motorwelle zum Verkippen verbunden. Der Motor ist über Abstandshülsen an der Bauplattformstütze verschraubt. Die zweite Lagerstelle der Kippplatte ist durch ein Rillenkugellager auf einer Achse integriert im Abstandshalter ausgeführt. Die Achse ist in die zweite Stütze eingepresst.

---

Die Drehung der Bauplattform wird durch eine angestellte Lagerung auf der Kippplatte ermöglicht. Zwischen den Lagern ist eine Abstandshülse, mit der die Kippplatte und der Drehaufbau miteinander verbunden sind. Die Lager und die Abstandshülse sitzen auf der Hohlwelle zur Plattformdrehung, auf der die Stützplatte montiert ist. Die Montage erfolgt mit dem Antriebsrad, indem dieses mit der Stützplatte verschraubt und dabei mit dem Wellenflansch geklemmt wird. Auf der Stützplatte ist die Bauplattform mit Abstandshaltern und einer Pertinaxplatte montiert. Auf der Unterseite der Bauplattform ist eine Heizmatte mittels einer Klebverbindung aufgebracht. Die Leitungen zur Signalübertragung der Bauplattformtemperatur und der elektrischen Energie zur Bauplattformbeheizung werden durch die Hohlwelle über Schleifkontakte aus dem rotierenden Teilbereich geführt.

Das Antriebsmoment zur Drehung der Bauplattform erfolgt durch einen Zahnriementrieb, der von einem Steppermotor mit Planetengetriebe angetrieben wird. Der Getriebemotor ist durch eine Führung mit einem translatorischen Freiheitsgrad parallel zur Ebene der Bauplattform an der Kippplatte montiert. Auf der Antriebswelle sitzt das Antriebsritzel, das mittels des Zahnriemens mit dem Antriebsrad bewegungstreu gekoppelt ist. Die Einstellung der Riemen Spannung erfolgt durch eine Spannschraube, mit der die Position des Getriebemotors entlang einer Parallelführung eingestellt und der Abstand zwischen Rad und Ritzel beeinflusst wird. Die gefertigte kinematische Erweiterung ist in Abbildung 7.21 in eingebautem Zustand mit den schwarz eloxierten Portalsystemtürmen dargestellt.

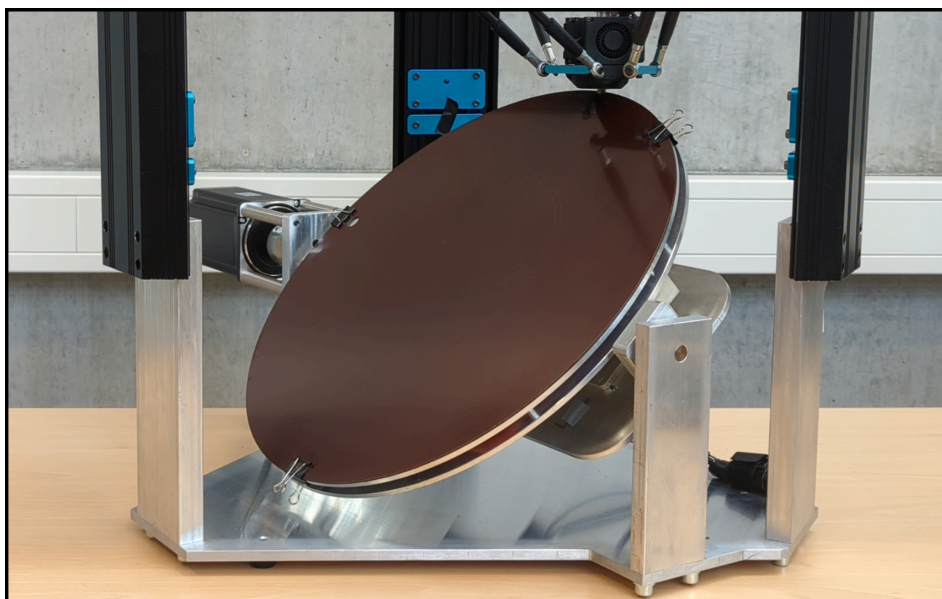


Abbildung 7.21: Gefertigte kinematische Erweiterung im eingebauten Zustand mit verbundenen Portalsystemtürmen, eigene Abbildung

Die Integration der kinematischen Erweiterung erfolgt durch die Demontage der bestehenden Bauplattform und die Verschraubung der Portalsystemtürme mit den Turmverlängerungen an der kinematischen Erweiterung. Das Portalsystem wird dadurch angehoben, sodass das erforderliche Volumen unterhalb der Bauplattform zur Ausführung der Kippbewegung besteht. Die kinematische Erweiterung ermöglicht vielfältige neue verfahrensinduzierte Eigenschaften. Diese sind im Rahmen

---

der fertigungsintegrierenden Prototypentwicklung nutzbar (vgl. Vorgehensmodell der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung Abschnitt 6.3 Pfad b)). Beispiele sind neben den dargestellten neuen Möglichkeiten konvexer und konkaver Leitungsverläufe auch Retrofit-Anwendungen in Kombination mit der Bauteilreparatur. Dadurch wird beispielsweise die Reparatur von Verkleidungsbauteilen bei gleichzeitiger bauraumneutraler Leitungsintegration während der Fertigung möglich.

---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

---

In diesem abschließenden Kapitel werden die erreichten Ergebnisse und Erkenntnisse in Abschnitt 8.1 zusammengefasst. Anschließend werden in Abschnitt 8.2 weiterführende Forschungsthemen als Ausblick zur Vertiefung und Erweiterung der Erkenntnisse aufgezeigt.

### 8.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Produktentwicklung werden die Bauteile des entwickelten Produkts während der Gestaltung festgelegt. Die Berücksichtigung von Fertigungsverfahren während der Produktentwicklung findet einerseits zur Sicherstellung der Fertigbarkeit der Bauteile und andererseits zunehmend zur Nutzung der gestalterischen Verfahrenspotentiale für neue Produkte, beispielsweise mit der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung statt. Bei der Berücksichtigung wird dabei die Verfügbarkeit einer Fertigungsmaschine zur Fertigung der Bauteile vorausgesetzt. (vgl. Abschnitt 3)

Die Verfügbarkeit einer geeigneten Fertigungsmaschine ist nicht prinzipiell gegeben und die Nutzung der gestalterischen Potentiale in Form verfahrensinduzierter Eigenschaften wird eingeschränkt. Gleichzeitig beinhaltet die Kenntnis über die gestalterischen Potentiale und deren Erweiterung wichtige Informationen in Form von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften an das gefertigte Bauteil. Die Berücksichtigung dieser Informationen ist für die zielgerichtete Entwicklung und Weiterentwicklung von Fertigungsmaschinen nutzbar, sodass deren potentialgetriebene Entwicklung möglich ist. Anhand dieser Herausforderungen ergibt sich für diese Arbeit das Ziel der systematischen Überführung der angestrebten verfahrensinduzierten Eigenschaften an das Bauteil in Anforderungen an die Fertigungsmaschine und deren Teilsysteme in Form von verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften. (vgl. Abschnitte 4 und 6)

Zur Erreichung des Ziels wurden zwei Teilziele festgelegt. Das erste Teilziel besteht in der Beschreibung der Wechselwirkungen des gefertigten Bauteils, dem Fertigungsverfahren, den Halbzeugen und der Fertigungsmaschine. Zur Erarbeitung des erforderlichen Wissens über die Zusammenhänge von Fertigungsverfahren und Fertigungsmaschine wurde das hybrid-integrierende additive 3DConFil-Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht die Integration von elektrischen, optischen und stoffbezogenen Leitungen und bildet die Voraussetzung zur Entwicklung der Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung. (vgl. Abschnitt 5) Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode basiert auf der eigenschaftsbasierten Beschreibung der Wechselwirkungen und der Verknüpfung durch das Verfahrensprinzipmodell der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung. Dadurch wird die Überführung der Soll-Eigenschaften an das gefertigte Bauteil in geforderte Eigenschaften an die Fertigungsmaschine möglich. Die geforderten Eigenschaften umfassen die

---

Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsmaschine und werden in Form von Anforderungen formuliert. Diese Anforderungen umfassen die Informationen für die Erweiterung der nutzbaren gestalterischen Potentiale im Rahmen der Produktentwicklung zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung in Form verfahrensprinziprelevanter Soll-Eigenschaften. Zur Förderung der Zuordnung von verfahrensinduzierten Eigenschaften der gefertigten Bauteile und den verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine wurde eine Matrixdarstellung vorgestellt. Diese ist bezüglich der Berücksichtigung weiterer Fertigungsschritte, Wirkgrößen, Wirkelemente und Bauteile beliebig erweiterbar. (vgl. Abschnitt 6)

Das zweite Teilziel besteht in der Zuordnung der Anforderungen zu den Teilsystemen der Fertigungsmaschine. Aufgrund der hohen Komplexität dieser technischen Systeme wurde eine Möglichkeit zur Zuordnung von Wirkgrößen und Wirkelementen erarbeitet. Die Zuordnung berücksichtigt die Wechselwirkungen innerhalb der Fertigungsmaschine und basiert auf deren Produktarchitektur. Die Produktarchitektur verknüpft die Maschinenfunktionen mit den funktionserfüllenden Bauteilen und unterstützt damit die Anforderungszuordnung. Die Wirkgrößen entsprechen Funktionen der Fertigungsmaschine während Wirkelemente Bauteile oder Teile dieser darstellen. Mit dieser strukturellen Beschreibung des technischen Systems Fertigungsmaschine besteht ein Modell zur Zuordnung der Anforderungen an die Teilsysteme der Fertigungsmaschine. (vgl. Abschnitt 6)

Die beschriebene Methode wurde anhand des erarbeiteten fertigungstechnologischen Wissens initial verifiziert. Hierzu wurden die erforderlichen Wirkgrößen und Wirkelemente des entwickelten Funktionsprototyps zur Durchführung der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens eingesetzt. Die nicht nutzbare verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaft der Integration von Leitungen mit geringerem Durchmesser wurde in Anforderungen an die Weiterentwicklung des Funktionsprototyps überführt und den jeweiligen Teilsystemen des Funktionsprototyps zugeordnet. (vgl. Abschnitt 7.1)

Die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung wurde weiterführend zur Erweiterung der integrierbaren Funktionen des 3DConFil-Verfahrens durch Endapplikationen angewandt. Die Ergebnisse ermöglichten die funktionsintegrierte Gestaltung eines Gleitlagergehäuses dessen Funktionsfähigkeit experimentell nachgewiesen wurde. Daran anschließend ermöglichte die Anwendung der Methode die Zuordnung neuer verfahrensinduzierter Eigenschaften und die Ableitung der erforderlichen Wirkgrößen der Fertigungsmaschine anhand der Erweiterung des 3DConFil-Verfahrens, um eine Bauteilorientierung während der Bauteilfertigung durch eine kinematische Erweiterung. (vgl. Abschnitte 7.2 bis 7.4)

Die Methode der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung nutzt die eigenschaftsbasierte Beschreibung und ermöglicht mit dem Verfahrensprinzipmodell nach Roos (2018, S. 56 bis S. 59) die systematische Zuordnung fertigungstechnologischen Wissens um die Wechselwirkungen während eines Fertigungsschritts. Dadurch wird die Überführung von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften in Anforderungen an die Fertigungsmaschine möglich. Für die Zuordnung der Anforderungen an die Teilsysteme der Fertigungsmaschine wird die Produktarchitektur der Fertigungsmaschine genutzt. Die Methode basiert damit auf einer übertragbaren Beschreibungsweise und produktbeschreibenden Modellen, die für verschiedene Fertigungsverfahren und Fertigungsmaschinen nutzbar und übertragbar sind.

---

## 8.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit identifizierten weiterführenden Forschungsaktivitäten liegen in zwei Bereichen. Der erste Bereich umfasst das 3DConFil-Verfahren. Das entwickelte 3DConFil-Verfahren steht, neben der funktionsintegrierten Armablage und dem Gleitlagergehäuse, zur Entwicklung weiterer Produkte zur Verfügung. Zusätzlich ist die Erweiterung des Fertigungsverfahrens, beispielsweise zur Integration von Leitungsverzweigungen innerhalb des Bauteils möglich. Der Funktionsprototyp stellt derzeit eine Grundfunktionalität zur Darlegung der Wirkgrößen und Wirkelemente des 3DConFil-Verfahrens bereit. Zur Fertigung von Bauteilen, im Besonderen mit größeren Abmaßen, ist die Weiterentwicklung der Teilsysteme anhand der bisherigen Erkenntnisse erforderlich. Dadurch stehen Versuche zur Fertigung größerer Bauteile aus.

Anhand des Entwicklungsfokus des Funktionsprototyps wurde die Gestaltung nicht für hohe Fertigungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Aus diesem Grund sind derzeit dynamische Effekte nicht berücksichtigt. Die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens der bewegten Teilsysteme bietet die Möglichkeit zur Erhöhung der Fertigungsgeschwindigkeit. Zur Bereitstellung der erweiterten Möglichkeiten zur Funktionsintegration durch die automatisierte Nutzung der Endapplikationen sind zum derzeitigen Stand keine Änderungen der physischen Komponenten erforderlich. Zur Stellung der erforderlichen Wirkgrößen ist die bestehende Software zur Steuerungsbefehlgenerierung erweiterbar. Die Erkenntnisse sind weiterführend zur Weiterentwicklung einer neuen Produktgeneration nutzbar. Dies trifft für den digitalen und den physischen Entwicklungsbereich zu. Beispielsweise sind die verfahrensspezifischen Komponenten auf andere Portalsysteme adaptierbar. Mit der kinematischen Erweiterung in Form der neigbaren und drehbaren Bauplattform besteht ein vielversprechender Schritt zur Fertigung von Bauteilen mit neuen verfahrensinduzierten Eigenschaften.

Der zweite Bereich umfasst die entwickelte Methode. Die Methode zur potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung wurde anhand des entwickelten hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahrens in mehreren Beispielen überprüft. Eine Validierung steht derzeit aus. Während der Entwicklung wurden keine verfahrensspezifischen Einschränkungen getroffen, sodass die Methode in der praktischen Anwendung für die Entwicklung von Fertigungsmaschinen anderer Fertigungsverfahren eingesetzt werden kann und soll. Während der Entwicklung und der Durchführung der Methode wird eine Änderung des Fertigungsverfahrens und der Halbzeuge nicht berücksichtigt. Diese sind ebenfalls wie die verfahrensinduzierten Eigenschaften und die Wirkgrößen beziehungsweise Wirkelemente der Fertigungsmaschine variierbar. Das Einbeziehen dieser Variationen bietet eine zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit der verfahrensinduzierten Bauteileigenschaften. Diese Erweiterung erscheint in Bezug auf die Nutzung bestehender Fertigungsmaschinen als zielführend.

Einen Einblick geben die aufgezeigten Endapplikationen. Durch die Berücksichtigung der bereitgestellten Wirkgrößen und Wirkelemente einer bestehenden Fertigungsmaschine während der Variation des Halbzeugs werden neue verfahrensinduzierte Eigenschaften möglich und nutzbar. Neben der Bereitstellung der verfahrensinduzierten Eigenschaften ist ebenfalls die gezielte Spezifikation einer Wirkgrößenreduktion der Fertigungsmaschine und damit die Reduktion erforderlicher Wirkelemente möglich und deutet auf eine Strategie zur Fertigungsmaschinenvereinfachung hin. Diese Anregungen stellen vielversprechende Erweiterungsansätze dar, die eingehender Untersuchungen bedürfen.



---

# A Anhang

---

## A.1 In der Literatur dokumentierte Definitionen des Begriffs der Funktionsintegration

Die im Stand der Forschung dokumentierten Definitionen des Begriffs Funktionsintegration sind in Tabelle A.1 aufgeführt.

Tabelle A.1: Definitionen von Funktionsintegration im Stand der Forschung

Autor	Beschreibung
Ponn und Lindemann (Ponn et al. 2011, S. 141)	„Das Prinzip der <b>Funktionsintegration</b> besagt, dass ein Bauteil zwei oder mehrere Funktionen erfüllt. Die Anwendung des Prinzips verspricht Vorteile hinsichtlich Bauraum, Produktgewicht und Kosten, da von einem Funktionsträger mindestens zwei Funktionen erfüllt werden, für die sonst mehrere Bauteile notwendig wären.“ [Hervorhebung im Originaltext]
Vietor und Stechert (Vietor et al. 2013, S. 866)	„Funktionsträger, die wenig beeinflusst werden, sollten sinnvoll in zuvor festgelegte Module integriert werden („Funktionsintegration“).“
Roth (Roth 2001, S. 412 f.)	„Ist die Vereinigung <i>verschiedener</i> → Funktionsträger zu <i>einem</i> → Wirkraum, <i>einer</i> → Wirkfläche, zwecks Verbilligung der Fertigung, so daß die von ihnen ausgehenden → Funktionen erhalten bleiben und die dabei gegebenenfalls auftretenden Störfunktionen in erträglichen Grenzen bleiben. → Funktionsträger können sowohl → Wirkräume als auch → Wirkflächen sein.“ [Hervorhebungen, Pfeile und Rechtschreibung im Originaltext]
Hoenow und Meißner (Hoenow et al. 2021, S. 37)	„Funktionsintegration liegt vor, wenn funktionsbedingte Bauteile konstruktiv so vereinigt werden, dass der Bauteilkörper des einen Teiles vollständig oder teilweise vom andern Teil gebildet wird, sodass Werkstoff und/oder Fertigungsaufwand für das integrierte Teil eingespart werden können. Funktionsintegration ist vollständig oder teilweise möglich ...“

---

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – von vorheriger Seite fortgesetzt.

Autor	Beschreibung
Ziebart (Ziebart 2012, S. 114)	„Funktionsintegration ist ein konstruktiver Vorgang, der ein technisches System mit gegebener Funktion derart verändert, dass zusätzliche Funktionen durch das System erfüllt werden und/oder die Anzahl der Bauelemente reduziert wird.“
Krause et al. (Krause et al. 2021, S. 360 f.)	„Ziel ist es, die Gesamtzahl von Bauteilen innerhalb einer Baugruppe bei gleichbleibendem Funktionsumfang zu reduzieren (Integralbauweise), oder zusätzliche Funktionen zu erfüllen (Multifunktionalbauweise).“
Matthiesen (Matthiesen 2021, S. 457)	„(Integration von Einzelfunktionen ins Gesamtsystem)“
Ehrlenspiel und Meerkamm (Ehrlenspiel et al. 2017, S. 598)	„Das Prinzip der <b>Funktionsvereinigung</b> ergibt hingegen meist die kostengünstigere, Platz sparendere und leichtere Konstruktion, da von einem Funktionsträger mindestens zwei Funktionen erfüllt werden, für die sonst mehr Bauteile notwendig wären.“ [Hervorhebung im Originaltext]

---

## A.2 Berücksichtigte Gestaltungslösungen zur Integration zwischen zwei Druckschichten

Die Festlegung der Grundfertigungsprozesse zur Leitungsintegration ermöglicht die Entwicklung von Gestaltungslösungen innerhalb des Bauteils. Die Gestaltungslösungen werden zuerst für die Integration zwischen zwei Druckschichten anhand einer Lösungsrecherche ermittelt und anhand der Anforderungen ausgewählt und festgelegt.

Im Folgenden werden die Gestaltungslösungen zur Leitungsintegration abgeleitet. Die Integration zwischen zwei Druckschichten ist sequentiell zum FFF-Verfahren durchführbar und ermöglicht vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Die Entwicklung der horizontalen Verlegung wird durchgeführt, indem Lösungen für die Funktion *Leitung mit dem additiv gefertigten Bauteil verbinden* ermittelt werden. Zur Lösungsfindung werden die Möglichkeiten der Verbindung einer horizontalen Verlegung der integrierten Leitung variiert. Die Verbindung zweier Körper kann auf verschiedene Arten erfolgen. Etablierte Verbindungstechniken sind in Anlehnung an (vgl. Ehrenstein 2004) in der Spalte Bezeichnung in Tabelle A.2 aufgeführt und auf das 3DConFil-Verfahren in der Spalte Beschreibung angewandt.

Tabelle A.2: Lösungen der Verbindungstechnik zur Verbindung von Grundkörper und integrierter Leitung mit etablierten Verbindungstechniken in Anlehnung an Ehrenstein (2004)

Art der Verbindungstechnik	Bezeichnung	Beschreibung
mechanisch	Verschraubung	Die Leitung wird durch Schraubelemente geklemmt. Die Schraubelemente können in das additiv gefertigte Bauteil direkt oder in bereits eingebrachte Gewindeeinsätze eingeschraubt werden.
	Klemmverbindung	Die Verbindung erfolgt reibkraftschlüssig oder formkraftschlüssig durch die elastische Verformung der beteiligten Elemente durch eine Fügekraft und eine Fugebewegung.
	Bajonett-Verbindung	Die Verbindung erfolgt formkraftschlüssig durch eine Fügekraft und eine Fugebewegung.
	angeformte Verbindungselemente	Verbindungselemente wie beispielsweise Gewinde und Filmgelenke können additiv mit dem Bauteil gefertigt werden.

---

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.2 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Art der Verbindungstechnik	Verbindungstechnik	Beschreibung
chemisch	Eindrücken in verflüssigten Kunststoff	Die Leitung wird für eine chemische Verbindung in verflüssigten Kunststoff gedrückt. Die Verflüssigung ist durch Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung oder Reibung möglich.
	Klebstoffe	Die Leitung wird mittels Klebstoff mit dem additiv gefertigten Bauteil verbunden. Das Aushärten des Klebstoffs ist beispielsweise durch Zusatz eines Härterers, durch Feuchtigkeit oder UV-Strahlung möglich.

Ausgehend von bekannten Verbindungsarten werden diese auf die Integration der Leitung zwischen zwei Druckschichten übertragen und durch die Integration einer elektrischen Leitung in Abbildung A.1 dargestellt. Die Verbindung von Leitung und Grundkörper ist nach Aguilera et al. durch ein lokales Einschmelzen der Leitung möglich. Diese Verbindung ist in Abbildung A.1 a) zu dem Einbetten einer Leitung in bereits verdrukten Kunststoff in Anlehnung an Aguilera et al. (2013, S.950 bis S.961) visualisiert. Eine Beschädigung des Leitungsmantels ist auch bei kurzer Erwärmdauer anhand des direkten Kontakts mit dem verflüssigten Kunststoff bzw. der Erhitzung nicht optimal und wird zurückgestellt.

Abbildung A.1 b) stellt eine weitere Verbindung während des Druckprozesses durch einen Formschluss dar. Der in den Grundkörper gedruckte Kanal entspricht dem Negativ der Leitungsaußenkontur. Damit ist die Übertragung mechanischer Kräfte in  $X$ -Richtung und in negativer  $Z$ -Richtung möglich. Gleichzeitig können Kräfte in  $Y$ -Richtung durch Reibung übertragen werden. Eine in die Leitung eingeleitete Zugkraft mit einem Kraftanteil in positiver  $Z$ -Richtung würde bei Überschreiten der Gewichtskraft die Leitung aus dem Kanal heben.

Eine optimierte Variante wird in Abbildung A.1 c) dargestellt und entspricht einem Formschluss, welcher durch Klemmelemente ergänzt ist. Der Kanal entspricht weiterhin dem Negativ der Außenkontur der Leitung und bleibt zum Zeitpunkt der Integration an der Oberseite geöffnet. Die Öffnung weist einen geringeren Durchmesser als der Durchmesser der Leitung auf. Nach dem Einlegen der Leitung entsteht eine Verbindung zur Klemmung. Diese ermöglicht die Übertragung von Kräften mit positivem  $Z$ -Anteil und eine reibkraftschlüssige Verbindung in  $Y$ -Richtung, welche durch die Klemmkraft variiert werden kann. Diese Lösung entspricht der Überlegung von Espalin et al. (2016). Der Unterschied besteht im Zentrierbereich (vgl. Kirchner et al. 2022, S.12), der durch die Zentrierwirkung der Leitung zu einem gegenüber Schwankungen des Einpresskraftangriffspunkts an der Leitung robusteren Einpressprozess führt. Die komplexere Gestalt des Grundkörpers ist durch das FFF-Verfahren ohne zusätzliche Werkzeuge durch die Nutzung der möglichen Gestaltkomplexität fertigbar. Ein Nachteil ist die Notwendigkeit einer Fügekraft und Fügebewegung zur Verbindung von kontinuierlicher Leitung und Grundkörper. Diese Kraft muss durch ein internes oder externes System aufgebracht werden.

Eine stoffschlüssige Verbindung durch Einbringen eines Klebstoffs und dessen Aushärtung um die Leitung ist in Abbildung A.1 d) visualisiert (vgl. auch Espalin et al. 2016). Bei dieser Lösung wird der Kanal beispielsweise mit einem quadratischen Querschnitt vorgedruckt und ein Klebstoff eingebracht. Während des Einlegens wird die Leitung umflossen und durch eine Polymerisationstechnik ausgehärtet. Hierbei entsteht eine flächige Verbindung zwischen der Leitungsoberfläche und der Kanalinnenwand.

Die Option, den Kunststoff des Grundkörpers für das Umfließen oder Zudrücken zu nutzen, wird aufgrund des möglichen Mantelkontakts mit heißem Material nicht betrachtet. Das Verschrauben der Leitung mit dem Grundkörper führt zu einer mechanischen Beschädigung. Eine Option ist die Verwendung eines zusätzlichen Bauteils (vgl. auch Espalin et al. 2016). Diese Option führt zu einer erhöhten Verfahrenskomplexität aufgrund der zusätzlichen Verarbeitungsprozesse und der notwendigen Bauteile zur Leitungsfixierung, welche in das System eingebracht oder zuvor additiv hergestellt werden. Aufgrund dieser Komplexität wird dies im Vergleich mit den bereits beschriebenen Lösungen im Rahmen dieser Entwicklung zurückgestellt. Aufgrund der Erwärmung des Leitungsmantels wird ein direktes Eindringen in verflüssigten Kunststoff nicht berücksichtigt. Eine formschlüssige Verbindung ohne eine Kraftaufnahme in positive Z-Richtung wird durch die fehlende Übertragbarkeit von Zugkräften (mit positivem Z-Anteil) ebenfalls nicht weiter konkretisiert.

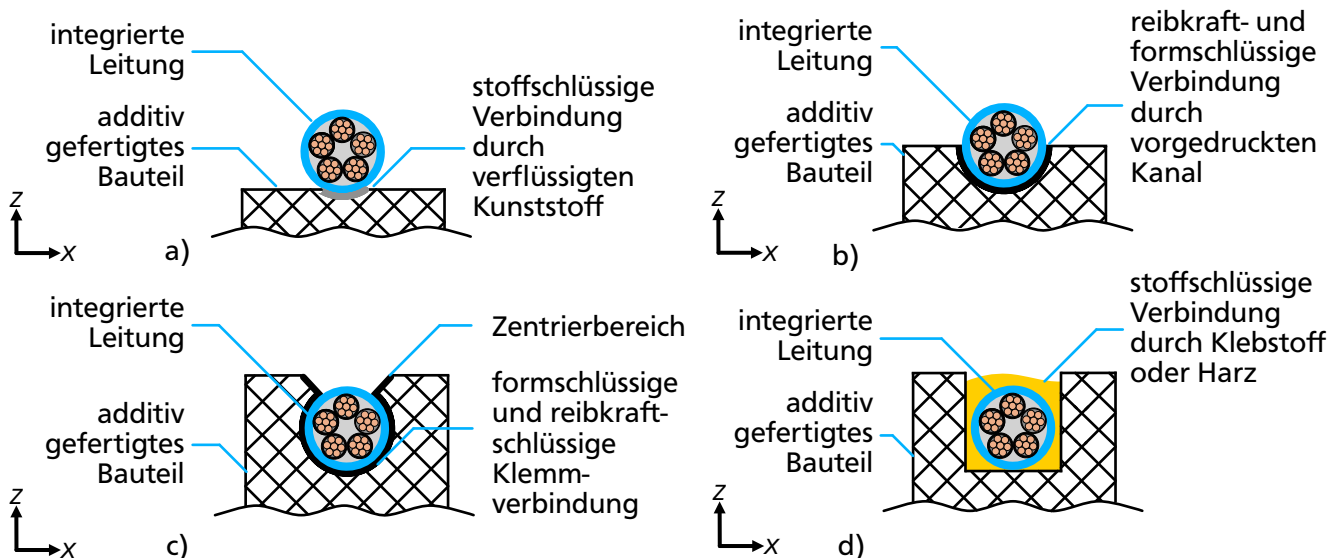


Abbildung A.1: Betrachtete Teillösungsauswahl zur Verbindung von integrierter Leitung und additiv gefertigtem Grundkörper zwischen zwei Druckschichten durch Eindrücken in verflüssigten Kunststoff mit Ähnlichkeiten zu dem Einbetten eines Leiters in bereits verdrukten Kunststoff in Anlehnung an Aguilera et al. (2013, S.950 bis S.961) in a), durch Einlegen in einen teilweise vorgedruckten Kanal in b), durch Einpressen in einen teilgeöffneten Kanal mit Klemmelementen und Zentrierbereich in Anlehnung an Kirchner et al. (2022, S.12) (ohne Zentrierbereich bekannt bei Espalin et al. (2016)) in c) und durch die Verwendung eines Klebstoffs oder UV-Harzes (vgl. Espalin et al. 2016) in d), eigene Abbildungen a) bis d)

---

Die Anforderungen werden durch eine Verbindung mit Klemmelementen oder eine stoffschlüssige Verbindung besser erfüllt und im Folgenden verglichen. Die Vorteile der Lösung des stoffschlüssigen Verbindens liegt in der Formlosigkeit des Füllstoffs während der Verarbeitung. Damit einher geht die Möglichkeit durch beispielsweise Unebenheiten und Toleranzen vorhandene Hohlräume zu füllen. Das Resultat ist eine große Anlagefläche zur Leitung mechanischer Kräfte nach dem Aushärten und die Verbindung ermöglicht die mechanische Übertragbarkeit höherer Kräfte im Vergleich zur Ausführung eines Klemmbereichs.

Die Nachteile liegen in der Bereitstellung der zusätzlichen Teilfunktionen wie der Speicherung, Leitung, Zuführung und Härtung des Füllstoffs im Kanal, der zusätzlichen Zeitdauer bis zur Weiterverarbeitung durch das Aushärten bei Klebstoffen und weiteren Zusatzkomponenten bei UV-Harzen. Weiterhin ist der Austritt aus dem Grundkörper möglich, sodass diese Stelle des Leitungsverlaufs entweder gedichtet ausgeführt ist oder zusätzliche Reinigungsprozesse zur Klebstoffentfernung notwendig sind. Zusätzlich ergeben sich Anforderungen an die Materialkompatibilität des verwendbaren Klebstoffs in Abhängigkeit des Mantelmaterials und des Filaments. Die beschriebenen Eigenschaften führen zu einer deutlich ansteigenden Verfahrenskomplexität und hohem Hardwareaufwand zur Bereitstellung der benötigten Funktionen. Anhand der beschriebenen Eigenschaften der verschiedenen Lösungen wird durch die integrierte Fertigung aller erforderlichen Wirkelemente für die Verbindung von Leitung und Grundkörper eine kontinuierliche Klemmverbindung unter Nutzung der gestalterischen Freiheit des FFF-Verfahrens entsprechend Abbildung A.1 c) gewählt.

## A.3 Prüfaufbau und Durchführung der Messungen

Das eingesetzte Portalsystem ermöglicht das Anfahren verschiedener Positionen der Positioniereinrichtung relativ zum Grundkörper und basiert auf einem Teil der Komponenten des kommerziell erhältlichen Modells A5 des Herstellers Shenzhen Aurora Technology Co., Ltd (2024). Die Befestigung des einen Endes der Leitung erfolgt durch einen Klemmadapter an der Bauplattform. Die zweite Einspannung der Leitung erfolgt mit einer Positioniereinrichtung. Diese besteht aus einem Adapter zum Portalsystem, einem aus Polytetrafluorethylen (PTFE) gefertigten Schlauch zur vertikalen Leitungsführung und einem kreisrunden Austritt. Zur Vermeidung mechanischer Schäden an den Leitungen und zur Reduktion der Reibung sind um die Z-Achse sowie um die Y-Achse drehbare Rollen im Umlenkungsbereich des Austritts angeordnet. Der Prüfaufbau ist schematisch in Abbildung A.2 dargestellt.

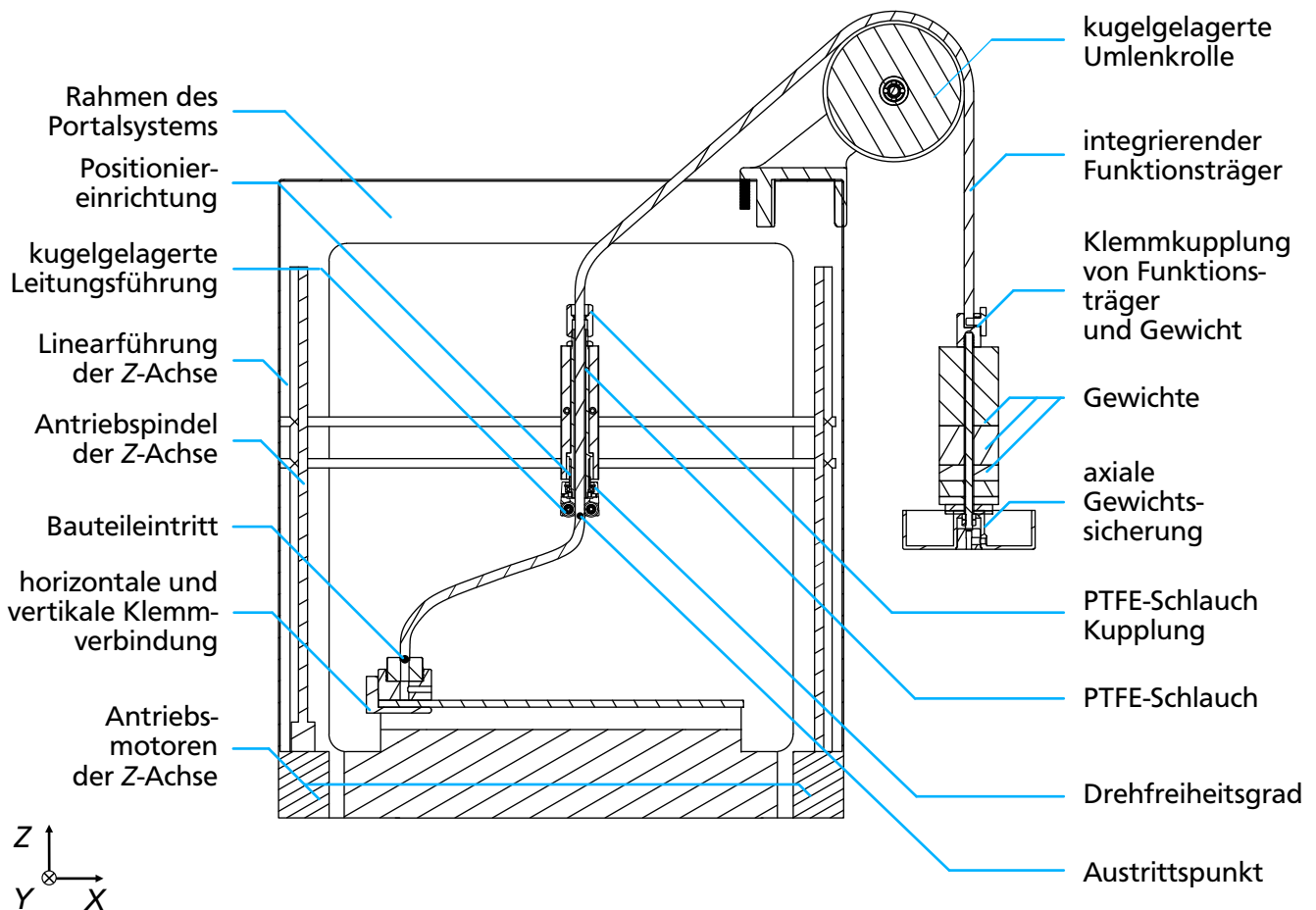


Abbildung A.2: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Verlaufsbestimmung der Leitungen, eigene Abbildung

An dem Portalsystem werden Anbauteile und Modifikationen durchgeführt, um die Bedingungen des Experiments an die späteren Druckbedingungen anzupassen. Das Portalsystem stellt in Richtung der X-Achse einen Verfahrweg von 260 mm und in Richtung der Z-Achse einen Verfahrweg von 180 mm

---

bereit. Der Bauteileintritt wird durch einen Abschnitt eines Kanals des Grundkörpers abgebildet. In diesem Kanalabschnitt werden die Leitungen fixiert. Während des Drucks wird auf die Leitung eine Zugkraft durch ein mit der Leitung verbundenes Totgewicht aufgebracht. Die Leitung wird an der Bauplattform in die Fixierung eingespannt, durch den Düsenaustritt gezogen und oberhalb über eine Umlenkrolle aus dem Portalsystem geführt. Das Totgewicht ist über ein Spannelement mit der Leitung verbunden und besteht aus einer Kunststoffgewindestange mit anschraubbaren Gewichten. Das Totgewicht hängt frei, sodass sich der Gleichgewichtszustand in Abhängigkeit der Leitungseigenschaften, der Druckkopfposition und der aufgebrachten Zugkraft durch das Heben und Senken des Totgewichts einstellt.

Zur optischen Aufnahme der Leitungsverläufe wird eine Kamera vor dem Prüfaufbau mit dem Objektiv rechtwinklig auf die X-Z-Ebene des Portalsystems positioniert. Die Bildaufnahmen werden mit einer Ximea xiQ MQ022MG-CM (vgl. XIMEA GmbH 2022) aufgenommen. Diese ist über den *universal serial bus* (USB) mit dem Experimentalrechner zur Speicherung der Bilddaten verbunden. Aufgrund der statisch aufgenommenen Leitungsverläufe ermöglicht die exakte zeitliche Auslösung der Bildaufnahme keine weiteren Informationen. Aus diesem Grund wird auf einen dedizierten Trigger der Kamera verzichtet. Das Auslösen der Bildaufnahmen mittels USB Verbindung ist hinsichtlich der zeitlichen Auflösung ausreichend.

Zur Prüfstandssteuerung, der Bilderfassung und der Bildauswertung wird die Software Matlab R2020b (vgl. The MathWorks, Inc. 2022) verwendet. Für die Ansteuerung der Motoren wird ein Arduino Uno (vgl. Arduino.cc 2022b) mit einem *CNC-Shield* kombiniert (vgl. Zyltech Engineering LLC. 2022). Auf dem Arduino befindet sich die Software GRBL (vgl. Jeon 2019), welche durch eine Matlab-GRBL-Schnittstelle angesteuert wird (vgl. Wesley et al. 2018), sodass die Positionsänderungen automatisiert durch das Portalsystem ausgeführt werden. Die aufgenommenen Bilder werden falls erforderlich anschließend auf den jeweiligen Ausschnitt zwischen Positioniereinrichtung und Bauteileintritt zugeschnitten.



## A.4 Auswahl des Konzepts des Fördersystems

Für die Konzeption des Fördersystems werden anhand der erforderlichen Funktionen geeignete Teillösungen ermittelt. Im Zuge der Recherche werden anhand der experimentellen Erkenntnisse der Leitungsverläufe bereits zielführende Lösungen ausgewählt. Diese werden in einem Ordnungsschema angelehnt an Gericke et al. (2021a, S. 281 bis S. 285) zusammengefasst. Das Ordnungsschema für den Funktionsprototyp ist in Abbildung A.3 mit den Teilfunktionen leiten, fördern, speichern, positionieren, einspannen und einpressen in der Kopfspalte und den auf bekannten und verbreiteten technischen Lösungen basierenden schematischen Darstellungen abgebildet.





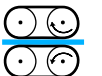
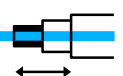








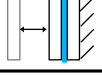
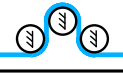


Teillösungen Teilfunktionen	1. TL	2. TL	3. TL	4. TL	5. TL	6. TL
Leitung leiten						
Leitung fördern						
Leitung speichern						
Leitung positionieren						
Leitung einspannen						
Leitung einpressen						

Abbildung A.3: Zuordnung bekannter, verbreiteter und ausgewählter Teillösungen zu den Teilfunktionen der Leitungsförderung für den Funktionsprototyp des 3DConFil-Verfahrens, strukturiert mit einem Ordnungsschema nach Gericke et al. (2021a, S. 281 bis S. 285), eigene Abbildung mit eigenen schematischen Abbildungen

Die Funktion *Leitung leiten* wird für eine unter Zug- bzw. unter Druckkräften stehende Leitung durch unterschiedliche Teillösungen erfüllt. Geeignete Teillösungen finden sich bereits in verbreiteten technischen Systemen, beispielsweise in Maschinen für das FFF-Verfahren, Flaschenzügen und Tragseilschuhen. Für diese erforderliche Teilfunktion sind unterschiedliche Teillösungen visualisiert. Die Teillösungen sind entsprechend von Druck- oder Zugspannungen innerhalb der Leitung in axialer Richtung unterschiedlich geeignet. Eine Rollenführung ist eine Teillösung, sofern die Leitung unter Zugspannung steht. Die erste Teillösung ist eine einzelne Rolle und die Leitung wird entlang des Umfangs umgelenkt. Die zweite Lösung besteht aus mehreren Rollen, deren Mittelpunkt entlang der Kurve zur Umlenkung liegen und die Leitung auf dem jeweiligen Umfang der Rolle verläuft. Die Leitung unter Druckkräften tritt für biegeschlaffe Materialien bei dem FFF-Verfahren analog bei der Förderung des FFF-Filaments zwischen Fördereinheit und Hotend auf. Die hierfür verbreitete technische Lösung ist die Führung des Filaments durch einen PTFE-Schlauch. Aus diesem Grund wird als dritte Teillösung ein Schlauch, beispielsweise aus PTFE, mit in das Ordnungsschema aufgenommen.

---

Dieser ist im Vergleich zur Leitung biegesteifer. Der Vorteil der Führungsrollen im Vergleich zu einem Führungsschlauch ist die geringere Reibung während der Förderung der Leitung. Sie stellt dabei keine Lösung für Leitungen unter Druckkräften dar. Aus diesem Grund werden beide Lösungen in der Leitungsführung eingesetzt. Für Leitungsführungsbereiche, die während der Betriebszustände unter Zug stehen, werden möglichst Rollenumlenkungen eingesetzt. In Bereichen, in welchen Druckkräfte innerhalb der Leitung bestehen, wird die Schlauchführung verwendet.

Für die Funktion *fördern* zur Leitungsförderung wurden reibkraftschlüssige und formschlüssige Verbindungen zur Förderkraftübertragung ermittelt, die durch verbreitete technische Lösungen von beispielsweise Papierfördermaschinen, Maschinen mit Kabelhandhabung und Kranauslegern bekannt sind. Formschlüssige Verbindungen werden aufgrund des Eingriffs in den Mantel der Leitung nicht weiter berücksichtigt. Die erste Teillösung bildet ein Rollenpaar zwischen dem die Leitung geklemmt ist. Mindestens eine Rolle ist angetrieben. Die zweite Teillösung besteht aus dem Klemmen der Leitung zwischen zwei Riemen mit mindestens einem angetriebenen Riemen. Die dritte Teillösung besteht in einem Teleskopausleger an dessen Ende die Leitung geklemmt und durch Ausfahren bzw. Einfahren des Teleskoparms vor- bzw. rückgefördert wird. Die Verarbeitung von Leitungen findet in der Industrie bereits vielfältige Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise die Förderung und Ablängung von elektrischen Leitungen (vgl. Metzner Maschinenbau GmbH 2023; TEKUWA GmbH 2023; Schleuniger GmbH 2023a; Komax Holding AG 2023a). Diesen ist gemein, dass sie die Leitung zwischen Riemen fördern. Aufgrund der Nutzung im industriellen Konzept wird diese Teillösung für das Fördersystem gewählt.

Für die Funktion *speichern* wird die Speicherung der gesamten Leitungsmenge und das Ein- bzw. Ausspeichern der frei werdenden oder erforderlichen Leitungslänge innerhalb des Bauraums benötigt. Diese Funktionen beziehungsweise nutzbare Lösungsprinzipien werden in Maschinen für das FFF-Verfahren, Freizeitfahrgechäften, in der Papierverarbeitung und unter der Variation der Nutzung von Auftriebskräften zum Seilspannen, bspw. Ballons, eingesetzt. Die erste Teillösung ist das Aufwickeln der Leitung auf eine Rolle, analog zur Speicherung des Kunststofffilaments des FFF-Verfahrens. Diese Teillösung weist die niedrigste Komplexität auf, die gespeicherte Leitungslänge ist vom Durchmesser abhängig. Dieser ändert sich mit der eingespeicherten Länge und der Richtung wie die Leitung auf den Wicklungen liegt. Die Erfassung der ein- bzw. ausgespeicherten Leitungslänge bezogen auf die Drehung der Speicherrolle erfordert diverse Informationen. Die zweite Teillösung ist ein Ring aus Rollen, auf dem die Leitung umläuft. Die Rollen werden entlang einer Geraden synchron verfahren, beispielsweise mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch. Die dritte Teillösung basiert ebenfalls auf kreisförmig angeordneten Rollen zur Führung der Leitung, allerdings sind die Rollen auf drehbaren Armen gelagert. Die Arme sind am Umfang eines Kreises angeordnet und werden synchron nach außen gedreht. Den Teillösungen zwei und drei ist gemein, dass die Änderung der gespeicherten Leitungslänge der Umfangsänderung der verstellbaren Rollen zu einer entspricht.

Teillösung vier besteht aus einem Leitungshauptspeicher, von dem die Leitung über eine mit einer Torsionsfeder gespannten Rolle an einem Arm um eine größere Rolle verläuft. Durch eine zweite kleinere feststehende Rolle wird sichergestellt, dass die Leitung um einen Großteil der größeren Rolle umläuft. Die Torsionsfeder spannt einerseits die Leitung vor und der Arm wird proportional zur Zugkraft der Leitung entgegen der Feder gedreht. Die Längendifferenz der Leitung entspricht bei

---

dieser Lösung etwa dem Unterschied des Umschlingungswinkels bezogen auf den Durchmesser der größeren Rolle. Bei Teillösung fünf wird die Leitung über eine federvorgespannte linear verschiebbare Rolle geführt. Durch die Feder wird die Leitung vorgespannt und die Änderung der gespeicherten Leitungslänge entspricht dem doppelten Weg der federnd gelagerten Rolle. Teillösung sechs ist an Teillösung fünf angelegt. Die Zugkraft wird statt durch eine Feder durch den Dichteunterschied zwischen Umgebung und einem mit Gas gefüllten Volumen auf die Leitung aufgebracht.

Eine Anforderung an die Speicherung der Gesamtlänge der Leitung zur Integration der Leitung innerhalb des Grundkörpers besteht in der gespeicherten Menge der Leitung. Im Vergleich erfordert das Speichern der Leitungslänge die vor- und rückgefördert wird, eine hohe Wiederholgenauigkeit ohne zu einer Beschädigung der Leitung zu führen. Für den Funktionsprototyp werden diese Anforderungen auf zwei Teilsysteme aufgeteilt.

Zur Hauptspeicherung der Leitung ist die Wicklung auf einer Speicherrolle eine zielführende Teillösung aufgrund der Bereitstellung der Leitung ohne die erforderliche detaillierte Zustandserfassung. Für die Zwischenspeicherung wird eine Teillösung gewählt, die am Portalsystem montierbar ist, das Volumen des Portalsystems nicht zusätzlich vergrößert und der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung zur Änderung der gespeicherten Leitungslänge mit linearisierbarem Zusammenhang beschreibbar ist. Teillösung vier wird im Vergleich zu den weiteren Teillösungen durch den hohen Komplexitätsgrad zurückgestellt. Die Teillösungen zwei und drei als Ringspeicher werden den Teillösungen fünf und sechs als Flaschenzug gegenübergestellt. Zur Einhaltung des minimalen Biegeradius sind die Radien der Rollen des Flaschenzugs für die verarbeiteten Leitungen ausreichend groß zu wählen, sodass der ringförmige Speicher für die Leitungszwischenspeicherung aufgrund der besseren Integrierbarkeit im verfügbaren Einbauvolumen ausgewählt wird. Das Speichern der dauerhaft verarbeiteten Leitung wird durch die im industriellen Kontext eingesetzte Teillösung der Rollenspeicherung gewählt.

Die Funktion *positionieren* ermöglicht die Festlegung des Orts für den Austritt der Leitung innerhalb des Bauraums. Gleichzeitig ist es erforderlich, dass die Leitung bei einer bestehenden Position oder in Bewegung vor- und rückgefördert werden. Die Teillösung der empirischen Überprüfung des Leitungsverhaltens erfüllt die Anforderungen für die Positionierung der Leitung und wird übernommen (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Die Funktion *einspannen* ermöglicht die Fixierung der Leitung an einem festgelegten Punkt. Die berücksichtigten Teillösungen sind beispielsweise von Schraubstöcken und der Zugentlastung in elektrischen Steckern bekannt. Das Einspannen der Leitung ist formschlüssig mit der ersten Teillösung möglich. Für diese Teillösung wird eine Beschädigung des Mantels erwartet, sodass diese zurückgestellt wird. Die zweite Teillösung ist das reibkraftschlüssige Klemmen der Leitung, beispielsweise zwischen zwei Platten. Hierbei handelt es sich um eine etablierte Lösung, die beispielsweise bei Schraubstöcken eingesetzt wird. Die dritte Teillösung ist reibkraftschlüssig und basiert auf der Nutzung der Seilreibung. Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass keine beweglichen Bauteile zur Funktionserfüllung notwendig sind. Zur Herstellung der Verbindung wird eine komplexere Leitungshandhabung erforderlich. Dies bedeutet in der Regel einen höheren Aufwand in der Automatisierung, sodass die Teillösung der reibkraftschlüssigen Leitungsklemmung mittels Platten gewählt wird.

---

Anhand der in Abschnitt 5.3.3 dargelegten Wirkgrößen zum Einspannen und Trennen der Leitung wird deren Ähnlichkeit ersichtlich. Bei der Wahl einer durch ein verfahrbares Klemmelement funktionierenden Teillösung ist auch die Funktion der Leitungstrennung durch die gestalterische Adaption des verfahrbaren Elements möglich. Diese Wirkgrößenähnlichkeit mündet damit in der einfachen Variation zwischen Klemmen und Trennen der Leitung (siehe auch Abbildung A.7 in Abschnitt A.6), sodass diese Teilfunktion nicht gesondert bspw. in Abbildung A.3 behandelt wird.

Abschließend wird die Funktion *einpressen* der Leitung in horizontale Kanalabschnitte betrachtet. Im Rahmen der Recherche wurden möglichst kompakte mechanische Lösungen eines steifen Zylinders mit Halbkugel an der mit der Leitung in Kontakt kommenden Seite und eine Kugelrolle in das Ordnungsschema aufgenommen. Diese Lösungen entsprechen im Fall des gerundeten Zylinders der mechanischen Nachbildung einer Fingerkuppe beim manuellen Eindrücken der Leitung und im Fall der Kugelrolle ist diese ein verbreitetes Element zur effizienten Förderung auch schwerer Werkstücke auf Kugelrolltischen. Der wesentliche Unterschied zwischen den Teillösungen ist die Möglichkeit zum simultanen Verfahren der Einpresseinrichtung während dem Einpressen der Leitung. Die Kräfte zum Einpressen führen zu leitungsmantelabhängigen Reibkräften während einer Relativbewegung von Leitung und Einpresswerkzeug. Weiterhin besteht durch starke Gleitreibung die Möglichkeit der Beschädigung des Leitungsmantels. Aus diesem Grund wird eine Kugelrolle als Teillösung festgelegt.

## A.5 Abschätzung der Biegewechselereignisse

Während der Integration über mehrere Druckschichten wird die Leitung bei Änderung der Relativposition zwischen Leitungseintritt und Leitungsausgang gebogen. Zur Abschätzung der auftretenden Biegewechselereignisse werden zwei Bauteile bei zweidimensionaler Betrachtung in der jeweiligen gefertigten Schicht betrachtet. Aufgrund der Approximation gekrümmter Verfahrbahnen durch Geradenabschnitte eignen sich die Steuerungsbefehle zum Verfahren der FFF-Düse nicht für die Ermittlung der Biegewechselereignisse.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung der Ereignisanzahl ist durch die Einteilung des Bauraums in Bereiche möglich. Während der Fertigung des Grundkörpers wird in der jeweiligen Bauteilschicht die Düse entlang der Verfahrwege positioniert. Die Relativposition wird mit dem Leitungseintrittspunkt in den Grundkörper und der Position der FFF-Düse angenommen. Eine Änderung der FFF-Düsenposition, die zum Wechsel von einem Bereich in einen anderen führt, wird als Bereichsereignis aufgefasst. Die Art der Einteilung der Bereiche um den Leitungseintritt beeinflusst die Anzahl der abgeschätzten Biegewechselereignisse. Zur Einteilung der Fläche des Bauraums werden vier Quadranten festgelegt, die durch zwei Geraden eingeteilt werden. Die Geraden stehen orthogonal zueinander und schneiden sich in der Achse des Leitungseintritts am Grundkörper. Die Festlegung der Richtung der Geraden wird anhand des jeweiligen Beispielbauteils vorgenommen. In Abbildung A.4 sind die zur Berechnung der Biegewechselereignisse genutzten Bauteile mit der jeweiligen Ausrichtung der Geraden dargestellt.

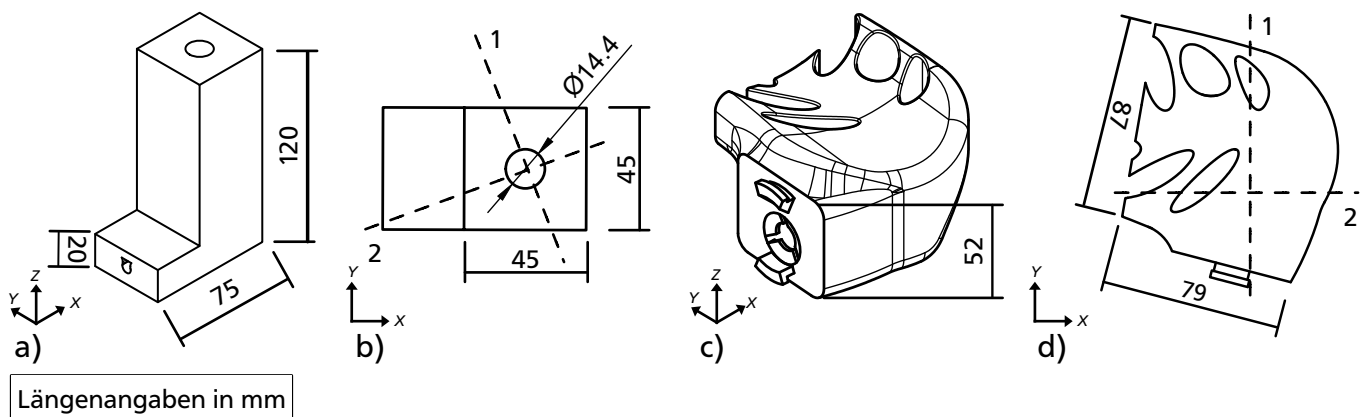


Abbildung A.4: Abschätzung der Biegewechselereignisse anhand eines an der Gestaltung eines Turms angelehnten Beispielbauteils als isometrische Ansicht in a) und als Draufsicht in b) sowie anhand eines an der Gestaltung einer Armablage angelehnten Beispielbauteils als isometrische Ansicht in c) und als Draufsicht in d), eigene Abbildungen a) bis d)

Ein Bauteil ist in seiner Gestaltung an einen Turm mit vertikalem Verlaufsabschnitt der Leitung als isometrische Ansicht in Abbildung A.4 a) visualisiert. Abbildung A.4 b) beinhaltet das Bauteil in der Draufsicht mit den gestrichelt eingezeichneten Geraden 1 und 2 zur Bereichseinteilung. Das zweite Bauteil ist in seiner Gestaltung an eine Armablage mit geneigtem Verlaufsabschnitt der Leitung als isometrische Ansicht in Abbildung A.4 c) visualisiert. Abbildung A.4 d) beinhaltet das Bauteil in der Draufsicht mit den gestrichelt eingezeichneten Geraden 1 und 2 zur Bereichseinteilung.

---

Das Beispielbauteil in Anlehnung an einen Turm weist eine Schichthöhe von 0,2 mm auf, die Länge an Leitung, welche über mehrere Schichten hinweg verlegt wird, beträgt 110 mm. Die Anzahl der Bereichswechsel liegt für diesen Fall bei 20 200. Das Beispielbauteil in Anlehnung an eine Armablage treten bei einer Schichthöhe von 0,2 mm und einer integrierten Leitungslänge über mehrere Schichten hinweg von 23 mm insgesamt 8287 Bereichswechsel auf. Mit Halbierung der Schichthöhe verdoppelt sich die Anzahl der Bereichswechsel und entsprechend analog halbiert sich die Anzahl der Bereichswechsel bei einer Verdopplung der Schichthöhe.

---

## A.6 Gestaltung der weiteren physischen Teilsysteme

In diesem Abschnitt des Anhangs sind die weiteren Teilsysteme des 3DConFil-Funktionsprototyps beschrieben. Der Fokus liegt im Besonderen auf dem Aufbau der Teilsysteme Riemenextruder zur Leitungsförderung, des Zwischenspeichers zur temporären Leitungsspeicherung während der Verfahrbewegungen des Druckkopfs und den weiteren Teilsystemen zur Leitungsverarbeitung.

### A.6.1 Teilsystem - Riemenextruder

Das Teilsystem zur Bereitstellung der Wirkgrößen zur Leitungsförderung ist der Riemenextruder. Das Teilsystem befindet sich in der Leitungsförderstrecke zwischen dem Druckkopf und der Leitungsumlenkung. Die wichtigsten Anforderungen an die Fördereinheit sind die beschädigungsfreie Handhabung der Leitung, das Bereitstellen der Verfahrwege und der Wechselzyklen. In diesem Anwendungsbereich werden beispielsweise Förderriemen zur Kraftübertragung auf die Leitung genutzt. Diese Teillösung wird im Rahmen einer Gestaltvariation für die Leitungsfördereinheit anhand bestehender industrieller Lösungen (vgl. Metzner Maschinenbau GmbH 2023; TEKUWA GmbH 2023; Schleuniger GmbH 2023a; Komax Holding AG 2023a) modifiziert und auf den Bauraum innerhalb des Funktionsprototyps angepasst. Die Gestaltung ist in Abbildung A.5 dargestellt.

Entsprechend der bestehenden Teillösung werden zwei gegenüberliegende Riemen verwendet. Für die verbesserte definierte Förderung der Leitung durch eine Steuerung ist die möglichst bewegungstreue Förderung erforderlich, sodass ein Zahnriemen eingesetzt wird. Die eingesetzten Riemen sind für eine höhere Kraftübertragung mit dem Polyurethan (PU) Kunststoff Linatex<sup>®</sup> (vgl. The Weir Group PLC 2023) beschichtet. Zur Vermeidung von Beschädigungen des Leitungsmantels wird die Übertragungsfläche möglichst groß gewählt und zur Vergleichmäßigung der Kraftübertragung sind zwischen den Umlenkrollen für jeden Riemen zwei Anpressrollen vorgesehen. Eine der Umlenkrollen je Riemen wird zur Vorspannung des jeweiligen Riemens genutzt. Die Leitungsförderungen von verschiedenen Leitungsdurchmessern wird ermöglicht, indem der eine Riemen fest und der andere Riemen verstellbar ist. Der verstellbare Riemen wird über eine geführte Pinole verschoben, über die ebenfalls eine definierte Vorspannung durch eine Feder aufgebracht wird.

Die Riemenspannung der Riemen ist getrennt einstellbar und es erfolgt der Antrieb eines Riemens. Der Aufbau des Riemenextruders ist so gewählt, dass mit einem zweiten Motor beide Riemen angetrieben werden können. In den Einlaufbereichen zum Förderspalt sind ein Adapter für den PTFE-Schlauch mit Knickschutz und eine Leitungsführung montiert, um die Leitung zu führen. Die Schnittstelle der Adapter ist erweiterbar, beispielsweise zur Montage eines zusätzlichen Rollenpaares zur Erfassung der geförderten Leitungslänge mittels Rotationsencoder. Diese Daten sind für eine Schlupfregelung einsetzbar.

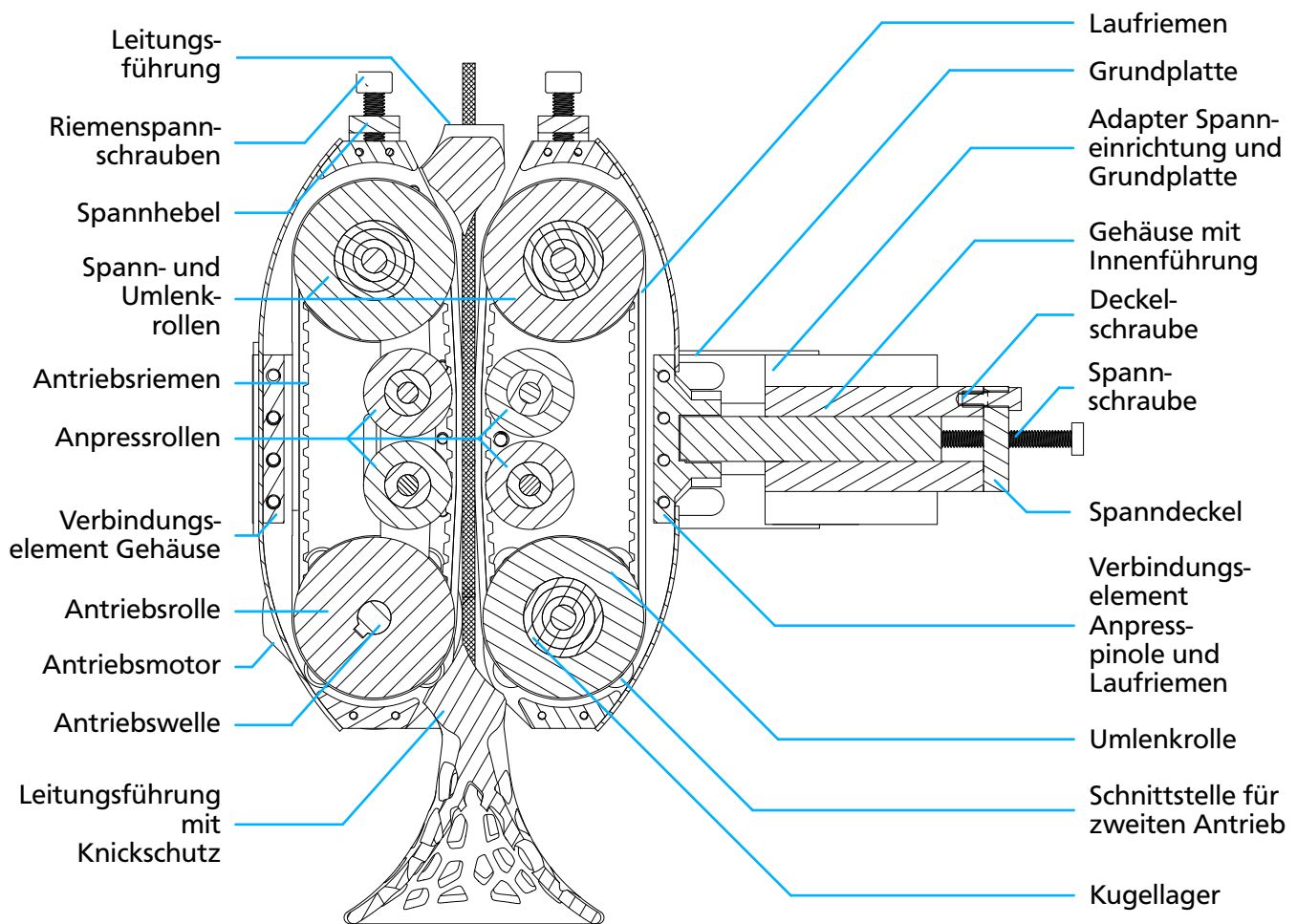


Abbildung A.5: Schematische Darstellung des Aufbaus des Riemenextruders, eigene Abbildung

## A.6.2 Teilsystem - Zwischenspeicher

In diesem Abschnitt wird der Zwischenspeicher als weitere Kernkomponente der Leitungsförderstrecke beschrieben. Das Konzept des Zwischenspeichers ist ein angetriebenes Sonnenrad mit acht Planetenrädern, die jeweils einen Hebelarm drehen. An den Hebelarmen sind drehbar gelagerte Umlenkrollen mit Führungsnuten für die verarbeiteten Leitungen am Umfang. In Abbildung A.6 ist die Konstruktion des Zwischenspeichers dargestellt.

In Abbildung A.6 a) ist die Draufsicht mit den charakteristischen Bauteilen visualisiert. Zu diesen zählen die Umlenkrollen (ohne Voronoi-Strukturen dargestellt), die das Filament in kreisähnlicher Form führen und deren Abstand zueinander durch das Verdrehen der Rollenarme vergrößert oder verkleinert werden kann. Die gleichmäßige Verstellung der Rollenarme wird durch das angetriebene Sonnenrad und die an dessen Umkreis angeordneten Ritzel erreicht. Die Arme des Zwischenspeichers sind durch das Filament vorgespannt. Der Vorspannweg wird durch einen Federarm weiter erhöht, sodass auch Differenzen zwischen der geförderten Länge des Antriebs und der eingespeicherten



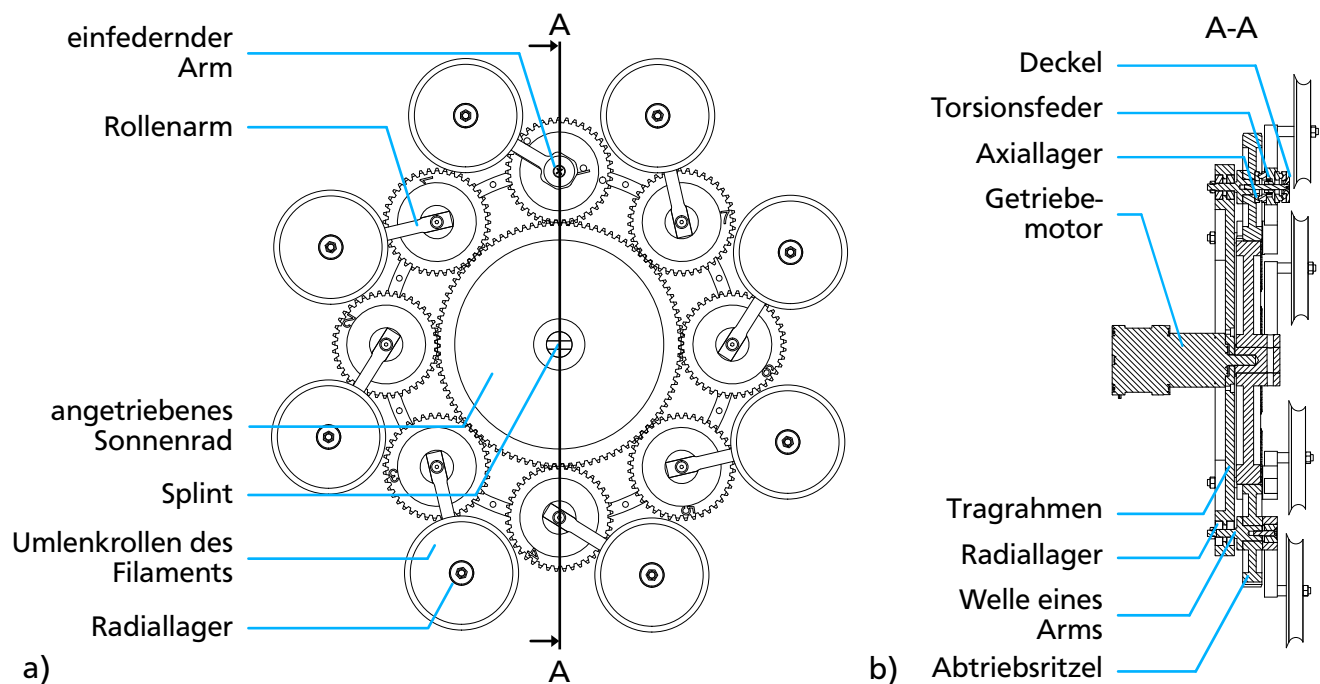


Abbildung A.6: Schematische Darstellung des Aufbaus des Zwischenspeichers in der Draufsicht in a) und als Schnittdarstellung in b), eigene Abbildungen

Länge des Filaments zu keinem Verlust der Zugspannung führen. Spezifisch für die beschriebene Gestaltung ist, dass durch den Getriebemotor und die Sonnenradstufe Umkehrspiel auftritt. Dieses wird im ordnungsgemäßen Betrieb des Zwischenspeichers durch die zu jedem Zeitpunkt anliegenden Verspannung des Zwischenspeichers durch die Zugkraft der Leitung nicht wirksam.

In Abbildung A.6 b) ist die Schnittansicht A des Zwischenspeichers dargestellt. Von den Rollenarmen ist ein Arm federnd gelagert, sodass die Rolle mit zunehmender Zugkraft auf das Filament weiter einfedert. Dadurch wird die Speicherkapazität reduziert und die Zugkraft im Filament verringert. Das Sonnenrad ist über einen Splint mit einer Hülse verbunden, die das Drehmoment von der Welle des Getriebemotors leitet. Die Radiallager des Zwischenspeichers sind im Tragrahmen montiert. Mit der beschriebenen Gestaltung des Zwischenspeichers und dem gewählten Getriebemotor mit einem Übersetzungsverhältnis von 50 (vgl. Stepperonline 2023) ergibt sich zur Ansteuerung ein Wert von 25 Steps/Unit, der in der Firmware hinterlegt wird.

Die erwartete Drehgeschwindigkeit wird anhand der Anforderung an die Fördergeschwindigkeit von  $150 \text{ mm s}^{-1}$  ermittelt, sodass die Winkeländerungsgeschwindigkeit  $0,05 \text{ s}^{-1}$  beträgt. Als Werkstoff für die Zahnräder sind sowohl Metalle als auch Kunststoffe geeignet. Die Vorteile des Kunststoffs im Vergleich zu Metallen liegen in der hohen Laufruhe bei Geradverzahnung, dem Dämpfungsvermögen, der Korrosionsbeständigkeit (vgl. Schlecht 2010, S. 467) und dem niedrigeren Gewicht. Demgegenüber steht der größere Bauraum bei gleicher Belastung (vgl. Schlecht 2010, S. 467). Die Vorteile von Metallzahnradern werden anhand der zuvor beschriebenen Betriebsgrößen nicht ausgereizt, sodass im Rahmen dieser Arbeit Kunststoffzahnräder aus Polyketon verwendet werden.

### A.6.3 Weitere Teilsysteme der Leitungsführung

In den zuvor beschriebenen Abschnitten wurden Kernkomponenten zur Handhabung der Leitung vorgestellt. Zur Vervollständigung der Teilsysteme werden in diesem Abschnitt die Leitungsumlenkung, das Klemm- und Trennsystem sowie eine Feststelleinheit dargelegt. Die Teilsysteme sind in Abbildung A.7 visualisiert. Für den Eintritt in den hybriden Fertigungsschritt zur Integration zwischen zwei Schichten wird die Leitung an einem definierten Ort fixiert. Zur Fixierung wird die Leitung unterhalb der Bauplattform geklemmt, indem der Leitungsausstritt des Druckkopfs über eine Bohrung in der Bauplattform verfährt.

Die Klemmung erfolgt durch zwei Klemmbacken, welche zueinander verfahren werden. Das Teilsystem zur Klemmung ist in Abbildung A.7 a) dargestellt. Der Eintritt in den Klemmbereich befindet sich unter der Bohrung der Bauplattform und die Leitung wird durch deren Vorförderung in den Klemmbereich eingeführt. Anschließend werden die Klemmbacken durch Ansteuerung des Schrittmotors verfahren und die Leitung unterhalb der Bauplattform mit dem definierten Austrittspunkt am Ort der Bohrung der Bauplattform eingespannt. Die Integration des Klemmsystems unterhalb der Bauplattform erfolgt durch eine Schraubverbindung.

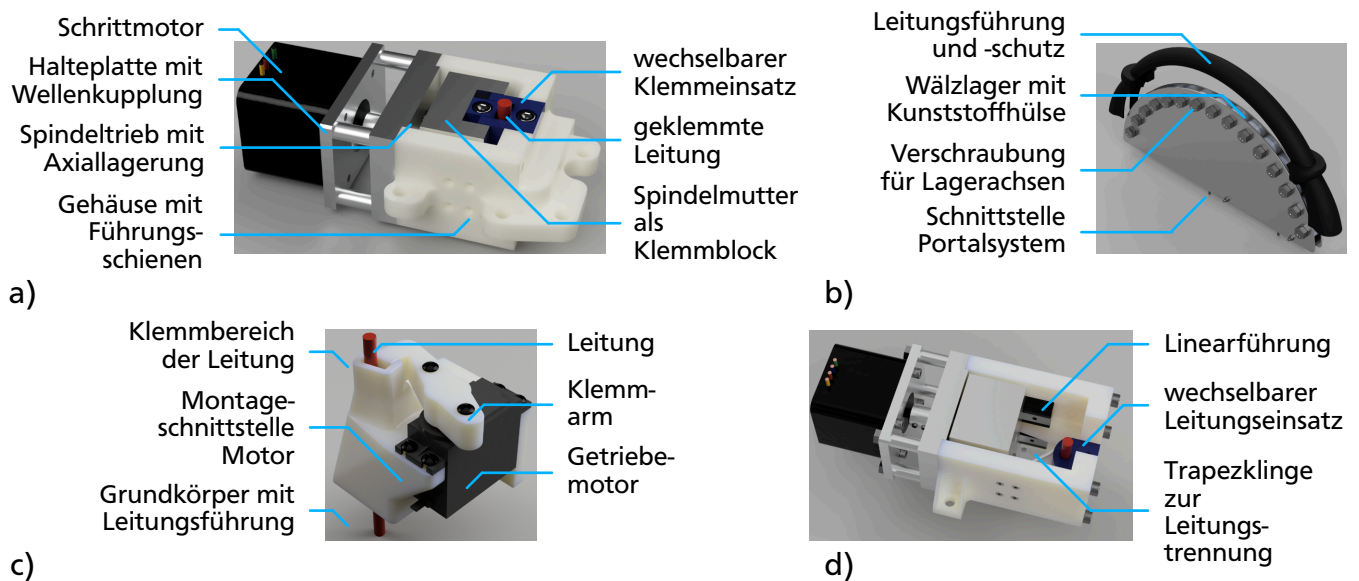


Abbildung A.7: CAD-Modelle der weiteren Teilsysteme der Förderstrecke mit der Leitungsklemmeinheit unter der Bauplattform in a), der Umlenkung der Leitung auf dem Funktionsprototyp in b), der temporären Feststelleinheit der Leitung zwischen Zwischenspeicher und Hauptspeicher in c) und einer Trenneinheit als Gestaltvariation der Klemmeinheit in d), eigene Abbildungen a) bis d)

Die Leitung verläuft durch die Bauraumkomponenten bestehend aus dem Druckkopf, dem PTFE-Schlauch und der Leitungsfördereinheit und verlässt den Bauraum durch die Bereiche der Steuerungselektronik im oberen Teil des Portalsystems. Mit der Leitungsumlenkung, dargestellt in Abbildung A.7 b), wird die Leitung auf einem Durchmesser von ca. 300 mm um 180° zwischen Austritt des Zwischenspeichers und Eintritt am Dach des Prototyps geführt. Die Leitung läuft über Kunststoff-

---

hülsen, die auf den Außenringen von Wälzlagern aufgespresst sind. Die schwarze Blende verhindert zusätzlich bei Beulen der Leitung durch eine zu große Leitungslänge das Verlassen der Führungsbahn und schützt die Leitung vor Umgebungseinflüssen.

Die drehbar gelagerten Rollen des Zwischenspeichers ermöglichen die Durchförderung der Leitung ohne den Zwischenspeicher zu verfahren. Damit ist die direkte Nachförderung der Leitung aus dem Hauptspeicher durch die Leitungsfördereinheit möglich. Dieses Verhalten führt dazu, dass beispielsweise während des Einspeicherns der Leitung in den Zwischenspeicher neben der rückgeführten Leitungslänge gleichzeitig Leitung aus dem Hauptspeicher entnommen wird. Diese Möglichkeit wird durch eine Feststelleinheit zwischen Hauptspeicher und Zwischenspeicher verhindert und ist in Abbildung A.7 c) dargestellt. Im Vergleich zur Klemmeinheit werden geringe Anforderungen an die Klemmkraft der Feststelleinheit gestellt, sodass dieses Teilsystem durch einen Getriebemotor mit Winkelsteuerung ausgeführt ist.

Während der Ableitung der initialen Fertigungsschritte in Abschnitt 5.2.4 und der Wirkgrößen in Abschnitt 5.3.3 ist die Trennung der Leitung zum Wechsel aus einem hybriden Fertigungsschritt in die FFF-Fertigung beschrieben. Die Funktion der Leitungstrennung ist durch Gestaltvariation des entwickelten Klemmsystems möglich (vgl. Abschnitt A.4). Das Teilsystem zur Leitungstrennung ist in Abbildung A.7 d) dargestellt. Die Wirkgrößen des Teilsystems unterscheiden sich in der Fläche, auf der eine Kraft orthogonal zur Leitungsachse auf die Leitung aufgebracht wird. Zur Leitungstrennung wird statt einer Klemmbacke eine Trapezklinge für einen ziehenden Schnitt eingesetzt.

---

## A.7 Konzeption der digitalen Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens

In diesem Abschnitt des Anhangs wird anhand der Prüfung möglicher Eingriffspunkte in die digitale Prozesskette des FFF-Verfahrens eine Möglichkeit zur Generierung der 3DConFil-spezifischen Steuerungsbefehle abgeleitet. Auf die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Grundlagen der Prozesskette wird an dieser Stelle nicht eingegangen und auf den Abschnitt verwiesen. Die gewählte und ausgestaltete Softwarekette ist in Abschnitt 5.4.6 beschrieben, vervollständigt durch das zugehörige Whitepaper (vgl. Steffan et al. 2023a).

Der erste Eingriffspunkt ist im Rahmen der Bauteilkonstruktion während der dreidimensionalen Modellierung des Bauteils. Die zur Modellierung notwendigen Funktionen sind bereits vorhanden und der Export in ein Flächenmodell, beispielsweise eine stl-Datei, ist nutzbar. Durch die Modellierung von Kanal und Leitung innerhalb einer CAD-Software können diese genutzt werden. Das führt dazu, dass kein Einfluss auf die Art der Erstellung des Flächenmodells besteht. Die Wahl der Facetten wird durch den Algorithmus des CAD-Softwareherstellers festgelegt und Änderungen sind durch Softwareänderungen möglich. Eine Alternative ist eine Änderung der ersten Schnittstellendatei, das Flächenmodell. Während an diesem Punkt der Prozesskette durch die Bearbeitung des Flächenmodells Überarbeitungen und Modellverfeinerungen möglich sind, ist die Erstellung der Editierfunktionen erforderlich und stellt im Vergleich zur direkten Nutzung der CAD-Software einen hohen Aufwand dar.

Ein weiterer Eingriffspunkt ist die Anpassung der Slicer-Software. Dieses Programm beinhaltet ein Modell des Bauraums der Fertigungsmaschine, Funktionen zur Orientierung des Bauteils innerhalb des Bauraums, die Erstellung von Stützstrukturen, die Füllung des von den Facetten umschlossenen Volumens und die Bahnberechnung für den FFF-Druckkopf zum Aufbau des Bauteils in den jeweiligen Schichten. Für jeden dieser Schritte stehen diverse Einstellparameter zur Verfügung, welche einerseits kontinuierlich optimiert und dadurch verändert werden. Andererseits kommen neue Funktionen in kurzen Zeiträumen hinzu. Für eine Lösung im Bereich der Sliceradaptation ist eine Schnittstelle erforderlich, die eine Beständigkeit und Kompatibilität zu neuen Programmversionen der Slicer-Software aufweist. Das Ergebnis des Slicers sind die Steuerungsbefehle in Form von G-Code.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die zweite Schnittstellendatei, der G-Code des Slicers. An dieser Stelle der Prozesskette ist die Modifizierung der Steuerbefehle aus dem Slicer möglich. Die Gesamtheit der bis zu diesem Zeitpunkt getroffenen Festlegungen, von der Modellierung über die Flächenapproximation bis zur Auswahl der Fertigungsparameter für den FFF-Prozess, sind in einen sequenziellen Befehlssatz transformiert worden, der für das FFF-Verfahren die erfolgreiche Prozessdurchführung ermöglicht. Zur Nutzung der 3DConFil spezifischen Steuerungsbefehle ist die Formulierung dieser als G-Code erforderlich. Das bedeutet, dass die Anzahl der Steuerungsbefehle sehr hoch und die Erstellung automatisiert ist. Weiterhin müssen die G-Codebefehle des FFF-Verfahrens und die 3DConFil spezifischen Befehle in einer Datei zusammengeführt werden. Ein Vorteil ist die hohe Flexibilität aufgrund der vollständigen Editierbarkeit aller Befehle vor der Steuerung der Fertigungsmaschine.

---

Der letzte betrachtete Eingriffspunkt ist die Firmware der Maschinensteuerung. Die Firmware überführt die als G-Code vorliegenden Befehle in direkte Steuerungssignale für die spezifische Hardware der Fertigungsmaschine. Die Firmware ist in der Regel zur sequenziellen Abarbeitung und Transformation allgemeiner Steuerungsbefehle in hardwarespezifische Signale entwickelt. Eine umfassende Logikintegration in Steuerungsbefehle ist in diesem Teilbereich für das nicht hybride FFF-Verfahren nicht vorgesehen.

Nach der Beschreibung der betrachteten Eingriffspunkte in die digitale Softwarekette zur Erstellung der 3DConFil-spezifischen Steuerungsbefehle wird der Entwicklungsaufwand abgeschätzt und der Entwicklungsrahmen festgelegt. Die Modellierung der geometrischen Modelle von Bauteil, Leitungskanal und der Leitung in bestehender CAD-Software stellt den geringsten Entwicklungsaufwand durch die Nutzung bestehender Softwarefunktionen ohne die Entwicklung eigener Softwarefunktionen dar. Dem gegenüber wird der Entwicklungsaufwand zur Modifikation des Facettenmodells des Bauteils als sehr hoch eingeschätzt. Hinzu kommt der slicerssoftwarespezifische Import des Facettenmodells, der nur unter Eingriff in die Slicerssoftware beeinflussbar ist. Daher wird für die Modellierung des Grundkörpers, der 3DConFil spezifischen Leitungspfade und der Leitung selbst der Einsatz etablierter CAD-Software gewählt.

Mit der Gestaltung von Bauteil und Leitung ist die notwendige Bedingung der digitalen Repräsentation des hybrid-integrierten Bauteils erreicht. Etablierte Slicerssoftware berechnet ausgehend von diesen Produktmodellen keine 3DConFil-spezifischen Steuerungsbefehle. Damit besteht noch die Wahl zwischen der Modifikation von etablierter Slicerssoftware oder der Modifikation der Steuerungsbefehle in Form eines G-Codes für die Bauteilfertigung mittels FFF-Verfahren. Der Entwicklungsaufwand wird bei beiden Möglichkeiten als hoch eingeschätzt. Zur Entscheidung wird die Betrachtung der neuen Steuerungsbefehle zur Realisierung der hybrid-integrierenden additiven Fertigungsschritte herangezogen. Bei der Integration zwischen zwei Schichten findet kein Positionierbefehl der FFF-Düse statt. Die Integration beginnt nach dem Abschluss der vorherigen Schicht und endet vor der kommenden Schicht. Dieser Fertigungsschritt wird bezüglich der Wechselwirkungen mit dem FFF-Verfahren als unkritisch betrachtet.

Die Integration über Schichten hinweg bedeutet, dass die Leitung innerhalb des Bauraums bei jedem Verfahren des FFF-Kopfs nicht mit diesem kollidiert. Die FFF-Pfade sind zum Zeitpunkt der möglichen Modifikation des G-Codes festgelegt. Damit ist sowohl die freie Gestaltung von Steuerungsstrategien der Maschinenhardware und zu jedem Zeitpunkt die Position und die Bewegung FFF-spezifischer Hardware möglich. Neue Steuerungsstrategien werden auch bei der Modifikation der Slicerssoftware erwartet. Anhand der Möglichkeiten der verschiedenen Eingriffspunkte in die digitale Prozesskette und der notwendigen Flexibilität hinsichtlich der Anpassbarkeit der Steuerungsbefehle wird die Modifikation des für das FFF-Verfahren erstellten G-Codes als Lösung für die digitale Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens gewählt.

## A.8 Berücksichtigte kommerzielle Anbieter von Endapplikationen

Tabelle A.3: Berücksichtigte kommerzielle Anbieter von Endapplikationen für Leitungsschnittstellen, Sensorik und Aktorik

Beschaffungsquelle	Arten der Endapplikationen
RS Components GmbH (2024)	Schnittstelle für elektrische Energie Schnittstelle für Stoffe Schnittstelle für mechanische Energie Sensorik Aktorik
EFB-Elektronik GmbH (2022)	Schnittstelle für optische Energie
Reichelt Elektronik GmbH & Co. KG (2024)	Schnittstelle für elektrische Energie Schnittstelle für Stoffe Schnittstelle für mechanische Energie Sensorik Aktorik
Bürklin GmbH & Co. KG (2022)	Schnittstelle für elektrische Energie
Festo Vertrieb GmbH & Co. KG (2022)	Schnittstelle für Stoffe
Micro Motors SRL (2023)	Aktoren
Mouser Electronics, Inc. (2024)	Schnittstelle für elektrische Energie Schnittstelle für Stoffe Schnittstelle für mechanische Energie Sensorik Aktorik

## A.9 Anforderungsliste der 3DConFil-Fertigungsmaschine

Tabelle A.4: Anforderungsliste an die Fertigungsmaschine des 3DConFil-Verfahrens in Form eines Funktionsprototyps

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
Hauptanforderungen Fertigungsmaschine (F)	F1	FF	Mindestfunktionsumfang		Erzeugung der Wirkgrößen zur Durchführung der Fertigungsschritte zur Leitungsintegration des 3DConFil-Verfahrens.
	F2	ZF	erweiterter Funktionsumfang		Erzeugung der Wirkgrößen zum automatisierten Einspannen und Trennen der Leitung.
	F3	FF	Entwicklungsaktivitäten		Die durchgeführten Entwicklungsaktivitäten werden auf 3DConFil-spezifische Komponenten fokussiert. Zur weiteren Aufwandsreduktion werden, sofern geeignet, Übernahmevariationen der Komponenten bevorzugt.
	F4	ZF	Modularität und Erweiterbarkeit		Ein Ziel ist die Entwicklung der 3DConFil-spezifischen Teilsysteme in Form von Modulen. Damit wird die Weiterentwicklung einzelner Teilsysteme auf Basis experimenteller Erkenntnisse und die Adaptierbarkeit auf andere Systeme zur Erschließung neuer gestalterischer Potentiale sichergestellt.
	F5	W	Wartbarkeit		Die Gestaltung der Teilsysteme ermöglicht die Wartbarkeit bei möglichst geringem Wartungsaufwand.
	F6	BF	Zugkraft	1,4 N bis 5,4 N	Die Leitungshandhabungskomponenten ermöglichen die variable Einstellung der Zugkraft im Bereich von 1,4 N bis 5,4 N. Kraftabschätzung anhand experimenteller Absicherung in Abschnitt 5.2.3.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.4 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
	F7	ZF	Einspannung		Die Leitungseinspannung ermöglicht die Übertragung der Zugkraft.
	F8	FF	Positioniergenauigkeit Leitungshandhabung		Die Positionierungsgenauigkeit der Positioniereinrichtung entspricht der des FFF-Verfahrens.
	F9	FF	Leitungstrennung		Das Teilsystem der Leitungstrennung ermöglicht das Trennen von Kupferlitzen bis zu 8 mm Durchmesser.
	F10	BF	Einpresskraft		Die von den Leitungshandhabungskomponenten aufgebrauchte Einpresskraft ermöglicht die Leitungsintegration zwischen zwei Druckschichten in den Klemmkanal.
	F11	ZF	Abmaße	H,B,T je 130 mm	Die Zielwerte der Abmaße des Druckkopfs werden als gleichseitiger Würfel mit einer Kantenlänge von 130 mm angestrebt. Bei Erreichen des Ziels sind alle Funktionen im gleichen Bauvolumen integriert. Eine kleinere Baugröße liefert keinen Bauraumvorteil aufgrund der festgelegten Kinematik des Portalsystems.
	F12	WF	Hardwareintegration	Steuerungsplatinen	Integrationsmöglichkeit der Steuerungs- und Regelungsplatinen innerhalb des Portalsystems.
	F13	BF	Steuerbare Freiheitsgrade	$\geq 10$	Für die Deltakinematik, die Zusatzkomponenten und Automatisierungen und weiterführende Entwicklungen sind mehr als 10 Freiheitsgrade erweiterbar.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...



Tabelle A.4 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
	F14	BF	Abmaße	größte Länge $\leq$ 2,4 m und Gurtmaß $\leq$ 4 m	Zur einfachen Distribution der Fertigungsmaschine wird die Versandmöglichkeit mit verbreiteten Versanddienstleistern anhand der Versandbedingungen von TNT Holdings B. V. by FedEx Express Deutschland GmbH (2022) und United Parcel Service of America, Inc. (2022) festgelegt.
	F15	BF	Bauteilmaße	$\geq$ H: 300 mm B: 300 mm T: 300 mm	Die untere Grenze des Druckraums wird initial anhand etablierter FFF-Fertigungsmaschinen am Markt ermittelt (vgl. MakerBot Industries, LLC 2022; Zortrax 2022; Prusa Research a.s. 2022; Markforged Inc. 2023; 3dGence America, Inc. 2022).
	F16	ZF	Schwerpunkt	Schwerpunkt der Fläche in der X-Y-Ebene des Effektors	Zur Minimierung der Zusatzbelastung des Portalsystems durch ein Kippmoment am Effektor um die X-Achse und Y-Achse.
	F17	FF	Energieform	elektrische Energie	Zur flexiblen Aufstellung an Betriebsorten wird die Nutzung elektrischer Energie bevorzugt. Eine Wandlung in andere Energieformen innerhalb des Systems ist möglich.
	F18	ZF	Relativbewegung	unbegrenzt	Steigender Wert des Drehfreiheitsgrads der FFF-Düse führt zur Verringerung des Rückdrehens des Druckkopfs. Bei Entfallen der Druckkopfdrehung ist keine Rückdrehung erforderlich.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.4 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
	F19	FF	Höhentoleranz	0,3 mm	Die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt darf in Z-Richtung nicht den Wert einer FFF-Schichthöhe überschreiten.
	F20	ZF	Höhentoleranz	$\leq$ 0,05 mm	Die geringste Schichthöhe beträgt 0,1 mm, sodass der Einfluss der Höhendifferenz ab dem Zielwert als vernachlässigbar angenommen wird.
	F21	FF	Förderrichtung	bidirektional	Anhand des Verfahrens wird durch die Verfahrswege des Druckkopfs Leitung vorgefördert und wieder freigegeben. Das Fördersystem stellt die Vorförderung und Rückförderung der Leitung bereit.
	F22	BF	Richtungswechsel	$\geq 10^5$	Erwartete Anzahl der Richtungswechsel von Vorförderung und Rückförderung der Leitung, ermittelt durch Referenzbauteile.
	F23	FF	Leitungswechsel	manuell	Der Wechsel einer Leitung ist händisch ohne Werkzeug durchführbar.
	F24	W	Leitungswechsel	teilautomatisiert	Der Wechsel einer Leitung ist durch eine Teilautomatisierung unterstützt und die manuell durchgeführten Wechselprozesse sind gegenüber des ausschließlich manuellen Wechsels reduziert.
	F25	BF	Wechseldauer	$\leq 5$ min	Der Wechsel einer Leitung ist schnell möglich.
	F26	BF	Überlastverhalten	$\leq 40$ N	Durch das Portalsystem wurde eine maximale Zugkraft des Druckkopfs ermittelt und als Grenze festgelegt.

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.4 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Gliederung	Nr.	Art	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
	F27	BF	Förderung	< Federweg des Zwischen-speicherfederarms	Die Förderwegtoleranz der Leitung muss zu jedem Zeitpunkt der Bauteilfertigung kleiner als der Federweg des Zwischen-speicherfederarms zur Sicherstellung der Zugspannung der Leitung sein.
	F28	ZF	Geschwindigkeit	$150 \frac{mm}{s}$	Die Fördergeschwindigkeit ist mit der Verfahrgeschwindigkeit des Druckkopfs gekoppelt. Das Portalsystem ermöglicht eine maximale Fördergeschwindigkeit, welche als Ziel festgelegt ist.
	F29	FF	Montierbarkeit	zerstörungsfrei montierbar und demontierbar	Während des experimentellen Funktionstests des Prototyps werden Adaptionen der bestehenden Komponenten erwartet, sodass die zerstörungsfreie Montierbarkeit und Demontierbarkeit sichergestellt werden.

## A.10 Funktionsträger zur Überprüfung des Leitungsverlaufs

Tabelle A.5: Leitungen zur experimentellen Überprüfung des Leitungsverlaufs

Lei- tungs- art	Bezeichnung	Außen- durch- messer Ø	Anzahl un- abhängiger Verbindun- gen	Online verfügbar unter:	Zuletzt ge- prüft am:
El.	Kabeltronik 2430405T9-1 Sensorleitung Sensocord®	2,4 mm	4	<a href="https://www.conrad.de/de/p/kabeltronik-2430405t9-1-sensorleitung-sensocord-4-x-0-05-mm-schwarz-meterware-1269460.html">https://www.conrad.de/de/p/kabeltronik-2430405t9-1-sensorleitung-sensocord-4-x-0-05-mm-schwarz-meterware-1269460.html</a>	22.11.2022
El.	HELUKABEL® SUPERTRONIC® - PVC 49554	4,8 mm	7	<a href="https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/1DB_49550_de.pdf">https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/1DB_49550_de.pdf</a>	22.06.2023
El.	HELUKABEL® SUPERTRONIC® - PURö 49587	5,2 mm	7	<a href="https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/HELUKABEL_M49583_DE.pdf">https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/HELUKABEL_M49583_DE.pdf</a>	22.06.2023
El.	Helukabel 40004 Koaxialkabel	6,2 mm	2	<a href="https://www.conrad.de/de/p/helukabel-40004-koaxialkabel-aussen-durchmesser-6-20-mm-rg59-b-u-75-schwarz-meterware-558442.html">https://www.conrad.de/de/p/helukabel-40004-koaxialkabel-aussen-durchmesser-6-20-mm-rg59-b-u-75-schwarz-meterware-558442.html</a>	22.11.2022
El.	HELUKABEL® SUPERTRONIC® - PURö 49590	6,7 mm	14	<a href="https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/HELUKABEL_M49583_DE.pdf">https://assets-cdn.helukabel.com/suppliers/Helukabel/documents/db/HELUKABEL_M49583_DE.pdf</a>	22.06.2023
Opt.	LAPP 28020002- 1 POF-Kabel Hitronic	5,5 mm	2	<a href="https://www.conrad.de/de/p/lapp-28020002-1-pof-kabel-hitronic-pof-980-1000-duplex-orange-meterware-1078800.html">https://www.conrad.de/de/p/lapp-28020002-1-pof-kabel-hitronic-pof-980-1000-duplex-orange-meterware-1078800.html</a>	07.07.2021

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.5 – von vorheriger Seite fortgesetzt

Lei- tungs- art	Bezeichnung	Außen- durch- messer Ø	Anzahl un- abhängiger Verbindun- gen	Online verfügbar unter:	Zuletzt ge- prüft am:
Stoff	FESTO Druckluft- schlauch 197390- 1 PUN	4 mm	1	<a href="https://www.conrad.de/de/p/festo-druckluftschlauch-197390-1-pun-h-4x0-75-sw-thermoplastisches-elastomer-schwarz-innen-durchmesser-2-6-mm-10-bar-me-1972452.html">https://www.conrad.de/de/p/festo-druckluftschlauch-197390-1-pun-h-4x0-75-sw-thermoplastisches-elastomer-schwarz-innen-durchmesser-2-6-mm-10-bar-me-1972452.html</a>	07.07.2021

---

# Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Einteilung additiver Fertigungsverfahren, eigene Abbildung in Anlehnung an Westkämper et al. (2010, S. 6 bis S. 8), Kumke (2018, S. 9) und DIN 8580 (2022, S. 7 bis S. 9)	6
2.2	Schematischer Aufbau des Fused Filament Fabrication Verfahrens in Anlehnung an Kumke (2018, S. 228) mit FFF-Prozessdarstellung angelehnt an Gebhardt et al. (2019b, S. 50), eigene Abbildung	7
2.3	Übersicht der Prozesskette additiver Fertigungsverfahren in Anlehnung an Kumke (2018, S. 10) adaptiert für das FFF-Verfahren, eigene Abbildung	9
2.4	Visuelle Darstellung des Tesselierungsergebnisses anhand einer einzelnen Dreiecksfacette angelehnt an Gebhardt (2016, S. 36) und Reichwein (2022, S. 9 f.) in a) und der Approximation eines Halbkreises mit unterschiedlicher Auflösungsgenauigkeit angelehnt an Gebhardt (2016, S. 39) und Reichwein (2022, S. 9 f.) in b), eigene Abbildungen	10
2.5	Parameter der Konturlinien und Fülllinien eines FFF-gefertigten Bauteils übersetzt in Anlehnung an Moritzer et al. (2019, S. 030056-2) in a) und weiteren Fülllinienmustern in Anlehnung an Dey et al. (2019, S. 2 f.), veröffentlicht unter der CC BY 4.0 Lizenz, in b) und in c), eigene Abbildungen a) bis c)	12
2.6	Ursache-Wirkungsdiagramm der Einflüsse auf die Teilequalität und die Eigenschaften von FFF-Bauteilen, eigene Abbildung übersetzt nach Ouazzani et al. (2022, S. 5)	13
2.7	Verknüpfungen von Potentialen mit den Eigenschaften der additiven Fertigung in Anlehnung an Kumke (2018, S. 18) basierend auf Baldinger et al. (2013, S. 13), eigene Abbildung	15
2.8	Einteilung hybrider Fertigungsverfahren in die Kombination von Energiequellen beziehungsweise Werkzeugen und die Nutzung von Prozessmechanismen, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Lauwers et al. (2014, S. 563)	20
2.9	Schematische Darstellungen verschiedener Arten der Integration mit dem Einschmelzen in den Kunststoff in Anlehnung an Aguilera et al. (2013, S. 950 bis S. 961) in a), der Umspülung der Faser und kombinierte Faser-Kunststoffextrusion in Anlehnung an Ziervogel et al. (2021, S. 43036 bis S. 43049) in b), der Umspritzung der Faser mit Kunststoff außerhalb der Druckdüse in Anlehnung an Saari et al. (2015, S. 35) in c) und der Umspülung der Faser mit Photopolymer und simultaner Fasereextrusion und nachfolgender UV-Aushärtung in Anlehnung an Continuous Composites Inc. (2024) in d), eigene Abbildungen a) bis d)	25

3.1	Schematische Darstellung des technischen Prozesses zur Überführung eines Operanden von einem Anfangszustand in einen Endzustand, eigene Abbildung in Anlehnung an Gramlich (2013, S. 63 f.) . . . . .	27
3.2	Technisches System, eigene Abbildung in Anlehnung an Hubka (1984, S. 15) . . . .	28
3.3	Systemtheoriekonzepte, eigene Abbildung in Anlehnung an Ropohl (2009, S. 76) . .	28
3.4	TOTE-Schema in Anlehnung an Ehrlenspiel et al. (2017, S. 103) in a) und modellbasierte Problemlösung angelehnt an die Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 15) in b), eigene Abbildungen . . . . .	29
3.5	Schematische Vorgehensmodell Darstellung vereinfacht in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 31) als allgemeines Modell des Produktentwicklungsprozesses zwischen der Aufgabe und dem gefertigten Produkt in a) und Elemente einer Methode übersetzt in Anlehnung an Gericke et al. (2017, S. 107) in b), eigene Abbildungen . . . . .	30
3.6	Phasen des Produktlebenslaufs in Anlehnung an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.) basierend auf Birkhofer et al. (2018, S. 602), eigene Abbildung . . . . .	34
3.7	Schematische Darstellung des DfX und dessen Einfluss auf die Produktentwicklung, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 16) und für den Produktlebenslauf an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.) . . . . .	36
3.8	Integrationsarten durch Erfüllung neuer Funktionen in a), der Integration von Fertigungsverfahren in b) und einer integralen Baustruktur in c). Abbildungsteile a) bis c) als eigene Abbildungen in Anlehnung an Wagner (2018, S. 39 bis S. 45) . . . . .	37
3.9	Schematische Darstellung der fertigungsintegrierenden Produktentwicklung, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und für den Produktlebenslauf an Kirchner et al. (2021, S. 467 f.) . . . . .	39
3.10	Beschreibung des Fertigungsverfahrens in Form einer zusammengefassten Zustandsänderung in a) und als Abfolge einer endlichen Anzahl von Fertigungsschritten N+1 in b), eigene Abbildungen angelehnt an Gramlich (2013, S. 135) und Roos (2018, S. 53 f.). Es besteht die Möglichkeit, dass verfahrensinduzierte Eigenschaften die verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften eines nachfolgenden Fertigungsschritts darstellen (vgl. Gramlich 2013, S. 135 f.) . . . . .	42
3.11	Wechselwirkung der Operanden, des Arbeitsmittels und der Wirkgrößen von Nachbarsystemen in Form des Verfahrensprinzipmodells dargestellt, eigene Abbildung in Anlehnung an Roos (2018, S. 58) . . . . .	42
3.12	Verfahrensprinzipmodell in Anlehnung an Roos (2018, S. 58) ausgeführt für das Fused Filament Fabrication Verfahren und der verfahrensinduzierten Materialeigenschaften anhand einer Zugprobe in Anlehnung an De Bernardez et al. (2023, S. 119 bis S. 121), eigene Abbildung . . . . .	44
4.1	Zusammenhang von Produktentwicklung, Fertigung, Fertigungsmaschine und deren Entwicklung mit zugeordneten Forschungsfragen. Schematische Darstellung von Produktentwicklungsprozess und Produktlebenszyklus in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und Kirchner et al. (2021, S. 467 f.), eigene Abbildung . . . . .	49

5.1	Verlauf einer flexiblen, kontinuierlichen Leitung innerhalb eines Bauteils bestehend aus horizontalen, vertikalen und geneigten Verlaufsabschnitten, eigene Abbildung .	52
5.2	Ausbildung einer statischen Seillinie mit geringerer Biegesteifigkeit in a) im Vergleich zu einer höheren Biegesteifigkeit in b) jeweils ohne Gravitationseinfluss angelehnt an einen Biegebalken mit festen Einspannungen (vgl. Gross et al. 2021, S. 108 f.). Unter Gravitationseinfluss $\vec{g}$ tritt eine Änderung der Seillinie bei festen Einspannungen an beiden Enden auf (vgl. Petersen et al. 2017a, S. 573; Petersen et al. 2017b, S. 1304 f.) mit eingezeichnetem Biegeradius in c). Die Seillinie in d) nähert sich unter Zugkraft einer Geraden an (vgl. Petersen et al. 2017b, S. 1300 bis S. 1316), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	55
5.3	Initiale Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens zur Integration der Leitung in den Grundkörper zwischen zwei Druckschichten (Positioniereinrichtung angelehnt an Kirchner et al. (2022, S. 1)) in a) und über mehrere Druckschichten mit FFF-Prozessdarstellung in Anlehnung an Gebhardt et al. (2019b, S. 50) in b), eigene Abbildungen . . . . .	59
5.4	Klemmkanalgeometrie zur Integration zwischen zwei Schichten in Anlehnung an Kirchner et al. (2022, S. 12) (ohne Zentrierbereich (vgl. Espalin et al. 2016)) in a) und Kanalgeometrien zur Integration über mehrere Schichten für einen vertikalen Leitungsverlauf in b). Die kreisrunde Durchstoßfläche der Druckschichten in c), die Kanalgeometrie eines schrägen Verlaufs durch das Bauteil in d) und der zugehörigen elliptischen Durchstoßfläche in e), eigene Abbildungen a) bis e) . . . . .	61
5.5	Schnittdarstellung der Integration über mehrere Druckschichten in a) mit einer Detailansicht eines möglichen Kontaktbereichs von Hotend und Leitung in b), eigene Abbildungen . . . . .	63
5.6	Auszug der Stichprobe flexibler, kontinuierlicher Funktionsträger zur Leitung von optischen und elektrischen Energien sowie Stoffen (vgl. Steffan 2023) mit der oberen Grenze des Außendurchmessers als gestrichelte Linie und der unteren Grenze der berücksichtigten Außendurchmesser als punktierte Linie in den Bereichen einer Verbindungszahl unter 50 und einem Außendurchmesser zwischen ca. 2 mm und 8 mm, eigene Abbildung . . . . .	65
5.7	Annahmen zur Reduktion der experimentellen Überprüfung des Leitungsverhaltens mit einer bezüglich des Austrittspunkts bestehenden Winkelunabhängigkeit in a), der Positionsunabhängigkeit des Bauteils in b) und der Unabhängigkeit bezüglich des Abstands in Z-Richtung zwischen Bauteiloberfläche und Positioniereinrichtungsaustritt in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	66
5.8	Grundkörper zur experimentellen Bestimmung des Leitungsverlaufs bei horizontaler Einspannung als Schnittansicht in a), als isometrische Ansicht in b) und vertikaler Einspannung als Schnittansicht in c) und als isometrische Ansicht in d), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	68
5.9	Beispielhafte Messpositionen der experimentellen Bestimmung des Leitungsverlaufs, eigene Abbildung . . . . .	69



5.10 Leitungsverläufe bei Zugkräften von 1,4 N und 5,4 N zwischen vertikalem Grundkörpereintritt und Leitungsaustritt einer Hohlleitung in a) und b), einer elektrischen Leitung in c) und d), einer optischen Leitung in e) und f) sowie einer Koaxialleitung in g) und h), eigene Abbildungen a) bis h) . . . . .	70
5.11 Leitungsverläufe unter einer Zugkraft von 1,4 N zwischen vertikalem Grundkörpereintritt und Leitungsaustritt mit variiertem vertikalen Abstand für eine optische Leitung in a), b) und c) sowie einer Koaxialleitung in d), e), und f), eigene Abbildungen von a) bis f) . . . . .	71
5.12 Leitungsverläufe bei einer Zugkraft von 1,4 N zwischen horizontalem Grundkörpereintritt und Leitungsaustritt für eine optische Leitung in a) und mit variiertem vertikalen Abstand für eine elektrische Leitung in b), c) und d), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	72
5.13 Übergänge zwischen einem horizontalen Kanalabschnitt in einen geneigten Kanalabschnitt in a), einem vertikalen Kanalabschnitt in einen versetzten vertikalen Kanalabschnitt in b) und von einem geneigten Kanalabschnitt in einen horizontalen Kanalabschnitt in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	74
5.14 FFF-Druck, erweiterte Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens zur Leitungsintegration und zum Übergang in und aus den Fertigungsschritten der Leitungsintegration, eigene Abbildung . . . . .	75
5.15 Schematische Darstellung der Wirkgrößen und Wirkelemente zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten als Ansicht auf die X-Z-Ebene in a), als Schnittansicht in b) und als Ansicht auf die X-Y-Ebene in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	77
5.16 Schematische Darstellung der Wirkgrößen und Wirkelemente zur Leitungsintegration über mehrere Schichten als Ansicht auf die X-Z-Ebene in a) und auf die X-Y-Ebene in b), eigene Abbildungen . . . . .	78
5.17 Wirkgrößen der Fertigungsmaschine zur initialen Einspannung der Leitung in a) und zur Abtrennung der Leitung in b), eigene Abbildungen . . . . .	79
5.18 Schematische Darstellung von Portalsystembauweisen für FFF-Fertigungsmaschinen in Anlehnung an Lachmayer et al. (2020a, S. 107) von a) bis d) und als schematische Darstellung unter Anlehnung an Ma et al. (2021, S. 1228) in e), eigene Abbildungen a) bis e) . . . . .	83
5.19 CAD-Modelle des Portalsystems zur Teilsystemintegration des 3DConFil-Verfahrens mit dargestelltem Bauraum im Originalzustand a) und der Bezeichnung der Komponenten in b), eigene Abbildungen . . . . .	85
5.20 Mögliche Relativpositionen von Leitungsaustritt der Positioniereinrichtung und der FFF-Düse mit gespannter Leitung zum Leitungseintritt in ein Beispielbauteil in der Draufsicht für verschiedene Druckpositionen in a) und b), eigene Abbildungen . . . . .	87
5.21 Schematische Darstellungen der Integration der Leitung bei horizontalem Kanalverlauf am Bauteileintritt in a) bei Kurvenfahrt in b) und am Austritt aus dem Bauteil in c). Hotend- und Einpresswerkzeugposition zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten in d) und über mehrere Schichten in e), eigene Abbildungen a) bis e) . . . . .	88
5.22 Positionen der Teilsysteme mit freien Positionen für die Leitungsförderung und die Leitungstrennung, eigene Abbildung . . . . .	90
5.23 Schematische Schnittansicht des Druckkopfs für das 3DConFil-Verfahren, eigene Abbildung . . . . .	92

5.24	CAD-Modell in den Positionen des Hotends am 3DConFil-Druckkopf mit der Position zur Leitungsintegration zwischen zwei Schichten in a) und zur Integration über mehrere Schichten in b), eigene Abbildungen . . . . .	93
5.25	Koordinatensystem und Drehfreiheitsgrade des Druckkopfs als schematische Darstellung, eigene Abbildung in Anlehnung an Steffan et al. (2023a, S. 3) . . . . .	94
5.26	Funktionsprototyp mit den Kernkomponenten des 3DConFil-Verfahrens, bestehend aus dem Druckkopf, der Leitungsförderung, dem Zwischenspeicher und dem Hauptspeicher in der Einhausung zur Reduktion von Umgebungseinflüssen anhand des Zugangs zum Bauraum in a) und zum Zwischenspeicher in b), eigene Abbildungen . . . . .	96
5.27	Prozesskette des 3DConFil-Verfahrens: Verknüpfung der digitalen Prozesskette mit der Fertigungsmaschine, den Halbzeugen und dem Druckprozess mit schematischer Darstellung der additiven Prozesskette angelehnt an Kumke (2018, S. 10) adaptiert für das 3DConFil-Verfahren, eigene Abbildung . . . . .	99
5.28	Geslictes 3DConFil-Bauteil in der Slicer-Software Cura (Ultimaker B.V. 2023) in a) und vereinfachtes Strukturdiagramm des 3DConFil-Parsers angelehnt an Steffan et al. (2023a, S. 9) in b), eigene Abbildungen . . . . .	102
5.29	Gestaltung der durch das 3DConFil-Verfahren fertigmachen Armablage mit integrierter Leitungsführung in unkonfektioniertem Zustand des gedruckten Grundkörpers als CAD-Modell in a) mit dargestelltem Leitungsverlauf innerhalb des Bauteils als CAD-Modell in b), in montiertem Zustand als CAD-Modell in c), nach dem händischen Integrationsprozess der gefertigten Armablage in teilgedrucktem Zustand in d) und in endmontiertem Zustand in e), eigene Abbildungen a) bis e) . . . . .	105
6.1	Übersicht der Verknüpfung von Anforderungen an die verfahrensinduzierten Eigenschaften (Verfahrensinduzierte Soll-Eigenschaften) und den nutzbaren Anforderungen im Rahmen der Fertigungsmaschinenentwicklung (Verfahrensprinziprelevante Soll-Eigenschaften). Der Informationsfluss ist in Form des blauen Pfeils visualisiert. Schematische Darstellung von Produktentwicklungsprozess und Produktlebenszyklus in Anlehnung an Roos (2018, S. 84) und Kirchner et al. (2021, S. 467 f.), eigene Abbildung . . . . .	108
6.2	Verknüpfung von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine innerhalb eines Fertigungsschritts unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells nach (vgl. Roos 2018, S. 58) mit der Darstellung in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	110
6.3	Zuordnungsmatrix mit den Verknüpfungen der verfahrensinduzierten Bauteileigenschaften und den verfahrensprinziprelevanten Fertigungsmaschineneigenschaften, eigene Abbildung . . . . .	112
6.4	Verknüpfung von verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den verfahrensprinziprelevanten Soll-Eigenschaften der Fertigungsmaschine für aufeinanderfolgender Fertigungsschritte in Anlehnung an die Prozesskettenmodellierung nach Roos (2018, S. 54) mit der Darstellung des Verfahrensprinzipmodells ohne Nachbarsysteme in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	114
6.5	Mit weiteren Fertigungsschritten erweiterte Zuordnungsmatrix von verfahrensinduzierten und verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften, eigene Abbildung . . . . .	115

6.6	Verknüpfung von verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften der Fertigungsmaschine mit den Teilfunktionen anhand von Eigenschaften der Wirkgrößen und den Bauteilen anhand von Eigenschaften der Wirkelemente in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 257) mit der Verknüpfung durch technische Lösungen in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 277) in Unterscheidung von der modularen Produktentwicklung mit der Bezeichnung der Baustruktur nach der Richtlinie VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 10) in Anlehnung an Lindemann (2009, S. 45), eigene Abbildung . . . . .	117
6.7	Vorgehen der potentialgetriebenen Fertigungsmaschinenentwicklung zur Erweiterung nutzbarer verfahrensinduzierter Eigenschaften, eigene Abbildung . . . . .	119
7.1	Verknüpfung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den Anforderungen an die Fertigungsmaschine am Beispiel der Integration von Leitungen mit kleinerem Durchmesser für den vorgelagerten FFF-Fertigungsschritt zur Fertigung des horizontalen Kanalabschnitts unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	123
7.2	Verknüpfung der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaften mit den Anforderungen an die Fertigungsmaschine am Beispiel der Integration von Leitungen mit kleinerem Durchmesser zwischen zwei Schichten für den Fertigungsschritt der Integration zwischen zwei Schichten unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	124
7.3	Auszug der Matrixdarstellung von Verknüpfungen zwischen den verfahrensinduzierten Eigenschaften des Bauteils und der verfahrensprinziprelevanten Eigenschaften des Funktionsprototyps für die Leitungsintegration zwischen zwei Schichten des 3DConFil-Verfahrens mit der Bauteilfestigkeit nach De Bernardez et al. (2023, S. 119 bis S. 121), eigene Abbildung . . . . .	126
7.4	Teildarstellung der Produktarchitektur des 3DConFil-Funktionsprototyps als Visualisierung der potentialbeeinflussenden Funktionen und Bauteile. Mit der Darstellungsform in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 257) mit der Verknüpfung durch technische Lösungen in Anlehnung an Feldhusen et al. (2013b, S. 277) in Unterscheidung von der modularen Produktentwicklung mit der Bezeichnung der Baustruktur nach VDI 2221 Blatt 1 (2019, S. 10) in Anlehnung an Lindemann (2009, S. 45), eigene Abbildung . . . . .	127
7.5	Beispiele für Endapplikationen in a), rechteckige Einhüllende mit Drahtmodell eines Toslink-Steckers in b) und zylindrische Einhüllende mit Drahtmodell eines Federkontaktstifts in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	130
7.6	Funktionserweiterung durch Endapplikationen mit der Beherrschung der Variantenvielfalt durch einen Integrationskörper in a), mit der Darstellung der Wirkgrößen während eines Positionierprozesses in b) und dem Montageprozess des Integrationskörpers in der Tasche des Grundkörpers in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	132
7.7	Ableitung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine anhand der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft zur freien Positionierung der Endapplikation innerhalb des Bauteilvolumens unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	134

7.8	Integrationskörper für einen Federkontaktstift mittels händischer Integration, eingesetzt in einer Gleitlageranwendung (vgl. Steffan et al. 2023b, S. 1166 bis S. 1169) in a), mittels automatisierter Integration mit dem Funktionsprototyp in b) und in der Positionierposition am Leitungsausstritt des Druckkopfs zur automatisierten Integration in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	135
7.9	Neue Gestaltungsmöglichkeiten durch die Verwendung eines Integrationskörpers zur Integration mehrere Leitungsabschnitte in einer Ebene zusammen mit Einspann- und Trennprozess in a) und im weiteren Druckprozess anschließender Integration über mehrere Schichten in b), eigene Abbildungen . . . . .	136
7.10	Schnittansicht des CAD-Modells des konventionellen Gleitlagergehäuses, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1166) . . . . .	138
7.11	Kenngößen eines Gleitlagers in Anlehnung an Deters et al. (2018, S. 540 bis S. 543) und der Norm DIN 31652-1 (2017, S. 5) zur Abschätzung des Temperaturmessbereichs mit einer vertikalen Last mit $\omega_F = const.$ bei hoher Winkelgeschwindigkeit $\omega_J$ in a), einer niedrigeren Winkelgeschwindigkeit $\omega_{J1} < \omega_J$ in b) und unter einer um $45^\circ$ gedrehten Last bei der Winkelgeschwindigkeit $\omega_{J2} = \omega_J$ in c), eigene Abbildungen a) bis c) . . . . .	139
7.12	Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Absicherung der Gleitlagerschnittstellen hinsichtlich der mechanischen Anforderung einer Zugkraft von 1 kN, eigene Abbildung übersetzt und basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1167) . . . . .	141
7.13	Lösungsideen zur Temperaturmessung an der Gleitlagerschale durch mehrere Messpositionen über den geforderten Winkelbereich als eigene Abbildung in a) und durch eine stufenlos veränderliche Messposition als eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1167) in b) . . . . .	142
7.14	Erstes Konzept des Gleitlagergehäuses für den experimentellen Betrieb in der Einbauposition als CAD-Modell, eigene Abbildung übersetzt und basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1167) . . . . .	143
7.15	Erstes Gestaltungskonzept des Gleitlagergehäuses in eingebautem Zustand, eigene Abbildung . . . . .	144
7.16	Impedanzwerte der Gleitlagerung im Mischreibungsgebiet unter einer Z-Kraft von 300 N, eigene Abbildung übersetzt in Anlehnung an Steffan et al. (2023b, S. 1168) . . . . .	145
7.17	Verbesserungen des Gleitlagergehäuses nach Experimentalbetrieb unter der Reduktion der Riemenreibung durch Wälzlager an der Innenseite der Riemenlaufbahn mit Riemenspannsystem als CAD-Modell in a), äußerer Montagelösung und Montagewerkzeug der Wirbelstromsensoren als CAD-Modell in b) sowie als neu gefertigtes und montiertes Gleitlagergehäuse in c), eigene Abbildungen von a) bis c) . . . . .	146
7.18	Fertigungsschritte zur Integration zwischen zwei Schichten unter Drehung des Werkstücks um die Y-Achse mit drei Kanalabschnitten unter einer Drehung von $25^\circ$ entgegen dem Uhrzeigersinn zum Einpressen des ersten Abschnitts in a), von $0^\circ$ zum Einpressen des zweiten Abschnitts in b) und von $45^\circ$ zum Einpressen des dritten Abschnitts in c), eigene Abbildungen von a) bis c) . . . . .	149

7.19	Ableitung der Anforderung an die Fertigungsmaschine anhand der verfahrensinduzierten Soll-Eigenschaft zur kraftschlüssigen Integration der Leitung bei veränderlicher Bauteilorientierung unter Nutzung des Verfahrensprinzipmodells in Anlehnung an Roos (2018, S. 58), eigene Abbildung . . . . .	150
7.20	Schnittansicht der kippbaren Bauplattform zur kinematischen Erweiterung des Funktionsprototyps, eigene Abbildung . . . . .	152
7.21	Gefertigte kinematische Erweiterung im eingebauten Zustand mit verbundenen Portalsystemtürmen, eigene Abbildung . . . . .	153
A.1	Betrachtete Teillösungsauswahl zur Verbindung von integrierter Leitung und additiv gefertigtem Grundkörper zwischen zwei Druckschichten durch Eindrücken in verflüssigten Kunststoff mit Ähnlichkeiten zu dem Einbetten eines Leiters in bereits verdrukten Kunststoff in Anlehnung an Aguilera et al. (2013, S.950 bis S.961) in a), durch Einlegen in einen teilweise vorgedruckten Kanal in b), durch Einpressen in einen teilgeöffneten Kanal mit Klemmelementen und Zentrierbereich in Anlehnung an Kirchner et al. (2022, S.12) (ohne Zentrierbereich bekannt bei Espalin et al. (2016)) in c) und durch die Verwendung eines Klebstoffs oder UV-Harzes (vgl. Espalin et al. 2016) in d), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	162
A.2	Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Verlaufsbestimmung der Leitungen, eigene Abbildung . . . . .	164
A.3	Zuordnung bekannter, verbreiteter und ausgewählter Teillösungen zu den Teilfunktionen der Leitungsförderung für den Funktionsprototyp des 3DConFil-Verfahrens, strukturiert mit einem Ordnungsschema nach Gericke et al. (2021a, S. 281 bis S. 285), eigene Abbildung mit eigenen schematischen Abbildungen . . . . .	166
A.4	Abschätzung der Biegewechselereignisse anhand eines an der Gestaltung eines Turms angelehnten Beispielbauteils als isometrische Ansicht in a) und als Draufsicht in b) sowie anhand eines an der Gestaltung einer Armablage angelehnten Beispielbauteils als isometrische Ansicht in c) und als Draufsicht in d), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	170
A.5	Schematische Darstellung des Aufbaus des Riemenextruders, eigene Abbildung . . . . .	173
A.6	Schematische Darstellung des Aufbaus des Zwischenspeichers in der Draufsicht in a) und als Schnittdarstellung in b), eigene Abbildungen . . . . .	174
A.7	CAD-Modelle der weiteren Teilsysteme der Förderstrecke mit der Leitungsklemmeinheit unter der Bauplattform in a), der Umlenkung der Leitung auf dem Funktionsprototyp in b), der temporären Feststelleinheit der Leitung zwischen Zwischenspeicher und Hauptspeicher in c) und einer Trenneinheit als Gestaltvariation der Klemmeinheit in d), eigene Abbildungen a) bis d) . . . . .	175

---

# Tabellenverzeichnis

---

2.1	Integrierbare Funktionsträger unter Einsatz des additiven FFF-Verfahrens . . . . .	22
3.1	Nutzen und Nachteile der Integralbauweise, deren Ergebnis zur Teilereduktion dem Ergebnis der Funktionsintegration entspricht, Auszug nach Ehrlenspiel et al. (2017, S. 600 bis S. 603) . . . . .	36
5.1	Berücksichtigte Parameter biegeschlaffer Leitungen . . . . .	56
5.2	Initiale Anforderungsliste an das 3DConFil-Verfahren . . . . .	57
5.3	Tabelle der variierten Parameter im Rahmen der experimentellen Untersuchung der Leitungsverläufe . . . . .	67
5.4	Wirkgrößen und Wirkelemente der Fertigungsschritte des 3DConFil-Verfahrens . . .	80
5.5	Auszug der Anforderungsliste der 3DConFil-Fertigungsmaschine . . . . .	82
5.6	Anforderungsliste des 3DConFil-Verfahrens zur Softwarekette . . . . .	97
7.1	Anforderungen an das hybrid-integrierte additive Gleitlagergehäuse basierend auf Steffan et al. (2023b, S. 1165 bis S. 1167) . . . . .	140
A.1	Definitionen von Funktionsintegration im Stand der Forschung . . . . .	158
A.2	Lösungen der Verbindungstechnik zur Verbindung von Grundkörper und integrierter Leitung mit etablierten Verbindungstechniken in Anlehnung an Ehrenstein (2004) .	160
A.3	Berücksichtigte kommerzielle Anbieter von Endapplikationen für Leitungsschnittstellen, Sensorik und Aktorik . . . . .	179
A.4	Anforderungsliste an die Fertigungsmaschine des 3DConFil-Verfahrens in Form eines Funktionsprototyps . . . . .	180
A.5	Leitungen zur experimentellen Überprüfung des Leitungsverlaufs . . . . .	185

---

# Literatur

---

- 3dGence America, Inc. (2022):** *Industry F340*. Online verfügbar unter <https://3dgence.com/3d-printers/industry-f340/>, zuletzt geprüft am 17.09.2022.
- Abele, E.; Reinhart, G. (2011):** *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-446-42595-8. DOI: 10.3139/9783446428058.
- Achillas, C.; Aidonis, D.; Iakovou, E.; Thymianidis, M.; Tzetzis, D. (2015):** *A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 37 (1), S. 328–339. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.07.014.
- Adam, G. A. O. (2015):** *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*. Dissertation, Universität Paderborn. In: *Forschungsberichte des Direct Manufacturing Research Centers*. Hrsg. von Zimmer, D. Bd. 1. Aachen: Shaker Verlag. ISBN: 978-3-8440-3474-5.
- Aguilera, E.; Ramos, J.; Espalin, D.; Cedillos, F.; Muse, D.; Wicker, R.; MacDonald, E. (2013):** *3D Printing of Electro Mechanical Systems*. In: *Proceedings for the 2013 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 950–961. DOI: 10.26153/tsw/15649.
- Ahmels, L.; Bott, A.-K.; Bruder, E.; Gibbels, M.; Gramlich, S.; Hansmann, M.; Karin, I.; Kohler, M.; Lipp, K.; Melz, T.; Müller, C.; Neufeld, D.; Niehuesbernd, J.; Roos, M.; Tomasella, A.; Ulbrich, S.; Wagener, R.; Walter, A. (2017):** *Manufacturing Induced Properties: Determination, Understanding, and Beneficial Use*. In: *Manufacturing Integrated Design: Sheet Metal Product and Process Innovation*. Hrsg. von Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. Cham: Springer International Publishing AG, S. 99–145. ISBN: 978-3-319-52376-7. DOI: 10.1007/978-3-319-52377-4\_4.
- Alafaghani, A.; Qattawi, A.; Alrawi, B.; Guzman, A. (2017):** *Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach*. In: *Procedia Manufacturing* 10, S. 791–803. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.079.
- Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E. (2015):** *Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*: Stuttgart, 19. Juni 2015; Hrsg. von Binz, H.; Fraunhofer IRB-Verlag, S. 1–10.

- 
- Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S. (2017):** *PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads*. In: *Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research* 81 (1), S. 13–31. DOI: 10.1007/s10010-016-0210-0.
- Albers, A.; Zimmermann, V.; Marthaler, F.; Bursac, N.; Duehr, K.; Spadinger, M. (2021):** *Selection of reference system elements in the model of PGE - Product Generation Engineering: method for the integration of customer and user satisfaction in product planning*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Gothenburg, Sweden., S. 2611–2620. DOI: 10.1017/pds.2021.522.
- Albers A.; Bursac N.; Urbanec J.; Lüdcke R.; Rachenkova G. (2014):** *Knowledge Management in Product Generation Development – an empirical study*. In: *Proceedings of the 25th Symposium for Design for X*. Hrsg. von Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. Hamburg: TuTech Verlag, S. 13–24. ISBN: 978-3-941492-79-0.
- Alfaifi, A.; Saleh, M.; Abdullah, F. M.; Al-Ahmari, A. M. (2020):** *Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review*. In: *Sustainability* 12 (19), 7936. DOI: 10.3390/su12197936.
- Anycubic Technology Co., Ltd (2022):** *Predator*. Online verfügbar unter <https://www.anycubic.com/products/anycubic-predator-fdm-printer>, zuletzt geprüft am 28. 08. 2022.
- Arduino.cc (2022a):** *Nano*. Online verfügbar unter <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>, zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.
- Arduino.cc (2022b):** *UNO R3*. Online verfügbar unter <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>, zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.
- Arena, A.; Pacitti, A.; Lacarbonara, W. (2016):** *Nonlinear response of elastic cables with flexural-torsional stiffness*. In: *International Journal of Solids and Structures* 87, S. 267–277. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.09.019.
- Armillotta, A. (2006):** *Assessment of surface quality on textured FDM prototypes*. In: *Rapid Prototyping Journal* 12 (1), S. 35–41. DOI: 10.1108/13552540610637255.
- Asadollahi-Yazdi, E.; Gardan, J.; Lafon, P. (2018):** *Multi-Objective Optimization of Additive Manufacturing Process*. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), S. 152–157. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.250.
- Atzeni, E.; Iuliano, L.; Minetola, P.; Salmi, A. (2010):** *Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts*. In: *Rapid Prototyping Journal* 16 (5), S. 308–317. DOI: 10.1108/13552541011065704.
- Atzeni, E.; Salmi, A. (2012):** *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62, S. 1147–1155. DOI: 10.1007/s00170-011-3878-1.
- Autodesk Inc. (2023a):** *Fusion 360*. Online verfügbar unter <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>, zuletzt geprüft am 18. 04. 2023.



- 
- Autodesk Inc. (2023b):** *Inventor*. Online verfügbar unter <https://www.autodesk.de/products/inventor/overview>, zuletzt geprüft am 18.04.2023.
- Baldinger, M.; Leutenecker, B.; Rippel, M. (2013):** *Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren*. In: *Industrie Management* 29 (2). Berlin: GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, S. 11-14. Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?hl=en&lr=&id=ZZ91qHi5O7EC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Strategische+Relevanz+generativer+Fertigungsverfahren&ots=pe7pfl0x-i&sig=E5gEtTGN5y920eTMVmtXIOT5048&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Strategische%20Relevanz%20generativer%20Fertigungsverfahren&f=false](https://books.google.de/books?hl=en&lr=&id=ZZ91qHi5O7EC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Strategische+Relevanz+generativer+Fertigungsverfahren&ots=pe7pfl0x-i&sig=E5gEtTGN5y920eTMVmtXIOT5048&redir_esc=y#v=onepage&q=Strategische%20Relevanz%20generativer%20Fertigungsverfahren&f=false), zuletzt geprüft am 23.01.2024.
- BASF 3D Printing Solutions BV (2022):** *Technisches Datenblatt - Ultrafuse PC GF30*. Online verfügbar unter [https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Reinforced%20Filaments/PC%20GF30/TDS/Ultrafuse\\_PC\\_GF30\\_TDS\\_DE\\_v1.1.pdf](https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Reinforced%20Filaments/PC%20GF30/TDS/Ultrafuse_PC_GF30_TDS_DE_v1.1.pdf), zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Baumers, M.; Dickens, P.; Tuck, C.; Hague, R. (2016):** *The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push*. In: *Technological Forecasting and Social Change* 102, S. 193–201. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.02.015.
- Becker, R.; Grzesiak, A.; Henning, A. (2005):** *Rethink assembly design*. In: *Assembly Automation* 25 (4), S. 262–266. DOI: 10.1108/01445150510626370.
- Bender, B.; Gericke, K. (2021a):** *Entwickeln der Anforderungsbasis: Requirements Engineering*. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 169–209. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_7.
- Bender, B.; Gericke, K.; Heusel, J.; Bronnhuber, T.; Helms, O.; Krzywinski, J.; Wölfel, C.; Klocke, F.; Dilger, K.; Müller, R.; Ehlers, T.; Lachmayer, R. (2021b):** *Gestaltungsrichtlinien*. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 567–828. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_16.
- Bici, M.; Brischetto, S.; Campana, F.; Ferro, C. G.; Seclì, C.; Varetto, S.; Maggiore, P.; Mazza, A. (2018):** *Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 67, S. 215–220. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.202.
- Birkhofer, H.; Schulze, K.; Zhao, S.; Sarnes, J. (2018):** *Umweltgerechtes Konstruieren*. In: *Handbuch Konstruktion*. 2. Aufl. Hrsg. von Rieg, F.; Steinhilper, R. München: Carl Hanser Verlag, S. 599–620. ISBN: 978-3-446-45224-4. DOI: 10.3139/9783446456198.022.
- Böge, A.; Böge, W., Hrsg. (2021a):** *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 24. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-30272-6. DOI: 10.1007/978-3-658-30273-3.

- 
- Böge, G.; Böge, W. (2021b):** *Lager*. In: Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 24. Aufl. Hrsg. von Böge, A.; Böge, W. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 829–866. ISBN: 978-3-658-30272-6. DOI: 10.1007/978-3-658-30273-3\_43.
- Bönig, J. (2016):** *Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation*. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. In: Fertigungstechnik - Erlangen 281. Hrsg. von Franke, J., Merklein, M. und Schmidt, M. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag. ISBN: 978-3-87525-405-1. DOI: 10.25593/978-3-87525-405-1.
- Bonnard, R.; Hascoët, J.-Y.; Mognol, P. (2019):** *Data model for additive manufacturing digital thread: state of the art and perspectives*. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 32 (12), S. 1170–1191. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690681.
- Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A. (2010):** *Product Design for Manufacture and Assembly*. 3. Aufl. Boca Raton, London, New York: CRC Press. ISBN: 978-1-4200-8927-1.
- Bör, J. (2018):** *Kabel und Leitungen für bewegte Industrieanwendungen: Im Zeitalter von Industrie 4.0*. Berlin: VDE-Verlag. ISBN: 978-3-8007-4379-7.
- BP Europa SE (2020):** *Sicherheitsdatenblatt - FVA-Versuchel Nr. 3 mit 4% A99 - Produktcode 456096-DE04*. Ausgabedatum: 2020-08-21. Hamburg: BP Europa SE.
- Bralla, J. G., Hrsg. (1999):** *Design for manufacturability handbook*. 2. Aufl. New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-150178-1.
- Braun, A. (2013):** *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Serie: Forschungsberichte IPEK Bd. 72. Hrsg. von Albers, A.. Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung (IPEK). DOI: 10.5445/IR/1000040221.
- Brecher, C.; Krüger, J.; Uhlmann, E.; Verl, A., Hrsg. (2010):** *Hybride Technologien in der Produktion*. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 675. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 978-3-18-367502-9.
- Brecher, C.; Weck, M. (2017):** *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-46566-0. DOI: 10.1007/978-3-662-46567-7.
- Brinker, J.; Gembarski, P. C.; Hagen, S.; Thomas, O. (2020):** *Anwendungspotenziale von Additive Repair und Refurbishment für Service-orientierte Geschäftsmodelle*. In: Konstruktion für die Additive Fertigung 2019. Hrsg. von Lachmayer, R.; Rettschlag, K.; Kaierle, S. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 43–54. ISBN: 978-3-662-61148-7. DOI: 10.1007/978-3-662-61149-4\_4.
- Bürklin GmbH & Co. KG (2022):** *Steckverbinder*. Online verfügbar unter <https://www.buerklin.com/de/c/steckverbinder/40000000/>, zuletzt geprüft am 30. 09. 2022.

- 
- Burton, M. J. (2005):** *Design for rapid manufacture: developing an appropriate knowledge transfer tool for industrial designers*. Dissertation. Loughborough University, Loughborough.
- Campbell, R. I.; Jee, H.; Kim, Y. S. (2013):** *Adding product value through additive manufacturing*. In: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Hrsg. von Lindemann, U.; Srinivasan, V.; Kim, Y. S.; Lee, S. W.; Clarkson, J.; Cascini, G. Design Society, S. 259–268. ISBN: 978-1-904670-47-6.
- Campbell, T.; Williams, C.; Ivanova, O.; Garrett, B. (2011):** *Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. In: Strategic Foresight Report. Washington: Atlantic Council. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/resrep03564>, zuletzt geprüft am 26.10.2024.
- Carranza, G. T.; Robles, U.; Valle, C. L.; Gutierrez, J. J.; Rumpf, R. C. (2019):** *Design and Hybrid Additive Manufacturing of 3-D/Volumetric Electrical Circuits*. In: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 9 (6), S. 1176–1183. DOI: 10.1109/TCP MT.2019.2892389.
- Castillo, S.; Muse, D.; Medina, F.; MacDonald, E.; Wicker, R. (2009):** *Electronics Integration in Conformal Substrates Fabricated with Additive Layered Manufacturing*. In: Proceedings for the 2009 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, S. 730–737. DOI: 10.26153/tsw/15146.
- Chacón, J. M.; Caminero, M. A.; García-Plaza, E.; Núñez, P. J. (2017):** *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. In: Materials & Design 124, S. 143–157. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- Chacón, J. M.; Caminero, M. A.; Núñez, P. J.; García-Plaza, E.; García-Moreno, I.; Reverte, J. M. (2019):** *Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties*. In: Composites Science and Technology 181, 107688. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107688.
- Conner, B. P.; Manogharan, G. P.; Martof, A. N.; Rodomsky, L. M.; Rodomsky, C. M.; Jordan, D. C.; Limperos, J. W. (2014):** *Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services*. In: Additive Manufacturing 1-4, S. 64–76. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.005.
- Continuous Composites Inc. (2024):** *Technology*. Online verfügbar unter <https://www.continuouscomposites.com/technology>, zuletzt geprüft am 18.01.2024.
- Coogan, T. J.; Kazmer, D. O. (2019):** *Modeling of interlayer contact and contact pressure during fused filament fabrication*. In: Journal of Rheology 63 (4), S. 655–672. DOI: 10.1122/1.5093033.
- Cosmic Corporation (2023):** *PDSBC Series - XY Series Automated Point Soldering Robot System*. Online verfügbar unter <http://www.cosmic-corp.com/product.html>, zuletzt geprüft am 01.06.2023.

- 
- De Bernardez, L.; Campana, G.; Mele, M.; Sanguineti, J.; Sandre, C.; Mur, S. M. (2023):** *Effects of infill patterns on part performances and energy consumption in acrylonitrile butadiene styrene fused filament fabrication via industrial-grade machine.* In: *Progress in Additive Manufacturing* 8, S. 117–129. DOI: 10.1007/s40964-022-00316-4.
- Deters, L.; Bartel, D. (2018):** *Gleitlagerungen.* In: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau.* 25. Aufl. Hrsg. von Grote, K.-H.; Bender, B.; Göhlich, D. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 540–554. ISBN: 978-3-662-54804-2. DOI: 10.1007/978-3-662-54805-9\_48.
- Dey, A.; Yodo, N. (2019):** *A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics.* In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3 (3): 64. (Unter der CC BY 4.0 Lizenz <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). DOI: 10.3390/jmmp3030064.
- Dickson, A. N.; Abourayana, H. M.; Dowling, D. P. (2020):** *3D Printing of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Filament Fabrication - A Review.* In: *Polymers* 12 (10): 2188. DOI: 10.3390/polym12102188.
- Diegel, O.; Singamneni, S.; Huang, B.; Gibson, I. (2011):** *Curved Layer Fused Deposition Modeling in Conductive Polymer Additive Manufacturing.* In: *Advanced Materials Research* 199-200, S. 1984–1987. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.199-200.1984.
- Diegel, O.; Singamneni, S.; Reay, S.; Withell, A. (2010):** *Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing.* In: *Journal of Sustainable Development* 3 (3), S. 68–75. DOI: 10.5539/jsd.v3n3p68.
- Dietrich, J. (2018):** *Praxis der Umformtechnik: Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen.* 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-19529-8. DOI: 10.1007/978-3-658-19530-4.
- DIN 31652-1 (2017):** *Gleitlager - Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb - Teil 1: Berechnung von Kreiszyylinderlagern.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2017-01. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 31692-2 (1996):** *Gleitlager - Teil 2: Temperaturüberwachung.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 1996-03. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 66025-1 (1983):** *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen: Allgemeines.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 1983-01. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 8580 (2022):** *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2022-12. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9000 (2015):** *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2015-11. Berlin: Beuth Verlag.

- 
- DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022):** *Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2022-03. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO/ASTM 52901 (2018):** *Additive Fertigung – Grundlagen – Anforderungen an erworbene additiv gefertigte Bauteile (ISO/ASTM 52901:2017); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52901:2018.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2018-12. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO/ASTM 52915 (2020):** *Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2 (ISO/ASTM 52915:2020); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52915:2020.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2020-11. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO/ASTM 52950 (2021):** *Additive Fertigung - Grundlagen - Überblick über die Datenverarbeitung (ISO/ASTM 52950:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52950:2021.* Hrsg. von Deutsches Institut für Normung e.V.. Ausgabedatum: 2021-05. Berlin: Beuth Verlag.
- Doege, E.; Behrens, B.-A. (2016):** *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen.* 3 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-43890-9. DOI: 10.1007/978-3-662-43891-6.
- Duet3D Limited (2024):** *Duet3 Products.* Online verfügbar unter <https://www.duet3d.com/products>, zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Duffy, A. H. B.; Andreasen, M. M.; Maccallum, K. J.; Reijers, L. N. (1993):** *Design Coordination for Concurrent Engineering.* In: *Journal of Engineering Design* 4 (4), S. 251–265. DOI: 10.1080/09544829308914785.
- E3D-Online Ltd. (2022):** *V6 All-Metal Hot End.* Online verfügbar unter <https://e3d-online.com/products/v6-all-metal-hotend>, zuletzt geprüft am 17.09.2022.
- EFB-Elektronik GmbH (2022):** *Glasfaser Stecker und Kupplungen.* Online verfügbar unter <https://www.efb-elektronik.de/produkte/glasfaserverkabelung/glasfaser-stecker-und-kupplungen/>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.
- Ehrenstein, G. W., Hrsg. (2004):** *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik.* München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3446226685.
- Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2017):** *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.* 6. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44089-0.
- Eichenhofer, M.; Wong, J. C. H.; Ermanni, P. (2017):** *Continuous lattice fabrication of ultra-lightweight composite structures.* In: *Additive Manufacturing* 18, S. 48–57. DOI: 10.1016/j.addma.2017.08.013.
- eku Kabel & Systeme GmbH & Co. KG (2023):** *Kabel und Komponenten.* Online verfügbar unter <https://www.eku.de/produkt-kategorie/glasfaser/>, zuletzt geprüft am 23.06.2023.

- 
- Espalin, D.; MacDonald, E.; Wicker, R. B. (2016):** *Structurally integrating metal objects into additive manufactured structures*. WO2016149181A1. [US]: Board of Regents, The University of Texas System, US, Offenlegung am 22.09.2016. Online verfügbar unter <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=WO002016149181A1>, zuletzt geprüft am 31. 08. 2024.
- Espalin, D.; Muse, D. W.; MacDonald, E.; Wicker, R. B. (2014):** *3D Printing multifunctionality: structures with electronics*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72, S. 963–978. DOI: 10.1007/s00170-014-5717-7.
- Fanous, M.; Gold, S.; Muller, S.; Hirsch, S.; Ogorka, J.; Imanidis, G. (2020):** *Simplification of fused deposition modeling 3D-printing paradigm: Feasibility of 1-step direct powder printing for immediate release dosage form production*. In: *International Journal of Pharmaceutics* 578: 119124. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.119124.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2013a):** *Der Produktentstehungsprozess (PEP)*. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Hrsg. von Feldhusen, J.; Grote, K.-H. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 11–24. ISBN: 978-3-642-29568-3. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0\_2.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J.; Tretow, G. (2013b):** *Technische Systeme*. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Hrsg. von Feldhusen, J.; Grote, K.-H. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 237–279. ISBN: 978-3-642-29568-3. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0\_4.
- Festo Vertrieb GmbH & Co. KG (2022):** *Verbindungstechnik*. Online verfügbar unter [https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/verbindungstechnik-id\\_pim33/](https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/verbindungstechnik-id_pim33/), zuletzt geprüft am 30. 09. 2022.
- Flowers, P. F.; Reyes, C.; Ye, S.; Kim, M. J.; Wiley, B. J. (2017):** *3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament*. In: *Additive Manufacturing* 18, S. 156–163. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.002.
- Freund, R.; Philipp, D.; Vietor, T. (2021):** *Additive Materialextusion von Glas und mineralischen Materialien*. In: *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Hrsg. von Lachmayer, R.; Rettschlag, K.; Kaieler, S. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 183–200. ISBN: 978-3-662-63029-7. DOI: 10.1007/978-3-662-63030-3\_10.
- Gafurov, J. K.; Mardonov, B.; Gofurov, K.; Dushamov, O. S.; Ergashev, O. O.; Bobajonov, H. T. (2018):** *Yarn Deformation with view of its structural structure*. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 459: 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/459/1/012042.
- Gao, M.; Li, Y.; Choi, J. (2022):** *Triboelectric pad journal bearing for self-powered condition monitoring*. In: *Nano Energy* 103, Part B, 107851. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107851.
- Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Wang, C. C. L.; Shin, Y. C.; Zhang, S.; Zavattieri, P. D. (2015):** *The status, challenges, and future of additive*

- 
- manufacturing in engineering*. In: Computer-Aided Design 69, S. 65–89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- Garcia, D.; Jones, M. E.; Zhu, Y.; Yu, H. Z. (2018):** *Mesoscale design of heterogeneous material systems in multi-material additive manufacturing*. In: Journal of Materials Research 33 (1), S. 58–67. DOI: 10.1557/jmr.2017.328.
- Gausemeier, J.; Echterhoff, N.; Wall, M. (2013):** *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements*. Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, Paderborn. Online verfügbar unter [https://www.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06\\_Downloads/01\\_Studies/DMRC\\_Study\\_Part\\_3.pdf](https://www.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_3.pdf), zuletzt geprüft am 09.02.2024.
- Gebhardt, A. (2016):** *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion*. 5. Aufl. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44401-0.
- Gebhardt, A.; Kessler, J.; Schwarz, A. (2019a):** *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-45285-5.
- Gebhardt, A.; Kessler, J.; Thurn, L. (2019b):** *3D printing - Understanding additive manufacturing*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-1-56990-702-3.
- Gebler, M.; Schoot Uiterkamp, A. J. M.; Visser, C. (2014):** *A global sustainability perspective on 3D printing technologies*. In: Energy Policy 74, S. 158–167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- Geis, J.; Merschroth, H.; Sommer, T.; Kirchner, E.; Weigold, M. (2021):** *Konstruktive Potentiale einer Mikrostrukturgradierung von topologieoptimierten L-PBF-Bauteilen*. In: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X. Hrsg. von Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. The Design Society. DOI: 10.35199/dfx2021.08.
- Gericke, K.; Bender, B.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2021a):** *Entwickeln von Wirkstrukturen*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 255–306. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_10.
- Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2021b):** *Der Produktentwicklungsprozess*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 57–93. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_4.
- Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2021c):** *Funktionen und deren Strukturen*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 233–254. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_9.
- Gericke, K.; Eckert, C.; Stacey, M. (2017):** *What do we need to say about a design method?* In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17), Vol. 7: Design

- 
- Theory and Research Methodology, Vancouver, Canada. Hrsg. von Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; van der Loos, M. Glasgow: The Design Society, S. 101–110. ISBN: 978-1-904670-95-7.
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. (2021):** *Additive Manufacturing Technologies*. 3. Aufl. Cham: Springer Nature Switzerland AG. ISBN: 978-3-030-56126-0. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.
- Glasschröder, J.; Prager, E.; Zaeh, M. F. (2015):** *Powder-bed-based 3D-printing of function integrated parts*. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (2), S. 207–215. DOI: 10.1108/RPJ-12-2014-0172.
- Glasschröder, J. H. (2018):** *Additiv gefertigte Werkstücke mit integrierten elektrischen Schaltungen unter Nutzung des 3D-Druckprozesses*. Dissertation. Technische Universität München, München. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:91-diss-20180628-1421825-1-6>, zuletzt geprüft am 24. 01. 2023.
- Gramlich, S. (2013):** *Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln: Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: *Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente*, Bd. 423. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 978-3-18-342301-9.
- Gramlich, S.; Ionescu, E.; Kirchner, E.; Schäfer, K.; Schork, S. (2018):** *Vom Material zur Produktinnovation: Eine kritische Betrachtung der Innovationskette*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-20663-5. DOI: 10.1007/978-3-658-20664-2.
- Gramlich, S.; Roos, M.; Ahmels, L.; Kaune, V.; Müller, C.; Bauer, O.; Karin, I.; Tomasella, A.; Melz, T. (2015):** *Ein wissenschaftlicher fertigungsintegrierender Produktentwicklungsansatz*. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*. Hrsg. von Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Grégoire, M.; Schömer, E. (2007):** *Interactive simulation of one-dimensional flexible parts*. In: *Computer-Aided Design* 39 (8), S. 694–707. DOI: 10.1016/j.cad.2007.05.005.
- Groche, P.; Schmitt, W.; Bohn, A.; Gramlich, S.; Ulbrich, S.; Günther, U. (2012):** *Integration of manufacturing-induced properties in product design*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (1), S. 163–166. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.041.
- Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A. (2019):** *Haftung und Reibung*. In: *Technische Mechanik 1 - Statik*. 14. Aufl. Hrsg. von Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 245–263. ISBN: 978-3-662-59156-7. DOI: 10.1007/978-3-662-59157-4\_9.
- Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A. (2021):** *Balkenbiegung*. In: *Technische Mechanik 2 - Elastostatik*. 14. Aufl. Hrsg. von Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W. A. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 77–158. ISBN: 978-3-662-61861-5. DOI: 10.1007/978-3-662-61862-2\_4.



- 
- Hällgren, S.; Pejryd, L.; Ekengren, J. (2016):** *3D Data Export for Additive Manufacturing - Improving Geometric Accuracy*. In: *Procedia CIRP* 50, S. 518–523. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.046.
- Harder, A.; Hausmann, M.; Kraus, B.; Kirchner, E.; Hasse, A. (2022):** *Sensory Utilizable Design Elements: Classifications, Applications and Challenges*. In: *Applied Mechanics* 3 (1), S. 160–173. DOI: 10.3390/applmech3010012.
- Hauschildt, J. (2005):** *Dimensionen der Innovation*. In: *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement: Strategie - Umsetzung - Controlling*. Hrsg. von Albers, S.; Gassmann, O. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 23–39. ISBN: 978-3-322-90787-5. DOI: 10.1007/978-3-322-90786-8\_2.
- Heidemann, B. (2001):** *Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: *Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente*, Nr. 351. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 3-18-335101-3.
- Heinen, J. J.; Hoberg, K. (2019):** *Assessing the potential of additive manufacturing for the provision of spare parts*. In: *Journal of Operations Management* 65 (8), S. 810–826. DOI: 10.1002/joom.1054.
- HELU KABEL GmbH (2015):** *Auswahltabellen für Schleppkettenleitungen*. KL&Z Ausgabe 27. Online verfügbar unter [https://www.helukabel.com/publication/DE/CATALOGUES/CW/Auswahltabellen\\_DE/Kap\\_C\\_156\\_193\\_dt\\_link.pdf](https://www.helukabel.com/publication/DE/CATALOGUES/CW/Auswahltabellen_DE/Kap_C_156_193_dt_link.pdf), zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Herrmann, J. W.; Cooper, J.; Gupta, S. K.; Hayes, C. C.; Ishii, K.; Kazmer, D.; Sandborn, P. A.; Wood, W. H. (2004):** *New Directions in Design for Manufacturing*. In: *Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 3d: 8th Design for Manufacturing Conference. Salt Lake City, Utah, USA, S. 853–861. ASME. DOI: 10.1115/DETC2004-57770.
- Hirsch, A.; Bahmann, W. (2021):** *Baugruppen von Werkzeugmaschinen*. In: *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 24. Aufl. Hrsg. von Böge, A.; Böge, W. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1255–1305. ISBN: 978-3-658-30272-6. DOI: 10.1007/978-3-658-30273-3\_61.
- Hirt, G.; Bleck, W.; Bobzin, K.; Brecher, C.; Bührig-Polazcek, A.; Haberstroh, E.; Klocke, F.; Loosen, P.; Michaeli, W.; Poprawe, R.; Reisgen, U.; Taleb Araghi, B.; Arntz, K.; Bagcivan, N.; Bambach, M.; Bäuml, S.; Beckemper, S.; Bergweiler, G.; Breitbach, T.; Buchholz, S.; Bültmann, J.; Diettrich, J.; Do-Khac, D.; Eilbracht, S.; Emonts, M.; Flock, D.; Gerhardt, K.; Gillner, A.; Göttmann, A.; Grönlund, O.; Hartmann, C.; Heinen, D.; Herfs, W.; Hermani, J.-P.; Holtkamp, J.; Ivanov, T.; Jakob, M.; Janssen, A.; Karlberger, A.; Klaiber, F.; Kutschmann, P.; Neuß, A.; Prahl, U.; Roderburg, A.; Rosen, C.-J.; Rösner, A.; Saeed-Akbari, A.; Scharf, M.; Scheik, S.; Schleser, M.; Schöngart, M.; Stein, L.; Steiners, M.; Stollenwerk, J.; Theiß, S.; Wunderle, J. (2011):** *Hybride Produktionssysteme*. In: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Hrsg. von Brecher, C. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 465–745. ISBN: 978-3-642-20692-4. DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1\_5.

- 
- Hoernow, G.; Meißner, T.; Henschler, S.; Simon, S. (2021):** *Konstruktionspraxis im Maschinenbau - Vom Einzelteil zum Maschinendesign*. 5. Aufl. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-46499-5.
- Holmström, J.; Partanen, J. (2014):** *Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products*. In: *Supply Chain Management: An International Journal* 19 (4), S. 421–430. DOI: 10.1108/SCM-10-2013-0387.
- Hopkinson, N.; Dicknes, P. (2003):** *Analysis of rapid manufacturing - using layer manufacturing processes for production*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 217 (1), S. 31–39. DOI: 10.1243/095440603762554596.
- Huang, Y.; Leu, M. C.; Mazumder, J.; Donmez, A. (2015):** *Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (1): 014001. ASME. DOI: 10.1115/1.4028725.
- Huber, C.; Abert, C.; Bruckner, F.; Groenefeld, M.; Muthsam, O.; Schuschnigg, S.; Sirak, K.; Thanhoffer, R.; Teliban, I.; Vogler, C.; Windl, R.; Suess, D. (2016):** *3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer*. In: *Applied Physics Letters* 109 (16): 162401. DOI: 10.1063/1.4964856.
- Hubka, V. (1984):** *Theorie technischer Systeme - Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. 2. Aufl. Hochschultext. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag. ISBN: 3-540-12953-7.
- Hubka, V.; Eder, W. E. (1992):** *Einführung in die Konstruktionswissenschaft - Übersicht, Modell, Anleitungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag. ISBN: 3-540-54832-7.
- Hull, C. W. (1986):** *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US4575330A. [EN]: UVP, Inc., US, Erteilung am 11.03.1986.
- ISO 20653 (2023):** *Road vehicles — Degrees of protection (IP code) — Protection of electrical equipment against foreign objects, water and access*. Publikationsdatum: 2023-08. International Organization for Standardization.
- ISO 6983-1 (2009):** *Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words - Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*. Publikationsdatum: 2009-12. International Organization for Standardization.
- Jacob, A.; Künneke, T.; Lieneke, T.; Baumann, T.; Stricker, N.; Zimmer, D.; Lanza, G. (2018a):** *Iterative Produktentwicklung und Produktionsplanung für die Additive Fertigung*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (11). München: Carl Hanser Verlag, S. 742–745. DOI: 10.3139/104.112005.
- Jacob, A.; Steimer, S.; Stricker, N.; Häfner, B.; Lanza, G. (2019):** *Integrating product function design, production technology optimization and process equipment planning on the example of hybrid additive manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 86, S. 222–227. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.013.

- 
- Jacob, A.; Windhuber, K.; Ranke, D.; Lanza, G. (2018b):** *Planning, Evaluation and Optimization of Product Design and Manufacturing Technology Chains for New Product and Production Technologies on the Example of Additive Manufacturing.* In: *Procedia CIRP* 70, S. 108–113. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.049.
- Jaksic, N. I.; Desai, P. D. (2018):** *Characterization of resistors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament.* In: *Procedia Manufacturing* 17, S. 37–44. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.010.
- Jeon, S. (2019):** *GNEA GRBL V1.1h - GRBL Controller.* Online verfügbar unter <https://github.com/gnea/grbl>, zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.
- Joshi, P. C.; Dehoff, R. R.; Duty, C. E.; Peter, W. H.; Ott, R. D.; Love, L. J.; Blue, C. A. (2012):** *Direct digital additive manufacturing technologies: Path towards hybrid integration.* In: *2012 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings, Gatlinburg, TN, USA. IEEE*, S. 1–4. ISBN: 978-1-4673-2482-3. DOI: 10.1109/FIIW.2012.6378353.
- Khatri, B.; Lappe, K.; Habedank, M.; Mueller, T.; Megnin, C.; Hanemann, T. (2018):** *Fused Deposition Modeling of ABS-Barium Titanate Composites: A Simple Route towards Tailored Dielectric Devices.* In: *Polymers* 10 (6): 666. DOI: 10.3390/polym10060666.
- Kim, S. K.; Kazmer, D. O.; Colon, A. R.; Coogan, T. J.; Peterson, A. M. (2021):** *Non-Newtonian modeling of contact pressure in fused filament fabrication.* In: *Journal of Rheology* 65 (1), S. 27–42. DOI: 10.1122/8.0000052.
- King, A. M.; Burgess, S. C.; Ijomah, W.; McMahon, C. A. (2006):** *Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?* In: *Sustainable Development* 14 (4), S. 257–267. DOI: 10.1002/sd.271.
- Kirchner, E.; Neudörfer, A. (2021):** *Grundregeln der Gestaltung.* In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag*, S. 467–523. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_14.
- Kirchner, E.; Steffan, K.-E.; Müller, T. M. (2022):** *Vorrichtung und Verfahren zur additiven Fertigung einer heterogenen Struktur.* DE102020125109A1. [DE]: Technische Universität Darmstadt, DE, Offenlegung am 31.03.2022. Online verfügbar unter <https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/register?AKZ=1020201251092>, zuletzt geprüft am 20. 06. 2023.
- Klahn, C.; Leutenecker, B.; Meboldt, M. (2014):** *Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products.* In: *Procedia CIRP* 21, S. 138–143. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.145.
- Klaus, A.; Becker, D.; Kleiner, M. (2006):** *Three-Dimensional Curved Profile Extrusion – First Results on the Influence of Gravity.* In: *Advanced Materials Research* 10, S. 5–12. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.10.5.

- 
- Knauf Industries (2021):** *Die Autoarmlehne – Ein universelles Element mit vielen Funktionen.* Online verfügbar unter <https://knaufautomotive.com/de/die-autoarmlehne-ein-universelles-element-mit-vielen-funktionen/>, zuletzt geprüft am 13. 06. 2023.
- Knofius, N.; van der Heijden, M. C.; Zijm, W. H. M. (2016):** *Selecting parts for additive manufacturing in service logistics.* In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 27 (7), S. 915–931. DOI: 10.1108/JMTM-02-2016-0025.
- Knoop, F.; Kloke, A.; Schoeppner, V. (2017):** *Quality improvement of FDM parts by parameter optimization.* In: *AIP Conference Proceedings* 1914 (1): 190001. DOI: 10.1063/1.5016790.
- Ko, H.; Moon, S. K.; Hwang, J. (2015):** *Design for additive manufacturing in customized products.* In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16, S. 2369–2375. DOI: 10.1007/s12541-015-0305-9.
- Kodama, H. (1981):** *Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer.* In: *Review of Scientific Instruments* 52 (11), S. 1770–1773. DOI: 10.1063/1.1136492.
- Koller, R. (1985):** *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen des methodischen Konstruierens.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag. ISBN: 3-540-15369-1. DOI: 10.1007/978-3-662-12183-2.
- Komax Holding AG (2023a):** *ADS 112 - Wire Handling.* Online verfügbar unter <https://www.komaxgroup.com/de/products/wire-handling/ads-112>, zuletzt geprüft am 01. 06. 2023.
- Komax Holding AG (2023b):** *Omega 755 - Harness Manufacturing.* Online verfügbar unter <https://www.komaxgroup.com/de/products/harness-manufacturing/omega-755>, zuletzt geprüft am 01. 06. 2023.
- Korpela, M.; Riikonen, N.; Piili, H.; Salminen, A.; Nyrhilä, O. (2020):** *Additive Manufacturing—Past, Present, and the Future.* In: *Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0 - Automation, Adaption and Manufacturing in Finland and Beyond.* Hrsg. von Collan, M.; Michelsen, K.-E. Imprint: Palgrave Macmillan, Cham: Springer Nature Switzerland, S. 17–41. ISBN: 978-3-030-46102-7. DOI: 10.1007/978-3-030-46103-4\_2.
- Kramer, T. R.; Proctor, F. M.; Messina, E. (2000):** *The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3.* Intelligent Systems Division National Institute of Standards and Technology - Technology Administration U.S. Department of Commerce Gaithersburg, Maryland 20899 - NISTIR 6556. Online verfügbar unter [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=823374](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374), zuletzt geprüft am 05. 04. 2023.
- Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C. (2015):** *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4.* In: *Journal of Laser Applications* 27 (S1), S14001. DOI: 10.2351/1.4885235.

- 
- Krause, D.; Gebhardt, N. (2018):** *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-53039-9. DOI: 10.1007/978-3-662-53040-5.
- Krause, D.; Vietor, T.; Inkermann, D.; Hanna, M.; Richter, T.; Wortmann, N. (2021):** *Produktarchitektur*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 335–393. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_12.
- Kristiawan, R. B.; Imaduddin, F.; Ariawan, D.; Ubaidillah; Arifin, Z. (2021):** *A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters*. In: Open Engineering 11 (1), S. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063.
- Kulkarni, P.; Marsan, A.; Dutta, D. (2000):** *A review of process planning techniques in layered manufacturing*. In: Rapid Prototyping Journal 6 (1), S. 18–35. DOI: 10.1108/13552540010309859.
- Kumke, M. (2018):** *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. AutoUni – Schriftenreihe, Bd. 124. Imprint: Springer, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 978-3-658-22208-6. DOI: 10.1007/978-3-658-22209-3.
- Kunz, J.; Lukic, D. (2006):** *Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit in der beanspruchungsgerechten Auslegung*. In: Konstruktion 7/8. Düsseldorf: Springer VDI-Verlag, S. 65–67. Online verfügbar unter [https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3\\_forschung\\_dienstleistung/institute/iwk/mechanische\\_systeme/fachbeitraege/0607\\_biegesteifigkeit\\_und\\_biegefestigkeit.pdf](https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/iwk/mechanische_systeme/fachbeitraege/0607_biegesteifigkeit_und_biegefestigkeit.pdf), zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Kuschmitz, S.; Schirp, A.; Busse, J.; Watschke, H.; Schirp, C.; Vietor, T. (2021):** *Development and Processing of Continuous Flax and Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites by a Modified Material Extrusion Process*. In: Materials 14 (9). DOI: 10.3390/ma14092332.
- Kutuniva, K.; Mäkikangas, J.; Mustakangas, A.; Rautio, T.; Kumpula, J.; Mäntyjärvi, K. (2018):** *DFAM Based Multi-Material 3D Printing Using Conductive and Flexible Filaments*. In: Key Engineering Materials 786, S. 364–370. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.786.364.
- Lachmayer, R.; Ehlers, T.; Lippert, R. B. (2022a):** *Grundlagen*. In: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. 2. Aufl. Hrsg. von Lachmayer, R.; Ehlers, T.; Lippert, R. B. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 7–19. ISBN: 978-3-662-65923-6. DOI: 10.1007/978-3-662-65924-3\_2.
- Lachmayer, R.; Ehlers, T.; Lippert, R. B. (2022b):** *Kreative Methoden*. In: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. 2. Aufl. Hrsg. von Lachmayer, R.; Ehlers, T.; Lippert, R. B. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 37–87. ISBN: 978-3-662-65923-6. DOI: 10.1007/978-3-662-65924-3\_4.
- Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (2020a):** *Die Entwicklungsumgebung*. In: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Hrsg. von Lachmayer, R.; Lippert, R. B. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 99–127. ISBN: 978-3-662-59788-0. DOI: 10.1007/978-3-662-59789-7\_6.

- 
- Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (2020b):** *Grundlagen*. In: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Hrsg. von Lachmayer, R.; Lippert, R. B. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 7–20. ISBN: 978-3-662-59788-0. DOI: 10.1007/978-3-662-59789-7\_2.
- Lachmayer, R.; Lippert, R. B. (2020c):** *Methoden für Vorentwicklung und Konstruktion*. In: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Hrsg. von Lachmayer, R.; Lippert, R. B. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 41–65. ISBN: 978-3-662-59788-0. DOI: 10.1007/978-3-662-59789-7\_4.
- Lashin, G.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2013):** *Hilfsmittel für die Entwicklung und Konstruktion*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Hrsg. von Feldhusen, J.; Grote, K.-H. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 411–457. ISBN: 978-3-642-29568-3. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0\_7.
- Lauwers, B.; Klocke, F.; Klink, A.; Tekkaya, A. E.; Neugebauer, R.; Mcintosh, D. (2014):** *Hybrid processes in manufacturing*. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 (2), S. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
- Laverne, F.; Segonds, F.; Anwer, N.; Le Coq, M. (2015):** *Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study*. In: Journal of Mechanical Design 137 (12), 121701. ASME. DOI: 10.1115/1.4031589.
- Laverne, F.; Segonds, F.; D'Antonio, G.; Le Coq, M. (2016):** *Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal*. In: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 11, S. 279–288. DOI: 10.1007/s12008-016-0314-7.
- Leutenecker-Twelsiek, B.; Klahn, C.; Meboldt, M. (2016):** *Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing*. In: Procedia CIRP 50, S. 408–413. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.016.
- Li, J.; Wasley, T.; Nguyen, T. T.; Ta, V. D.; Shephard, J. D.; Stringer, J.; Smith, P.; Esenturk, E.; Connaughton, C.; Kay, R. (2016):** *Hybrid additive manufacturing of 3D electronic systems*. In: Journal of Micromechanics and Microengineering. 26 (10): 105005. IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/0960-1317/26/10/105005.
- Linde Material Handling (2022):** *Ergonomischer Stapler fahren – ohne Lenkrad*. Online verfügbar unter [https://www.linde-mh.at/de\\_at/technical/News-Detail\\_5202752.html](https://www.linde-mh.at/de_at/technical/News-Detail_5202752.html), zuletzt geprüft am 20. 11. 2022.
- Lindemann, C.; Jahnke, U.; Moi, M.; Koch, R. (2012):** *Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing*. In: Proceedings for the 2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, S. 177–188. DOI: 10.26153/tsw/15341.
- Lindemann, U. (2009):** *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationgerecht anwenden*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN: 978-3-642-01422-2. DOI: 10.1007/978-3-642-01423-9.

- 
- Link, M. (2022):** *Komponentenintegration von Dehnungsmessstreifen mittels pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: Schriftenreihe des PTW: Innovation Fertigungstechnik. Düren: Shaker Verlag. ISBN: 978-3-8440-8621-8.
- Lippert, R. B. (2016):** *Gestaltung von Additive Manufacturing Bauteilen*. In: 3D-Druck beleuchtet - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung. Hrsg. von Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Fahlbusch, T. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 45–55. ISBN: 978-3-662-49055-6. DOI: 10.1007/978-3-662-49056-3\_5.
- Loke, G.; Yuan, R.; Rein, M.; Khudiyev, T.; Jain, Y.; Joannopoulos, J.; Fink, Y. (2019):** *Structured multimaterial filaments for 3D printing of optoelectronics*. In: Nature Communications 10: 4010. DOI: 10.1038/s41467-019-11986-0.
- Ludwig, A. (2022):** *Wie aus einem Guss - Forschungsteam der TU Darmstadt setzt neue Maßstäbe in der Bauteilfertigung*. Technische Universität Darmstadt. Online verfügbar unter [https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles\\_meldungen/archiv\\_2/2022/2022quartal2/news\\_archiv\\_de\\_366144.de.jsp](https://www.tu-darmstadt.de/universitaet/aktuelles_meldungen/archiv_2/2022/2022quartal2/news_archiv_de_366144.de.jsp), zuletzt geprüft am 09. 11. 2024.
- Luo, R. C.; Hsu, L. C.; Hsiao, T. J.; Perng, Y. W. (2020):** *3D Digital Manufacturing via Synchronous 5-Axes Printing for Strengthening Printing Parts*. In: IEEE Access 8, S. 126083–126091. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007772.
- Ma, B.; Meng, C.; Tian, X.; Liu, J.; Wang, S. (2021):** *Research on the Control System and Digital Model of new 5-Axis 3D Printer Based on Stewart Parallel Mechanism*. In: 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) Chongqing, China, S. 1225–1228. ISBN: 978-1-7281-8028-1. DOI: 10.1109/IAEAC50856.2021.9390595.
- MacDonald, E.; Salas, R.; Espalin, D.; Perez, M.; Aguilera, E.; Muse, D.; Wicker, R. B. (2014):** *3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics*. In: IEEE Access 2, S. 234–242. DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2311810.
- Mackay, M. E.; Swain, Z. R.; Banbury, C. R.; Phan, D. D.; Edwards, D. A. (2017):** *The performance of the hot end in a plasticating 3D printer*. In: Journal of Rheology 61 (2), S. 229–236. DOI: 10.1122/1.4973852.
- MakerBot Industries, LLC (2022):** *3D printer Method X technical specifications*. Online verfügbar unter <https://www.makerbot.com/3d-printers/method-x/>, zuletzt geprüft am 17. 09. 2022.
- Malca, C.; Santos, C.; Sena, M.; Mateus, A. (2018):** *Development of SLM cellular structures for injection molds manufacturing*. In: Science and Technology of Materials 30 (1), S. 13–22. DOI: 10.1016/j.stmat.2018.03.001.
- Malone, E.; Berry, M.; Lipson, H. (2008):** *Freeform fabrication and characterization of Zn–air batteries*. In: Rapid Prototyping Journal 14 (3), S. 128–140. DOI: 10.1108/13552540810877987.
- Mani, M.; Witherell, P.; Jee, J. (2017):** *Design Rules for Additive Manufacturing: A Categorization*. In: Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and

- 
- Computers and Information in Engineering Conference. Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference. Cleveland, Ohio, USA. August 6–9, 2017. V001T02A035. ASME. DOI: 10.1115/DETC2017-68446.
- Markforged Inc. (2022):** *Materialdatenblatt Verbundstoffe*. Online verfügbar unter [https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/Translations/DE/Markforged\\_CompositesV5.1\\_de.pdf](https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/Translations/DE/Markforged_CompositesV5.1_de.pdf), zuletzt geprüft am 04. 10. 2022.
- Markforged Inc. (2023):** *3D Printer FX20*. Online verfügbar unter <https://markforged.com/3d-printers/fx20>, zuletzt geprüft am 15. 06. 2023.
- Matthiesen, S. (2021):** *Gestaltung – Prozess und Methoden*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 397–465. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_13.
- McAloone, T. C.; Pigosso, D. C. A. (2021):** *Ökodesign*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 975–1021. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_22.
- McIlroy, C.; Olmsted, P. D. (2017):** *Deformation of an amorphous polymer during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing*. In: Journal of Rheology 61 (2), S. 379–397. DOI: 10.1122/1.4976839.
- Medina, F.; Lopes, A.; Inamdar, A.; Hennessey, R.; Palmer, J.; Chavez, B. D.; Davis, D. W.; Gallegos, P. L.; Wicker, R. (2005):** *Hybrid Manufacturing: Integrating Direct Write and Stereolithography*. In: Proceedings for the 2005 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, S. 39-49. Online verfügbar unter <https://repositories.lib.utexas.edu/items/39e984c9-c384-44fa-b29b-9ddc80111111>, zuletzt geprüft am 09.02.2024.
- Merklein, M.; Junker, D.; Schaub, A.; Neubauer, F. (2016):** *Hybrid Additive Manufacturing Technologies – An Analysis Regarding Potentials and Applications*. In: Physics Procedia 83, S. 549–559. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.057.
- Metzler GmbH (2022):** *Ultraflacher Edelstahl Drucktaster rostfrei IP67 - Einbau Durchmesser Ø 19 mm - Tastend - LED Weiß - Artikelnummer K19-TF-W*. Online verfügbar unter <https://www.led-taster.de/Metzler-ultraflacher-Edelstahl-Drucktaster-rostfrei-IP67-Einbau-Durchmesser-O-19-mm-Tastend-LED-Weiss>, zuletzt geprüft am 10. 10. 2022.
- Metzner Maschinenbau GmbH (2023):** *Metzner AM 5000 Baureihe*. Online verfügbar unter <https://www.metzner.com/de/produkt-loesungen/automatisierte-kabelverarbeitung/ablaengen-abisolieren/metzner-am-5000-baureihe/>, zuletzt geprüft am 07. 02. 2024.
- Micro Motors SRL (2023):** *Gear Motors - DC and Brushless*. Online verfügbar unter <https://www.micromotors.eu/en/gear-motors/>, zuletzt geprüft am 31. 05. 2023.



- 
- Mokhtari Molk Abadi, N. (2020):** *Überwachung hydrodynamischer Gleitlager basierend auf der Körperschallanalyse*. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. In: *Advances in Automation Engineering*. Band 7. Hrsg. von Gühmann, C..Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin. ISBN: 978-3-7983-3184-6. DOI: 10.14279/depositonce-10642.
- Moritzer, E.; Hirsch, A.; Bürenhaus, F. (2019):** *Development and modeling of design and process guidelines for FDM structures for the partial reinforcement of hybrid structures*. In: *AIP Conference Proceedings* 2065 (1): 030056. DOI: 10.1063/1.5088314.
- Mouser Electronics, Inc. (2024):** *Elektronikkomponenten*. Online verfügbar unter <https://www.mouser.de/electronic-components/>, zuletzt geprüft am 08. 02. 2024.
- Multi3D LLC (2024):** *Electrifi Conductive Filament*. Online verfügbar unter <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi/>, zuletzt geprüft am 09. 02. 2024.
- Nassar, H.; Dahiya, R. (2021):** *Fused Deposition Modeling–Based 3D–Printed Electrical Interconnects and Circuits*. In: *Advanced Intelligent Systems* 3 (12): 2100102. DOI: 10.1002/aisy.202100102.
- Navarrete, M.; Lopes, A.; Acuna, J.; Estrada, R.; MacDonald, E.; Palmer, J.; Wicker, R. (2007):** *Integrated Layered Manufacturing of a Novel Wireless Motion Sensor System with GPS*. In: *Proceedings for the 2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 575–585.
- Newell, A.; George, A.; Papakostas, N.; Lhachemi, H.; Malik, A.; Shorten, R. (2019):** *On Design for Additive Manufacturing: Review of Challenges and Opportunities utilising Visualisation Technologies*. In: *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. IEEE, S. 1–7. ISBN: 978-1-7281-3401-7. DOI: 10.1109/ICE.2019.8792569.
- Nguyen, J.; Park, S.-i.; Rosen, D. (2013):** *Heuristic optimization method for cellular structure design of light weight components*. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14 (6), S. 1071–1078. DOI: 10.1007/s12541-013-0144-5.
- Obilanade, D.; Dordlofva, C.; Törlind, P. (2021):** *Surface roughness considerations in design for additive manufacturing - A literature review*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Gothenburg, Sweden, S. 2841–2850. DOI: 10.1017/pds.2021.545.
- Oliveira, L. M.; Esteves, S.; Tenreiro, A. F.; Matos, J. R.; Sobral, J.; Pereira, J. P. T. (2020):** *Systems Design for FRP Hybrid AM*. In: *Additive Manufacturing Hybrid Processes for Composites Systems*. Hrsg. von Torres Marques, A.; Esteves, S.; Pereira, J. P. T.; Oliveira, L. M. *Advanced Structured Materials* 129. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 173–201. ISBN: 978-3-030-44521-8. DOI: 10.1007/978-3-030-44522-5\_5.
- Ouazzani, K.; Jai, M. E.; Elfahime, B. (2022):** *Detailed classification of FDM (Fused Deposition Modeling) process parameters and potentially affected Part characteristics*. In: *2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, S. 1–9. ISBN: 978-1-6654-2209-3. DOI: 10.1109/IRASET52964.2022.9738432.

- 
- Padovano, E.; Galfione, M.; Concialdi, P.; Lucco, G.; Badini, C. (2020):** *Mechanical and Thermal Behavior of Ultem® 9085 Fabricated by Fused-Deposition Modeling*. In: Applied Sciences 10 (9): 3170. DOI: 10.3390/app10093170.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2007):** *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN: 978-3-540-34060-7. DOI: 10.1007/978-3-540-34061-4.
- Palmer, J. A.; Summers, J. L.; Davis, D. W.; Gallegos, P. L.; Chavez, B. D.; Yang, P.; Medina, F.; Wicker, R. B. (2005):** *Realizing 3-D Interconnected Direct Write Electronics Within Smart Stereolithography Structures*. In: Proceedings of the ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Electronic and Photonic Packaging, Electrical Systems Design and Photonics, and Nanotechnology. Orlando, Florida, USA. ASME, S. 287–293. DOI: 10.1115/IMECE2005-79360.
- Pandzic, A.; Hodzic, D.; Milovanovic, A. (2019):** *Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of PLA Material for FDM Process*. In: Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium. Hrsg. von Katalinic, B. Wien: DAAAM International, S. 0545–0554. ISBN: 978-3-902734-22-8. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.074.
- Panesar, A.; Brackett, D.; Ashcroft, I.; Wildman, R.; Hague, R. (2014):** *Design Optimization Strategy for Multifunctional 3D Printing*. In: Proceedings for the 2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/2152/89261> , zuletzt geprüft am 09.02.2024.
- Panesar, A.; Brackett, D.; Ashcroft, I.; Wildman, R.; Hague, R. (2015):** *Design Framework for Multifunctional Additive Manufacturing: Placement and Routing of Three-Dimensional Printed Circuit Volumes*. In: Journal of Mechanical Design 137 (11):111414. ASME. DOI: 10.1115/1.4030996.
- Panesar, A.; Ashcroft, I.; Brackett, D.; Wildman, R.; Hague, R. (2017):** *Design framework for multifunctional additive manufacturing: Coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems*. In: Additive Manufacturing 16, S. 98–106. DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.009.
- Pereira, T.; Kennedy, J. V.; Potgieter, J. (2019):** *A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job*. In: Procedia Manufacturing 30, S. 11–18. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.003.
- Pérès, F.; Noyes, D. (2006):** *Envisioning e-logistics developments: Making spare parts in situ and on demand: State of the art and guidelines for future developments*. In: Computers in Industry 57 (6), S. 490–503. DOI: 10.1016/j.compind.2006.02.010.
- Perez, K. B.; Williams, C. B. (2014):** *Design Considerations for Hybridizing Additive Manufacturing and Direct Write Technologies*. In: Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 4: 19th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 8th International Conference on

- 
- Micro- and Nanosystems. Buffalo, New York, USA. V004T06A005. ASME. DOI: 10.1115/DETC 2014-35408.
- Periard, D.; Malone, E.; Lipson, H. (2007):** *Printing Embedded Circuits*. In: Proceedings for the 2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, S. 503–512. DOI: 10.26153/tsw/7237.
- Persad, J.; Rocke, S. (2022):** *A Survey of 3D Printing Technologies as Applied to Printed Electronics*. In: IEEE Access 10, S. 27289–27319. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3157833.
- Petersen, C.; Werkle, H. (2017a):** *Schwingungen biegeweicher Seile und Stangen*. In: Dynamik der Baukonstruktionen. 2. Aufl. Hrsg. von Petersen, C.; Werkle, H. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 559–590. ISBN: 978-3-8348-1459-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-2109-6\_8.
- Petersen, C.; Werkle, H. (2017b):** *Schwingungen von Seilabspannungen und Seiltragwerken*. In: Dynamik der Baukonstruktionen. 2. Aufl. Hrsg. von Petersen, C.; Werkle, H. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1299–1369. ISBN: 978-3-8348-1459-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-2109-6\_22.
- Petrovic, V.; Vicente Haro Gonzalez, J.; Jordá Ferrando, O.; Delgado Gordillo, J.; Ramón Blasco Puchades, J.; Portolés Griñan, L. (2011):** *Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies*. In: International Journal of Production Research 49 (4), S. 1061–1079. DOI: 10.1080/00207540903479786.
- Pezold, D.; Rosnitschek, T.; Kleuderlein, A.; Döpfer, F.; Alber-Laukant, B. (2021):** *Evaluation of Technologies for the Fabrication of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Parts by Fused Layer Modeling*. In: Technologies for economic and functional lightweight design - Conference proceedings 2020. Hrsg. von Dröder, K.; Vietor, T. Serie: Zukunftstechnologien für den multifunktionalen Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 125–141. ISBN: 978-3-662-62923-9. DOI: 10.1007/978-3-662-62924-6\_11.
- Ponche, R.; Hascoet, J.-Y.; Kerbrat, O.; Mognol, P. (2017):** *A new global approach to design for additive manufacturing*. In: Additive manufacturing handbook: Product development for the defense industry, 2017. hal-01921270, S. 169–186. Online verfügbar unter <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01921270>, zuletzt geprüft am 10. 02. 2024.
- Ponn, J. (2016):** *Systematisierung des Lösungsraums*. In: Handbuch Produktentwicklung. Hrsg. von Lindemann, U. München: Carl Hanser Verlag, S. 715–742. ISBN: 978-3-446-44518-5. DOI: 10.3139/9783446445819.025.
- Ponn, J.; Lindemann, U. (2008):** *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN: 978-3-540-68562-3. DOI: 10.1007/978-3-540-68563-0.
- Ponn, J.; Lindemann, U. (2011):** *Produktgestalt*. In: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. Hrsg. von Ponn, J.; Lindemann, U. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 133–158. ISBN: 978-3-642-20579-8. DOI: 10.1007/978-3-642-20580-4\_6.

- 
- Poprawe, R.; Hinke, C.; Meiners, W.; Schrage, J.; Bremen, S.; Merkt, S. (2015):** *SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design*. In: *Advances in Production Technology, Lecture Notes in Production Engineering*. Hrsg. von Brecher, C. Cham: Springer Verlag, S. 49–65. ISBN: 978-3-319-12303-5. DOI: 10.1007/978-3-319-12304-2\_5.
- Pradel, P.; Zhu, Z.; Bibb, R.; Moultrie, J. (2018):** *A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design*. In: *Journal of Engineering Design* 29 (6), S. 291–326. DOI: 10.1080/09544828.2018.1483011.
- Prashad, H. (2006):** *Tribology in electrical environments*. In: *Tribology and interface engineering series* Bd. 49. Hrsg. von Briscoe, B. J. Amsterdam, London: Elsevier. ISBN: 978-0-444-51880-4.
- Protoplant Inc. (2024):** *Material Data Electrically Conductive PLA*. Online verfügbar unter <https://protoplant.com/collections/conductive/products/conductive-pla?variant=43265594589432>, zuletzt geprüft am 09. 02. 2024.
- Prusa Research a.s. (2022):** *Prusa i3 MK3s+: Technical Parameters*. Online verfügbar unter <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>, zuletzt geprüft am 17. 09. 2022.
- Prüß, H.; Vietor, T. (2015):** *Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (11): 111409. ASME. DOI: 10.1115/1.4030993.
- Python Software Foundation (2024):** *Python 3.9.9*. Online verfügbar unter <https://www.python.org/downloads/release/python-399/>, zuletzt geprüft am 22. 01. 2024.
- Quero, R. F.; Da Silveira, G. D.; Fracassi da Silva, J. A.; De Jesus, D. P. (2021):** *Understanding and improving FDM 3D printing to fabricate high-resolution and optically transparent microfluidic devices*. In: *Lab on a Chip* 21 (19), UK : Royal Society of Chemistry, S. 3715–3729. DOI: 10.1039/D1LC00518A.
- Raju, M.; Gupta, M. K.; Bhanot, N.; Sharma, V. S. (2019):** *A hybrid PSO–BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 30, S. 2743–2758. DOI: 10.1007/s10845-018-1420-0.
- Raspberry Pi Ltd. (2023):** *Raspberry Pi 3 Model B+*. Online verfügbar unter <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>, zuletzt geprüft am 08. 05. 2023.
- Reichelt Elektronik GmbH & Co. KG (2024):** *Website*. Online verfügbar unter <https://www.reichelt.de>, zuletzt geprüft am 07. 02. 2024.
- Reichwein, J. H. (2022):** *Gestaltung der Baustruktur für die additive Fertigung mittels Bauteilintegration und -trennung*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. DOI: 10.26083/tu-prints-00020822.
- RepRap contributors (2020):** *The RepRap Project - RepRap Firmware*. Online verfügbar unter [https://reprap.org/mediawiki/index.php?title=RepRap\\_Firmware&oldid=187297](https://reprap.org/mediawiki/index.php?title=RepRap_Firmware&oldid=187297), zuletzt geprüft am 08. 05. 2023.

- 
- Richter, B. (2018):** *Intelligente Fahrzeugbedienung - Traktor über Smart-Touch-Armlehne durch Antippen steuern.* In: Konstruktionspraxis. Online verfügbar unter <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/traktor-ueber-smart-touch-armlehne-durch-antippen-steuern-a-750844/>, zuletzt geprüft am 20. 11. 2022.
- Rieger, M.; Johnen, B.; Kuhlenkötter, B. (2016):** *Analysis and Development of the Fused Layer Manufacturing Process using Industrial Robots.* In: Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, S. 652–659. ISBN: 978-3-8007-4231-8.
- Robinson, C. J.; Stucker, B.; Lopes, A. J.; Wicker, R.; Palmer, J. A. (2006):** *Integration of Direct-Write (DW) and Ultrasonic Consolidation (UC) Technologies to Create Advanced Structures with Embedded Electrical Circuitry.* In: Proceedings for the 2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, S. 60–69. DOI: 10.26153/tsw/7117.
- Rolink, A.; Schröder, T.; Jacobs, G.; Bosse, D.; Hölzl, J.; Bergmann, P. (2020):** *Feasibility study for the use of hydrodynamic plain bearings with balancing support characteristics as main bearing in wind turbines.* In: Journal of Physics: Conference Series 1618 (5) 052002. IOP Publishing Ltd. DOI: 10.1088/1742-6596/1618/5/052002.
- Romanov, V.; Samuel, R.; Chaharlang, M.; Jafek, A. R.; Frost, A.; Gale, B. K. (2018):** *FDM 3D Printing of High-Pressure, Heat-Resistant, Transparent Microfluidic Devices.* In: Analytical chemistry 90 (17), S. 10450–10456. American Chemical Society. DOI: 10.1021/acs.analchem.8b02356.
- Roos, M.; Abedini, S.; Abele, E.; Albrecht, K.; Anderl, R.; Gibbels, M.; Gramlich, S.; Groche, P.; Horn, B.; Hoßfeld, A.; Köhler, S.; Lüthen, H.; Mattmann, I.; Melz, T.; Monnerjahn, V.; Müller, C.; Neuwirth, M.; Niehuesbernd, J.; Özel, M.; Pfetsch, M.; Reising, J.; Schäfer, S.; Schmidt, S.; Turan, E.; Ulbrich, S.; Wagner, C.; Walter, A.; Weber Martins, T.; Zimmermann, A. (2017):** *The Result: A New Design Paradigm.* In: Manufacturing Integrated Design: Sheet Metal Product and Process Innovation. Hrsg. von Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. Cham: Springer International Publishing AG, S. 301–334. ISBN: 978-3-319-52376-7. DOI: 10.1007/978-3-319-52377-4\_9.
- Roos, M. (2018):** *Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 441. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 978-3-18-344101-3.
- Ropohl, G. (2009):** *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik.* 3. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe. ISBN: 978-3-86644-374-7. DOI: 10.5445/KSP/1000011529.
- Rosli, A. A.; Shuib, R. K.; Ishak, K. M. K.; Hamid, Z. A. A.; Abdullah, M. K.; Rusli, A. (2020):** *Influence of bed temperature on warpage, shrinkage and density of various acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts from fused deposition modelling (FDM).* In: AIP Conference Proceedings 2267 (1): 020072. DOI: 10.1063/5.0015799.
- Roth, K. (2001):** *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 2: Konstruktionskataloge.* 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN: 3-540-67026-2. DOI: 10.1007/978-3-642-17467-4.

- 
- RS Components GmbH (2022):** *KFZ-Steckverbinder mit IP67 Schutzklasse*. Online verfügbar unter <https://de.rs-online.com/web/c/steckverbinder/elektrische-kfz-steckverbinder/kfz-steckverbinder/?pn=1&rpp=100&applied-dimensions=4294875394>, zuletzt geprüft am 30. 09. 2022.
- RS Components GmbH (2023):** *Elektro- und Industriekabel*. Online verfügbar unter <https://de.rs-online.com/web/c/kabel-und-drahte/elektro-und-industriekabel/>, zuletzt geprüft am 23. 06. 2023.
- RS Components GmbH (2024):** *Website*. Online verfügbar unter <https://de.rs-online.com/web/>, zuletzt geprüft am 07. 02. 2024.
- Saari, M.; Cox, B.; Richer, E.; Krueger, P. S.; Cohen, A. L. (2015):** *Fiber Encapsulation Additive Manufacturing: An Enabling Technology for 3D Printing of Electromechanical Devices and Robotic Components*. In: *3D Printing and Additive Manufacturing 2* (1), S. 32-39. New York: Mary Ann Liebert, Inc., publishers. DOI: 10.1089/3dp.2015.0003.
- Sarobol, P.; Cook, A.; Clem, P. G.; Keicher, D.; Hirschfeld, D.; Hall, A. C.; Bell, N. S. (2016):** *Additive Manufacturing of Hybrid Circuits*. In: *Annual Review of Materials Research 46*, S. 41–62. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031632.
- Sauer, T. (2006):** *Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: *Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 390*. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 3-18-339001-9.
- Schlecht, B. (2010):** *Maschinenelemente 2: Getriebe - Verzahnungen - Lagerungen*. Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH. München: Pearson Studium. ISBN: 978-3-8273-7146-1.
- Schleuniger GmbH (2023a):** *PowerCut 3700 Ablängautomat*. Online verfügbar unter <https://www.schleuniger.com/de/produkte/ablaengen/powercut-3700/>, zuletzt geprüft am 08. 05. 2023.
- Schleuniger GmbH (2023b):** *StripCrimp 208 - Abisolier- und Crimpmaschine*. Online verfügbar unter <https://www.schleuniger.com/de/produkte/crimp/abisolieren-und-crimpen/stripcrimp-208/>, zuletzt geprüft am 01. 06. 2023.
- Schneck, M.; Gollnau, M.; Lutter-Günther, M.; Haller, B.; Schlick, G.; Lakomic, M.; Reinhart, G. (2019):** *Evaluating the Use of Additive Manufacturing in Industry Applications*. In: *Procedia CIRP 81*, S. 19–23. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.004.
- Schuh, G.; Kreysa, J.; Orilski, S. (2009):** *Roadmap „Hybride Produktion“: Wie 1 + 1 = 3-Effekte in der Produktion maximiert werden können*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104* (5). München: Carl Hanser Verlag, S. 385–391. DOI: 10.3139/104.110072.
- Schüle, H.; Eyerer, P. (2020):** *Verarbeitung von Kunststoffen zu Bauteilen*. In: *Polymer Engineering 2 - Verarbeitung, Oberflächentechnologie, Gestaltung*. 2. Aufl. Hrsg. von Schüle, H.; Eyerer, P. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 1–414. ISBN: 978-3-662-59840-5. DOI: 10.1007/978-3-662-59841-2\_1.

- 
- Schulte, F.; Sauerzapf, L.; Kirchner, E. (2022):** *Influences and Effects on Scaling the Pressure Stiffness of Additively Manufactured Meso Structures*. In: Proceedings of the Design Society 2, S. 1451–1460. DOI: 10.1017/pds.2022.147.
- Schulte, F.; Weber, S.; Reichwein, J.; Paetzold, K.; Kirchner, E. (2021):** *Potentiale additiv gefertigter Gitterstrukturen – ein Review*. In: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X. Hrsg. von Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. The Design Society. DOI: 10.35199/dfx2021.07.
- Sealy, M. P.; Madireddy, G.; Williams, R. E.; Rao, P.; Toursangsaraki, M. (2018):** *Hybrid Processes in Additive Manufacturing*. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 140 (6): 060801. DOI: 10.1115/1.4038644.
- Shenzhen Aurora Technology Co., Ltd (2024):** *JGAURORA 3DPRINTER - Model A5 - User Guide*. Bereitgestellt von Treatstock Inc. , Online verfügbar unter <https://www.treatstock.com/machines/item/447-a5> , zuletzt geprüft am 07.02.2024. Online verfügbar unter <https://www.treatstock.com/static/uploads/printers/JGAURORA%20A5%20USER%20GUIDE%20201801.pdf>, zuletzt geprüft am 07.02.2024.
- Shin, Y. C. (2010):** *Laser assisted machining: Its potential and future*. In: Proceedings of the ICALEO 2010: 29th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing. ICALEO 2010: 29th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing. Anaheim, California, USA. ASME, S. 513–522. DOI: 10.2351/1.5062073.
- Siemens AG (2024):** *CAD Software - NX CAD software*. Online verfügbar unter <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/cad-online/>, zuletzt geprüft am 06.02.2024.
- Silva, M.; Felismina, R.; Mateus, A.; Parreira, P.; Malça, C. (2017a):** *Application of a Hybrid Additive Manufacturing Methodology to Produce a Metal/Polymer Customized Dental Implant*. In: Procedia Manufacturing 12, S. 150–155. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.08.019.
- Silva, M.; Mateus, A.; Oliveira, D.; Malça, C. (2017b):** *An alternative method to produce metal/plastic hybrid components for orthopedics applications*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 231 (1-2), S. 179–186. DOI: 10.1177/1464420716664545.
- Silva, M. R.; Domingues, J.; Costa, J.; Mateus, A.; Malça, C. (2019):** *Study of Metal/Polymer Interface of Parts Produced by a Hybrid Additive Manufacturing Approach*. In: Applied Mechanics and Materials 890, S. 34–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.890.34.
- SIP Scootershop GmbH (2022):** *Blinkerschalter für Piaggio Vespa - OEM-Nummer: 1D001824 (PIAGGIO)*. Online verfügbar unter [https://www.sip-scootershop.com/de/product/blinkerschalter-piaggio\\_PI001824](https://www.sip-scootershop.com/de/product/blinkerschalter-piaggio_PI001824), zuletzt geprüft am 10.10.2022.
- Song, Y.; Yang, Z.; Liu, Y.; Deng, J. (2018):** *Function representation based slicer for 3D printing*. In: Computer Aided Geometric Design 62, S. 276–293. DOI: 10.1016/j.cagd.2018.03.012.

- 
- Spallek, J.; Krause, D. (2016):** *Process Types of Customisation and Personalisation in Design for Additive Manufacturing Applied to Vascular Models*. In: *Procedia CIRP* 50, S. 281–286. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.022.
- Srivastava, M.; Rathee, S.; Maheshwari, S.; Kundra, T. K. (2020):** *Additive Manufacturing - Fundamentals and Advancements*. Imprint: CRC Press. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN: 9781351049382. DOI: 10.1201/9781351049382.
- Stachowiak, H. (1973):** *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer Verlag. ISBN: 3-211-81106-0.
- Steffan, K.-E. W. H.; Fett, M.; Kirchner, E. (2020):** *Extended approach to optimize modular products through the potentials of additive manufacturing*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1*, May 2020, S. 1115–1124. DOI: 10.1017/dsd.2020.172.
- Steffan, K.-E. W. H.; Fett, M.; Kirchner, E. (2022):** *Function Integration through Design for Hybrid Integrating Additive Manufacturing Technologies*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN2022 2*, May 2022, S. 1471–1480. DOI: 10.1017/pds.2022.149.
- Steffan, K.-E.; Fett, M.; Kurth, D.; Kirchner, E. (2021):** *Identification of optimization areas of a transtibial prosthesis through the potentials of additive manufacturing processes*. In: *Proceedings of the Design Society 1*, S. 1807–1816. DOI: 10.1017/pds.2021.442.
- Steffan, K.-E. W. H. (2023):** *Verlauf biegeschlaffer Leitungen und Leitungsrechercheergebnisse*. DOI: 10.48328/tudatalib-1191. Online verfügbar unter <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/3911>, zuletzt geprüft am 29.06.2023.
- Steffan, K.-E. W. H.; Klein J. N. (2023a):** *Whitepaper: 3DConFil - Programm zur Generierung von Steuerungsbefehlen*. DOI: 10.48328/tudatalib-1188. Online verfügbar unter <https://tudatalib.ulb.tu-darmstadt.de/handle/tudatalib/3910>, zuletzt geprüft am 26.06.2023.
- Steffan, K.-E. W. H.; Schmitt, F.; Kraus, J.-P.; Freudenberg, J.; Kirchner, E. (2023b):** *Application of Manufacturing Induced Properties to Exploit the Potentials of a Hybrid Integrating Additive Manufacturing Technology*. In: *Procedia CIRP* 119, S. 1164–1169. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.187.
- Stepperonline (2023):** *Stepper Motor mit Getriebe 17HS15-1684S-HG50*. Online verfügbar unter <https://www.omc-stepperonline.com/de/nema-17-schrittmotor-l-39mm-uebersetzungsverhaeltnis-50-1-hochpraezises-planetengertriebe-17hs15-1684s-hg50>, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- Stratasys, LTD. (2022):** *Fused Deposition Modeling - FDM Technology*. Online verfügbar unter <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/FDM-technology/>, zuletzt geprüft am 23.08.2022.
- Suh, N. P. (1998):** *Axiomatic Design Theory for Systems*. In: *Research in Engineering Design* 10, S. 189–209. DOI: 10.1007/s001639870001.



- 
- Taleb Araghi, B.; Göttmann, A.; Bambach, M.; Hirt, G.; Bergweiler, G.; Diettrich, J.; Steiners, M.; Saeed-Akbari, A. (2011):** *Review on the development of a hybrid incremental sheet forming system for small batch sizes and individualized production.* In: *Production Engineering - Research and Development* 5 (4), S. 393–404. DOI: 10.1007/s11740-011-0325-y.
- Tang, P.; Zhao, X.; Shi, H. (2023):** *A non-supporting printing algorithm for fused filament fabrication of multi-branch structure.* In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126, S. 2959–2974. DOI: 10.1007/s00170-023-11267-7.
- TEKUWA GmbH (2023):** *Kabelschneide- und Abisoliermaschinen sowie Ablängautomaten.* Online verfügbar unter <https://tekuwa.de/de/produkte1/ablaengen>, zuletzt geprüft am 08. 05. 2023.
- The MathWorks, Inc. (2022):** *Matlab R2020b im Überblick.* Online verfügbar unter [https://de.mathworks.com/products/new\\_products/release2020b.html](https://de.mathworks.com/products/new_products/release2020b.html), zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.
- The Weir Group PLC (2023):** *Linatex premium rubber.* Online verfügbar unter <https://www.global.weir/brands/linatex/>, zuletzt geprüft am 08. 05. 2023.
- Thiebes, F.; Plankert, N. (2014):** *Umgang mit Komplexität in der Produktentwicklung – Komplexitätsbeherrschung durch Variantenmanagement.* In: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen - Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern.* Hrsg. von Schoeneberg, K.-P. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 165–185. ISBN: 978-3-658-01283-0. DOI: 10.1007/978-3-658-01284-7\_8.
- Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F. (2016):** *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints.* In: *CIRP Annals* 65 (2), S. 737–760. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- TNT Holdings B. V. by FedEx Express Deutschland GmbH (2022):** *Max. Masse und Gewichte.* Online verfügbar unter [https://www.tnt.com/dam/tnt\\_express\\_media/de\\_de/download\\_documents/Downloads/masse-gewichte-072019.pdf](https://www.tnt.com/dam/tnt_express_media/de_de/download_documents/Downloads/masse-gewichte-072019.pdf), zuletzt geprüft am 17. 09. 2022.
- Turner, B. N.; Gold, S. A. (2015):** *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness.* In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (3), S. 250–261. DOI: 10.1108/RPJ-02-2013-0017.
- Tüzün, G.-J.; Roth, D.; Kreimeyer, M. (2023):** *Function integration in additive manufacturing: A review of approaches.* In: *Proceedings of the Design Society* 3, S. 2005–2014. DOI: 10.1017/pds.2023.201.
- Uhlmann, E.; Bochnig, H. (2010):** *IT-Unterstützung für die Entwicklung hybrider Leistungsbündel.* In: *Hybride Technologien in der Produktion.* Hrsg. von Brecher, C.; Krüger, J.; Uhlmann, E.; Verl, A. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 675. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 22–33. ISBN: 978-3-18-367502-9.

- 
- Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D. (1995):** *Product design and development*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-113742-4.
- Ultimaker B.V. (2023):** *UltiMaker Cura*. Online verfügbar unter <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>, zuletzt geprüft am 05. 04. 2023.
- United Parcel Service of America, Inc. (2022):** *Sendungsgröße und -gewicht*. Online verfügbar unter <https://www.ups.com/de/de/support/shipping-support/shipping-dimensions-weight.page>, zuletzt geprüft am 17. 09. 2022.
- Utterback, J. M.; Abernathy, W. J. (1975):** *A dynamic model of process and product innovation*. In: Omega - The International Journal of Management Science 3 (6), S. 639–656. DOI: 10.1016/0305-0483(75)90068-7.
- VDI 2221 (1993):** *VDI-Richtlinie - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V.. Ausgabedatum: 1993-05. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2221 Blatt 1 (2019):** *VDI-Richtlinie - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V.. Ausgabedatum: 2019-11. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2221 Blatt 2 (2019):** *VDI-Richtlinie - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V.. Ausgabedatum: 2019-11. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2222 Blatt 1 (1997):** *VDI-Richtlinie - Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure. Ausgabedatum: 1997-06. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2222 Blatt 2 (1982):** *VDI-Richtlinie - Konstruktionsmethodik - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Hrsg. von VDI-Verlag. Ausgabedatum: 1982-02. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2223 (2004):** *VDI-Richtlinie - Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure. Ausgabedatum: 2004-01. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2225 Blatt 3 (1998):** *VDI-Richtlinie - Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure. Ausgabedatum: 1998-11. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 3405 (2014):** *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V.. Ausgabedatum: 2014-12. Berlin: Beuth Verlag.
- Verashape Sp. z o.o. sp.k. (2023):** *VSHAPER 5AX*. Online verfügbar unter <https://vshaper.com/3d-printers/vshaper-5ax-machine#get-a-quote>, zuletzt geprüft am 15. 06. 2023.

- 
- Verstege, S.; aus der Wiesche, S. (2018):** *Gleitlager für Dampfturbinen*. In: Handbuch Dampfturbinen - Grundlagen, Konstruktion, Betrieb. Hrsg. von aus der Wiesche, S.; Joos, F. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 815–859. ISBN: 978-3-658-20629-1. DOI: 10.1007/978-3-658-20630-7\_19.
- Vietor, T.; Stechert, C. (2013):** *Produktarten zur Rationalisierung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Hrsg. von Feldhusen, J.; Grote, K.-H. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 817–871. ISBN: 978-3-642-29568-3. DOI: 10.1007/978-3-642-29569-0\_17.
- Vogeler, F.; Verheecke, W.; Voet, A.; Valkenaers, H. (2013):** *An Initial Study of Aerosol Jet® Printed Interconnections on Extrusion-Based 3D-Printed Substrates*. In: Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 59 (11), S. 689–696. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.999.
- Wagner, C.; Ahmels, L.; Gramlich, S.; Groche, P.; Monnerjahn, V.; Müller, C.; Roos, M. (2017):** *Finding New Opportunities: Technology Push Approach*. In: Manufacturing Integrated Design: Sheet Metal Product and Process Innovation. Hrsg. von Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. Cham: Springer International Publishing AG, S. 275–299. ISBN: 978-3-319-52376-7. DOI: 10.1007/978-3-319-52377-4\_8.
- Wagner, C. (2018):** *Funktionsintegration im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Online verfügbar unter <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7528>, zuletzt geprüft am 24. 01. 2024.
- Walachowicz, F.; Bernsdorf, I.; Papenfuss, U.; Zeller, C.; Graichen, A.; Navrotsky, V.; Rajvanshi, N.; Kiener, C. (2017):** *Comparative Energy, Resource and Recycling Lifecycle Analysis of the Industrial Repair Process of Gas Turbine Burners Using Conventional Machining and Additive Manufacturing*. In: Journal of Industrial Ecology 21 (S1), S203–S215. DOI: 10.1111/jiec.12637.
- Wäldele, M. (2012):** *Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte - Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. In: Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 414. Düsseldorf: VDI-Verlag. ISBN: 978-3-18-341401-7.
- Wang, X.; Tian, X.; Yin, L.; Li, D. (2020):** *3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Low Melting Point Alloy Matrix Composites: Mechanical Properties and Microstructures*. In: Materials 13 (16) 3463. DOI: 10.3390/ma13163463.
- Wartzack, S. (2021):** *Auswahl- und Bewertungsmethoden*. In: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Aufl. Hrsg. von Bender, B.; Gericke, K. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 307–334. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7\_11.
- Wasley, T.; Li, J.; Kay, R.; Ta, D.; Shephard, J.; Stringer, J.; Smith, P.; Esenturk, E.; Connaughton, C. (2016):** *Enabling Rapid Production and Mass Customisation of Electronics Using Digitally Driven Hybrid Additive Manufacturing Techniques*. In: 2016 IEEE 66th Electronic Components and

---

Technology Conference (ECTC). IEEE, S. 849–856. ISBN: 978-1-5090-1204-6. DOI: 10.1109/ECTC.2016.187.

**Wasserfall, F. (2019):** *Integration of Conductive Materials and SMD-Components into the FDM Printing Process for Direct Embedding of Electronic Circuits*. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Online verfügbar unter <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/6173>, zuletzt geprüft am 24.01.2024.

**Waveshare Electronics (2022):** *1.28inch LCD Module*. Online verfügbar unter [https://www.waveshare.com/wiki/1.28inch\\_LCD\\_Module](https://www.waveshare.com/wiki/1.28inch_LCD_Module), zuletzt geprüft am 10.10.2022.

**Weber, C. (2012):** *Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften - eine kritische Zwischenbilanz*. In: Design for X - Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012. Hrsg. von Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. Hamburg: TuTech Verlag, S. 25–62. ISBN: 978-3-941492-51-6.

**Wesley, J.; Congdon, R. (2018):** *MATLAB-GRBL-Controller*. Online verfügbar unter <https://github.com/WJonson/MATLAB-GRBL-Controller>, zuletzt geprüft am 28.11.2022.

**Westkämper, E.; Schloske, A. (2018):** *Fertigungs- und Fabrikbetrieb*. In: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 25. Aufl. Hrsg. von Grote, K.-H.; Bender, B.; Göhlich, D. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 1510–1541. ISBN: 978-3-662-54804-2. DOI: 10.1007/978-3-662-54805-9\_118.

**Westkämper, E.; Warnecke, H.-J. (2010):** *Grundlagen zur Fertigungstechnik*. In: Einführung in die Fertigungstechnik. 8. Aufl. Hrsg. von Westkämper, E.; Warnecke, H.-J. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 1–11. ISBN: 978-3-8348-0835-6. DOI: 10.1007/978-3-8348-9798-5\_1.

**Woo, S.-G.; Lee, I. H.; Lee, K.-C. (2015):** *Hybrid fabrication process of additive manufacturing and direct writing for a 4×4 mm matrix flexible tactile sensor*. In: Journal of Mechanical Science and Technology 29 (9), S. 3905–3909. DOI: 10.1007/s12206-015-0836-0.

**Wu, C.; Dai, C.; Fang, G.; Liu, Y.-J.; Wang, C. C. L. (2020):** *General Support-Effective Decomposition for Multi-Directional 3-D Printing*. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 17 (2), S. 599–610. DOI: 10.1109/TASE.2019.2938219.

**Würtenberger, J.; Reichwein, J.; Kirchner, E. (2018):** *Using the potentials of additive manufacturing by a systematic linkage of the manufacturing process to product design*. In: Proceedings of the DESIGN 2018: 15th International Design Conference. Hrsg. von Marjanović, D., Štorga, M., Škec, S., Bojčetić, N., Pavković, N., S. 1465–1476. ISBN: 978-953-7738-59-4. DOI: 10.21278/idc.2018.0225.

**Wüthrich, M.; Elspass, W. J.; Bos, P.; Holdener, S. (2021):** *Novel 4-Axis 3D Printing Process to Print Overhangs Without Support Material*. In: Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of AMPA2020. Hrsg. von Meboldt, M.; Klahn, C. Cham: Springer International Publishing, S. 130–145. ISBN: 978-3-030-54333-4. DOI: 10.1007/978-3-030-54334-1\_10.

- 
- XIMEA GmbH (2022):** *Ximea xiQ MQ022MG-CM*. Online verfügbar unter <https://www.ximea.com/en/products/usb3-vision-cameras-xiq-line/mq022mg-cm>, zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.
- Xu, K.; Chen, L.; Tang, K. (2019):** *Support-Free Layered Process Planning Toward 3 + 2-Axis Additive Manufacturing*. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 16 (2), S. 838–850. DOI: 10.1109/TASE.2018.2867230.
- Yang, L.; Hsu, K.; Baughman, B.; Godfrey, D.; Medina, F.; Menon, M.; Wiener, S. (2017):** *Additive Manufacturing Process Chain*. In: *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*, Springer Series in Advanced Manufacturing. Hrsg. von Yang, L.; Hsu, K.; Baughman, B.; Godfrey, D.; Medina, F.; Menon, M.; Wiener, S. Cham: Springer International Publishing, S. 33–43. ISBN: 978-3-319-55127-2. DOI: 10.1007/978-3-319-55128-9\_2.
- Yuran, A. F.; Yavuz, I. (2020):** *Effect of Heat Break Geometry on the Thermal Performance of A 3D Printer Extruder*. In: *International Journal of Scientific and Technological Research* 6 (12), S. 41–50. DOI: 10.7176/JSTR/6-12-05.
- Zhang, B.; Jaiswal, P.; Rai, R.; Nelaturi, S. (2018):** *Additive Manufacturing of Functionally Graded Material Objects: A Review*. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 18 (4): 041002. DOI: 10.1115/1.4039683.
- Zhang, B.; Seong, B.; Nguyen, V.; Byun, D. (2016):** *3D printing of high-resolution PLA-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques*. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 26 (2): 025015. DOI: 10.1088/0960-1317/26/2/025015.
- Ziebart, J. R. (2012):** *Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration*. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. In: *Reihe Produktentwicklung Bericht Nr. 83*, Institut für Konstruktionstechnik. München: Dr. Hut Verlag. ISBN: 978-3-8439-0567-1.
- Ziervogel, F.; Boxberger, L.; Bucht, A.; Drossel, W.-G. (2021):** *Expansion of the Fused Filament Fabrication (FFF) Process Through Wire Embedding, Automated Cutting, and Electrical Contacting*. In: *IEEE Access* 9, S. 43036–43049. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065873.
- Zoller & Fröhlich GmbH (2023):** *Universal stripper-crimper UNIC-GV*. Online verfügbar unter <https://www.zofre.de/en/wire-processing/stripping-and-crimping-machines/unic-gv>, zuletzt geprüft am 01. 06. 2023.
- Zortrax (2022):** *Zortrax endureal*. Online verfügbar unter <https://zortrax.com/3d-printers/endureal/>, zuletzt geprüft am 17. 09. 2022.
- Zwier, M. P.; Wits, W. W. (2016):** *Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization*. In: *Procedia CIRP* 55, S. 128–133. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.040.
- Zyltech Engineering LLC. (2022):** *Arduino Compatible CNC Shield Instructions*. Online verfügbar unter <https://www.zyltech.com/arduino-cnc-shield-instructions/>, zuletzt geprüft am 28. 11. 2022.

---

# Eigene Veröffentlichungen

---

2020

**Schulte, F.; Würtenberger, J.; Steffan, K.-E.; Kirchner, E. (2020):** *TRIZ als Schlüssel zu den Potentialen additiver Fertigungsverfahren.* In: Konstruktion für die Additive Fertigung 2018. Hrsg. von Lachmayer, R.; Lippert, R.; Kaierle. S. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 55–75. ISBN: 978-3-662-59057-7. DOI: 10.1007/978-3-662-59058-4\_4.

**Steffan, K.-E. W. H.; Fett, M.; Kirchner, E. (2020):** *Extended approach to optimize modular products through the potentials of additive manufacturing* In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1, May 2020, S. 1115–1124. DOI: 10.1017/dsd.2020.172.

2021

**Reichwein, J.; Steffan, K.-E.; Kirchner, E. (2021):** *Bauteiltrennung zur Reduzierung der Prozesszeit und -kosten in der Additiven Fertigung.* In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021: Stuttgart, 20. Mai 2021. Hrsg. von Binz, H.; Bertsche, B.; Spath, D.; Roth, R. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

**Steffan, K.-E.; Fett, M.; Kurth, D.; Kirchner, E. (2021):** *Identification of optimization areas of a transtibial prosthesis through the potentials of additive manufacturing processes.* In: Proceedings of the Design Society 1, August 2021, S. 1807–1816. DOI: 10.1017/pds.2021.442.

**Kraus, B.; Schmitt, F.; Steffan, K.-E.; Kirchner, E. (2021):** *A valve closing body as a central sensory-utilizable component.* In: Procedia CIRP 100, S. 109–114. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.018.

2022

**Steffan, K.-E. W. H.; Fett, M.; Kirchner, E. (2022):** *Function Integration through Design for Hybrid Integrating Additive Manufacturing Technologies.* In: Proceedings of the Design Society: DESIGN2022 2, May 2022, S. 1471–1480. DOI: 10.1017/pds.2022.149.

2023

**Steffan, K.-E. W. H.; Schmitt, F.; Kraus, J.-P.; Freudenberg, J.; Kirchner, E. (2023):** *Application of Manufacturing Induced Properties to Exploit the Potentials of a Hybrid Integrating Additive Manufacturing Technology* In: Procedia CIRP 119, S. 1164-1169. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.187.

---

# Betreute studentische Arbeiten

---

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der Technischen Universität Darmstadt wurden unter meiner wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung studentische Arbeiten betreut, die sich mit Teilaspekten des entwickelten Fertigungsverfahrens, der Fertigungsmaschine und den Verknüpfungsmöglichkeiten der verfahrensinduzierten Eigenschaften befassen. Deren Ergebnisse haben in Teilen als Grundlage meiner Ausführungen gedient und sind abschnittsweise in die vorliegende Dissertation eingeflossen.

## 2018

**Müller, T. (2018):** *Konstruktion und Fertigung eines Druckkopfs mit einer Relativbewegung zwischen zwei Düsen.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

## 2019

**Fett, M. (2019):** *Einflüsse der additiven Fertigung auf die modulare Produktgestaltung.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**von Elling, M.; Müller, T.; Scheidt, B.; Scheiwe, G.; Schwalm, J. (2019):** *Optimierung der konstruktiven Umsetzung und Integration eines Druckkopfs mit Relativbewegung.* Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

## 2020

**Fett, M.; Koch, F.; Seufert, P. M.; Yazdandoost Khosravi, N. V.; Zaiat, A. (2020):** *Entwicklung eines modularen, additiv fertigen Transportassistenzsystems.* Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Kurth, D. (2020):** *Weiterentwicklung des Prototyps eines Fused Filament Fabrication Druckers.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

---

**Löffler, J. (2020):** *Weiterentwicklung des Druckprozesses eines Fused Filament Fabrication Druckers durch eine Erweiterung der Kinematik.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Olbrich, J.; Lausch, M.; Sommer, T. M.; Ehrt, C. A. P. W. (2020):** *Entwicklung und Implementierung einer Steuerungslogik eines material extrusion Druckers mit erweiterter Kinematik.* Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

2021

**Khuat, A.; Kukula, M.; Schaumann, S. C.; Sindel, R. L. (2021):** *Implementierung und Validierung der Steuerungslogik eines additiven, hybriden Herstellungsverfahrens.* Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Kilian, M. (2021):** *Gestaltung und Fertigung einer Fördereinheit für additiv, hybride Fertigungsverfahren.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Krauß, P. (2021):** *Erarbeitung der Parametrisierung eines additiv, hybriden Fertigungsverfahrens anhand von Referenzmaterialien.* Studienarbeit. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Scheidt, B. (2021):** *Zuordnung und Weiterentwicklung der Produktmodellierung einer hybrid-integrierten additiven Fertigungstechnologie.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Wilhelm, L. (2021):** *Funktionale Erweiterung und konstruktive Umsetzung eines Druckkopfs mit Relativbewegung.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

2022

**Fett, M. (2022):** *Erweiterung von DfAM Ansätzen durch hybrid-integrierte additive Fertigungstechnologien.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Freudenberg, J. (2022):** *Potenzialrealisierung einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungstechnologie anhand einer Gleitlageranwendung.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Klein, J. (2022):** *Erweiterung und Verifikation der Steuerungsprozesse einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungstechnologie.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).



---

**Lendowski, V.; Racky, F.; Schäffner, M.; Schnieders, M. (2022):** *Konstruktion, Fertigung und experimentelle Validierung einer automatisierten Klemmeinheit für kontinuierliche Filamente.* Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**März, J. (2022):** *Erweiterung einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungstechnologie durch integrierte Endapplikationen.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Racky, F. (2022):** *Experimentelle Bestimmung der Funktionszuverlässigkeit einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungsmaschine.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

**Walch, E. B. (2022):** *Vertiefung der Produktmodellierung anhand der Fertigungsschritte einer hybrid-integrierenden additiven Fertigungstechnologie.* Master-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

## 2023

**Kraus, J.-P. (2023):** *Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien eines hybrid-integrierenden additiven Fertigungsverfahrens und eines Vorgehens zur Anwendung dieser im Konstruktionsprozess.* Bachelor-Thesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).