

# **Methode zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Material Extrusion Verfahren**

Von der Graduate School of Excellence  
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von

**Friedrich Bähr**

aus Rehestädt in Thüringen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.  
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 01.12.2020

Graduate School of Excellence  
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart  
2020



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit fasst die Ergebnisse meiner Forschungstätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart und der Abteilung Funktionale Materialien am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA zusammen.

Mit dieser Arbeit bin ich der Additiven Fertigung nahegekommen, die mich seither und in Zukunft beruflich und privat intensiv begleitet.

Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr. Westkämper für die Begleitung der Dissertation, den Hauptbericht und die Abnahme der Prüfung. Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr. Witt für die Übernahme des Mitberichts.

Den Kollegen der Abteilung funktionale Materialien am Fraunhofer IPA, wo ich einen fruchtbaren fachlichen Austausch erfahren durfte, möchte ich dafür herzlich danken.

Eine wichtige Voraussetzung für diese Doktorarbeit war mein freundschaftliches und kollegiales Umfeld, auf welches ich im Rahmen meiner Promotion immer wieder erfolgreich zurückgreifen durfte. Für die wertschätzende und produktive Unterstützung gilt mein Dank insbesondere: Sarah Müller, Dr. Christian Katzfuß, Dr. Christian Küber, Dr. Max Monauni, Dr. Johannes Öhl und Dr. Christoph Taphorn.

Einen bedeutenden Anker während der Promotion stellten meine Freunde und Wegbegleiter dar, ohne deren Rückhalt die erfolgreiche Umsetzung dieses Vorhabens wohl nicht möglich gewesen wäre. Ein großer Dank gebührt Roman Freitag, Max Henneberg, Isaura Iturbe, Khoi Tran, Timo Massierer, Hans Meister, Tobias Müller, Dr. Ulrike Schief und Nadin Zeiße.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie Thomas, Sabine, Johannes und Lena Bähr. Ihre vielfältige Unterstützung in jeglichen Lebenslagen hat mich dahin gebracht, wo ich heute bin.

## Kurzzusammenfassung

Additive Fertigungstechnologien etablieren sich zunehmend für industrielle Anwendungen. Unbeherrschte Prozesse sowie mangelhafte Bauteilqualität bremsen jedoch die Verbreitung in der Serienanwendung. Die Fertigung von Qualität und Maßnahmen zu deren Absicherung im Sinne der Reproduzierbarkeit gestalten sich als besonders wichtig und herausfordernd. Mit Blick auf Losgröße eins reichen dem Prozess nachgelagerte Kontrollmaßnahmen nicht mehr aus. Die Forderung nach beherrschten und fähigen Prozessen bedarf einem hohen Maß an Prozessverständnis. In der Forschungsarbeit wird eine Methode zur präventiven Qualitätsabsicherung für das Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren vorgestellt. Sie basiert auf der Modellierung des Prozesses entlang einer systematischen Vorgehensweise in sieben Schritten. Ziel ist die Prognose von Abweichungen und resultierenden Fehlern und deren prophylaktische Abschaltung. Zunächst werden die auf den Prozess wirkenden Einflussfaktoren, deren Interferenzen und Zusammenhänge mit Bauteileigenschaften untersucht. Es folgt eine detaillierte Betrachtung der Wirkmechanismen und physikalischen Phänomene im Fused Deposition Modeling. Die Methode wird an einem eigens entwickelten, verfahrensspezifischen Prüfkörper und einer zweistufigen Finite-Elemente-Simulation evaluiert und validiert. Für die numerische Analyse wird zunächst der thermische Gradient des Prüfkörpers während der Abkühlung ermittelt. Darauf aufbauend folgt eine mechanisch-statische Analyse zur Bestimmung von prozess- und materialbedingter Schwindung, Eigenspannungen und resultierender Verformung. Die Simulation wird durch den Vergleich von Messwerten mit einem physischen Bauteil validiert. Es wird ein Werkzeug zur Vorhersage von Bauteileigenschaften vorgestellt, das sowohl praktisch applikabel ist, als auch Anwendung für weitere Schichtbauverfahren finden kann.



## **Abstract**

Additive manufacturing technologies are now becoming increasingly established for industrial applications. However, uncontrolled processes and poor component quality are slowing down the expansion into series applications. The production of high quality components and measures to ensure its reproducibility are particularly important and challenging. With regard to batch size one, control measures subsequent to the process are no longer sufficient. The demand for controlled and capable processes requires a high degree of process understanding. This research work presents a method for preventive quality assurance for the Fused Deposition Modeling (FDM) process. It is based on a systematic approach of modeling the process in seven steps. The objective is the prognosis of deviations and resulting errors and their preventive elimination. First, the influencing factors affecting the process, their interferences and correlations with component properties are examined. This is followed by a detailed examination of the effect mechanisms and physical phenomena in Fused Deposition Modeling. The method is evaluated and validated on a specially developed, process-specific test specimen and a two-stage finite element simulation. For the numerical analysis, the thermal gradient of the test specimen during cooldown is first determined. This is followed by a mechanical-static analysis to determine process and material-related shrinkage, residual stresses and resulting distortion. The simulation is validated by comparing measured values with a physical component. A tool for the prediction of component properties is presented, which can be applied in practice as well as for further layer manufacturing processes.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	XI
Abkürzungsverzeichnis .....	XII
Eigenständigkeitserklärung .....	XIV
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Problemstellung .....	2
1.3 Zielsetzung .....	3
1.4 Struktur der Arbeit.....	4
2 Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling (FDM).....	5
2.1 Das Verfahren.....	5
2.1.1 Funktionsweise .....	6
2.1.2 Charakteristika der Anlagen .....	9
2.1.3 Werkstoffe .....	12
2.1.4 Standardisierung und Tolerierung: Richtlinien, Normen und Toleranzen .....	15
2.1.5 Abweichungen und Fehler.....	21
2.2 Ansätze zur präventiven Qualitätssicherung additiver Fertigungsverfahren .....	24
2.2.1 Kalibrierung der Anlage .....	25
2.2.2 Empirische Prozessentwicklung .....	26
2.2.3 Expertise Anlagenbediener und Kommunikation.....	26
2.2.4 Geometriebasierte Optimierung .....	27
2.2.5 Design for Additive Manufacturing (DfAM) .....	27
2.2.6 Standardisierung und Normierung.....	28
2.2.7 Numerische Simulation.....	29

2.3	Vorhersagemodelle geometrischer Bauteileigenschaften im FDM.....	30
2.4	Methodenentwicklung .....	33
3	Grundlagen zur Prozessmodellierung und Analyse additiv gefertigter Bauteilmerkmale .....	35
3.1	Begriffe und Definitionen .....	35
3.1.1	Qualität .....	35
3.1.2	Prozessfähigkeit, Prozessstabilität und Maschinenfähigkeit .....	35
3.1.3	Prozessfenster.....	39
3.2	Einflussgrößen .....	40
3.3	Modellierung von Fertigungsverfahren .....	42
3.3.1	Das Modell.....	42
3.3.2	Vorgehen zur Prozessmodellierung .....	43
4	Systematik zur modellierungs-basierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling.....	50
5	Modellierung des Problemfeldes.....	55
5.1	Problemfeld definieren.....	55
5.2	Größen identifizieren .....	59
5.3	Syntaktische Betrachtung .....	67
5.3.1	Materialbeschickung.....	69
5.3.2	Aufschmelzen .....	69
5.3.3	Druckaufbau .....	69
5.3.4	Extrusion.....	70
5.3.5	Strangablage .....	70
5.3.6	Strangverbindung .....	70
5.3.7	Support.....	71
5.3.8	Bauteilabkühlung .....	71
5.4	Modellierungsansatz.....	72
5.4.1	Der Aufbauprozess.....	72

5.4.2	Der Abkühlprozess .....	80
5.4.3	Fazit Aufbau- und Abkühlprozess.....	89
5.5	Modellierungsumsetzung.....	90
6	Verifizierung und Validierung.....	99
6.1	Verifizierung durch numerische Simulation .....	99
6.1.1	Analyseart und Simulationssoftware .....	100
6.1.2	Prozessbezugsgröße.....	100
6.1.3	Werkstoffmodell.....	100
6.1.4	Aufbau der Analyse .....	101
6.1.5	Durchführung der Analyse.....	103
6.2	Auswertung der Simulation.....	108
6.3	Validierung am physischen Objekt .....	109
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	118
7.1	Zusammenfassung .....	118
7.2	Bewertung der Ergebnisse und Ableitung von zukünftigem Forschungsbedarf.....	120
7.3	Summary .....	121
8	Literatur.....	123
8.1	Literaturverzeichnis.....	123
8.2	Literatur Wirkmechanismen .....	138
Anhang	.....	142
	Toleranzen für additive Extrusionsverfahren (VDI 3405 Blatt 7 2019; .....	
	DIN 16742, 2013).....	142
	Kurzvita des Autors.....	143

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Problemstellung und Zielsetzung (Eschey, 2013; Huang, Y. et al., 2015; Gebhardt, 2016; Wohlers, 2017) .....	3
Abbildung 2 - Kunststoffverarbeitende additive Verfahren .....	5
Abbildung 3 - Fused Deposition Modeling (FDM).....	7
Abbildung 4 - Rasteranordnung in additiven Extrusionsverfahren (VDI 3405 Blatt 7, 2019) .....	10
Abbildung 5 - Kunststoffpyramide für FDM, Daten aus (Bonten, 2016; 2019; KERN GmbH, 2019; Stratasys, Ltd., 2019; Ultimaker, 2019).....	13
Abbildung 6 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm ABS und PLA, Daten aus (Bonten, 2016) .....	14
Abbildung 7 - Geometriebasierte Optimierung in Anlehnung an (Eschey, 2013) ....	27
Abbildung 8 - Beherrschte und fähige Prozesse in Anlehnung an (Eschey, 2013) .	36
Abbildung 9 - Prozessfenster für FDM.....	39
Abbildung 10 - Ishikawa Diagramm der auf das FDM wirkenden Einflussgrößen ...	41
Abbildung 11 - Vorgehensweise zur Modellierung in sieben Schritten in Anlehnung an (Hangos und Cameron, 2001).....	43
Abbildung 12 - Dimensionen der Modellierung von Fertigungsprozessen in Anlehnung an (Müller und Bähr, 2021).....	44
Abbildung 13 - Modellierungsansätze für Fertigungsverfahren: Black / Grey / White Box.....	46
Abbildung 14 - Modellierung von Fertigungsverfahren in Anlehnung an (Müller und Bähr, 2021).....	49
Abbildung 15 – Systematik zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling.....	51
Abbildung 16 - Produktentstehungsprozess FDM .....	56
Abbildung 17 - Technische Zeichnung Prüfkörper FDM.....	57
Abbildung 18 - Prozessübersicht .....	62
Abbildung 19 - Prozessschrittmodell .....	68
Abbildung 20 - Mesostruktur von FDM Bauteilen .....	73
Abbildung 21 - Benetzung verschiedener Stränge .....	74
Abbildung 22 - Benetzungsarten und Strangformen.....	75
Abbildung 23 - Nullviskosität von PLA und ABS (Quellen siehe Tabelle 5).....	78

Abbildung 24 - Abkühlprozess im FDM .....	81
Abbildung 25 - Polymerkettendiffusion .....	82
Abbildung 26 - Kristallisation .....	83
Abbildung 27 - Differential Scanning Calorimetry (DSC) Kurve von ABS und PLA, Werte aus (Day et al., 2006; Cuiffo et al., 2017) .....	83
Abbildung 28 - Schwindung von FDM Bauteilen, Ausschnitt eines Stranges .....	85
Abbildung 29 - Oben: Entstehung von Eigenspannungen, unten: Entstehung von Verzug im FDM.....	86
Abbildung 30 - Prüfkörper für FDM.....	96
Abbildung 31 - APDL Kommandozeile für Birth & Death.....	103
Abbildung 32 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 1.....	104
Abbildung 33 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 2.....	105
Abbildung 34 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 3.....	105
Abbildung 35 - Phase 2: thermisch-transient, Schritt 1.....	106
Abbildung 36 - Phase 2: thermisch-transient, Schritt 2.....	106
Abbildung 37 - Phase 3: statisch-mechanisch, Ansicht I .....	107
Abbildung 38 - Phase 3: statisch-mechanisch, Ansicht II .....	108
Abbildung 39 - Gedruckter Prüfkörper aus ABS .....	110
Abbildung 40 - Zusammenfassung Methode zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling....	119

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Normen und Richtlinien für extrudierende additive Verfahren .....	16
Tabelle 2 - Güteklassen für additiv gefertigte Kunststoffbauteile (VDI 3405 Blatt 7, 2019) .....	20
Tabelle 3 – Vorhersagemodelle von Bauteileigenschaften im FDM unterteilt nach Oberfläche, Werkstoff und Geometrie .....	30
Tabelle 4 - Geometrische Vorhersagemodelle für FDM .....	31
Tabelle 5 - Viskositätswerte ausgewählter Werkstoffe .....	79
Tabelle 6 - Einfluss von Aufbau- und Abkühlprozess auf Bauteileigenschaften .....	89
Tabelle 7 - Wirkmechanismen im FDM Verfahren (Quellen siehe Literaturverzeichnis in Kapitel 8.2) .....	91
Tabelle 8 - Geometrische Features und überprüfbare Bauteileigenschaften .....	93
Tabelle 9 - Geometrische Features: Ausführungen, Toleranzen und Überprüfung .....	95
Tabelle 10 - Materialkennwerte für eine numerische FEM Simulation .....	101
Tabelle 11 - Messprotokoll Prüfkörper FDM .....	111

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AM	Additive Manufacturing
AMF	Additive Manufacturing Format
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	Internationale Standardisierungsorganisation, ursprünglich <i>American Society for Testing and Materials</i>
BAAM	Big Area Additive Manufacturing
BGH	Bundesgerichtshof
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLP	Digital Light Processing
DoE	Design of Experiments
DSC	Differential Scanning Calorimetry
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
ICT	Industrielle Computertomographie
i.O.	In Ordnung
ISO	Internationale Organisation für Normung
KFZ	Kraftfahrzeug
MEX	Material Extrusion
MJM	Multi-Jet Modeling
NA	Nicht verfügbar (Not Available)
n.i.O.	Nicht in Ordnung
NW	Nicht werkzeuggebunden
OBJ	Object (Datei-Format)
PLA	Polylactid, auch Polymilchsäure
SLA	Stereolithografie
SLS	Selektives Lasersintern



STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data (Datei-Format)
STL	Standard Triangulation Language (Datei-Format)
TG	Toleranzgruppe
UV-Licht	Ultraviolettes Licht
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Forschungsarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Textstellen und Inhalte, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Abbildungen und Tabellen in der Arbeit sind von mir selbst erstellt oder mit den entsprechenden Quellennachweisen versehen. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Stuttgart, 01.12.2020

---

Friedrich Bähr

# 1 Einleitung

*Wer aufhört besser zu werden, hat aufgehört gut zu sein.*

-Robert Bosch-

Die Gesellschaften der Industrienationen befinden sich im Wandel. Vor etwa einhundert Jahren leitete Henry Ford mit der Einführung des Fließbandes das Zeitalter der Massenfertigung ein. Das Model T, welches der Kunde in jeder Farbe erstehen konnte, solange es schwarz war, verkaufte sich über 19 Jahre mehr als 15 Millionen Mal in einer einzigen Konfiguration. Heute hingegen beherrscht der Trend zu individualisierten Produkten die globale Nachfrage (Westkämper und Zahn, 2009; Westkämper und Löffler, 2016). Resultat sind eine Produkt- und Variantenvielfalt von nie da gewesenem Umfang. So kommt es, dass bei den deutschen Automobilherstellern mit mehreren Millionen produzierten Fahrzeugen im Jahr keine zwei Identischen vom Band laufen (Herrmann und Huber, 2013). Allerdings sind etablierte Fertigungsverfahren wie Gieß- und Zerspanprozesse unter ökonomischen Gesichtspunkten grundsätzlich für die Herstellung einer Vielzahl identischer Erzeugnisse geeignet. Nachgefragt werden jedoch kundenspezifische Produkte mit wachsenden Anforderungen an die Funktionalität. Die Erzeugnisse müssen filigraner, komplexer und leichter werden. Die Forderung nach wirtschaftlicher Herstellung funktionaler Bauteile der Losgröße eins entsteht. Somit kommt der Bedarf nach neuen, innovativen Produktionstechniken auf.

## 1.1 Ausgangssituation

Die additive Fertigung, auch als 3D-Druck bezeichnet, hat das Potenzial, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Die Schichtbauverfahren kommen ohne formgebende Werkzeuge aus. So wird der Weg für die wirtschaftliche Einzelteilmontage ebnet. Zudem birgt das materialauftragende Vorgehen theoretisch uneingeschränkte Formfreiheit. Geometrien wie Hinterschnitte und lastrichtungsabhängige, verzweigte Strukturen für Leichtbauanwendungen, die mit herkömmlichen Verfahren oft nicht realisierbar sind, bedeuten keinen zusätzlichen Aufwand. *Complexity for free* wird Realität. Über 28 Prozent jährliches Wachstum über die letzten sieben Jahre beflügelten

nicht nur die öffentliche Wahrnehmung und den Stellenwert des Additive Manufacturing (AM) in der Gesellschaft (Wohlers, 2019). Neben Keramik, Beton, Lebensmitteln, organischem Zellmaterial, Sand, und anderen Werkstoffen werden insbesondere Metall und Kunststoff verarbeitet. Polymere dominieren mengenmäßig mit mehr als 80 Prozent die nachgefragten Ausgangsmaterialien (Wohlers, 2017). Eines der wichtigsten kunststoffverarbeitenden Verfahren ist das extrusionsbasierte Fused Deposition Modeling (FDM) (Gebhardt, 2016). Während anfänglich vorwiegend Prototypen gefertigt wurden, verschiebt sich das Gewicht seit einigen Jahren zu industriell gefertigten Funktionsbauteilen (Wohlers, 2019).

## 1.2 Problemstellung

Qualitative Anforderungen an eine Fertigungstechnologie übersteigen den Prototypenbau deutlich. In einer Industrieregion wie Deutschland steht die Qualität der Produkte für die strategische Produktionsplanung und –entwicklung im Vordergrund (Westkämper und Löffler, 2016). Das Deutsche Institut für Normung (DIN) definiert Qualität als „Grad der Erfüllung der an die Merkmale eines Produktes bestehenden Erwartungen“ (DIN EN ISO 9000, 2015). Im Kontext der additiven Fertigung werden Erwartungen insbesondere durch die Reproduzierbarkeit widerspiegelt (Gordon und Meyer, 2012; Shah et al., 2016; Gebhardt, 2016). Sie ist nach derzeitigem Stand der Technik für den industriellen Einsatz oft unzureichend (Huang, Y. et al., 2015; Gebhardt, 2016; Wohlers, 2019). Grund dafür ist, dass die Verfahren nicht in ausreichendem Maß fähig und beherrscht sind (Eschey, 2013). In der Konsequenz wird die Qualität hauptsächlich durch nachträgliche Überprüfung der Werkstücke abgesichert (Wohlers, 2017).

Klassische Verfahren zur Qualitätsüberprüfung, die auf statistischer Auswertung oder Zerstörung von Bauteilen basieren, können für Lose der Größe eins nicht angewendet werden (Gebhardt, 2016). Der Ansatz *Fehler zu verhüten, statt sie zu überprüfen* gewinnt an Bedeutung (Westkämper, 1991). Eine dafür notwendige, systematisch-strukturelle Methode zur Qualitätsabsicherung existiert nicht.

### 1.3 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll eine ganzheitliche Methode zur Qualitätssicherung für das Fused Deposition Modeling Verfahren entwickelt und angewendet werden.

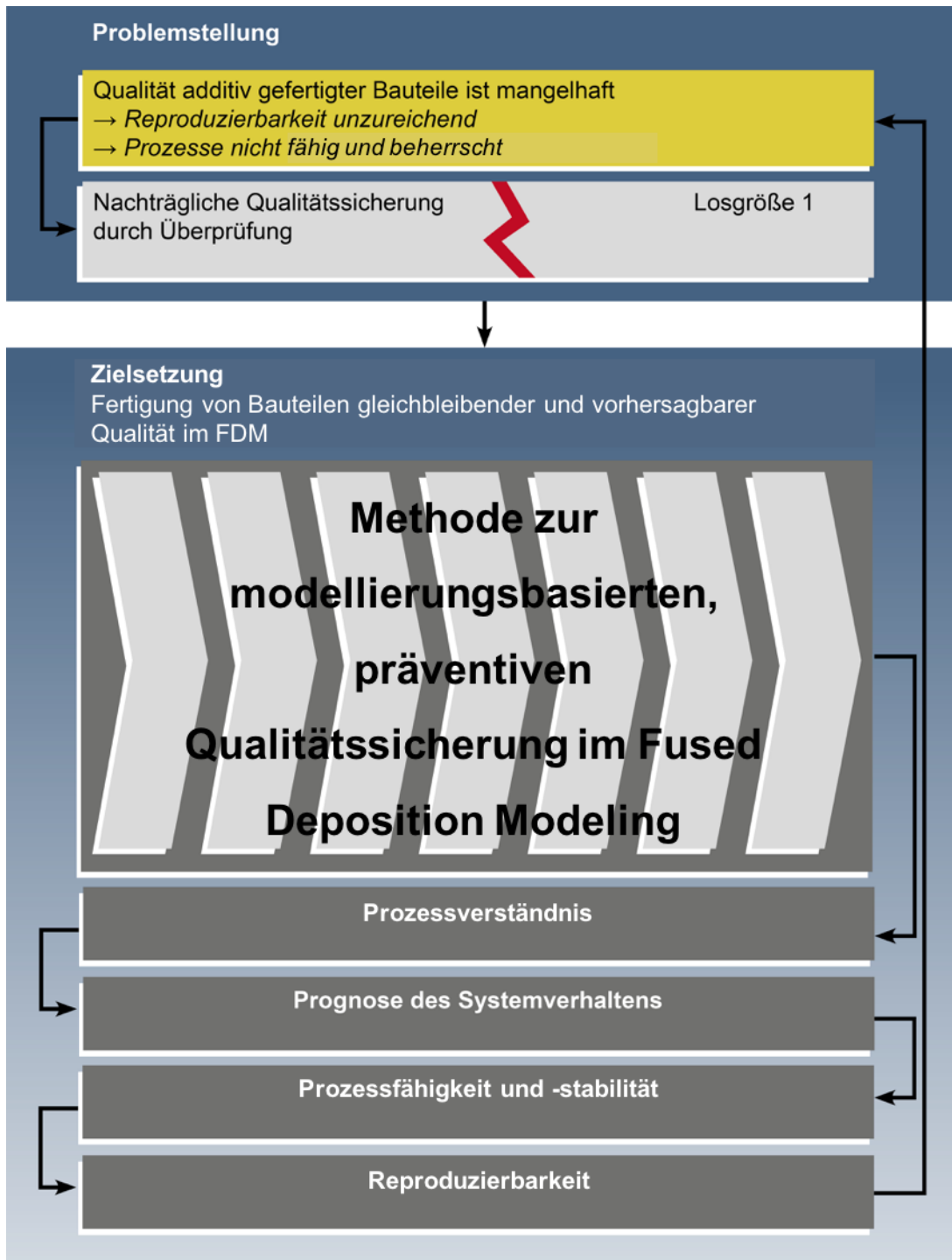


Abbildung 1 - Problemstellung und Zielsetzung (Eschey, 2013; Huang, Y. et al., 2015; Gebhardt, 2016; Wohlers, 2017)

Kern der Methode ist der modellierungsbasierte Aufbau von Prozesswissen. Eingangs- und Ausgangsgrößen des Prozesses, deren Interferenzen sowie physikalische Phänomene sind zu identifizieren und untersuchen. Dazu zählen sowohl die beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren als auch die gewollten und ungewollten Einfluss- und Störgrößen (5M). Die Modellierung gewährt Einblicke in die innere Struktur des Systems und die Wirkzusammenhänge. Ein FDM spezifischer Prüfkörper ist zu entwickeln. Basierend auf generiertem Prozesswissen soll ein Instrument zur Vorhersage von geometrischen Bauteileigenschaften geschaffen werden. Mit Hilfe von numerischer Simulation sind geeignete Einstellgrößen für den Fertigungsprozess zu ermitteln. Innerhalb des aufgespannten Prozessfensters soll der Prüfkörper gefertigt werden. Entsprechen die produzierten Merkmale der Simulation und liegen diese innerhalb der Toleranzgrenzen, liegt ein sicheres Prozessfenster vor. Der Prozess ist fähig, beherrscht und reproduzierend.

#### **1.4 Struktur der Arbeit**

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. In Kapitel eins wird in das Thema eingeleitet und die aktuelle Relevanz der Thematik erläutert. Daraus leiten sich Problemstellung sowie Zielsetzung ab. Anschließend wird auf das Fused Deposition Modeling sowie den aktuellen Stand der präventiven Qualitätssicherung eingegangen. In Kapitel drei werden die Grundlagen gelegt, die zur Entwicklung einer Qualitätssicherungsmethode für das FDM erforderlich sind. Hintergründe zur Modellierung von Fertigungsverfahren als Basis der Methode werden aufgezeigt. In einem nächsten Schritt wird das Forschungsdesign beschrieben. Daraus hervor geht der Aufbau der Methode sowie der Inhalt der Analyse- und Modellierungsschritte. Den definierten Schritten folgend, wird das Problemfeld sukzessive verfeinert und abgebildet. Besondere Bedeutung kommt der Analyse der Wirkmechanismen im Aufbau- und Abkühlprozess zu. Verifizierung und Validierung sind Inhalt des sechsten Kapitels. Zunächst wird eine numerische Simulation an einem Prüfkörper durchgeführt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit einem physisch erzeugten Objekt abgeglichen. In Kapitel sieben werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst. Ein Ausblick für weiteren Bedarf der Untersuchungen wird gegeben.

## 2 Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling (FDM)

### 2.1 Das Verfahren

Der additive Auftrag von Kunststoffen basiert auf vier grundsätzlich voneinander abgrenzbaren Funktionsprinzipien (vgl. Abbildung 2). Liegt der Werkstoff in flüssiger Form vor, findet Photopolymerisation statt. Niederviskose Kunstharze werden mit Hilfe von UV-Strahlung zu Kunststoff ausgehärtet. Bekannte Verfahren auf dieser Basis sind die Stereolithografie (SLA), das Digital Light Processing (DLP) und das dem Ink-Jet Druck ähnliche Multi-Jet Modeling (MJM). Vor wenigen Jahren kam ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren auf den Markt, das als Continuous Liquid Interface Process (CLIP) bezeichnet wird.

Eine weitere typische Form des Ausgangsmaterials ist das Pulver. Wird dieses durch Wärmeeintrag geschmolzen, handelt es sich um Selective Laser Sintering (SLS) oder ein ähnliches Verfahren. Erfolgt das Verbinden der Partikel mit Hilfe eines Binders, spricht man vom 3D-Printing (3DP).

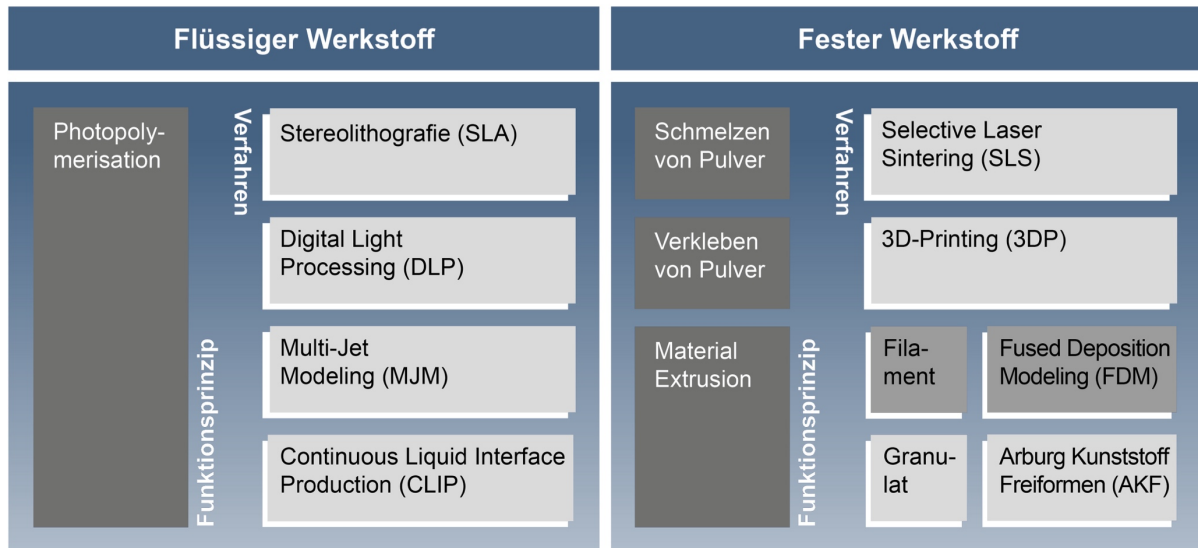


Abbildung 2 - Kunststoffverarbeitende additive Verfahren

Das vierte Prinzip basiert auf der Extrusion von geschmolzenem thermoplastischen Kunststoff. Dieser wird als Granulat oder Filament der Anlage zugeführt. Granulat verarbeitende Verfahren wie das Arburg Kunststoff Freiformen sind selten. Hingegen weit verbreitet sind Anlagen, die drahtförmiges Filament verarbeiten. Sie stellen die

mengenmäßig größte Anzahl weltweit installierter Systeme dar (Wohlers, 2017). Das zu Grunde liegende Verfahren wird laut Normung Material Extrusion (MEX) genannt (VDI 3405 Blatt 3.4, 2019; VDI 3405 Blatt 4.1, 2019). Das Funktionsprinzip basiert auf dem Fused Deposition Modeling (FDM). Dabei handelt es sich um einen Markennamen, der vom Erfinder des Verfahrens, Scott Crump von dem Unternehmen Stratasys Ltd., eingeführt und patentiert wurde (Crump, 1989). Dieser Begriff findet derzeit (12.2020) in Industrie und Forschung hauptsächlich Anwendung und wird in der vorliegenden Arbeit vorrangig benutzt. Weitere gängige Bezeichnungen sind Fused Layer Modeling (FLM) und Fused Filament Fabrication (FFF).

### 2.1.1 Funktionsweise

Nach Gibson et al. ist der FDM Prozess durch sieben Schlüsselmerkmale (Key Features) gekennzeichnet (Gibson et al., 2015). An dieser Stelle wird ein achttes ergänzt: die Bauteilabkühlung im Anschluss an den Herstellprozess. Abhängig von den Randbedingungen kann die Abkühlung des fertigen Objekts einen maßgeblichen Einfluss auf dessen Eigenschaften haben. Es ergeben sich die folgenden acht Prozessschritte:

- Materialbeschickung
- Aufschmelzen
- Druck aufbauen
- Extrusion
- Strangablage
- Strangverbindung
- Support
- Bauteilabkühlung

#### Materialbeschickung

FDM Anlagen verarbeiten Thermoplaste in Form von drahtförmigem, kontinuierlichen Filament, das auf einer Spule bereitgestellt wird. Der Durchmesser von 1,75 mm hat sich am Markt etabliert. Das Filament wird mit einer Vorschubwalze in die Plastifiziereinheit gepresst. Führungseinrichtungen sind nicht zwingend notwendig. Sie sorgen jedoch für höhere Prozesssicherheit und kommen mit steigenden Anlagenpreisen vermehrt vor.



## Aufschmelzen

In der Plastifiziereinheit wird thermische Energie durch Heizelemente eingebracht. Sie sorgt dafür, dass das Filament aufschmilzt. Ziel ist es, ein gleichbleibendes Temperaturniveau der Schmelze während des gesamten Extrusionsvorgangs zu halten.

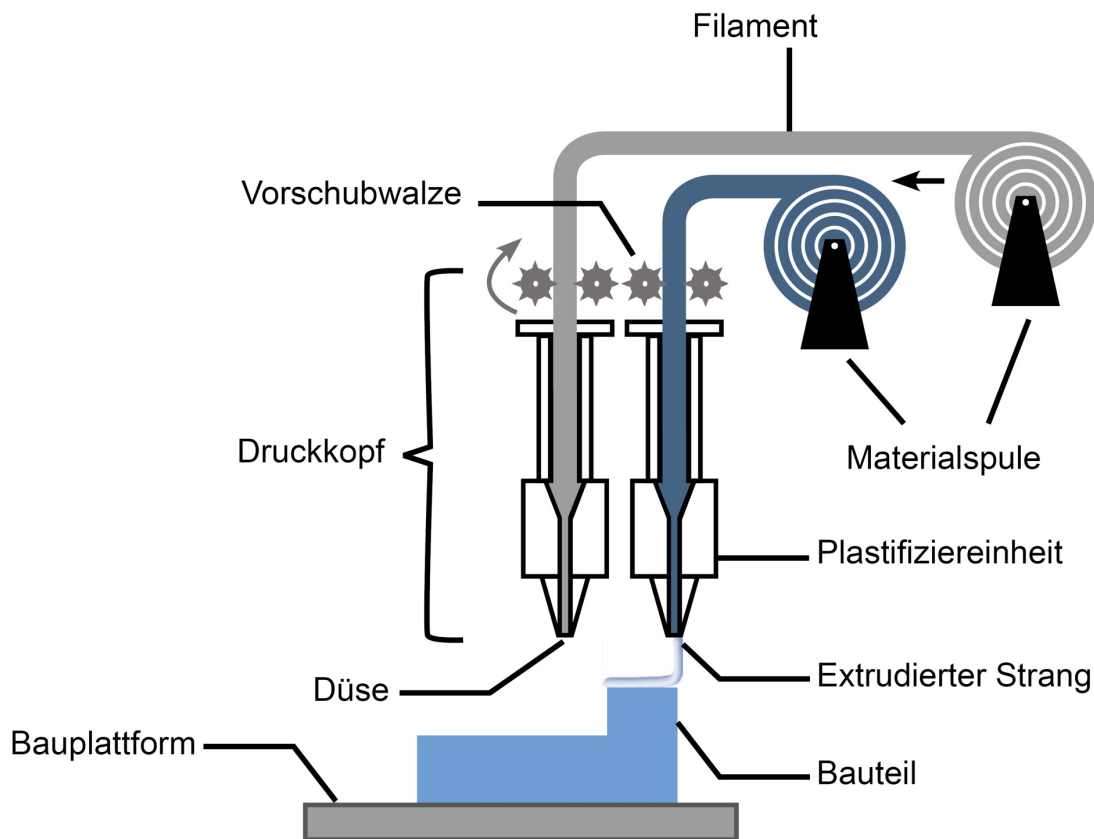


Abbildung 3 – Fused Deposition Modeling (FDM)

## Druck aufbauen

Um ein hochviskoses Fluid durch eine feine Düsenöffnung zu pressen bedarf es einem gewissen Druck. Eine Vorschubwalze sorgt für Kräfteintrag entlang des festen Filaments. Durch dessen Vorwärtsbewegung wird verflüssigtes Material durch die Düse extrudiert. Die resultierende Menge pro Zeit (typischerweise Kubikmillimeter pro Sekunde) wird als Feed Rate bezeichnet.

## Extrusion

Die Druckdifferenz zwischen Schmelze und Umgebung regelt die Extrusionsmenge. Breite und Höhe des extrudierten Stranges ergeben sich aus Form, Durchmesser und Beschaffenheit der Düse sowie dem Abstand zur Bauplattform oder dem Bauteil.

## Strangablage

Entlang eines vordefinierten Weges wird der Strang auf die Bauplattform oder das Bauteil abgelegt. Die Bahnplanung erfolgt gewöhnlich vor dem Bauprozess im Slicer. Sie folgt einer in der Software hinterlegten Slicing- und Ablagestrategie.

## Strangverbindung

Nebeneinander abgelegte Stränge müssen sich miteinander verbinden, um ein physisch kohärentes Modell zu bilden. Thermische Energie des extrudierten Stranges geht in angrenzende polymere Bereiche des Bauteils über. Sie sorgt für ein Anschmelzen der langkettigen Moleküle (Gebhardt, 2016). Die erzeugte physikalische Bindung gibt dem Werkstück die Fähigkeit, Kräfte zu übertragen.

## Support

Im FDM Verfahren sind teilweise Supportstrukturen notwendig, um überhängende Bauteilgeometrien abzustützen. Die Erzeugung der Stützen erfolgt simultan zum Aufbau des Modells. Dafür ablaufende Fertigungsschritte entsprechen den Merkmalen eins bis vier. Der maximale Überhangwinkel ohne Stützen ist von Material, Anlage und den Prozessparametern Spurbreite und Schichtdicke abhängig. Unter Beachtung der Anforderungen an die Qualität betroffener Oberflächen wird zwischen Break Away und löslichem Support ausgewählt. Löslicher Support besteht aus einem Werkstoff, der sich in Wasser oder anderen Fluiden löst. Je nach Schmelzpunkt des Baumaterials wird ein adäquater Werkstoff für den Support ausgewählt. Im Anschluss an den Bauvorgang wird das Werkstück in ein Flüssigkeitsbad eingelegt, in dem die Stützstrukturen entfernt werden. Die Oberfläche des Bauteils wird nicht angegriffen. Um das zusätzliche Material im Bauprozess zu verarbeiten, wird eine zweite Extrusionseinheit in der Anlage benötigt. Lösliches Supportmaterial ist vergleichsweise kostenintensiv. Break Away Strukturen hingegen werden aus Baumaterial gefertigt. Die

eingesetzte Anlage kommt entsprechend mit einem Extruder aus. Form und Anbindung der Stützen sind so gestaltet, dass das Bauteil bei deren mechanischer Entfernung möglichst unbeschädigt bleibt. Support Grate (Support Structure Burrs) lassen sich jedoch nicht vermeiden. Diese werden in Kapitel 2.1.5 diskutiert.

### Bauteilabkühlung

Nach Fertigstellung wird das Bauteil (samt Bauplattform) der Anlage entnommen oder verweilt in dieser. Es kühlt auf Umgebungstemperatur ab. Ausschlaggebend für Dauer und Homogenität sind insbesondere die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs sowie das Temperieren der Bauplattform und des Bauraums. Entsprechende maschinenspezifische Unterschiede werden anschließend betrachtet.

### 2.1.2 Charakteristika der Anlagen

Der grundsätzliche Aufbau von FDM Anlagen folgt dem in Abbildung 3 dargestellten Prinzip. Die Bauplattform ist in den meisten Fällen beheizbar, sodass die erste Schicht besser haftet und ein Ablösen des Bauteils verhindert wird. Auf diese Art wird versucht, den Verzug gering zu halten. Darüber hinaus bieten einige Anlagen die Möglichkeit, den Bauraum zu beheizen. Für manche Werkstoffe wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) ist die Bauraumbeheizung eine Grundvoraussetzung um Verzug und das resultierende Ablösen des Bauteils von der Plattform zu unterbinden. Hinsichtlich konstruktiver Ausgestaltung sind dem Anlagenbauer wenige Grenzen gesetzt. Die Anlagen können mit einem oder mehreren Extrusionssystemen ausgestattet sein. Das bietet neben löslichen Supportstrukturen die Möglichkeit, verschiedene Werkstoffe einzusetzen. Dazu zählen mehrfarbige Anwendungen sowie hart-weich Kombinationen in einem Bauteil.

Dimensionen reichen von Bruchteilen von Millimetern bis zu mehreren Metern. Die erzielbare Auflösung ist von den Prozessparametern und der konstruktiven Ausgestaltung der Anlage abhängig. Anwendung findet das FDM Verfahren für Konzeptmodelle, Funktionsprototypen, Werkzeuge und immer mehr für Endprodukte (Gebhardt, 2016). Auf einen Prototyp folgen typischerweise mehrere tausend Serienteile. Die Fertigung von Endprodukten birgt bedeutendes Potenzial für additive Verfahren.

So vielseitig die additiven Bauprinzipien, so vielseitig sind die Charakteristika der Verfahren. FDM Bauteile unterliegen mehr als andere anisotropen mechanischen Eigenschaften.

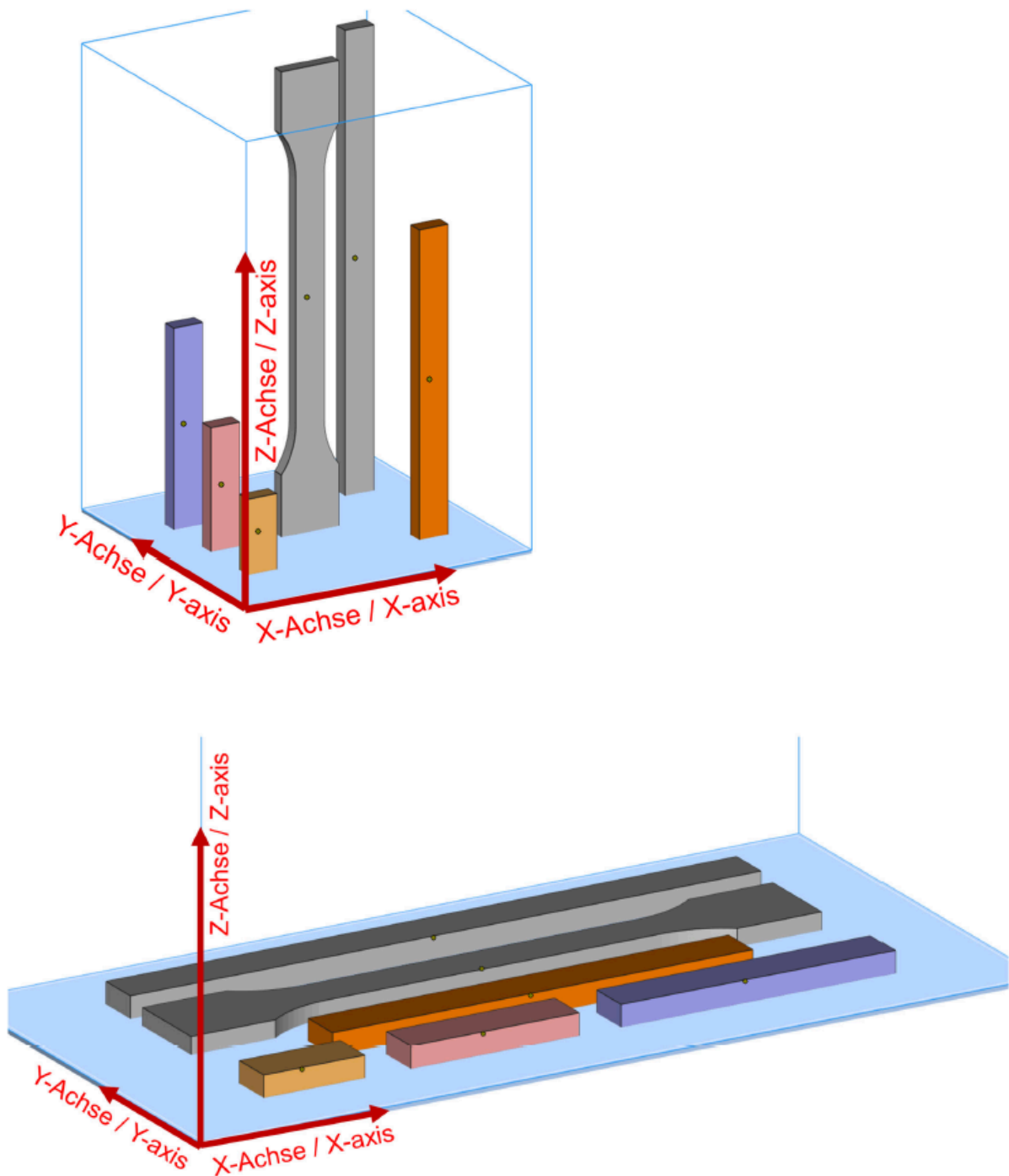


Abbildung 4 - Rasteranordnung in additiven Extrusionsverfahren (VDI 3405 Blatt 7, 2019)

Die Fähigkeit zur Kraftübertragung in Baurichtung ist um ein Mehrfaches geringer als in der Ebene. In Forschungsergebnissen wird von 13 % bis 35 % berichtet (Sun et al., 2008; Duty et al., 2017; Kishore et al., 2017; Shih et al., 2019). Daher ist es umso wichtiger, die Ausrichtung von Werkstücken im Bauraum zu definieren.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat eine standardisierte Rasteranordnung für additive Extrusionsbauteile eingeführt (s. Abbildung 4; VDI 3405 Blatt 7, 2019). Im unteren Bild sind XY-Prüfkörper aufgeführt, oben Z-Prüfkörper. XY-Prüfkörper liegen flach im Bauraum, Z-Prüfkörper sind vertikal am Raster ausgerichtet. Dabei kann das Bauteil frei gedreht werden.

Kunststoffe unterliegen einer hohen Verarbeitungsschwindigkeit. Aus dem schichtweisen Aufbau ergeben sich Herausforderungen für die Einhaltung geometrischer Anforderungen. Ein generelles Defizit aller additiver Verfahren sind die langen Bauzeiten. Das trifft auch auf das FDM zu. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte und später erläuterte Prüfkörper mit Dimension von 100 x 50 x 25 mm wurde in 3,5 h gebaut. Mit Blick auf die Industrialisierung ist das eine der großen Herausforderungen. Eingeschränkt ist FDM ebenso in der Einbindung verschiedener Farben in ein Bauteil. Am Markt angebotene Anlagen sind meist nicht in der Lage, mehr als zwei Farben in ein Bauteil einzubringen. Erste vollfarbige Systeme wurden jedoch vorgestellt und verbreiten sich langsam.

Allen Restriktionen zum Trotz ist das FDM eines der beliebtesten additiven Verfahren (Wohlers, 2017). Gründe dafür liegen nicht zuletzt in der einfachen Bedienbarkeit und Wartung der Anlagen. Kosten für Maschinen und Material sind vergleichsweise gering. Professionelle Geräte sind für einige tausend Euro erhältlich, entsprechendes Filament für geringe zweistellige Beträge pro Kilogramm. Die Anlagen können teils in Büroumgebung betrieben werden. Sie sind im Allgemeinen kompakt und können einfach transportiert werden. Hinsichtlich Geräusch- und Partikelemissionen sind FDM Anlagen im Allgemeinen unbedenklich (Caviezel et al., 2017). Abhängig von Geruchsentwicklung, Geräuschemission der Schrittmotoren und deren Treiber sowie Nutzungsdauer der Anlagen bietet es sich in einigen Fällen an, die Anlagen in einem separaten Raum zu betreiben.

Der Bezug, das Handling und die Lagerung des Filaments unterliegt wenigen Restriktionen und erfordert keine speziellen Vorkehrungen oder Expertise. Giftige Stoffe wie Kühlschmiermittel und Lösemittel werden nicht benötigt. Die Versorgung der Anlagen mit Medien wie Druckluft, Wasser und Abwasser ist nicht notwendig. Einen weiteren positiven Aspekt stellt die Vielzahl an verfügbaren Ausgangsmaterialien dar.

### 2.1.3 Werkstoffe

Grundsätzlich können in Extrusionsverfahren jegliche Materialien verarbeitet werden, die sich thermoplastisch verhalten (Gebhardt, 2016). Keramik, Ton, Beton, Lebensmittel wie Schokolade oder Teigwaren, organisches Zellmaterial, Medikamente und Wachs sind nur einige der extrudierbaren Substanzen. Theoretisch sind ebenfalls Metalle möglich, wenn auch unter vergleichsweise hohen Temperaturen mit entsprechenden Anforderungen an Beständigkeit und Isolation der in der Anlage verwendeten Materialien. Ein im FDM verwendeter Rohstoff liegt in der Regel als hinreichend flexibles, zähes und reißfestes Filament vor, was die Zahl der in Betracht kommenden Stoffgruppen reduziert.

Thermoplastische Kunststoffe eignen sich besonders gut. Eine Vielzahl an Polymeren wird in ihrer ursprünglichen Form, als Blend sowie mit Füllstoffen oder Additiven angereichert, verwendet. Füllstoffe dienen der Anpassung von Verarbeitungs- und Bauteileigenschaften. Metall- und Holzpartikel schaffen veränderte Optik und Haptik, kugelförmige Kohle- und Glaspartikel erhöhen die Zugfestigkeit. Mit Graphen gefülltes Filament ist elektrisch leitfähig, zugesetzter Eisenstaub lässt das Werkstück ferromagnetisch werden. Zur Verarbeitung von Keramiken ist FDM ein beliebtes Verfahren. Es kommt ein thermoplastisches Trägermaterial zum Einsatz. Dieses kann im Anschluss ausgebrannt werden, sodass lediglich der keramische Füllstoff erhalten bleibt. Zum Optimieren der Verarbeitungseigenschaften beziehungsweise um Kunststoffe dem FDM Verfahren grundlegend zugänglich zu machen, werden Additive beigefügt. Ein Beispiel ist mit Glycerol angereichertes Polyethylenterephthalat (PET). Die Kristallisation der Kettenmoleküle wird verhindert und das Filament somit flexibler und weniger bruchgefährdet.

Zudem wird PETG durch die amorphe Struktur transparent, was sich positiv auf die Optik auswirken kann. Geblendete Kunststoffe ermöglichen die gezielte Einstellung gewünschter Werkstoffeigenschaften. Mit Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) geblendetes Polycarbonat (PC) etwa erreicht durch den Synergieeffekt eine außerordentliche Schlagzähigkeit im Vergleich zu den ursprünglichen Stoffen.

- 1 Hochleistungsthermoplaste
- 2 Technische Thermoplaste
- 3 Standardthermoplaste

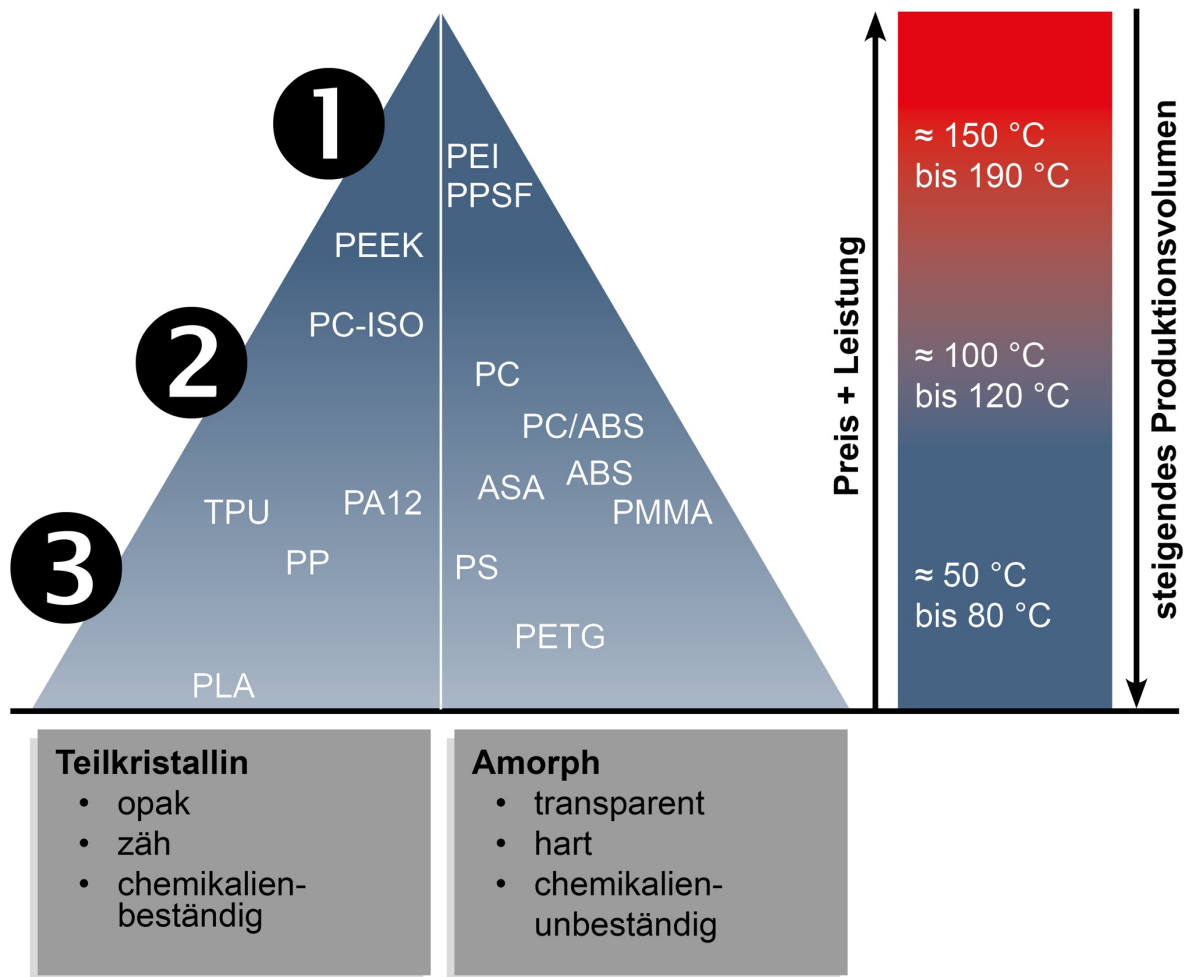


Abbildung 5 - Kunststoffpyramide für FDM, Daten aus (Bonten, 2016; 2019; KERN GmbH, 2019; Stratasys, Ltd., 2019; Ultimaker, 2019)

Abbildung 5 zeigt die Pyramide von verfügbaren Filament Werkstoffen für das FDM. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Materialforschung und Entwicklung für additive Verfahren

mit Nachdruck vorangetrieben wird, erscheinen regelmäßig neue Werkstoffe am Markt. Unterschieden werden Standard-, technische- und Hochleistungsthermoplaste im Prinzip nach Preis und Leistung. Die Wärmeformbeständigkeit dient als Indikator der Leistung. Das Produktionsvolumen verhält sich gegenläufig. Aufgeführte Standardthermoplaste bleiben formbeständig bei maximalen Temperaturen von ca. 50 °C bis 80 °C, technische bei etwa 100 °C bis 120 °C und Hochleistungspolymere können bis zu 190 °C dauerhaft eingesetzt werden. Hochleistungsthermoplaste kommen für besonders anspruchsvolle Anwendungen wie in der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz. Polyetherimide (PEI), welches unter dem Handelsnamen ULTEM vertrieben wird, ist ein typischer Vertreter. In der Pyramide nicht aufgeführt ist das wasserlösliche Polyvinylacetat (PVA). Es wird für auswaschbare Stützen mit einer zweiten Düse aufgetragen. Die Kosten für günstige Filamente liegen bei etwa zehn Euro pro Kilogramm. Sie reichen bis zu mehreren hundert Euro für Hochleistungswerkstoffe von Premiumanbietern.

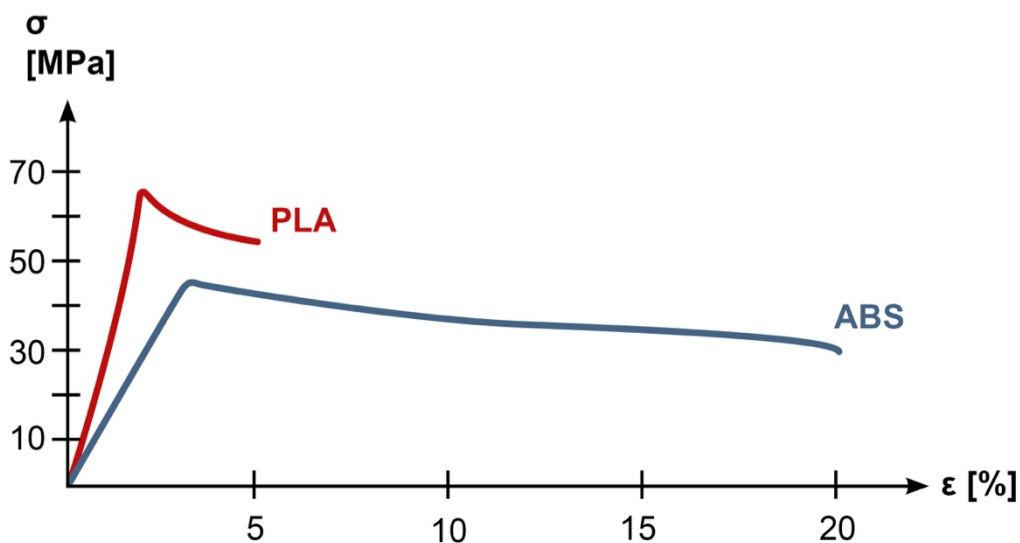


Abbildung 6 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm ABS und PLA, Daten aus (Bonten, 2016)

Im FDM häufig verwendete Werkstoffe sind Polymilchsäure, auch Polylactid (PLA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Im Heimanwenderbereich finden vorwiegend Standardthermoplaste wie PLA Verwendung. Im industriellen Umfeld mittlerer Anforderungen ist ABS verbreitet (Gebhardt, 2016). Unterschiede der Stoffe liegen vor allem in der Wärmeformbeständigkeit. Ein aus PLA gedrucktes Bauteil im Innenraum eines Kraftfahrzeuges etwa kann sich bei intensiver Sonneneinstrahlung verformen.



Die Wärmeformbeständigkeit liegt bei 49 °C (HDT/A) (sd3d, 2019). Gleiches gilt beispielsweise für Kunststoffartikel, die in einer Spülmaschine bei 70 °C gewaschen werden. ABS hingegen ist bis  $\approx 95$  °C - 105 °C (HDT/A) beständig gegen Verformung und damit für einen Großteil alltäglicher Anwendungen geeignet (Bonten, 2016).

ABS zeichnet sich durch hohe Haltbarkeit und Robustheit aus. Es ist schlagzäh und besitzt ein gutes Verhältnis aus Festigkeit und Zähigkeit (s. Abbildung 6). Die Verarbeitung in FDM Anlagen ist nicht trivial. Das spiegelt sich vor allem in der schlechten Haftung an der Bauplattform sowie in hoher Anfälligkeit für Verzug wider. PLA ist biobasiert und biologisch abbaubar. Es wird aus Zucker, Mais, Stärke und anderen Rohstoffen synthetisiert. Neben der einfachen Verarbeitbarkeit ist es vergleichsweise steif und hat eine geringe Zähigkeit. Um sicherzustellen, dass jegliche Filamente mit verfügbaren Anlagen verarbeitet werden können, müssen unter anderem deren Durchmesser und erlaubte Abweichungen einheitlich sein. Das Thema der Standardisierung und Tolerierung wird folgend betrachtet.

#### 2.1.4 Standardisierung und Tolerierung: Richtlinien, Normen und Toleranzen

Standardisierung ist der Prozess der Entwicklung und Einführung technischer Standards, basierend auf einem allgemeinen Konsens aller Interessenvereinigungen. Dazu zählen Unternehmen, Anwender, Standardisierungsorganisationen, Forschungseinrichtungen, Regierungen und andere Gruppen. Sie kann helfen, Kompatibilität, Interoperabilität, Sicherheit, Reproduzierbarkeit und Qualität zu verbessern (Tilton et al., 2017). Darüber hinaus können Produkte, die einstmals etwas Besonderes waren, zu etwas Alltäglichem, Gewöhnlichen, von mehreren Anbietern Erhältlichem überführt werden (Commodization).

Die Standardisierung ist einer der Grundsteine für den Erfolg der Industrialisierung additiver Verfahren (Tilton et al., 2017). Die Weiterentwicklung von Standards wird federführend von zwei Seiten aus vorangetrieben. Das ist zum einen der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), zum anderen die Internationale Organisation für Normung (ISO) in Kooperation mit der nordamerikanischen Standardisierungsorganisation ASTM und dem Deutschen Institut für Normung (DIN). Der vom VDI eingerichtete Fachausschuss 105 erstellt derzeit ein Set an Richtlinien für die additive Fertigung,

die Richtlinienreihe 3405 (s. Tabelle 1). ISO, ASTM und DIN entwickeln äquivalente Normen. Dafür zuständig ist das Technical Committee 261 von DIN und ISO sowie das Committee on Additive Manufacturing 42 der ASTM. Das DIN stellt einen Spiegelausschuss, dessen Aufgabe in der deutschen Meinungsbildung sowie der Benennung der deutschen Delegation für das Komitee besteht. In Tabelle 1 wird ein Überblick der für additive Extrusionsverfahren relevanten Richtlinien und Normen gegeben. Die Unterteilung der Themengebiete ist bei dem VDI und DIN EN ISO/ASTM im Grundsatz deckungsgleich. Bis zum aktuellen Zeitpunkt sind vorwiegend Regelwerke zu allgemeinen, verfahrensübergreifenden Themen veröffentlicht worden.

*Tabelle 1 - Normen und Richtlinien für extrudierende additive Verfahren (VDI 3405, 2014; DIN EN ISO/ASTM 52921, 2017; DIN EN ISO/ASTM 52900, 2018; DIN EN ISO/ASTM 52901, 2018; ISO/ASTM DIS 52903-2, 2018; ISO/ASTM 52910, 2018; VDI 3405 Blatt 3.4, 2019; VDI 3405 Blatt 4.1, 2019; VDI 3405 Blatt 7, 2019)*

Inhalt	VDI Richtlinie (VDI Fachauschuss 105)	Jahr	DIN EN ISO/ASTM Norm, ISO Technical Committee 261, ASTM Committee on Additive Manufacturing 42	Jahr
Verfahrensgrundlagen, Terminologie, Beschaffung	VDI 3405	2019	DIN EN ISO/ASTM 52900	2017
	Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen		Additive Fertigung - Grundlagen – Terminologie	
	VDI 3405 Blatt 7		DIN EN ISO/ASTM 52901	2018
	Güteklassen für additiv gefertigte Kunststoffbauteile	2014	Additive Fertigung - Grundlagen - Anforderungen an die Beschaffung von additiv gefertigten Bauteilen	2018
			DIN EN ISO/ASTM 52921	
			Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung - Koordinatensysteme und Prüfmethodologien	
Konstruktionsempfehlungen	VDI 3405 Blatt 3.2 Additive Fertigungsverfahren; Gestaltungsempfehlungen; Prüfkörper und Prüfmerkmale für limitierende Geometrielemente	In Arbeit	ISO/ASTM 52910	2018
			Standardverfahren - Richtlinie zur Konstruktion bei Additiver Fertigung	

Extrusion (FDM/FLM)	VDI 3405 Blatt 4.1	2019	ISO/ASTM 52903 – 1 / 2 / 3	In Ar-
	Werkstoffextrusion von Kunststoffbauteilen; Material, Filament		Standard Specification for Mate- rial Extrusion based AM of Plastic Materials - Part 1: Feedstock Materials	beit (Part 2: 2018)
	VDI 3405 Blatt 3.4	2019	- Part 2: Process Equipment - Part 3: Final Parts	
	Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Schmelzextrusionsverfahren			
Prüfkörper	VDI 3405 Blatt 3.2	In	ISO/ASTM 52902	In
	Additive Fertigungsverfahren; Gestaltungsempfehlungen; Prüfkörper und Prüfmerkmale für limitierende Geometrieelemente	Arbeit	Additive manufacturing -- Test artifacts -- Standard guideline for geometric capability assessment of additive manufacturing systems	Arbeit

Es handelt sich dabei um Grundlagen, Verfahrensbeschreibungen, Terminologie sowie Anforderungen an die Kommunikation zwischen Hersteller und Anwender. Mit der Richtlinie 3405 des VDI werden unter anderem praxiserprobte Hinweise und Empfehlungen aufgezeigt, um die Kommunikation zwischen Anwender und Hersteller zu verbessern (VDI 3405, 2014). Diese dienen als Grundlage für verbindliche Leistungs-gestaltung und reibungsfreie Auftragsabwicklung. Kommerziell verbreitete Verfahren, Qualitätsmerkmale, Prüfungsempfehlungen und Liefervereinbarungen sind Bestand-teile. Grundlegende Begriffe werden definiert. Neben dem Aufzeigen von Anwen-dungsbeispielen werden Empfehlungen für geeignete Prozesse zur Nachbehandlung sowie für den Datenaustausch gegeben. Die Empfehlungen der VDI-Richtlinie 3405 sind für jegliche additiven Verfahren gültig und daher von allgemeiner und qualitativer Natur. Quantitative Aussagen werden und können nicht generisch getroffen werden. Ähnlich gestalten sich die Inhalte der Normen DIN EN ISO/ASTM 52900, DIN EN ISO/ASTM 52901 und DIN EN ISO/ASTM 52921 (DIN EN ISO/ASTM 52900, 2018; DIN EN ISO/ASTM 52901, 2018; DIN EN ISO/ASTM 52921, 2017).

Ein erster Aufschlag von Konstruktionsempfehlungen, die insbesondere für den Pro-dukzentstehungsprozess von Bedeutung sind, wird mit der ISO/ASTM 52910 gemacht

(ISO/ASTM 52910, 2018). Jedoch ist die Norm verfahrensübergeordnet und dementsprechend allgemein gehalten. Sie bietet eine Sammlung an generischen Informationen, wie folgender Abschnitt exemplarisch darstellt. „Die schichtweise materialauftragende Natur der Verfahren bedeutet, dass praktisch jede Bauteilform ohne Werkzeuge wie Gussformen, Gesenke oder Aufnahmevorrichtungen hergestellt werden kann. An individuelle Anforderungen angepasste Geometrien können ökonomisch gefertigt werden.“ (ISO/ASTM 52910, 2018, Übersetzung aus dem Englischen). Aufgrund erheblicher Unterschiede zwischen additiven Technologien sind verfahrensspezifische Hinweise für die Gestaltung von Bauteilen unerlässlich.

Mit Blatt 3.4 der Richtlinie 3405 wurden vom VDI Gestaltungsempfehlungen für Extrusionsverfahren im Jahr 2019 veröffentlicht (VDI 3405 Blatt 3.4, 2019). Im ersten Drittel werden normative Verweise, Begriffe, Grundlagen, Formelzeichen und anderes geklärt. Darauf folgen spezifische Gestaltungsempfehlungen, geometrische Toleranzen und Genauigkeit sowie verfahrensspezifische Folgeprozesse. Die Gestaltungsempfehlungen beinhalten unter anderem die Thematik minimaler und maximaler Lochdurchmesser, wie in Kapitel 2.1.5 diskutiert. Darüber hinaus werden Wandstärken, Neigung, freistehende Geometrielemente, Überhang und Spaltmaße im Detail betrachtet. So wird beispielsweise der vertikale Lochdurchmesser mit  $d \gg 2 t_s$  und  $d \geq 2,0$  mm empfohlen. Dabei ist  $t_s$  die Schichtdicke. Die Ausführungen beinhalten Hinweise auf fertigungsgerechte Konstruktion mit konkreten Werten und Skizzen.

Blatt 4.1 ist auf den Prozess und das Material für extrudierende Verfahren ausgerichtet (VDI 3405 Blatt 4.1, 2019). Die Richtlinie stellt eine Ergänzung zur ISO/ASTM DIS 52903-1 dar. Inhalt ist die Materialeextrusion von Kunststoffbauteilen mit dem Fokus auf der Charakterisierung des Filaments. Materialeinflussparameter sowie Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit und Bauteileigenschaften werden beschrieben. Dazu zählen Filamentgeometrie, Lunker, Poren und Gasblasen, Verunreinigungen, Feuchtegehalt, Temperatur, Biegebarkeit, Härte, Füllstoff und optische Eigenschaften. Die Ausführungen haben einen hohen Detaillierungsgrad. Sie können direkt von Herstellern und Anwendern für den betrieblichen Alltag eingesetzt werden. Die zugrundeliegende Norm ISO/ASTM 52903 – 1/2/3 enthält Empfehlungen zu Ausgangsmaterial, Prozesszubehör sowie Fertigteilen und ist fragmentarisch in der Entwurfsfassung veröf-

fentlicht. In Part zwei werden Angaben zur Herstellung von Probekörpern, Verantwortung für Qualitätssicherung, Toleranzen, Oberflächenrauheit und Qualifizierung gemacht. Die Inhalte sind allgemein gültig formuliert, wie folgender Auszug exemplarisch darlegt. „Toleranzen und Oberflächenrauheit: Die absolut oder relativ angegebenen Toleranzen sowie die Oberflächenrauheit müssen vom Kunden in Rücksprache mit dem Teilehersteller definiert werden.“ (ISO/ASTM DIS 52903-2, 2018, Übersetzung aus dem Englischen).

Toleranzen bezeichnen die geduldete Abweichung einer Größe vom Normalzustand. Für den Normalzustand wird ein digitales Modell zu Grunde gelegt. Derzeit stellt die Tolerierung eine große Herausforderung für Anwender und Hersteller dar. Die Norm ISO/ASTM 52901 empfiehlt, Allgemeintoleranzen nach ISO 2768 anzunehmen (DIN ISO 2768, 1991; DIN EN ISO/ASTM 52901, 2018). Diese sind nicht auf additive Verfahren ausgerichtet. Eine Zuteilung der einzelnen Verfahren zu den vorgelegten Toleranzklassen f (fein), m (mittel), c (grob) und v (sehr grob) wird nicht vorgenommen. In der Praxis wird die Toleranzgruppe v (sehr grob) üblicherweise für Extrusionsverfahren herangezogen (vgl. Kapitel 5.2; rapidobject, 2019).

Das im April 2019 aktualisierte Blatt sieben der VDI Richtlinie 3405 führt darüber hinaus ein Güteklassensystem ein (VDI 3405 Blatt 7, 2019). Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, relative Bauteildichte und Maßhaltigkeit werden den Güteklassen null bis zehn mit entsprechenden Toleranzen zugeordnet. Werte für die Maßhaltigkeit sind der DIN 16742 zu entnehmen, in der Toleranzen und Abnahmebedingungen für Kunststoff-Formteile geregelt sind (DIN 16742, 2013).

Je nach Güteklasse finden nicht werkzeuggebundene (NW) Werte der Toleranzgruppen (TG) eins bis neun Anwendung (VDI 3405 Blatt 3.4, 2019; VDI 3405 Blatt 7, 2019). Nach Blatt sieben der VDI-Richtlinie 3405 kommen für Materialextrusion von ABS die Gruppen TG vier bis sieben in Frage (VDI 3405 Blatt 7, 2019). Typischerweise können TG vier bis TG sechs erreicht werden (VDI 3405 Blatt 3.4, 2019). Das entspricht im Güteklassensystem den Klassen zwei bis vier (vgl. Tabelle 2). Die passende Auswahl obliegt dem Anwender im jeweiligen Einsatzfall. Entsprechende Toleranzen der Maßhaltigkeit sind der DIN 16742 zu entnehmen (vgl. Anhang; DIN 16742, 2013).

Es ist zu sehen, dass umfangreiche Maßnahmen zur Standardisierung für additive Verfahren eingeleitet sind. Die Ausgestaltung befindet sich aktuell in einem frühen Entwicklungsstadium. Grundlagen in Form von allgemein gültigen Aussagen wurden geschaffen. Umfangreiche Bemühungen für die weitere Entwicklung der Standards werden von VDI und ISO/ASTM unternommen. Ein besonderer Fokus liegt auf verfahrensspezifischen Regelwerken. Diverse Richtlinien und Normen werden derzeit erstellt und sukzessive zu einem gesamten Konzept erweitert. Die Entwicklung der Regelwerke für das Lasersintern ist am weitesten vorangeschritten.

Tabelle 2 - Güteklassen für additiv gefertigte Kunststoffbauteile (VDI 3405 Blatt 7, 2019)

Kennwert / Characteristic value	E-Modul / E-modulus	Zugfestigkeit / Tensile strength	Bruchdehnung / Elongation at break	Relative Bauteildichte / Relative part density	Maßhaltigkeit / Dimensional accuracy	
Einheit / Unit	MPa	MPa	%	%		
Prüfnorm / Test standard	DIN EN ISO 527-1/ DIN 53504	DIN EN ISO 527-1/ DIN 53504	DIN EN ISO 527-1/ DIN 53504	gemäß Abschnitt 8.3 / according to Section 8.3	DIN 16742	
Güteklasse / Quality grade	Klasse / Grade 10	> 8000	>100	>200	>99,5	–
	Klasse / Grade 9	> 6000...8000	> 85...100	> 100...200	>99...99,5	–
	Klasse / Grade 8	> 5000...6000	> 70...85	> 50...100	> 98,5...99	TG 1 NW
	Klasse / Grade 7	> 4000...5000	> 60...70	> 35...50	> 97,5...98,5	TG 2 NW
	Klasse / Grade 6	> 3000...4000	> 50...60	> 25...35	> 95...97,5	TG 3 NW
	Klasse / Grade 5	> 2500...3000	> 45...50	> 20...25	> 92,5...95	TG 4 NW
	Klasse / Grade 4	> 2000...2500	> 40...45	> 15...20	> 90...92,5	TG 5 NW
	Klasse / Grade 3	> 1500...2000	> 30...40	> 10...15	> 85...90	TG 6 NW
	Klasse / Grade 2	> 1000...1500	> 20...30	> 5...10	> 80...85	TG 7 NW
	Klasse / Grade 1	> 500...1000	> 10...20	> 3...5	> 70...80	TG 8 NW
	Klasse / Grade 0	0 ... 500	> 0...10	0...3	> 0...70	TG 9

Richtlinien für Extrusionsverfahren werden derzeit veröffentlicht. Für die Absicherung der Kommunikation zwischen Hersteller und Anwender wurde vom VDI ein Güteklassensystem eingeführt. Darüber hinaus sind Gestaltungsrichtlinien für additive Extrusionsverfahren ausführlich und mit konkreten Werten beschrieben. Sie dienen als geeignete Hilfestellung für Konstrukteure und andere Interessengruppen. Eine Fülle an

weiteren Werken ist in Arbeit. Zur Fehlervermeidung und entsprechender Industrietauglichkeit des FDM ist es von Relevanz, dass Standards weiterentwickelt und insbesondere einen höheren verfahrensspezifischen Detaillierungsgrad erlangen. Grundlegende Überlegungen zu Abweichungen, Fehlern und deren Ursachen im FDM werden im folgenden Kapitel angestellt.

#### 2.1.5 Abweichungen und Fehler

Eine Abweichung liegt vor, wenn ein „Unterschied zwischen einem Merkmal oder einem dem Merkmal zugeordneten Wert und einem Bezugswert“ besteht (DIN 55350, 2008). Ein Fehler entspricht der „Nichterfüllung einer Anforderung“ (DIN EN ISO 9000, 2015). Abweichungen können zu Fehlern führen, müssen jedoch nicht zwangsweise. Ziel der präventiven Qualitätssicherung ist es, die Ursachen von Fehlern bereits im Vorfeld der Produktion zu eliminieren (Westkämper, 1997). Folgende Fehler entstehen typischerweise an FDM-Bauteilen, wenn es während des Bauprozesses zu Abweichungen kommt.

*Delamination*, auch Schichtablösung genannt, tritt auf, wenn Schichten nicht ausreichend miteinander verbunden sind. Der Bezugswert für die Benetzung muss mindestens so hoch sein, dass eine beständige Schichtverbindung entsteht. Oberhalb des Wertes reicht die Kraftaufnahme aus, dass Schichten sich nicht durch Eigenspannungen voneinander lösen. Wird der minimale Benetzungswert unterschritten, liegt eine Abweichung vor. Mit eintretender Delamination entsteht ein Fehler am Bauteil. Die Anforderung an das Erzeugnis der Werkstoffhomogenität ist nicht erfüllt. Der Grund für den Fehler liegt beim Sintervorgang zwischen aufeinanderliegenden Strängen. Wenn Eigenspannungen auf die Schwachstellen wirken, lösen sich Schichten voneinander. Neben Abweichungen bezüglich Geometrie, Oberfläche und Werkstoff kann durch abgelöste Schichten der Bauprozess unterbrochen und im schlimmsten Fall die Anlage beschädigt werden.

*Strangverbindungsfehler* sind das Äquivalent zur Delamination zwischen einzelnen Strängen. Ursachen dafür können vielschichtig sein. Im Gegensatz zur Delamination

führen sie nicht zum Abbruch des Prozesses und Versagen des Bauteils. Strangverbindungsfehler führen zu reduzierter Werkstoffhomogenität. Sie resultieren in verminderten mechanischen Eigenschaften.

Im FDM liegt stets der *Stufeneffekt* in Baurichtung vor. Ursache ist der schichtweise Materialauftrag. Selbst bei feinsten Schichtdicken wird immer eine Stufe zwischen zwei Schichten erkennbar sein. Abhängig von der Auflösung in Z-Richtung fällt der Stufeneffekt mehr oder wenig intensiv und sichtbar aus. Der auch *Stair-Step* genannte Effekt wirkt sich auf optische und haptische Eigenschaften aus. Mechanische Eigenschaften werden nicht tangiert.

Ungewollt extrudierte Kunststoffschmelze wird als *Herausquellen (Oozing)* bezeichnet. Während der Positionierung des Druckkopfes tritt Schmelze unkontrolliert aus der Düse. Die Prozessabweichung hat nicht zwangsweise Fehler zur Folge, kann jedoch optische und funktionelle Fehler zur Folge haben. Verantwortlich dafür ist das Zusammenspiel von Strangaufweitung, Viskosität, Fließverhalten, Schwerkraft, Düsentemperatur und Düsendurchmesser. Verunreinigungen, Materialanhaftungen an der Oberfläche des Bauteils und geometrische Abweichungen treten auf. Durch geeignete Einstellungen beziehungsweise Nacharbeit kann der Effekt abgestellt oder zumindest eingedämmt werden. Teils muss das Druckergebnis verworfen werden.

Unter *Schattenbildung (Shadowing)* wird ein mechanisch und softwaretechnisch induzierter Fehler an der Bauteiloberfläche verstanden. Zuvor abgebildete Konturen wiederholen sich mit geringerer Ausprägung an einer später abgefahrenen Stelle. Ursache dafür liegt bei der Steifigkeit der Maschine in Verbindung mit der Trägheit des Druckkopfes und entsprechend auftretenden Schwingungen beim Abfahren der Formkonturen. Eine zusätzliche Verstärkung des Effektes durch Fehler in der Maschinensteuerung kann nicht ausgeschlossen werden. Durch Nachbearbeitung in Form von Schleifen oder Glätten der Oberfläche können die Schatten zum Teil beseitigt werden.

Schwerer bis gar nicht zu beheben sind *defekte Grund- oder Deckschichten*. Der Effekt ist vom Einzelfall abhängig, sodass keine allgemeine Aussage zur Ursache der Entstehung getroffen werden kann.



Eine Schicht im FDM hat stets einen Anfang und ein Ende, die typischerweise sichtbar sind. Werden diese softwareseitig konstant übereinander positioniert, entsteht eine Art Bindenahet. Der Fehler wird als *Start-Stop-Defekt* bezeichnet. Moderne Slicer folgen Algorithmen, die stets variierende Start- und Stoppositionen in einer Schicht vornehmen. So kann der Fehler an der Oberfläche zumindest eingedämmt werden.

Eingezogenes Filament wird über einen Schrittmotor per Walze gefördert. Dabei kann es vorkommen, dass die Zähne der Walze nicht genug Reibung gegenüber dem Filament aufbauen und zu rutschen beginnen. Tritt der Fehler auf, kann die Extrusionsmenge des Materials nicht korrekt gesteuert werden. Ein Prozessabbruch beziehungsweise eine fehlerhafte Stelle im Bauteil ist die Folge. Grund für rutschende Walzen können in den mechanischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials sowie im aufgebauten Gegendruck liegen. Dieser ist das Resultat aus der Feed Rate und dem Düsendurchmesser.

Aus Baumaterial gefertigte Stützen werden im Anschluss an den Bauprozess herausgebrochen. An den Verbindungsstellen zum Bauteil entsteht ein *Support Grat* (*Support Structure Burr*). Dieser kann durch Form und Füllgrad des Supports reduziert, aber nie eliminiert werden. Abhilfe schafft Supporterzeugung mit lösbarem Material über eine zweite Extrusionseinheit. Diese Option ist einfacher im Handling, erzeugt glatte Oberflächen und ist kostenintensiver.

Ein ungleichmäßiger Temperaturgradient in Verbindung mit Eigenspannungen und Schwindung kann in *Verzug* resultieren. Eine detaillierte Betrachtung erfolgte im Rahmen des Abkühlprozesses in Kapitel 5.4.2.

Zu viel beziehungsweise zu wenig extrudiertes Material über einen bestimmten Weg wird als *Over Extrusion* oder *Under Extrusion* bezeichnet. Das kann zu reduzierten mechanischen Eigenschaften und optischen Mängeln führen. Um das Problem zu beheben ist zum einen das Slicerprogramm zu optimieren. Es ist sicher zu stellen, dass an jedem Ort die gleiche Menge Material abgelegt wird. Insbesondere für Beschleunigungsrampen ist die Einstellung nicht trivial. Zum anderen ist sicherzustellen, dass das eingesetzte Filament geringe Abweichungen des Durchmessers aufweist.

Insbesondere bei kleinen Löchern tritt zuweilen das Phänomen zu *geringer Durchmesser* auf. Die Ursache dafür kann aus verschiedenen Faktoren erwachsen. Ein möglicher Grund ist die Volumenzunahme der Schmelze bei Austritt aus der Düse durch den Effekt der Strangaufweitung. Ein weiterer geht aus der Oberflächenspannung in Kombination mit der auf Viskosität basierenden Zähigkeit der Schmelze hervor. Beim Extrudieren einer kreisrunden Kontur wirken Zugkräfte hin zum Zentrum des Loches. Der Strang wird zur Mitte gezogen. Ein weiterer Grund für zu kleine Lochdurchmesser wird in der Materialschwindung gesehen. Während der Abkühlung wird ein kleiner Hohlraum, also das Loch, durch schwindendes Material zusammengezogen. Eine Vielzahl an Parametern hat einen Einfluss auf die Durchmesserabweichungen. Das sind die Extrusionstemperatur, der Düsendurchmesser, die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum, die Konstruktion, Positioniergenauigkeit, die Art des Werkstoffes und nicht zuletzt die Slicing- und Ablagestrategie. Beschriebene Abweichungen und Fehler können zum Teil durch präventive Maßnahmen im Vorfeld der Produktion abgeschaltet werden. Eine Auswahl wird im Folgenden beschrieben.

## **2.2 Ansätze zur präventiven Qualitätssicherung additiver Fertigungsverfahren**

Bereits vor drei Jahrzehnten wurde der Grundsatz *Fehler zu verhüten statt sie zu erprüfen* umfangreich diskutiert (Westkämper, 1991). Die im Zuge der Automatisierung aufkommenden Produktionsverfahren waren vorrangig für Serien- und Massenfertigung geeignet. Dazu zählen Gießverfahren wie das Spritzen von Kunststoffen und materialabtragende wie das Zerspanen. Um den vorgegebenen Toleranzkorridor quantifizierbarer Qualitätsmerkmale einzuhalten, kamen und kommen meist überprüfende Verfahren zum Einsatz. Dabei wird der Trend eines Merkmals durch die Analyse von Stichproben identifiziert und im Idealfall vor der Produktion von Ausschuss angepasst. Diese Vorgehensweise widerspricht dem eingangs genannten Grundsatzes, ist jedoch simpel in der Umsetzung und hat sich im industriellen Umfeld etabliert.

Die Qualitätssicherung in der additiven Fertigung besteht heute im Allgemeinen ebenfalls in der nachträglichen Überprüfung von Eigenschaften am Bauteil (Gebhardt, 2016; Klahn et al., 2018). Liegen die Werte innerhalb definierter Toleranzen, findet das Bauteil Verwendung. Andernfalls wird es nachgearbeitet oder verworfen und erneut gefertigt. Ein solcher Trail-and-Error Ansatz kann bestenfalls für Experimente, in

der Entwicklung oder für Heimanwender genutzt werden. Das besondere Potenzial additiver Verfahren liegt bei der Herstellung von Kleinserien und Einzelteilen. Ansätze der Überprüfung, Trendanalyse und zerstörende Verfahren können nicht wirtschaftlich eingesetzt werden.

Vor dem Hintergrund, dass 75 Prozent der Fehler an Produkten ihren Ursprung vor der eigentlichen Fertigung haben, sind präventive Ansätze von entscheidender Bedeutung für die strategische Ausrichtung einer Fertigung (Westkämper, 1991). Die Fehlervorbeugung ist der Schlüssel zum Erfolg und muss entsprechend frühzeitig im Produktentstehungsprozess realisiert werden. Verschiedene Maßnahmen werden folgend vorgestellt:

- Kalibrierung der Anlage
- Empirische Prozessentwicklung
- Expertise Anlagenbediener
- Numerische Simulation
- Geometriebasierte Optimierung
- Design for Additive Manufacturing (DfAM)
- Standardisierung und Normierung

### 2.2.1 Kalibrierung der Anlage

Die Kalibrierung der Fertigungsanlage hat einen bedeutenden Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit (Gebhardt, 2016). Neben steifer sowie vibrations- und schwingungsarmer Auslegung der Anlage ist besonders die Einstellung von Achsen und Antrieben von Bedeutung. Um in einer FDM Anlage eine hohe Positioniergenauigkeit zu gewährleisten, muss die reale Schrittlänge des Motors mit dem softwareseitig hinterlegten Wert präzise abgeglichen werden. Dehnung und Torsion der Kraftübertragungseinrichtungen wie Wellen oder Zahnriemen fließen in die Betrachtung ein. Prüfkörper verschiedenster Ausführungen werden zur indirekten Kalibrierung der Fertigungsanlagen genutzt. Diese können die Form eines einfachen Würfels bis zu komplexen Formen annehmen.

### 2.2.2 Empirische Prozessentwicklung

Ziel der empirischen Prozessentwicklung ist es, Verknüpfungen zwischen Input und Output Parametern durch Experimente zu verstehen. Grundlage kann ein Versuchsplan nach der Design of Experiments (DoE) Methode oder iteratives Vorgehen nach dem Trial-and-Error Prinzip sein. Dieser Ansatz führt in der Regel direkt zu praktisch verwertbaren Ergebnissen (Eschey, 2013). Er ist zeit-, arbeits- und materialintensiv und schwer zu generalisieren. Die innere Struktur des behandelten Systems bleibt unberührt.

### 2.2.3 Expertise Anlagenbediener und Kommunikation

Wissen über additive Prozesse ist hauptsächlich beim Anlagenbediener angesiedelt (Caviezel et al., 2017). Dieser hat einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Fertigung. Beschäftigte in der additiven Fertigung müssen eine neue Bandbreite an Fähigkeiten entlang der gesamten Prozesskette der Produktentstehung abdecken. Neben klassischen Prozessplanungs-, Steuerungs- und Exekutionsaufgaben muss der Anlagenbediener Kenntnisse im Bereich der Konstruktion und im Umgang mit Computer Aided Design (CAD) Daten und Programmen mitbringen. Ein Potenzial der additiven Verfahren liegt bei der Herstellung kundenindividueller Produkte. So bekommt die Kommunikation zwischen Kunde, Konstrukteur und Anlagenbediener eine neue Bedeutung (Gebhardt, 2016). Regelmäßige Abstimmung und entsprechend kommunikative Fähigkeiten aller Beteiligten sind Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Abwicklung. Der Mitarbeiter an der Maschine akquiriert umfangreiches Prozessverständnis, Materialkenntnis und entwickelt darüber hinaus manuelle Fähigkeiten. Derartige Expertise kann nicht durch Schulungen vermittelt werden, sondern wird in der Praxis erworben (Caviezel et al., 2017). Verlässt der Mitarbeiter das Unternehmen, fließt gleichzeitig Fachwissen ab. Deutlich zu beobachten ist die Fluktuation von Mitarbeitern im Bereich der additiven Fertigung von Forschungseinrichtungen zu Anlagenherstellern hin zu produzierenden Unternehmen (Caviezel et al., 2017).

## 2.2.4 Geometriebasierte Optimierung

Der additive Bauprozess basiert auf einem digitalen Modell des Werkstücks und Informationen über Prozessparameter. Zu erwartende Defizite am Bauteil sind mitunter vor der Herstellung abschätzbar. Sie können durch Manipulation des CAD Modells kompensiert werden (s. Abbildung 7). Auf diese Art wird die Gestaltabweichung reduziert. So können etwa unter Annahme gleichmäßiger Schwindung Abweichungen durch entsprechende Beaufschlagung kompensiert werden (Eschey, 2013).

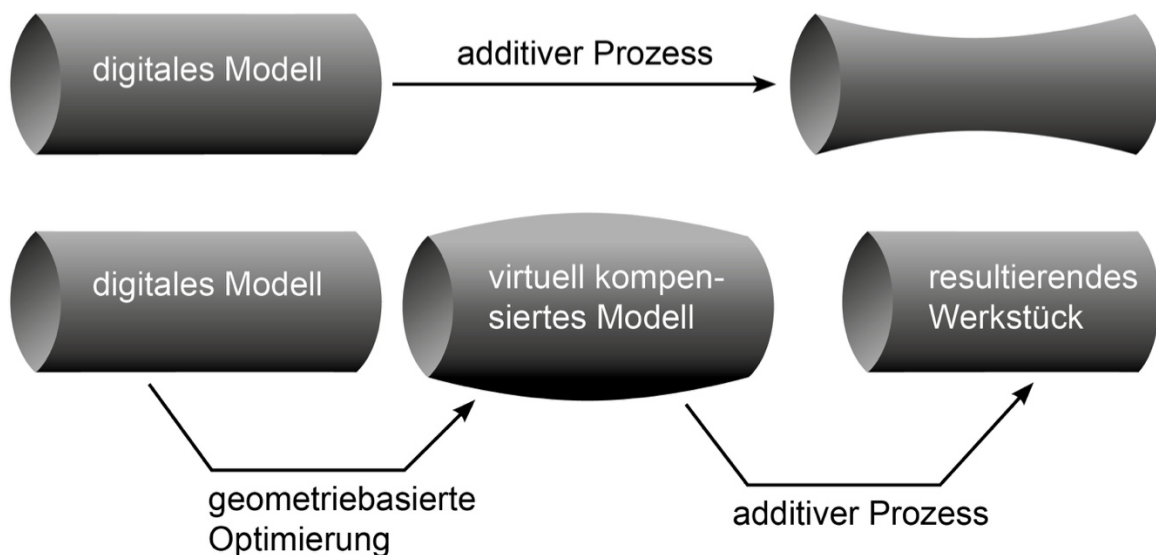


Abbildung 7 - Geometriebasierte Optimierung in Anlehnung an (Eschey, 2013)

Der Optimierungsansatz ist im Prinzip für jegliche einfachen Geometrien anwendbar. Obwohl keine generelle Übertragbarkeit auf beliebige additive Verfahren oder Werkstücke gegeben ist, sind die Auswirkungen der geometriebasierten Optimierung auf die Prozessfähigkeit durchweg positiv (Eschey, 2013). Es werden jedoch nicht die Ursachen der Abweichungen eliminiert, sondern deren Auswirkungen abgeschwächt. Das Prinzip dient der Reduzierung von Formabweichungen.

## 2.2.5 Design for Additive Manufacturing (DfAM)

Unter Design for Additive Manufacturing wird ein Set an Methoden und Werkzeugen verstanden, das dazu dient die spezifischen Charakteristika der additiven Verfahren

optimal zu nutzen. Herstellbarkeit, Zuverlässigkeit und Kosten werden optimal an die vom Produkt zu erfüllenden Anforderungen angepasst (Tang und Zhao, 2016). Im Zentrum steht das Potenzial der uneingeschränkten Formfreiheit materialauftragender Verfahren. Um die Ganzheit der Vorteile ausschöpfen zu können, werden DfAM Methoden und Werkzeuge benötigt. Typische DfAM Methoden sind unter anderem die Topologieoptimierung, Design für Mehrskalen Strukturen (Gitter,- Zell- und Wabenstrukturen), Multimaterial Design und Mass Customization (Thompson et al., 2016).

Fertigungsgerechte Konstruktion hat für additive Verfahren einen besonderen Stellenwert. Dabei ist es nicht das Ziel, ein Produkt von abtragender in auftragende Bauweise zu überführen, sondern vielmehr eine Neukonstruktion in Anlehnung an die Möglichkeiten des formlosen Materialauftrags. So wird etwa die Besonderheit der Verfahren genutzt, komplexe Bauteile herzustellen und damit den nachgelagerten Montageaufwand drastisch zu reduzieren (Gebhardt, 2016). Bei Kunststoffformteilen muss nicht mehr auf Hinterschnitte verzichtet werden, um kostenintensive Schieber im Spritzgießwerkzeug zu vermeiden. Entformungsschrägen, Trennebenen und Anspritzpunkte entfallen gänzlich. Neben der Konstruktion wird die Definition von Verfahren, der Anlage, Material und Fertigungsparametern in einem früheren Schritt im Produktentstehungsprozess wichtiger als bisher. So entscheiden beispielsweise die Extrusionstemperatur und die Schichtdicke im FDM maßgeblich über die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils (Gebhardt, 2016).

#### 2.2.6 Standardisierung und Normierung

In einer Informationsgesellschaft hat das verfügbare Wissen einen starken Einfluss auf die Produktivität und somit Erfolg und Wachstum der Wirtschaft (Jungmittag und Mangelsdorf, 2000). Allgemein anerkannte Regeln der Technik können insbesondere für aufstrebende, technologische Industriezweige von außerordentlicher Bedeutung sein. Sie bilden das Fundament, auf dem die Technologie aufgebaut werden kann (Tilton et al., 2017). Standardisierungsmaßnahmen haben einen positiven Einfluss auf die Kontrolle und Reduzierung von Risiko, die Effizienzsteigerung, Konsistenz der Qualität sowie zuverlässige Reproduzierbarkeit (Tilton et al., 2017). Schriftlich nieder-

gelegte Regelwerke für einzelne Technologien schildern bewährte und etablierte Methoden. In Kapitel 2.1.4 wurden für das FDM relevante Richtlinien, Normen und Standards betrachtet und diskutiert.

### 2.2.7 Numerische Simulation

Hohe Rechenleistung von modernen Computern wird zur Lösung komplexer Probleme herangezogen. Das zu Grunde liegende mathematische Modell besteht typischerweise aus einem Differentialgleichungssystem. Zur Lösung des Problems wird das Gesamtsystem in diskrete Objekte unterteilt, Finite Elemente genannt. In einem System partieller Differentialgleichungen wird das Verhalten unter Wirkung von Randbedingungen, teils in zeitlicher Abhängigkeit, dargestellt und berechnet. Die für additive Verfahren am häufigsten eingesetzte Methode ist die der Finiten Elemente (FEM) (Eschey, 2013). Sie dient der Vorhersage von Bauteileigenschaften und stellt ein hilfreiches Werkzeug dar, wenn die Umsetzung präzise möglich ist. Basis ist ein realitätsnahes Modell, das in eine endliche Anzahl an Elementen zerteilt wird. Das Verhalten jedes einzelnen Elementes wird durch numerische Berechnung der partiellen Differentialgleichungen vorhergesagt. Die Menge der Elemente hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Lösung. In praktischer Anwendung muss zwischen Rechendauer und Genauigkeit der Ergebnisse abgewogen werden. Für das FDM Verfahren existieren verschiedene Ansätze der numerischen Simulation. Werkzeuge für die Prognose von Bauteileigenschaften existieren sowohl für mechanische Merkmale als auch für Geometrie und Oberfläche.

Anitha et al., 2001; Ahn et al., 2009; Boschetto et al., 2013 sowie Boschetto und Bottini, 2015 konnten in ihren Arbeiten quantitative Aussagen im Vorfeld des Bauvorganges über die Oberflächenbeschaffenheit und Rauheit treffen (Tabelle 3, linke Spalte). Zur Vorhersage von mechanischen Eigenschaften wurden mathematische Modelle aufgestellt. Dazu zählt die Prognose der Intensität des Bondings und der Werkstoffkennwerte. Bellini und Güçeri, 2003; Bellehumeur et al., 2004; Sun et al., 2008; Mohamed et al., 2016; Coogan und Kazmer, 2017a sowie Coogan und Kazmer, 2017b stellten unter anderem Modelle zur Prädiktion der Anzahl der diffundierenden Polymerketten über die Grenzfläche auf. Darauf basierend wurden Vorhersagen über die Fähigkeit zur Kraftaufnahme der Verbindungsstellen getroffen.

Die Vorhersage geometrischer Merkmale ist Inhalt weiterer Forschungsarbeiten (s. Tabelle 3, rechte Spalte). Im Gegensatz zu Oberfläche und Werkstoff wurden keine Prognoseinstrumente zur quantitativen Bewertung der geometrischen Aspekte im FDM aufgestellt. Das soll in der vorliegenden Arbeit geschehen. Zunächst werden die Vorarbeiten mit größerem Detaillierungsgrad betrachtet.

*Tabelle 3 – Vorhersagemodelle von Bauteileigenschaften im FDM unterteilt nach Oberfläche, Werkstoff und Geometrie*

Oberfläche	Werkstoff	Geometrie
Anitha et al., 2001	Bellini und Güçeri, 2003	Zhang und Chou, 2008
Ahn et al., 2009	Bellehumeur et al., 2004	Boschetto und Bottini, 2014
Boschetto et al., 2013	Sun et al., 2008	Mohamed et al., 2016
Boschetto und Bottini, 2015	Mohamed et al., 2016b	Zhou et al., 2016
	Coogan und Kazmer, 2017a	Ferreira und Quelho de Macedo, 2017
	Coogan und Kazmer, 2017b	Compton et al., 2017
		Zhou und Hsieh, 2017
		Courter et al., 2017
		Zhang und Shapiro, 2018

### 2.3 Vorhersagemodelle geometrischer Bauteileigenschaften im FDM

Boschetto und Bottini sowie Mohamed, Masood und Bhowmik nutzen mathematische Modelle auf Basis der statistischen Versuchsplanung (Boschetto und Bottini, 2014; Mohamed et al., 2016). Das Vorgehen wird bei der Modellierung von Fertigungsverfahren als Black Box Ansatz bezeichnet (vgl. Kapitel 3.3.2). Weitere aufgeführte Arbeiten verfolgen einen Ansatz über numerische Simulation. Die Einhaltung veranschlagter Toleranzen für Lage, Form und Maßhaltigkeit wird maßgeblich durch die Temperaturentwicklung im Bauprozess bestimmt. Verantwortlich ist die starke Verarbeitungsschwindung von Kunststoffen. Die restlichen sieben der neun aufgeführten Arbeiten behandeln in einem ersten Schritt oder ausschließlich die Temperaturentwicklung im Bauprozess des jeweiligen Prüfkörpers.



Tabelle 4 - Geometrische Vorhersagemodelle für FDM

Autoren und Jahr	Titel	Vorhergesagte Attribute	Software	Methode	Validierung	Zusammenfassung
Zhang und Chou, 2008	A Parametric Study of Part Distortions in Fused Deposition Modeling Using Three-Dimensional Finite Element Analysis	Form (Verformung durch Eigenspannungen, Basis: thermische Analyse)	ANSYS	FEM mit Birth & Death	Experimentell, Platte, qualitativ (Trend übereinstimmend)	Verformung einer Platte in Abhängigkeit von Strangbreite, Schichtdicke, Verfahrgeschwindigkeit
Boschetto und Bottini, 2014	Accuracy Prediction in Fused Deposition Modeling	Maßhaltigkeit (Bauteildimensionen)	Wolf-ram Mathe-matica	Mathematische Modellbildung, Black Box	Experimentell, hexagonale Prüfkörper, quantitativ	Geometrische Abweichung in Abhängigkeit von Schichtdicke und Extrusionswinkel
Mohamed et al., 2016	Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters for Dimensional Accuracy using I-optimality Criterion	Maßhaltigkeit (dimensionale Genauigkeit)	JMP, Design Expert	Versuchsplanung und -auswertung I-Optimality Criterion, Black Box	Experimentell, quaderförmiger Prüfkörper, quantitativ	Verbesserte Genauigkeit durch Optimierung der Prozessparameter Schichtdicke, Air Gap, Raster Winkel, Ausrichtung, Schichtbreite, Anzahl Perimeter
Zhou et al., 2016	Temperature Analysis in the Fused Deposition Modeling Process	Temperaturgradient (Voraussetzung für Verzug)	ANSYS APDL	FEM, thermisch-transient mit Birth & Death	Keine Validierung	Temperaturentwicklung von 2 x 2 x 50 mm Strang in ersten Sekunden nach Extrusion

Ferreira und Quelho de Macedo, 2017	Residual Thermal Stress in Fused Deposition Modelling	Temperaturgradient, Eigenspannungen, Delamination, Verzug	Abaqus, Sprache Python	FEM	Experimentell, mit / ohne beheizter Bauplattform / Bauplattform / Bauplattform, qualitativ	Eigenspannungen, Delamination und Verzug durch Temperaturänderungen
Compton et al., 2017	Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites	Temperaturgradient	NA	FEM, Thermisch-transient, 1D	Experimentell, Prüfkörper KFZ Chassis, Temperaturüberprüfung mit Infrarotkamera, quantitativ	Temperaturentwicklung Strangablage in Big Area Additive Manufacturing (BAAM), perfekte Übereinstimmung mit Simulation
Zhou und Hsieh, 2017	Thermal analysis of fused deposition modeling process using infrared thermography imaging and finite element modeling	Temperaturgradient	NA	FEM, Thermisch-transient mit Birth & Death	Experimentell, kastenförmiger Prüfkörper, Überprüfung Temperatur mit Infrarotkamera, quantitativ	Temperaturentwicklung von PLA unmittelbar nach Extrusion
Courter et al., 2017	Finite Element Simulation of the Fused Deposition Modelling Process	Eigenspannungen, Bauteilverzug	Abaqus	FEM, thermisch-mechanische Analyse, progressive Element Aktivierung	Qualitative Übereinstimmung mit Ausdrucken	FEM Simulation von Mobius Arm auf Basis des Tool Path

Zhang und Shapiro, 2018	Linear-Time Thermal Simulation of As-Manufactured Fused Deposition Modeling Components	Temperaturgradient (temperature history)	NA	Finite Differenzen Methode, thermisch-transient,	Experimentell, einzelner extrudierter Strang, quantitativ	Temperaturentwicklung entlang extrudiertem Strang, toolpath, Grundlage für Eigenspannungen, Verformung
-------------------------	--	--	----	--	---	--

Zhou et al., Compton et al., Zhou und Hsieh sowie Zhang und Shapiro beschränken sich auf die Bestimmung des Temperaturgradienten und weisen für zukünftigen Forschungsbedarf auf die Analyse von Schwindung, Eigenspannungen und Verformung hin (Zhou et al., 2016; Compton et al., 2017; Zhou und Hsieh, 2017; Zhang und Shapiro, 2018). Diese werden von Zhang und Chou sowie Macedo und Ferreira über mechanische Berechnungen prognostiziert (Zhang und Chou, 2008; Ferreira und Quelho de Macedo, 2017).

Zhang und Shapiro verwenden die Finite-Differenzen-Methode. Die weiteren Simulationsansätze stützen sich auf numerische Berechnung mit finiten Elementen (Zhang und Shapiro, 2018). Der schichtweise Aufbau des Objektes wird typischerweise über eine zeitgesteuerte Aktivierung der Schichten mit einer Birth & Death Funktion realisiert (Zhang and Chou, 2008; Zhou et al., 2016; Courter et al., 2017; Zhou and Hsieh, 2017). Die kommerziellen Computerprogramme ANSYS und Abaqus finden Verwendung. In sieben der neun Fälle wird die Validierung der Vorhersageergebnisse experimentell durchgeführt. Zhou et al. verzichten auf eine Validierung (Zhou et al., 2016). Die thermischen Analysen werden vorwiegend quantitativ durch Überprüfung der Temperatur mittels Infrarotkamera validiert. Auffällig ist, dass in den drei Arbeiten zur Vorhersage der Verformung jeweils ausschließlich eine qualitative Validierung durchgeführt wurde (Zhang and Chou, 2008; Courter et al., 2017; Ferreira and Quelho de Macedo, 2017). Das bedeutet, der Trend der Verformung wird mit den Ergebnissen der numerischen Analyse verglichen. Der Trend ist in allen Fällen übereinstimmend.

## 2.4 Methodenentwicklung

Die ganzheitliche Betrachtung der Qualitätssicherung von additiven Fertigungsverfahren wurde selten adressiert. Einen Ansatz liefert Eschey in seiner Dissertation

(Eschey, 2013). Ausgangspunkt ist der eingeschränkt nutzbare Wissensstand bei additiven Verfahren. Im Zuge der Industrialisierung müssen die Prozesse fähig werden. Eschey stellt eine Methode zur *Maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung* vor. Daraus geht die Möglichkeit hervor, einen objektiven Vergleich zu konventionellen Maschinen wie dem Spanen im Metallbereich und Spritzgießmaschinen in der Kunststoffverarbeitung zu ziehen. Der Fokus liegt auf der Prozessfähigkeit. Ziel ist, diese zu erhöhen und zu quantifizieren. Bestehende Ansätze werden auf AM Verfahren adaptiert und weiterentwickelt. Dazu entwickelt Eschey eine Methode, mit der das charakteristische Verhalten eines Fertigungssystems erfasst, bewertet und mit geeigneten Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit ausgestattet wird. Die entwickelte Methode wird am Selektiven Lasersintern (SLS) angewendet und validiert.

### 3 Grundlagen zur Prozessmodellierung und Analyse additiv gefertigter Bauteilmerkmale

In diesem Kapitel wird zunächst auf grundlegende Begriffe und Definitionen im Kontext der Qualitätssicherung additiver Verfahren eingegangen. Anschließend werden Grundlagen der Modellierung von Fertigungsverfahren und deren Anwendbarkeit für das FDM betrachtet.

#### 3.1 Begriffe und Definitionen

##### 3.1.1 Qualität

Im Sinne der Güte von Objekten, Systemen oder Prozessen wird unter Qualität folgendes verstanden:

„Qualität ist der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000, 2015).

Als *inhärent* gelten ständige Merkmale, wie die objektiv messbaren Größen Gewicht, Länge und Breite. Der Grad der Erfüllung der Anforderungen leitet sich aus der Qualität der Produkte sowie des Prozesses ab. Darunter ist nicht ausschließlich der Fertigungsprozess zu verstehen, sondern auch vorgelagerte Prozesse. Gesamtheitliche Qualitätssicherung beginnt mit der Produktentwicklung. Effiziente Qualitätssicherung bedeutet, Qualität zu produzieren anstelle sie zu erprüfem. Eine entsprechend präventive Ausrichtung beginnt bereits bei der Regelung von Einflussparametern auf entsprechende Sollwerte. Beherrschte und fähige Prozesse sind Voraussetzung zur Produktion von Qualität (Westkämper, 1991). Folgend werden Fähigkeit und Stabilität von Prozessen diskutiert.

##### 3.1.2 Prozessfähigkeit, Prozessstabilität und Maschinenfähigkeit

Entsprechende Untersuchungen sind Instrument des Qualitätsmanagements im Produktentstehungsprozess. Die Betrachtung der Prozessfähigkeit verfolgt das Ziel, Aussagen über die *Qualitätsfähigkeit* des Prozesses zu treffen, der ein Merkmal herstellt (Faes, 2009). Ein Merkmal ist eine quantifizierbare Eigenschaft des Produktes, wie

beispielsweise das Nennmaß. Die Merkmale eines Produktes können dem Werkstoff, der Oberfläche oder der Geometrie zugeordnet werden (vgl. Tabelle 3). Grenzvorgaben der Merkmalsausprägung werden als Toleranzen bezeichnet. Sie basieren entweder auf ökonomischen Gesichtspunkten (Was fordert der Kunde?) oder auf der Ermittlung durch eine Vorperiode des Prozesses. Die Prozessfähigkeit ist das Verhältnis zwischen der Häufigkeitsverteilung eines messbaren Qualitätsmerkmals und der vorgegebenen Toleranz. Die Merkmalswerte eines fähigen Prozesses liegen zu einem bestimmten Anteil innerhalb definierter Toleranzgrenzen (Abbildung 8, Kurve 2).

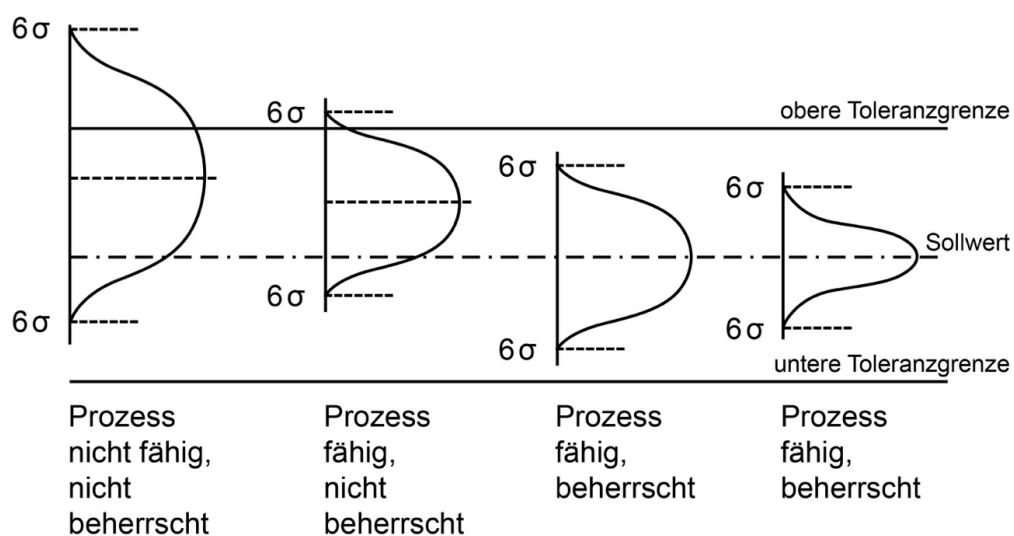


Abbildung 8 - Beherrschte und fähige Prozesse in Anlehnung an (Eschey, 2013)

Ein beherrschter Prozess wird auch als stabil bezeichnet. Die Merkmalsausprägungen streuen zufällig innerhalb eines Toleranzkorridors. Ein beherrschter Produktionsprozess weist ein vorhersagbares Streuverhalten auf. Mittelwerte und Streuungen schwanken um einen gewünschten Sollwert (Abbildung 8, Kurve 3) (Faes, 2009). Prozessfähigkeit und Prozessstabilität werden beschrieben durch die Kennzahlen  $c_p$  (Process Capability) und  $c_{pk}$  (Critical Process Capability). Für deren Berechnung werden folgende Annahmen getroffen: Die Merkmalswerte sind normalverteilt und der Prozess ist beherrschbar.

Der  $c_p$  Wert wird berechnet nach

$$c_p = \frac{T}{6 \times s} \quad (1)$$

$T$  steht für den vorgegebenen Toleranzkorridor,  $s$  für die Standardabweichung. Der  $c_p$  Index ist das Verhältnis der vorgegebenen Toleranz gegenüber der sechsfachen Standardabweichung. In diesem Bereich liegen 99,7 % aller Messwerte entsprechend der Normalverteilung. Das entspricht der natürlichen Prozessstreuung. Es wird typischerweise erwartet, dass mindestens ein Wert von  $c_p = 1$  erreicht werden muss, wobei in der Regel  $c_p = 1,33$  gefordert wird. Ist der Index erreicht oder überschritten, wird von einem fähigen Prozess ausgegangen (Faes, 2009). Der  $c_p$  Wert berücksichtigt nicht die Lage der Verteilung innerhalb der Toleranzgrenzen, also die Prozessstabilität. Der  $c_{pk}$  Wert hingegen beinhaltet die Prozesslage in Abhängigkeit der Toleranzmitte. Je kleiner  $c_{pk}$  gegenüber  $c_p$ , desto weiter entfernt liegt der Prozess von der Toleranzmitte entfernt. Der  $c_{pk}$  Index ist demzufolge immer gleich oder kleiner als  $c_p$ .

$$c_{pk} \leq c_p \quad (2)$$

In dem Fall  $c_p = c_{pk}$  liegt der Mittelwert des Qualitätsmerkmals in der Toleranzmitte. Ein Prozess ist fähig und beherrscht, wenn

$$c_{pk} \geq 1,33 \quad (3)$$

erzielt wird (Abbildung 8, Kurve 3 und 4). Der Toleranzkorridor  $T$  wird in Abhängigkeit der Kundenanforderungen festgelegt. Ob die Standardabweichung der Normalverteilung entspricht, kann durch Ermittlung der Maschinenfähigkeit untersucht werden. Unter festgelegten Bedingungen auf Basis von statistischen Kriterien wird eine Stichprobe von Werkstücken (mind. 50 Stück) hergestellt. Anschließend werden die für die spätere Funktion des Teiles kritischen Größen gemessen. Äußere Einflüsse durch Mensch, Material, (Mess-) Methode, Milieu und Maschine dürfen sich nicht bezie-

hungsweise nur gering ändern. Die Maschinenfähigkeit hat in der Praxis zu Problemen geführt, da auf die Maschinenfähigkeit zu viele Einflussgrößen (Messmittel, Umgebung, Mitarbeiter und andere) einwirken, sodass nur die Prozessfähigkeit  $c_p$  und die Stabilität des Prozesses  $c_{pk}$  verwendet werden sollten. Jedoch ist die Maschinenfähigkeit im Vergleich zur Prozessfähigkeit deutlich leichter und schneller zu ermitteln. Somit wird sie oft weiterhin für die Erstbewertung einer Anlage wie beispielsweise bei einer Maschinenvorabnahme eingesetzt.

Sowohl die Maschinenfähigkeit als auch die Prozessfähigkeit und –stabilität sind statistische Verfahren. Sie basieren auf der Auswertung der Messung eines Merkmals an einer bestimmten Anzahl von Bauteilen. Additive Verfahren haben durch die werkzeuglose Fertigung Potenzial für die Fertigung von Einzelprodukten. Der Ansatz über statistische Auswertung stellt einen verhältnismäßig großen Aufwand dar und reduziert die Vorteile der Schichtbauverfahren für die Losgröße eins. Klassische Methoden der Prozessfähigkeit und Stabilität können nur bedingt angewendet werden. Dazu zählt die maschinenseitige Kalibrierung der Anlagen. Problematisch ist, dass die generelle Kalibrierung einer FDM-Anlage nur im beschränkten Umfang möglich. Ein gleiches Set an Parametern erzielt unterschiedliche Ergebnisse bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien. Das bedeutet, dass für jedes Bauteil ein spezieller Parametersatz gefunden und der Prozess eingefahren werden muss. Darüber hinaus werden mit additiven Verfahren nicht selten Bauteile in Serie gefertigt, vorrangig mit kleinen und mittleren Losgrößen. In diesen Fällen ist es von Belang, dass der Prozess fähig und stabil ist. Die Indizes  $c_p$  und  $c_{pk}$  eignen sich bedingt zur Bewertung. Es bedarf zunächst einer Aufwand-Nutzen Abschätzung im Vorfeld der Einrichtung des Prozesses, die von der Losgröße, Komplexität, Material und letztlich der Wertschöpfung des Fertigungsprozesses abhängt. Werden keine Serien gefertigt, wird die Qualitätssicherung auf andere Weise umgesetzt. Zu den Möglichkeiten zählt die 100 % - Prüfung bei geometrischen- und Oberflächeneigenschaften. Mechanische Merkmale können durch zerstörende oder Durchstrahlungsprüfung ermittelt werden. Zerstörende Tests werden an einem simultan zum Bauteil gefertigtem Prüfkörper oder zweitem identischen Bauteil unternommen. Im Sinne der Produktion von Qualität anstelle



von Überprüfung sind derartige Maßnahmen jedoch nicht zufriedenstellend. Die prädiktive Qualitätssicherung rückt in den Fokus, etwa über den Ansatz eines sicheren Prozessfensters.

### 3.1.3 Prozessfenster

Sind die Parameterausprägungen für ein sicheres Prozessfenster bekannt, können Fertigungsergebnisse innerhalb gegebener Toleranzen erwartet werden. Die einzelnen Prozessparameter sind die Vektoren, die ein mehrdimensionales Prozessfenster aufspannen. Befindet sich der Prozessvektor als Resultierende aller Parameter innerhalb des definierten Fensters, kann davon ausgegangen werden, dass produzierte Merkmale innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Ein sicheres Prozessfenster für einen Fertigungsprozess wird durch prädiktive Untersuchung des Zusammenspiels der Prozessparameter definiert. In Abbildung 9 - Prozessfenster für FDM wird am Beispiel der Parameter Schichtbreite  $B_S$ , Extrusionstemperatur  $T_0$  und Schichtdicke  $D_S$  das sichere Fenster für einen FDM Prozess aufgezeigt.

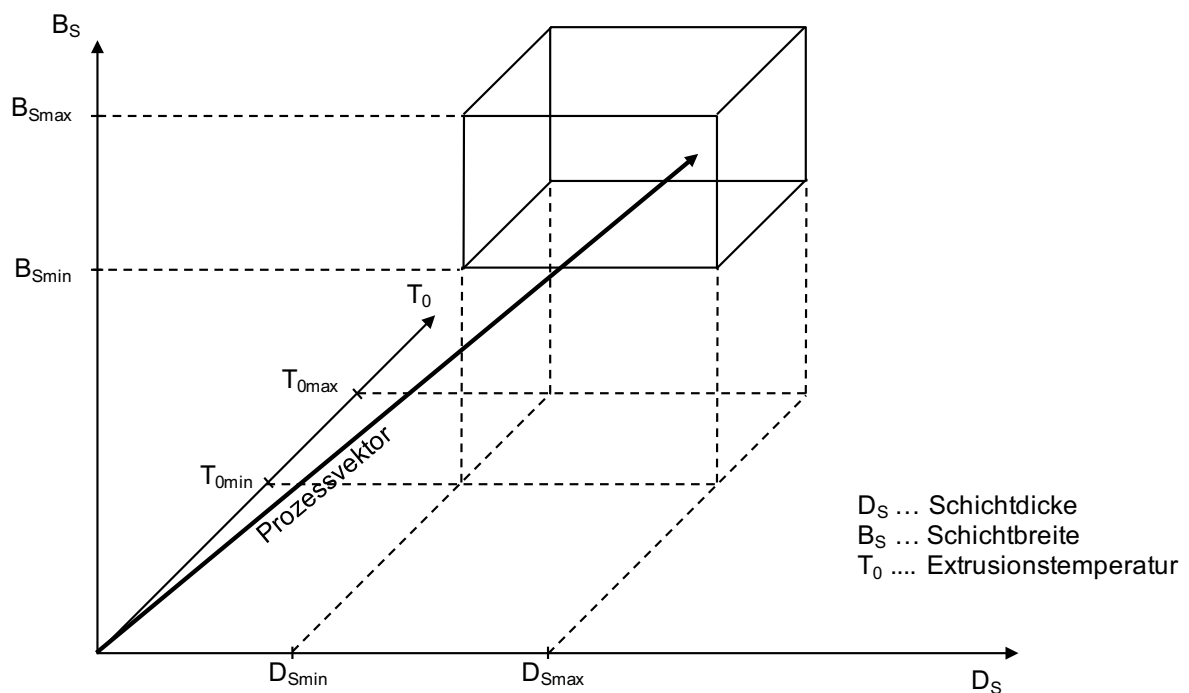


Abbildung 9 - Prozessfenster für FDM

In einem späteren Schritt wird das Prozessfenster für die Fertigung eines FDM - Prüfkörpers aufgestellt (Kapitel 6.3). Dafür ist umfangreiches Prozessverständnis notwen-

dig, das durch Modellierung des FDM Verfahrens aufgebaut werden kann. Zur Modellierung des FDM Prozesses müssen zunächst die auf den Bauprozess wirkenden Einflussgrößen betrachtet werden.

### **3.2 Einflussgrößen**

Ein Fertigungsprozess unterliegt einer Vielzahl an Einflüssen und deren Interferenzen. Die Einflussgrößen können den fünf Faktoren Mensch, Maschine, Material, Milieu und Methode (5M) zugeordnet werden. In Abbildung 10 werden die auf das FDM wirkenden Einflüsse in einem Ishikawa-Diagramm aufgeführt und gruppiert. Vom Menschen ausgehende Einflüsse beginnen bereits bei der Produktentwicklung. Ein Produkt muss entsprechend von der ersten Idee an verfahrensgerecht gestaltet werden. Dabei reicht die Konstruktion nach allgemeinen Design for Additive Manufacturing (DfAM) Richtlinien nicht aus. Für die zielführende Nutzung des Verfahrens ist Design for Fused Deposition Modeling unerlässlich. Dazu sind umfangreiche Kenntnisse über die Charakteristika des Verfahrens bei dem Bearbeiter vorausgesetzt. Diese können über spezielle Schulungen in Verbindung mit praktisch erlangter Expertise aufgebaut werden. Fehlt die Expertise und das Hintergrundwissen für das additive Verfahren, können zum einen dessen Vorteile nicht genutzt werden. Zum anderen leidet darunter die Qualität der Bauteile. Zur physischen Vorbereitung der Anlage zählen die Materialbeschickung (Filament einlegen), Medienversorgung (Strom, Druckluft, Abluft) und die Positionierung. Einflüsse aus der Umwelt können diverse Abweichungen und Fehler generieren. Dazu zählen die Unterbrechung der Energieversorgung, ungenaue Maschinenausrichtung, Vibrationen, Luftfeuchtigkeit, Variationen der Umgebungstemperatur und physische Einflüsse auf die Anlage. Die im Ishikawa Diagramm aufgeführten Einflüsse werden in Kapitel 5.2 diskutiert. Um einen fähigen und stabilen Prozess zu erreichen ist sicherzustellen, dass die Parameter zwischen zwei Fertigungsprozessen nicht beziehungsweise in geringem Umfang variieren, sodass das Bauergebnis nicht oder in vernachlässigbarem Umfang beeinflusst wird. Einige der Einflüsse können systematisch abgestellt werden, andere sind gewollt und sollten gezielt eingestellt werden. Unter Beachtung der Einflussfaktoren kann die Modellierung eines Fertigungsverfahrens vorgenommen werden. Grundlagen dazu werden im nächsten Kapitel betrachtet.

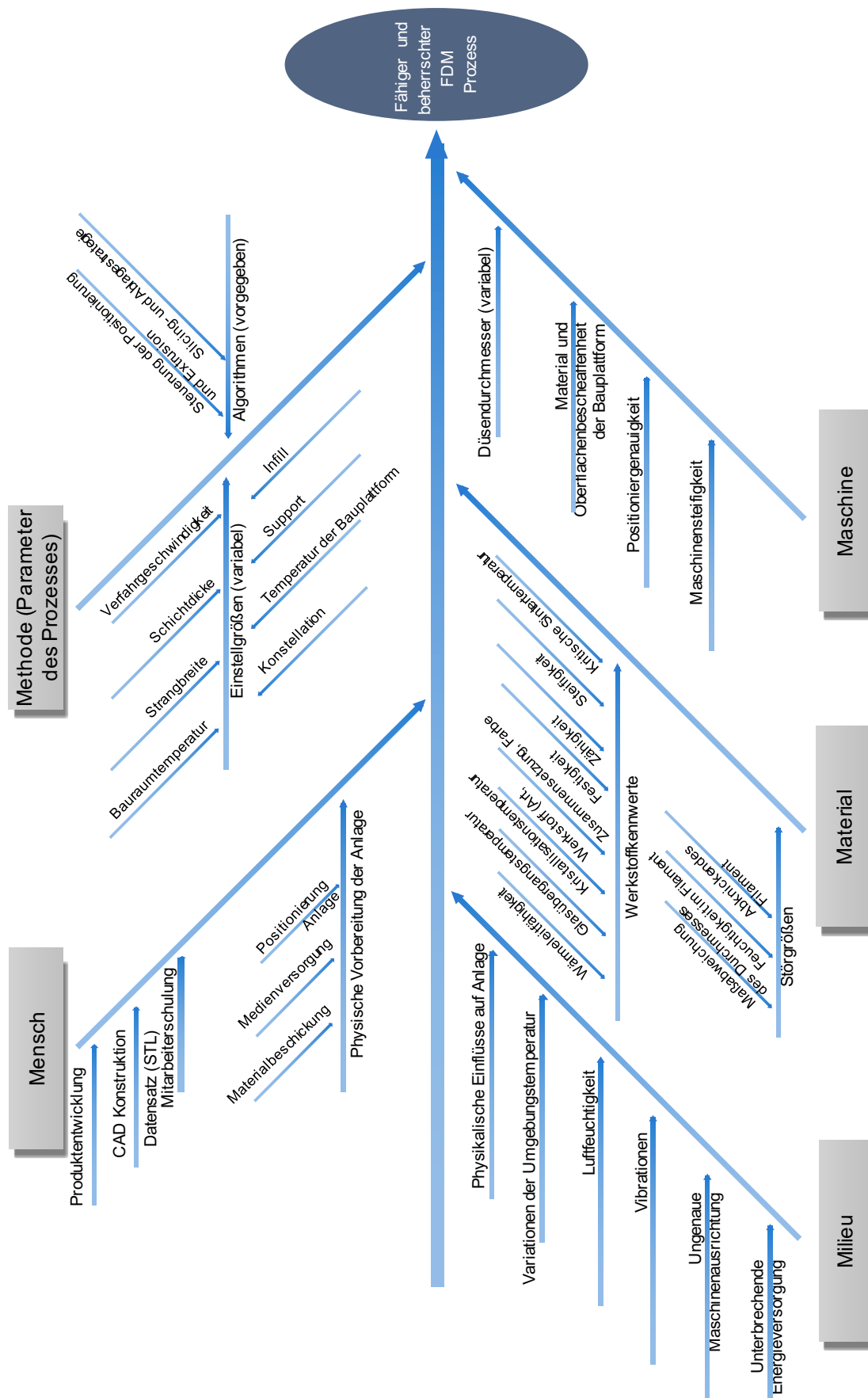


Abbildung 10 - Ishikawa Diagramm der auf das FDM wirkenden Einflussgrößen

### 3.3 Modellierung von Fertigungsverfahren

Im Zusammenhang mit additiver Fertigung wird der Terminus *Modellierung* nicht selten für das Erstellen eines digitalen dreidimensionalen Abbildes von einem physischen Objekt verstanden, der CAD Konstruktion. In der vorliegenden Abhandlung liegt der Fokus indes auf den technischen Fertigungsverfahren. Das sind komplexe Systeme, die einer großen Zahl an Einflussfaktoren unterliegen. Modellierungsansätze erweisen sich als entweder sehr umfangreich oder stark abstrahiert.

#### 3.3.1 Das Modell

Ein Modell wird erstellt, um komplexe Zusammenhänge eines Systems abzubilden und zu verstehen. Die Erzeugung eines Modells wird als Modellierung oder Modellbildung bezeichnet. Darunter versteht man im Allgemeinen die Entwicklung, Formung oder Herstellung eines Modells. Das Modell ist ein vereinfachtes Abbild der Realität. Da diese in aller Regel zu komplex ist, als dass man sie vollständig abbilden könnte, beinhaltet jedes Modell einen gewissen Grad an Abstraktion (Lauber und Göhner, 1999). Der Fokus der Modellierung liegt auf den wesentlichen Einflussfaktoren, die für das reale System sowie im Modellkontext relevant sind. Ein Modell ist nach Stachowiak durch drei Merkmale gekennzeichnet:

- Abbildung

Das Modell ist die Abbildung beziehungsweise Repräsentation eines natürlichen oder künstlichen originalen Systems, wobei das Original ebenso ein Modell sein kann.

- Verkürzung

Es wird eine Auswahl an Attributen des Originals nach Relevanz des Modellerschafters oder –Nutzers erfasst.

- Pragmatismus

Modelle erfüllen eine Ersetzungsfunktion. Das bedeutet, sie sind nicht einem Original eindeutig zugeordnet, sondern für eine Gruppe ähnlicher Originale anwendbar. Das Modell kann für bestimmte Subjekte, Zeitintervalle oder gedankliche beziehungsweise tatsächliche Operationen herangezogen werden (Stachowiak, 1973).

Weisberg unterscheidet prinzipiell zwischen Produkt- und Prozessmodellen (Weisberg, 2015). Das Produktmodell ist ein greifbares, physikalisches Objekt. In Bezug auf digitale Fertigung werden dieser Gruppe dreidimensionale CAD Zeichnungen zugeordnet. Prozessmodelle sind im Allgemeinen komplexer Natur. Folgend wird auf deren Erstellung eingegangen.

### 3.3.2 Vorgehen zur Prozessmodellierung

Die Entwicklung eines Prozessmodells ist inhärent iterativ. Treten während der Modellbildung Probleme beziehungsweise untypische oder ungewollte Entwicklungen auf, muss zu einem früheren Schritt zurückgesprungen und dieser wiederholt werden. Tatsächlich gibt es das perfekte Modell nicht, sondern lediglich ein brauchbares. Hangos und Cameron führen zur systematischen Entwicklung eines Prozessmodells die Vorgehensweise zur Modellierung in sieben Schritten ein (Hangos und Cameron, 2001) (s. Abbildung 11).

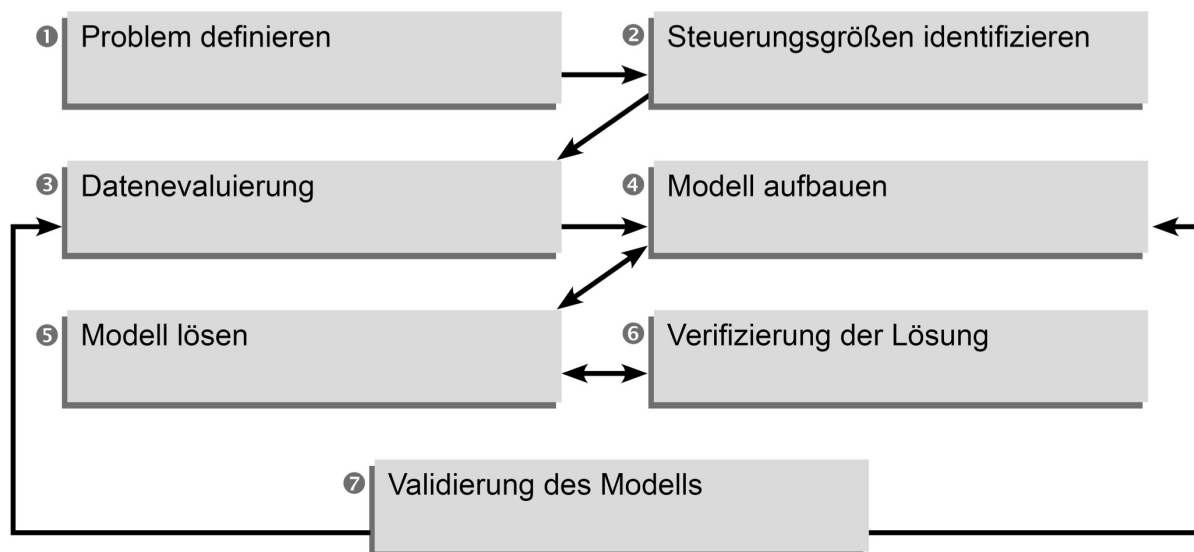


Abbildung 11 - Vorgehensweise zur Modellierung in sieben Schritten in Anlehnung an (Hangos und Cameron, 2001)

Im ersten Schritt wird das Problem formuliert. Der Prozess wird definiert, das Modellierungsziel gesetzt und der Detaillierungsgrad der Untersuchung festgelegt. Darüber hinaus wird die zeitliche Charakteristik des Prozessmodells geklärt. In einem zweiten Schritt sind die Steuerungsgrößen sowie Mechanismen im Prozess zu identifizieren. In Schritt drei werden die für das Problem relevanten Daten evaluiert. Das bedeutet,

es werden entweder Messdaten einbezogen oder Werte für Parameter angenommen. Folgend wird das Modell erstellt. Das kann beispielsweise durch Differentialgleichungen oder algebraische Gleichungen für ein mathematisches Modell geschehen. In einem fünften Schritt wird ein Vorgehen zur Lösung des Problems entwickelt. Die Überprüfung, ob das erstellte Modell sich korrekt verhält, nennt man Verifizierung. Im Schritt der Validierung wird die Qualität des Modells gegenüber unabhängigen Beobachtungen oder Vermutungen überprüft. In praktischen Anwendungsfällen wird im Allgemeinen eine teilweise Validierung durchgeführt. Die Herangehensweise ist für die Modellbildung jeglicher Prozesse gültig.

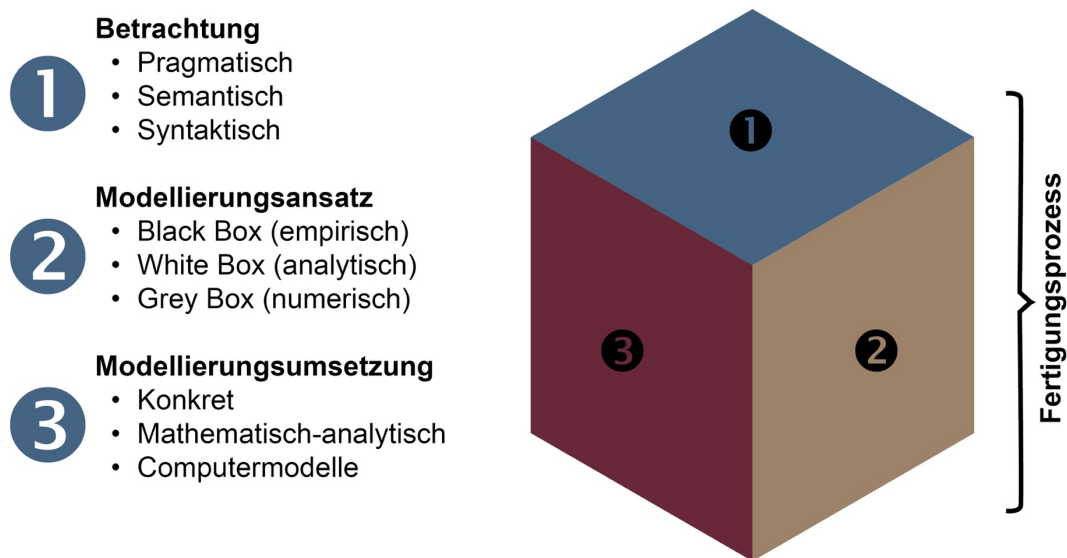


Abbildung 12 - Dimensionen der Modellierung von Fertigungsprozessen in Anlehnung an (Müller und Bähr, 2021)

Fertigungsprozesse sind geprägt von vielschichtigen Einflussfaktoren, Wirkmechanismen und Output Größen. Abbildung 12 veranschaulicht das Grundprinzip. Der Würfel repräsentiert einen Fertigungsprozess. Aus der einen Perspektive scheint der Würfel rot zu sein, von der anderen braun und von oben blau. In Realität ist er die Summe aller Farben. Um den Fertigungsprozess in seiner Gesamtheit abzubilden ist es notwendig, jede einzelne Dimension zu betrachten. In vorheriger Arbeit wurde eine Unterscheidung nach Betrachtung, Modellierungsansatz und Modellierungsumsetzung eingeführt (Müller und Bähr, 2021).

Die Betrachtung findet auf drei Ebenen statt. Das sind die pragmatische, die semantische und die syntaktische Ebene. Erstmals wurde diese Unterteilung von Neurath et al. vorgenommen (Neurath et al., 1938). Auf syntaktischer Ebene stellt sich die Frage *Wie wird etwas dargestellt?* Eine rote Ampel etwa wird durch eine leuchtende kreisrunde Form abgebildet. Semantisch stellt sich die Frage *Was wird dargestellt?* *Stopp!* wird signalisiert. Als pragmatisch wird die Absichtserklärung gesehen. Der Empfänger des Zeichens soll vor der Ampel anhalten. So kann ein einfaches Zeichen auf verschiedene Arten interpretiert werden. Weber applizierte das Prinzip auf Prozesse (Weber, 1998). Wechselwirkungen zwischen Input Größen weist er der pragmatischen Betrachtung zu. Die semantische Ebene bildet sich aus Output Größen und deren Interaktionen. Die zeitliche Abfolge von Prozessschritten stellt die syntaktische Betrachtung dar. Die zweite Dimension des Fertigungsprozesses ist der Modellierungsansatz.

Die Modellbildung kann nach dem Black Box, dem White Box oder dem Grey Box Ansatz erfolgen (s. Abbildung 13; Dyckhoff und Spengler, 2010). Black Box Modelle sind datenbasierte Ansätze. Sie generieren Prozesswissen durch empirisch ermittelte Prozessdaten und deren statistische Auswertung. Unter Verwendung von Messdaten werden Parameter abgeschätzt. Die funktionalen Aspekte eines Systems finden Beachtung. Der innere Aufbau des Systems bleibt unberücksichtigt, Verständnis über physikalische Effekte rückt in den Hintergrund (Ropohl, 2009). Zusammenhänge zwischen Input und Output werden in Abhängigkeit einer Prozessbezugsgröße dargestellt, die im Allgemeinen ein Prozessprodukt ist (Neubauer et al., 2015).

Der White Box Ansatz ist strukturbasiert. Das heißt, dass der innere Aufbau eines Systems sowie das daraus resultierende Systemverhalten analytisch untersucht wird (Neubauer et al., 2015). Das Modell bildet sämtliche Teilprozesse sowie Parameter des Verfahrens ab. Stoff- und Energieströme stellen Verknüpfungen der Teilprozesse dar. Für einen äußeren Betrachter ist der innere Aufbau des Systems vollständig ersichtlich (Hagos und Cameron, 2001). Empirisch ermittelte Messdaten finden keine Beachtung. Grey Box Modelle sind eine Mischform aus Black Box und White Box Modellen. Sie bilden die innere Systemstruktur bis zu einem bestimmten Aggregationsgrad ab (Neubauer et al., 2015). Dieser hängt von der Zielstellung der Untersuchung ab. Relevante Prozessparameter werden benannt, Prozesswissen besteht um

die allgemeine Struktur des Systems. Die Modellbildung erfolgt im Allgemeinen numerisch.

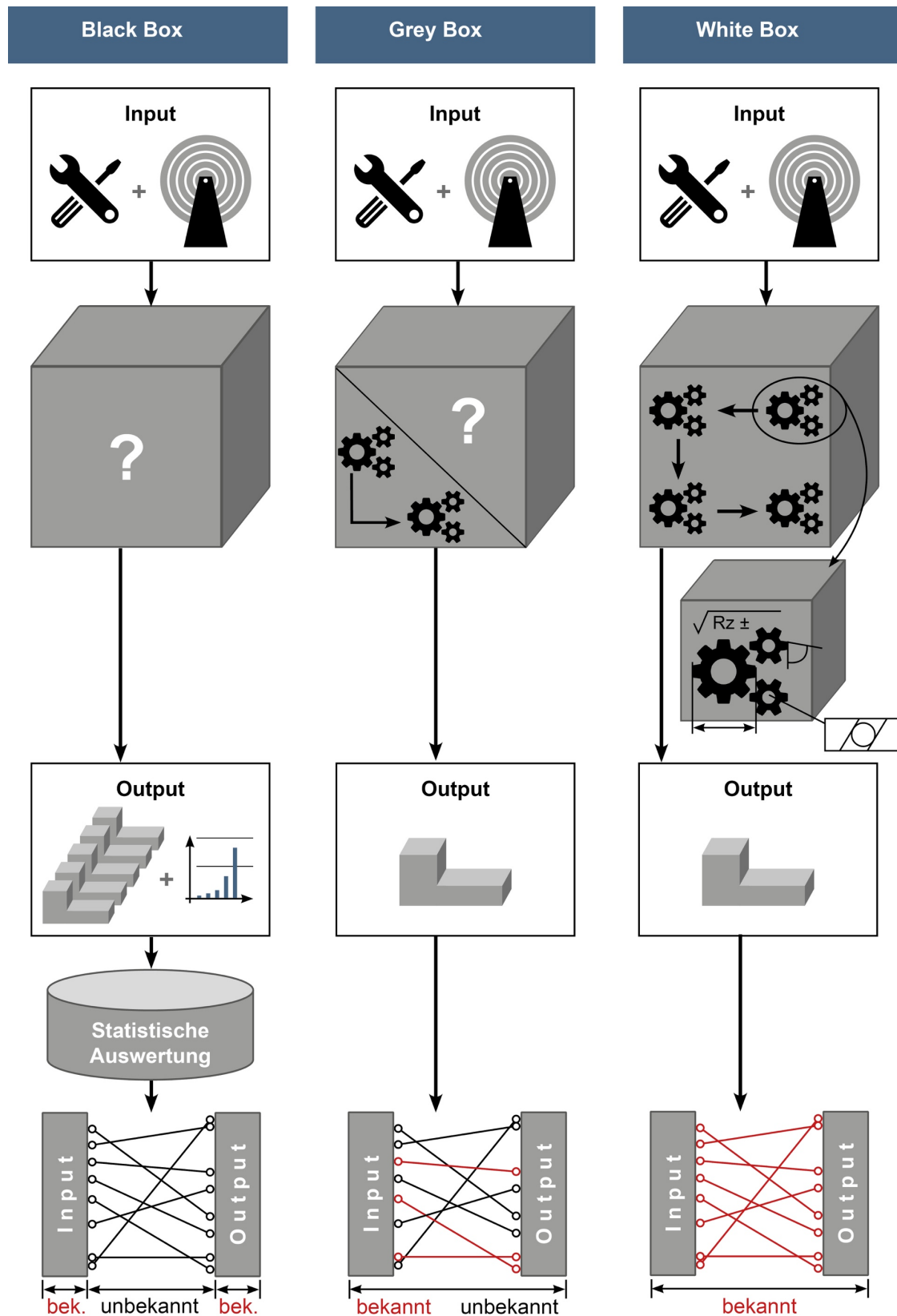


Abbildung 13 - Modellierungsansätze für Fertigungsverfahren: Black / Grey / White Box



Das FDM Verfahren kann grundsätzlich mit jedem der drei Ansätze modelliert werden. Ein Black-Box Modell wird typischerweise durch vielfache Fertigung eines speziellen Bauteils aufgestellt. Der Fokus liegt auf messbaren Parametern wie etwa der Oberflächenbeschaffenheit, Maßhaltigkeit oder der Rundheit von Löchern. Die Einstellgrößen werden variierend ausgewählt. Das kann die Extrusionstemperatur, Schichtdicke, Verfahrgeschwindigkeit, Strangbreite, oder ein anderer Prozessparameter sein. Die Versuchsplanung kann mit Hilfe von Design of Experiments (DoE) umgesetzt werden. Aussagen über den Zusammenhang zwischen Einfluss- und Ausgangsgrößen werden erzeugt, ohne zu wissen, welche physikalischen Vorgänge dazu führen. Ebenso kann der White Box Ansatz Verwendung finden. Dabei wird die innere Struktur untersucht. Das kann durch Aufstellen von Formeln geschehen, wie es bei Coogan und Kazmer, 2017b der Fall ist. Mit dem entwickelten *Healing Model* kann eine Vorhersage über die Anzahl der im FDM über die Grenzfläche diffundierten Moleküle getroffen werden. Die Festigkeit der Strangverbindung kann darauf basierend vorhergesagt werden. Zur Modellierung realer Prozesssysteme eignet sich jedoch der Grey Box Ansatz (Hangos und Cameron, 2001). Dieser Arbeit liegt ein reales Prozesssystem zugrunde. Die zur Zielerreichung benötigte Betrachtungstiefe ist herauszufinden und der Grey Box Ansatz auszuwählen.

Die dritte Dimension besteht in der Umsetzung der Modellierung. Frühere Literatur konzentriert sich primär auf die wissenschaftliche Nutzung mathematischer Modelle (Weisberg, 2015). Darüber hinaus finden auch konkrete Modelle, auch als analoge Modelle bezeichnet, in der angewandten Forschung und im Ingenieurwesen Anwendung. In den letzten Jahrzehnten rückten indes Computermodelle immer mehr in den Fokus der Wissenschaft. Weisberg nimmt eine Unterscheidung zwischen mathematischen und Computermodellen vor (Weisberg, 2015). Hangos und Cameron unterscheiden zwischen mathematischen und analogen Modellen (Hangos und Cameron, 2001).

Computermodelle sind der Grundstruktur nach mathematische Modelle, werden jedoch des Öfteren durch ihre strukturelle Eigenart und praktische Relevanz separat betrachtet. Somit liegt eine Dreiteilung der Modellarten vor (Müller und Bähr, 2021). Es wird unterschieden zwischen konkreten, mathematisch-analytischen und Computermodellen (vgl. Abbildung 12).

Die Aussagekraft eines konkreten Modells basiert auf physikalischer oder physikalisch-chemischer Nachbildung des realen Prozesses im Modell (Hangos und Cameron, 2001). Der Ansatz ist für Fertigungsverfahren von Interesse, wenn Experimentierstände oder Laboranalysen zum Studieren des physikalischen Verhaltens zum Einsatz kommen.

Unter einem mathematisch-analytischen Modell ist eine abstrakte Struktur zu verstehen, deren Eigenschaften in Relation zu der analytischen Darstellung von Phänomenen stehen (Weisberg, 2015). Es besteht aus Beziehungen und Variablen. Beziehungen können durch Funktionen, algebraische- oder Differenzialoperatoren bestehen. Variablen sind quantifizierbare Abstraktionen der Systemparameter. Qualifizierungskriterien mathematischer Modelle sind durch deren Struktur bedingt: Linear versus nicht linear, statisch versus dynamisch, explizit versus implizit, diskret versus kontinuierlich, deterministisch versus wahrscheinlichkeitstheoretisch und deduktiv, induktiv oder fließend (Melnik, 2015). In Naturwissenschaften sind mathematische Modelle von besonderer Bedeutung, insbesondere für physikalische Theorien. Als prominentes Beispiel sind die Newtonschen Gesetze zur Beschreibung einer Vielzahl von Alltagsphänomenen genannt. Ein Computermodell ist ein mathematisches Modell, das erhebliche Rechenleistung benötigt, um das Verhalten eines komplexen Systems durch Computersimulation zu untersuchen (Melnik, 2015). Das zu Grunde liegende System ist oft ein komplexes, nicht lineares System, für das keine analytische Lösung verfügbar ist. Das Modell wird meist durch Berechnung einer näherungsweise Lösung mittels numerischer Verfahren ausgewertet. Entgegen der analytischen Lösung wird im Computermodell durch Anpassung der Parameter experimentiert. Der jeweilige Einfluss auf das Ergebnis wird untersucht. Typische Beispiele sind Atmosphärenmodelle für die Wettervorhersage, Flugsimulatoren und neuronale Netze.

Unter Einbeziehung der Dimensionen eines Fertigungsprozesses wurde der Ansatz zur Prozessmodellierung von Hangos und Cameron zu einer Methode zur Modellierung von Fertigungsverfahren weiterentwickelt (Abbildung 14; (Müller und Bähr, 2021). In den Schritten eins bis fünf wird das Problemfeld modelliert. Im Anschluss folgen Verifizierung und Validierung. Diese Methode wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. Sie soll mit stärkerem Tiefgang explizit für additive Verfahren angepasst

werden. Im Anschluss ist eine Applikation am FDM vorgesehen. Dessen wichtigste Charakteristika werden anschließend zusammengestellt.

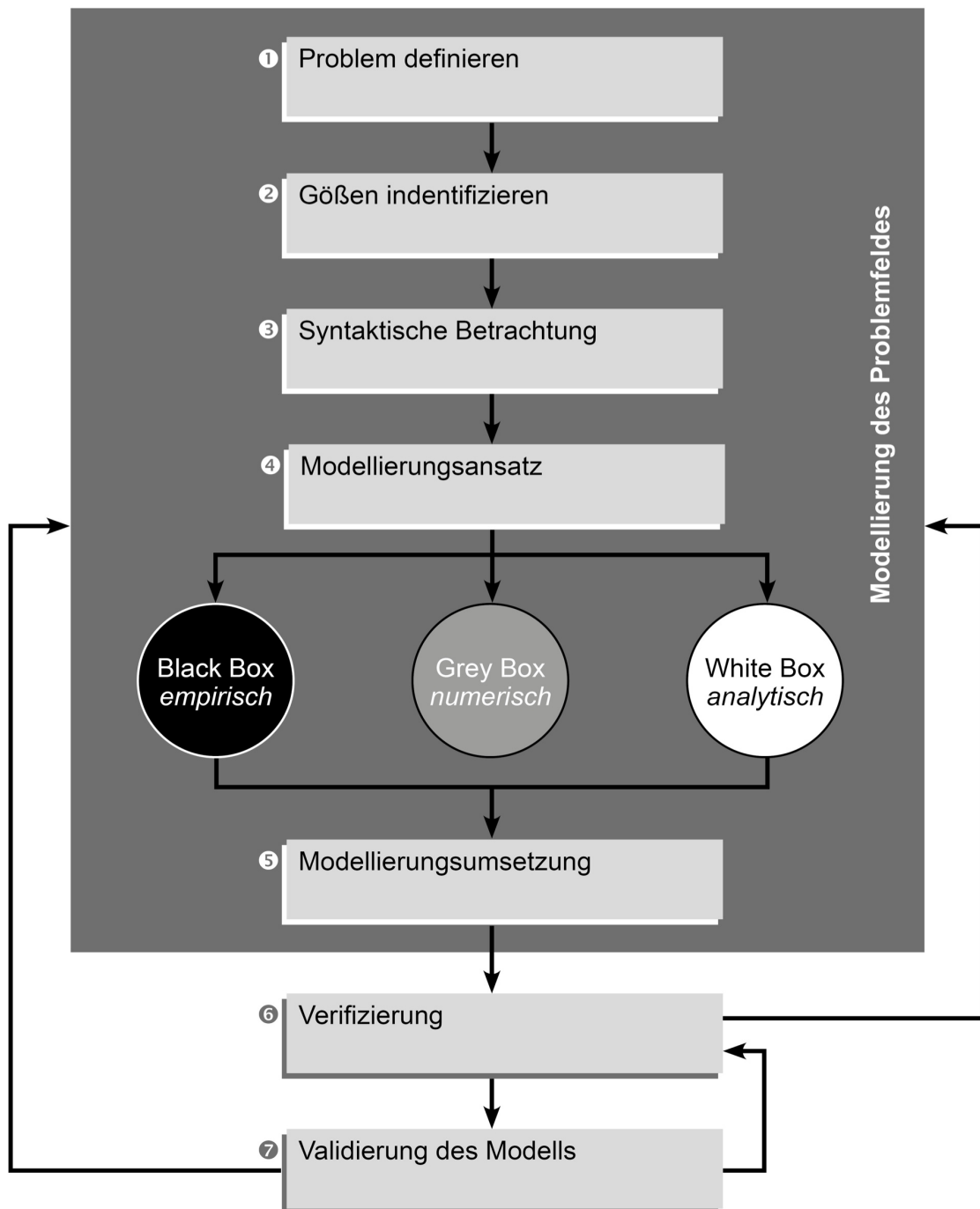


Abbildung 14 - Modellierung von Fertigungsverfahren in Anlehnung an (Müller und Bähr, 2021)

## 4 Systematik zur modellierungs-basierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling

Im Kapitel werden die Anforderungen an die Modellierungsmethode sowie deren struktureller Aufbau beschrieben. Ziel der Anwendung ist ein fähiger und beherrschter FDM Prozess. Die systematische Vorgehensweise dient der nachhaltigen Absicherung der Qualität. Der Ansatz basiert auf präventiven Maßnahmen. Eigenschaften am Bauteil sollen durch gesteigertes Systemverständnis vorhergesagt werden. Basis bildet die Modellierung der inneren Struktur des Systems und Kenntnis über Wirkzusammenhänge im Prozess.

Die Methode ist material- und bauteilunabhängig zu entwerfen. Geeignete Werkzeuge der ganzheitlichen Analyse und Darstellung sind zu entwickeln. Der Betrachtungsraum erstreckt sich von der Ausgangssituation bis hin zur Implementierung konkreter Optimierungsmaßnahmen im Fertigungsprozess. In Abbildung 15 ist der Aufbau dargestellt, der als Weiterentwicklung aus der in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Modellierungssystematik hervorgeht. Die Methode wird in sieben Schritte unterteilt:

1. Problemfeld definieren
2. Größen identifizieren
3. Syntaktische Betrachtung
4. Modellierungsansatz
5. Modellierungsumsetzung
6. Verifizierung
7. Validierung des Modells

Um das **Problemfeld definieren** zu können, sind zunächst vorliegende Defizite zu erkennen und im Detail zu beschreiben. Dazu wird der Produktentstehungsprozess von der ersten Idee bis zum fertigen Erzeugnis mit Messprotokoll betrachtet. Entlang des gesamten Prozesses können Abweichungen und Fehler auftreten, die die Funktionalität der Erzeugnisse beeinträchtigen können. In Kapitel 2.1.5 wurden mögliche Fehler am Bauteil erläutert. In einem späteren Schritt werden die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Fehlern untersucht (vgl. Abbildung 15).

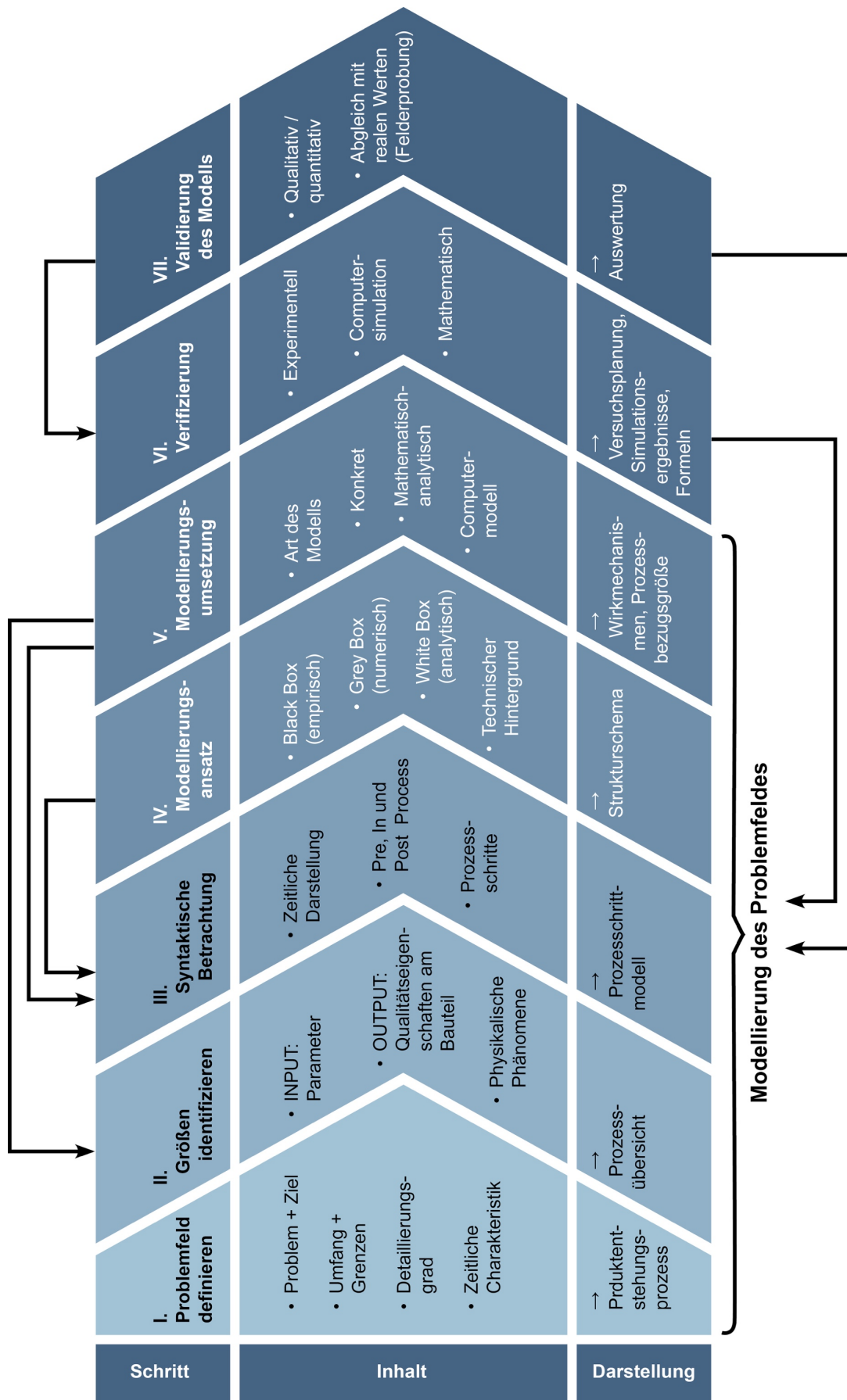


Abbildung 15 – Systematik zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling

Darüber hinaus sind fehleranfällige Faktoren im Produktentstehungsprozess wie etwa der Einfluss der Mitarbeiter, Kommunikation und Dokumentation zu betrachten. Es soll diskutiert werden, welche Maßnahmen entlang der einzelnen Prozessschritte zur ganzheitlichen Absicherung der Qualität getroffen werden können. Ein Prozess kann hinsichtlich der zeitlichen Charakteristik statisch oder dynamisch modelliert werden. Ein statisches Modell beschreibt den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt. Der dynamische Aspekt beschreibt darüber hinaus, wie sich das System im Sinne einzelner Abläufe oder des gesamten Verhaltens weiterentwickelt (König und Bruggink, 2011). Die Modellierung kann entsprechend statisch oder dynamisch durchgeführt werden oder aus Teilen beider Ansätze bestehen. Für das FDM eignet sich eine Mischform aus statischer und dynamischer Betrachtung. Physikalische Phänomene werden statisch betrachtet, um stoffliche und energetische Interaktionen darstellen und verstehen zu können. Zu einem späteren Zeitpunkt folgt eine dynamische Betrachtung des Abkühlprozesses mit Fokus auf der Materialschrumpfung. Einblicke in Verzug und Verformung während des Abkühlens des Bauteils können auf diese Art gewährt werden.

Die in Kapitel 3.3.2 vorgestellte Betrachtung eines Systems auf pragmatischer und semantischer Ebene bildet die Grundlage für den Prozessschritt **Größen identifizieren**. Alle auf den Prozess wirkenden Input (pragmatische) und Output (semantische) Größen werden betrachtet. Input Größen werden als *Parameter* und Output als *Eigenschaften* bezeichnet. Das Bindeglied zwischen Input und Output ist die innere Struktur des Systems, die durch physikalische Phänomene geprägt ist. Material- und Informationsflüsse sind die Verknüpfungen, die Wechselwirkungen zwischen Parametern und Eigenschaften aufzeigen. Die Inhalte sind in Form einer Prozessübersicht darzustellen. Innere und Beziehungen zur Außenwelt werden aufgezeigt. Iterations-schleifen mit dem Prozessschritt Modellierungsumsetzung stellen sicher, dass alle für die Zielstellung relevanten Größen Beachtung finden.

In der **syntaktischen Betrachtung** kommen Umfang und Grenzen aus dem Schritt Problemfeld definieren zum Tragen. In Anlehnung an den Produktentstehungsprozess wird das additive Verfahren nach zeitlicher Betrachtung in Pre, In und Post Process gegliedert. Diese sind auf der nächsten Detaillierungsebene in funktionelle Prozessschritte zu unterteilen. In jedem Prozessschritt werden Parameter untersucht und

dargestellt. Abhängig von Einflussintensität auf resultierende Bauteileigenschaften sowie der systematischen Möglichkeit Fehler auszuschließen, liegt der Fokus weiterer Betrachtungen auf schwer beherrschbaren Prozessschritten. Iterationsschleifen mit den Schritten vier und fünf helfen, die korrekte Abfolge der Prozessschritte aufzunehmen.

Im Rahmen des **Modellierungsansatzes** wird die innere Struktur des Systems untersucht. Der Black / White oder Grey Box Ansatz ist auszuwählen. Im Anschluss sind technische Hintergründe zu untersuchen. Der Tiefgang der Betrachtung hängt ab von der Intention darauffolgender Schritte. Ziel ist es, die Grundlagen für die zu entwickelnden Prognoseinstrumente zu schaffen. Im Laufe der weiteren Analyse wird durch iteratives Vorgehen der genaue Umfang und die entsprechende Abgrenzung definiert. Physikalische Phänomene und Zusammenhänge werden in einem Strukturschema dargestellt.

Zur **Umsetzung der Modellierung** ist die Art des Modells zu bestimmen (vgl. Kapitel 3.3.2). Es bestehen Abhängigkeiten mit dem Modellierungsansatz. So wird ein mathematisch-analytisches Modell stets über den White Box Ansatz erstellt. Der Grey Box Ansatz dient zur Entwicklung von numerischen Computermodellen. Einen essenziellen Bestandteil von Grey Box und insbesondere White Box Modellen stellt die Untersuchung der Wirkmechanismen dar. Für die Verifizierung und Validierung kann, je nach Modellierungsansatz, eine Prozessbezugsgröße notwendig sein. Im Fall der Black Box ist das oft ein reales Bauteil aus der Fertigung, das empirisch auf definierte Qualitätsmerkmale überprüft wird. Für Grey Box Modelle kann eine numerische Analyse mit einem definierten Bauteil umgesetzt werden. Der White Box Ansatz kommt im Allgemeinen ohne Prozessbezugsgröße aus.

**Verifizierung** ist die „Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass Anforderungen für eine bestimmte Anwendung [...] erfüllt sind.“ (DIN EN ISO 9000, 2015). Der objektive Nachweis kann empirisch, numerisch oder analytisch erfolgen. Empirisches Vorgehen erfolgt im Allgemeinen experimentell durch Versuche. Grey Box Modelle werden numerisch mit Hilfe einer computergestützten Simulation verifiziert. Finite Elemente und fluiddynamische Ansätze sind zwei typische Möglichkeiten. Entsprechend der Anforderungen wird ein Software Tool ausgewählt. Der Aufbau des

Vorhersagemodells beginnt mit der Definition der Randbedingungen, die sich im Kern aus Untersuchungen der Teilprozesse und Wirkmechanismen ableiten. Die Entwicklung des Vorhersagemodells ist verfahrens-, material- und bauteilspezifisch. Die Wahl der Feinheit des numerischen Modells ist auf Basis der Anforderung hinsichtlich Detaillierungsgrad und verfügbarer Rechenleistung auszuwählen. Analytische Systeme können durch Aufstellen allgemein gültiger Formeln validiert werden. Der Beweis wird in Form von mathematischer Herleitung erbracht.

Abschließend erfolgt die **Validierung** des Modells. Unter Validierung wird die Anwendbarkeit eines Produkts oder einer Methode zur Problemlösung verstanden. Es ist abzugleichen, inwiefern das initiale Problem durch die Entwicklung und Nutzung der Methode gelöst wurde. In Fertigungsprozessen erfolgt meist eine teilweise Validierung. Typische Instrumente der Validierung sind Experimente und die Felderprobung.

Zur Erarbeitung der Inhalte sind verschiedenartige Bezugsquellen geeignet. Wissenschaftlich gefestigte Grundlagen der Materialwissenschaften und Produktionstechnik bilden das Fundament. Darüber hinaus können Parallelen zu anderen Fertigungsverfahren mit technischen Überschneidungen gezogen werden, um Erkenntnisse zu adaptieren. So können Erkenntnisse aus dem Spritzgießen teilweise auf das FDM übertragen werden. Besonderes Augenmerk ist auf verfahrensspezifische Untersuchungen zu legen. Dazu zählen Artikel in wissenschaftlichen Journals, Konferenzvorträge und -veröffentlichungen, Auswertungen von Experimenten sowie eigene Versuchsreihen. Abgerundet wird das wissenschaftliche Studium durch gefestigte Erkenntnisse aus Richtlinien, Normen und Standards.



## 5 Modellierung des Problemfeldes

Im Folgenden wird die in den vorherigen Kapitel beschriebene Systematik Schritt für Schritt im Fused Deposition Modeling angewendet.

### 5.1 Problemfeld definieren

Zunächst sollen bestehende Defizite entlang des gesamten Prozesses identifiziert werden. Der Blick auf den typischen Ablauf der Produktentstehung gibt einen Überblick. Im Vordergrund steht die ganzheitliche und kontinuierliche Absicherung der Qualität von der ersten Idee bis zum einsatzbereiten Erzeugnis. Produkte werden entwickelt, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Wenn zur Zweckerfüllung einer der Faktoren Gewicht, Komplexität oder Individualität eine wichtige Rolle spielt, sollten Schichtbauverfahren in Betracht gezogen werden. Bei der Auswahl additiv zu fertigender Produkte ist es von Belang, dass Entwickler und Designer mit den Spezifikationen des Prozesses vertraut sind. Nur so können bereits in einem frühen Schritt grundlegende Fehlerursachen ausgeschlossen werden. Eine Hilfestellung bieten Gestaltungsrichtlinien (vgl. Kapitel 2.1.4). Zur Veranschaulichung sei ein Beispiel genannt. Die Tragflächen eines Fluggerätes können durch innenliegende Verstrebungen ohne Schwachstellen an Fügstellen besser gegen mechanisches Versagen abgesichert werden als mit konventionellen Herstellungsverfahren. In vielen Fällen geht die Änderung mit einer Gewichtsreduzierung einher. Aus dem geplanten Einsatz des Produktes ergeben sich Anforderungen an dessen Eigenschaften hinsichtlich Geometrie, Oberfläche und Werkstoff. In Kapitel 5.2 werden die Merkmale am Bauteil detailliert betrachtet. Geometrische Merkmale werden im CAD Modell abgebildet. Dieses wird vom Anwender typischerweise im STL, teils im OBJ oder STEP Format an den Hersteller übermittelt. Es ist darauf zu achten, dass triangulierte Oberflächenelemente fein genug sind, um alle Details in vollem Umfang darstellen zu können. Darüber hinaus sind zuvor erwähnte Gestaltungsregeln zu überprüfen und mit dem Hersteller abzustimmen. Neben dem dreidimensionalen Modell kommt der technischen Zeichnung, insbesondere der darin vorgenommenen Tolerierung, ein besonderer Stellenwert zu. Diese kann beispielsweise mit dem Hinweis auf das Toleranzsystem der DIN 16742 erfolgen (vgl. Abbildung 16). Kritische Merkmale sind durch die Anwendung eines geeigneten Toleranzsystems abzusichern (vgl. Kapitel 2.1.4). In der technischen Zeichnung wird auf die gewählte Art der Tolerierung hingewiesen.

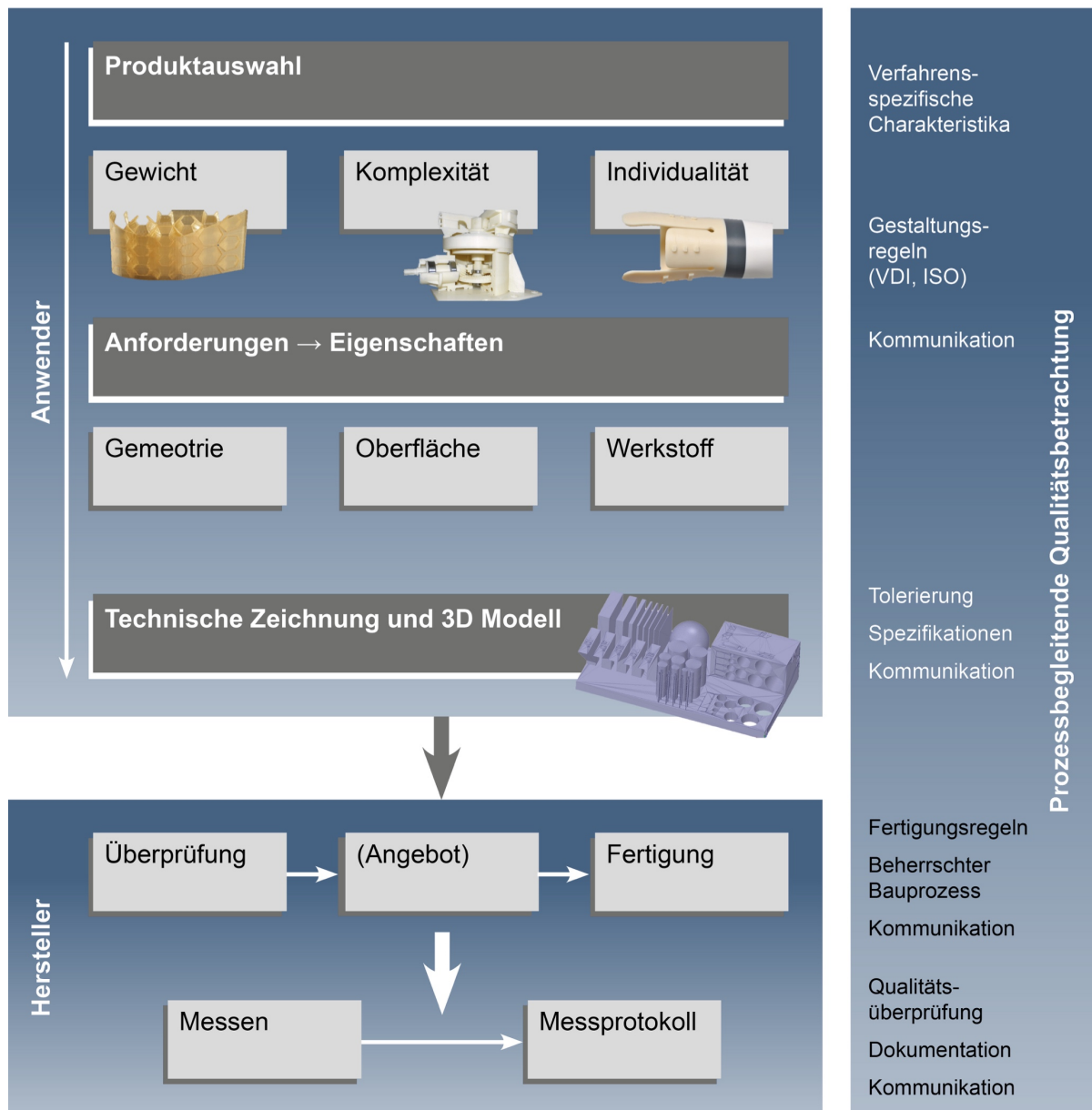


Abbildung 16 - Produktentstehungsprozess FDM

Zur klaren Darstellung können Messpunkte definiert und in einem Messprotokoll beigefügt werden. Dieser Schritt stellt einen zusätzlichen Aufwand dar, trägt jedoch zur Qualitätssicherung bei. Im Schriftfeld der technischen Zeichnung sind zusätzliche Informationen aufgeführt. Eine Anpassung der Vorgabe nach DIN EN ISO 7200 für den FDM Prozess ist in Abbildung 17 abgebildet (DIN EN ISO 7200, 2004).

In dem Feld Werkstoff sind Informationen zu Art, Zusammensetzung, Farbe und Hersteller beziehungsweise Handelsnamen zu hinterlegen.

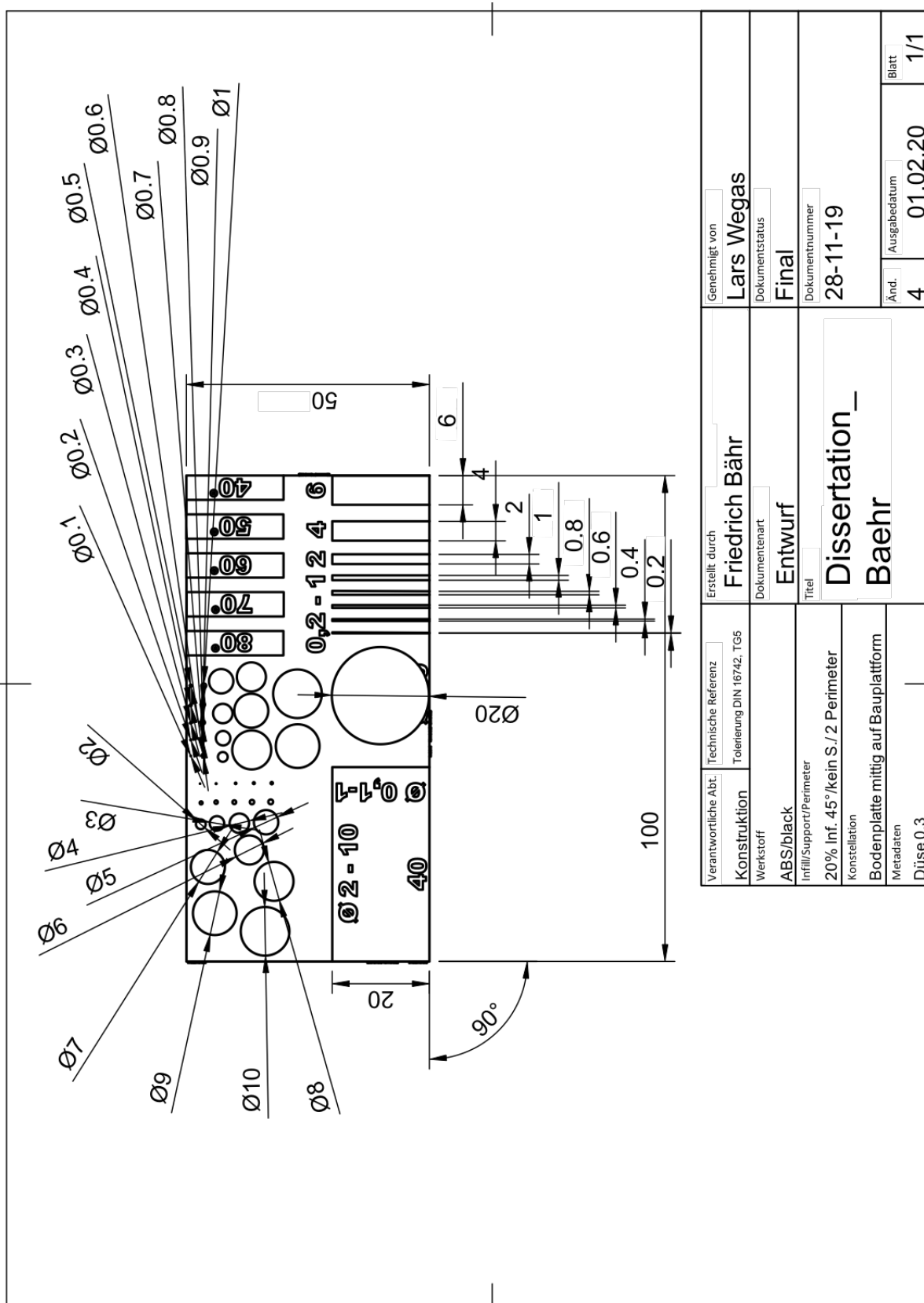


Abbildung 17 - Technische Zeichnung Prüfkörper FDM

Im darauffolgenden Feld werden Angaben zu Infill, Support und Außenkonturen (Perimeter) gemacht. Für das Infill ist der prozentuale Füllgrad, die Füllstrategie sowie

der Winkel anzugeben. Folgend wird angegeben, ob Support Strukturen erwünscht sind und wenn ja mit welchem Füllgrad. Zusätzlich sollte die Anzahl der zu fertigenden Perimeter definiert werden, um Missverständnisse zu vermeiden. Das nächste Feld steht für Angaben zur Konstellation, also der Positionierung und Orientierung der Objekte im Bauraum sowie der Druckreihenfolge zur Verfügung. In dem Feld Metadaten werden zusätzliche, für den Anwender relevante Parameter wie Schichtdicke, Strangbreite, Düsendurchmesser, Verfahrensgeschwindigkeit, Düsentemperatur, Bauraumtemperatur, Temperatur der Bauplattform et cetera hinterlegt. Zusätzlich wird hier auf gewünschte Nachbearbeitungsschritte hingewiesen.

Im unternehmerischen Alltag werden Produktdaten für die additive Fertigung typischerweise im Surface Triangulation Language (STL) Format ausgetauscht (Gebhardt et al., 2016). STL Dateien beinhalten ausschließlich Oberflächeninformationen. Zusätzliche Informationen wie Material, Farbe, Kontur und andere können nicht eingegeben werden. Daraus ergibt sich das Problem von Fehlern, die auf unzureichender Kommunikation basieren. Ein mögliches Prinzip zur Fehlerabschaltung stellt Poka Yoke dar, das Vermeiden unglücklicher Fehler. Dazu eignet sich das Additive Manufacturing File Format (AMF). Es ist ein Standard für Datensätze, in dem neben der Geometrie auch Informationen über Materialien, Farben, Texturen und weitere physikalisch-technologischen Eigenschaften enthalten sind. Durch die Nutzung des plattformunabhängigen Dateiformates können Fehler auf Basis mangelhafter Kommunikation oder Missverständnissen auf systematischer Ebene eliminiert werden. Das AMF-Format wurde von den internationalen Standardisierungsorganisationen ASTM und ISO im Jahr 2011 eingeführt (DIN EN ISO/ASTM 52915, 2017). Das AMF-Format verbreitet sich kontinuierlich, hat sich bis heute jedoch noch nicht auf breiter Front durchsetzen können (Gebhardt et al., 2016).

In einem nächsten Schritt übermittelt der Anwender die Fertigungsdaten an den Hersteller, um ein Angebot einzuholen. Dieser überprüft die Baubarkeit und erstellt ein den Spezifikationen entsprechendes Angebot. Mit Annahme des Angebots erfolgt die Fertigung des Produktes. Anschließend wird das Erzeugnis vermessen und ein Messprotokoll erstellt. In Tabelle 11 ist ein ausgefülltes Messprotokoll aufgezeigt. Für die Vermessung kommen zum einen taktile Geräte zum Einsatz. Das sind unter anderem Messschieber, Messschraube und Koordinatenmessgerät. Berührungslos

werden dreidimensionale Laserscanner und Laserentfernungsmesser genutzt. Eine präzise und umfassende Qualitätskontrolle basiert auf radiologischer Bilderzeugung mit einem Industriellen Computertomographen (ICT). Durch die Erzeugung einer Vielzahl an Bildern einzelner Ebenen ist es möglich, ein dreidimensionales Abbild des Werkstückes anzufertigen. Auf diese Art können geometrische und Oberflächenmerkmale analysiert werden. Des Weiteren erhält man einen Einblick in die innere Struktur des Materials, was Rückschlüsse auf mechanische Eigenschaften zulässt. Schlussendlich werden Produkt und Messprotokoll dem Anwender übermittelt.

Fehler sind unter anderem von manuellen Tätigkeiten, beteiligten Personen sowie deren Fähigkeiten, Wissen und Sorgfalt abhängig. Das ist nicht zuletzt dem Fakt geschuldet, dass Standardisierungsmaßnahmen nicht ausgereift sind und die Planungssicherheit entsprechend gering ist. Beginnend bei Gestaltungsrichtlinien über ein geeignetes Dateiformat bis zu Messstandards sind die Prozesse nicht klar definiert. Jedoch sind umfangreiche Bemühungen auf allen diesen Gebieten eingeleitet. Deren erfolgreichen breitflächige Umsetzung wird einer der Faktoren sein, die die Weiterentwicklung und Verbreitung des FDM Verfahrens in der industriellen Anwendung beeinflussen. Sofern dem Fertigungsprozess vor- und nachgelagerte Prozessschritte abgesichert sind, rückt der Bauprozess in den Fokus der Qualitätsbetrachtung.

## 5.2 Größen identifizieren

Ein Fertigungsprozess unterliegt Interaktionen mit seiner Umwelt auf verschiedenen Ebenen. Auf den Prozess wirkende Größen werden in dieser Abhandlung als *Parameter* bezeichnet. Unter dem Output werden quantifizierbare Attribute des Werkstückes, die *Eigenschaften*, verstanden. Im Prozess selbst treten physikalische Phänomene auf, die einander bedingen und beeinflussen. Diese werden als *Wirkzusammenhänge* bezeichnet.

Die auf einen FDM Prozess wirkenden Parameter sind folgenden Gruppen zuzuordnen:

- Störparameter
- Werkstoffparameter

- Prozessparameter
- Anlagenparameter

Umweltbedingte Störgrößen können zu ungewollten Fertigungsergebnissen, zum Abbruch des Bauprozesses bis hin zur Beschädigung der Anlage führen. Um störende Einflüsse zu vermeiden, müssen bei der Positionierung und im Betrieb der Anlage verschiedene Kriterien beachtet werden. Temperaturschwankungen durch direkte Sonneneinstrahlung sowie durch Aufheizen oder Abkühlen der Räumlichkeit sind zu vermeiden. Bei der Positionierung ist auf einen festen, nivellierten Stand zu achten. Insbesondere ist ein geeigneter Unterbau zu wählen, der in der Lage ist, im Fertigungsprozess auftretende Schwingungen zu absorbieren. Äußere physische Einwirkungen durch Geräte und Personen sind auf struktureller Ebene auszuschließen. Das kann durch mechanische Barrieren wie einer Einhausung der Maschine oder durch geeignete Sensorik wie Lichtschranken bewerkstelligt werden.

Weitere Störgrößen können durch das Ausgangsmaterial herbeigeführt werden. Der Prozess kann durch Maßabweichungen des Durchmessers, Feuchtigkeit und Abknicken des Filaments beeinträchtigt werden. Entsprechende systematische Vorkehrungen zur Fehlervermeidung umfassen Lieferantenaudit, Wareneingangskontrolle, Regelung von Luftfeuchtigkeit bei der Lagerung sowie Führungseinrichtungen der Filamentversorgung an der Anlage. Es ist Sorge zu tragen, dass der Ausgangsstoff ein homogenes Gefüge aufweist und frei von Verunreinigungen ist. Weiterhin ist eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten. In vielen Fällen muss der Bauprozess nach einer Unterbrechung von neuem gestartet werden. Vor allem bei zeitaufwendigen Baujobs, teils über mehrere Tage, kann das zeit- und kostenintensiv werden sowie zu Verzögerung im Fertigungsauftrag führen. Im schlimmsten Fall kann die Unterbrechung der Energieversorgung zu Kollisionen in der Anlage bis zur Zerstörung von Baugruppen führen. Im Anlagenbetrieb ist sicherzustellen, dass klimatische Normbedingungen herrschen. Nach DIN EN ISO 291 ist eine Temperatur von 20 °C bis 23 °C einzustellen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % bis 60 % (DIN EN ISO 291, 2008).

Bei der Verarbeitung von Erdölbasierten Kunststoffen wie ABS ist auf aktive Abluftabsaugung, mindestens jedoch ausreichende Belüftung der Räumlichkeiten zu achten. Die beim Aufschmelzen emittierten ultrafeinen Partikel liegen zwar im Allgemeinen in gesundheitlich unbedenklicher Konzentration vor, sollten aber dennoch bei Anwesenheit von Personen geringgehalten werden (Stephens et al., 2013; Caviezel et al., 2017). Nicht zuletzt ist vom Betreiber der Anlage sicherzustellen, dass ausschließlich geschultes Personal deren Bedienung übernimmt. Durch Einhalten der Vorschriften können bereits vor dem ersten Baujob eine Vielzahl an Fehlern systematisch ausgeschlossen werden. Sie können von der weiteren Qualitätsbetrachtung ausgenommen werden.

Parameter des Werkstoffes, des Prozesses und der Anlage hingegen wirken direkt auf den Bauprozess (vgl. **Abbildung 18 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Auswahl des Werkstoffes entscheidet über grundsätzliche mechanische Eigenschaften des Bauteils. Über die Materialzusammensetzung können gezielt Eigenschaften des Materials eingestellt werden, wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Farblich gleicht das Produkt dem ausgewählten Filament. Die kritische Sintertemperatur ist keine etablierte Materialkonstante in der Kunststofftechnik. Sie ist für additive Extrusionsverfahren von besonderer Relevanz (Bellehumeur et al., 2004; Bikas et al., 2016; Gebhardt, 2016). Die kritische Sintertemperatur gibt an, bis zu welchem Temperaturlevel der Hauptteil der Diffusion von Molekülketten stattfindet. Polymere, deren Ketten sich beim Abkühlen aus der Schmelze zum Teil in enger Packung anordnen, werden als teilkristallin bezeichnet. Dauer und Grad der Kristallisation haben Auswirkungen auf die Fähigkeit des Werkstoffes zur Kraftübertragung. Mit Erreichen des Glasübergangs gehen amorphe Bereiche eines Kunststoffes von einem elastisch-nachgiebigen (thermoplastischen) in einen spröde-steifen Zustand über (Bonten, 2016). Oberhalb der Glasübergangstemperatur fließen Polymere, unterhalb schwinden sie. Daraus resultiert die für den praktischen Einsatz signifikante Wärmeformbeständigkeit. Sie ist ein Maß für die Temperaturbelastbarkeit. Kunststoffe sind prinzipiell schlechte Wärmeleiter. Sie dämmen gut und transportieren Wärme im Fertigungsprozess entsprechend schlecht von dem Fabrikat ab. Der Abkühlprozess wird dadurch wesentlich charakterisiert. Diese Eigenschaften sind Grundlagen für den in Kapitel 5.4 betrachteten Abkühlprozess, in dessen Rahmen die Beeinflussung der resultierenden Eigenschaften im Detail untersucht wird.

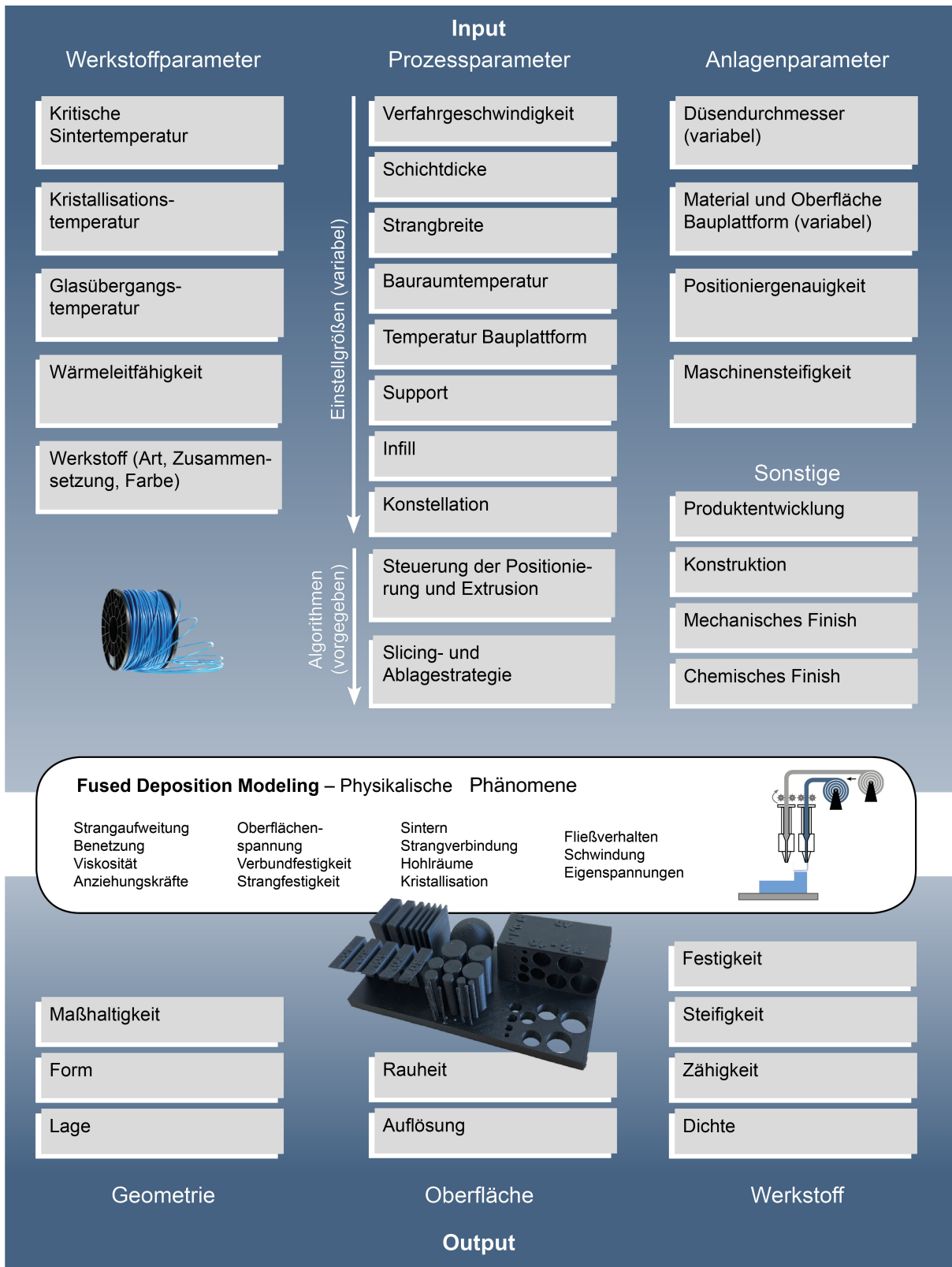


Abbildung 18 - Prozessübersicht



Prozessparameter fließen über das Slicer Programm in den Bauprozess ein. Mittels digitaler Fertigungsverfahren werden eingegebene Parameter in Anweisungen auf Maschinensprache umgewandelt. Dabei handelt es sich um DIN / ISO Programmierung, auch als G-Code bezeichnet, die von einer CNC Anlage interpretierbar sind. Die Fertigungsanweisungen bestehen aus softwaretechnisch vorgegebenen Algorithmen und variablen Einstellgrößen. Auf Untersuchungen und empirischer Analyse basierte Regeln sind in der Programmierung hinterlegt.

Ein weiteres Set an integrierten Algorithmen wird als Slicing- und Ablagestrategie bezeichnet. Danach wird das dreidimensionale Modell in Schichten, sogenannte Layer, geschnitten und die Bahnplanung vorgenommen. Die Untersuchung und Entwicklung von Slicing Strategien hat einen bedeutenden Einfluss auf qualitative Eigenschaften des Bauteils.

Vom Anwender anpassbare Parameter werden als Einstellgrößen bezeichnet. Je nach Slicing Software und Anlagenhersteller können diese variieren. Typische Einstellgrößen werden nachfolgend erläutert. Die im FDM vergleichsweise lange Bauzeit wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Dazu zählt die Verfahrgeschwindigkeit. Je schneller der Druckkopf verfährt, desto schneller der Fertigungsverfahren. Diese Regel ist im Allgemeinen anwendbar, stößt jedoch an ihre Grenzen. Abhängig von der Steifigkeit der Anlage kann eine hohe Verfahrgeschwindigkeit Bahnabweichungen hervorrufen. Grund dafür sind mit der Geschwindigkeit steigende Fliehkräfte. Darüber hinaus unterliegen die Achsen ständigen positiven und negativen Beschleunigungsrampen. Diese können nicht unendlich erhöht werden und müssen stets mit dem Materialaustrag synchronisiert sein.

Neben der Achsgeschwindigkeit wird die Bauzeit von der Strangbreite und insbesondere von der Schichtdicke beeinflusst. Die Strangbreite ist das Resultat aus Feed Rate, Düsendurchmesser, Bahngeschwindigkeit und Distanz zwischen Düse und Bauplatzform. Sie beträgt mindestens den Wert des Düsendurchmessers und übersteigt in den seltensten Fällen das Doppelte (Gebhardt, 2016). Der eingestellte Abstand zwischen Düsenöffnung und Bauplatzform erzeugt die Schichtdicke. Sie steht in linearem Zusammenhang mit dem Materialaustrag pro Zeiteinheit. Das bedeutet,

eine Reduktion der Schichtdicke von 0,2 mm auf 0,1 mm verdoppelt in etwa die Bauzeit. Strangbreite und Schichtdicke erzeugen den Detaillierungsgrad in der Ebene und die Auflösung in Baurichtung.

Mechanische Eigenschaften des Werkstoffes sind unter anderem abhängig von der Temperatur der Schmelze. Dabei herrscht ein nicht unerheblicher Unterschied zwischen der Extrusionsdüse und dem Strang beim Auftreffen auf Bauplattform oder Bauteil. Bereits nach 0,1 Sekunden bis 0,4 Sekunden wird bei der Extrusion von PLA und ABS die Glasübergangstemperatur erreicht (Dinwiddie et al., 2013; Zhou und Hsieh, 2017). Daher ist es umso wichtiger, eine ausreichend hohe Düsentemperatur einzustellen. Jedoch muss sie unterhalb der Grenze zur Degradierung des Werkstoffes liegen. Die Höhe der geeigneten Extrusionstemperatur hängt ab von der Art des Werkstoffes in Verbindung mit den beigetzten Additiven. Sie wird in der Regel empirisch ermittelt. Fließ- und Abkühlverhalten passen sich entsprechend an.

Auf den thermischen Gradienten des Werkstückes wirkt darüber hinaus die Umgebungstemperatur. Production 3D-Printer sind meist mit einem eingehausten und temperierbaren Bauraum ausgestattet. Abhängig von der Temperaturführung und dem Werkstoff können Verzug und Delamination auftreten. Anlagen ohne Einhausung bieten im Allgemeinen die Möglichkeit einer beheizten Bauplattform. Diese gibt der ersten Schicht und somit dem Bauteil Halt. Durch Einstellen einer Temperatur kann die Haftung verbessert und der Abkühlprozess beeinflusst werden. Anlagen ohne beheizbare Bauplattform oder Bauraum sind in der Praxis selten.

Supportstrukturen unterstützen die Erzeugung von Überhängen. Sie werden teilweise benötigt. Eine FDM spezifische Charakteristika stellt das Infill dar. Wenn nicht explizit gefordert, werden im FDM keine Bereiche aus Vollmaterial erstellt. Jedoch können Bauteile aus mechanischen, optischen oder anderen Gründen massive Zonen besitzen. Alle anderen Vollmaterialbereiche werden mit Infill-Strukturen gefüllt. Diese bestehen aus geradlinigen, rasterartigen, dreieckigen oder wabenartigen Wandungen. Struktur, Winkel und Füllgrad bedingen sowohl mechanische Eigenschaften als auch die Bauzeit zu einem Teil. Unter Konstellation werden Position und Orientierung der Objekte im Bauraum verstanden sowie die Reihenfolge der Fertigung. Je nach Orientierung variiert die Auflösung der entsprechend ausgerichteten Oberflächen. Die

Position im Bauraum sowie die Reihenfolge der Fertigung mehrerer Modelle kann im speziellen Fall von Relevanz sein. Infill Strukturen bestimmen zu einem Teil die Festigkeit, Zähigkeit und Steifigkeit eines Bauteils. Je nach Anforderung können die mechanischen Werte entsprechend bei gleichbleibendem Material variiert werden.

Die dritte Rubrik stellen baulich bedingte Parameter der Anlage dar. Sie sind weitestgehend durch das Design der Maschine festgelegt. Teilweise können Anpassungen mit überschaubarem Aufwand vorgenommen werden. Zu den variablen Elementen gehört die Extrusionsdüse. Sie kann automatisch oder manuell gewechselt werden. So kann der Durchmesser angepasst werden. Eine größere Strangbreite wird durch einen größeren Düsendurchmesser erreicht. Damit wird der Bauprozess zu Lasten der Auflösung zeitlich verkürzt.

Manche Anlagen bieten die Möglichkeit wechselbarer Bauplattformen. Der Abkühlprozess des fertig aufgebauten Produktes kann außerhalb des Bauraumes stattfinden und das Gerät ist unmittelbar wieder einsatzbereit. Damit wird die Grundlage für einen hohen Maschinennutzungsgrad geschaffen. Die Bauplattform sorgt zum einen für den Wärmeeintrag in das Werkstück von unten. Werkstoffe mit hoher thermischer Leitfähigkeit begünstigen das Temperieren des Bauteils. Zum anderen hängt die oben beschriebene Haftung des Materials von der Oberflächenspannung und Rauheit ab. Um den Grad der Adhäsion zu verstärken, kommen raue Materialien mit geringer Oberflächenspannung zum Einsatz. Die Positioniergenauigkeit gilt als Maß dafür, wie präzise ein gewünschter Punkt angefahren werden kann. Sie wird durch eingesetzte Achsen, deren Antriebe und die Maschinensteifigkeit bedingt. Sie definiert die Präzision der Strangablage.

Im Mittelpunkt der Prozessübersicht steht der Bauprozess. Darin wirkende physikalische Phänomene werden in diesem Schritt lediglich genannt. Im Rahmen der Untersuchung von Aufbau- und Abkühlprozess in Schritt vier werden sie im Detail dargestellt. Das Output eines jeden Fertigungsprozesses ist ein physisches Objekt mit den im Rahmen des Produktentstehungsprozesses beschriebenen, quantitativ bewertbaren Eigenschaften.

Die Maßhaltigkeit stellt die Abweichung eines real gemessenen Wertes gegenüber dem Modell an einem definierten Messpunkt dar. Form- und Lagetoleranzen werden in 14 Ausprägungen von der American Society of Mechanical Engineers (ASME) und ISO definiert (ASME, 1994; DIN EN ISO 1101, 2017). Die Bewertung von Formen im FDM erfolgt durch Rundheit, Ebenheit und Geradheit. Merkmale der Lage werden vorrangig durch Winkligkeit von Überhängen, Rechtwinkligkeit und Parallelität beschrieben.

Die Oberfläche eines FDM Bauteils ist durch Auflösung und Rauheit definiert. Die Rauheitswerte eines FDM Körpers variieren stark zwischen oberer Deckfläche, unterer Fläche sowie Flächen in Baurichtung. Die untere Fläche liegt auf der Bauplattform auf. Die Rauheit entspricht dem Negativ deren Oberflächenbeschaffenheit. Zumeist ist das die Fläche mit dem geringsten Rauheitswert am Objekt. Die obere Fläche bildet sich aus nebeneinander abgelegten Strängen ohne Negativform. Entsprechend der aufgequetschten Ellipsenform werden stets Berge und Täler der vertikal zur Strangablage vorhanden sein. Die Rauheitswerte sind größer als an der Unterseite. Seitenflächen weisen stets horizontal ausgeprägte Rillen auf. Diese entstehen durch sukzessive aufeinander abgelegte Schichten. Abhängig von der Schichtdicke und Anlage sind die Rillen mehr oder weniger ausgeprägt. Diese Struktur kann mit bloßem Auge gesehen werden oder durch sanftes Streifen mit dem Fingernagel ertastet werden. Im zweidimensionalen Druck wird unter der Auflösung die Gesamtzahl der Bildpunkte in einem Raster verstanden, die Pixel. Dreidimensionale Objekte setzen sich äquivalent aus Punkten im Gitter, den Voxeln, zusammen. Bei der Fertigung im FDM werden hingegen nicht einzelne Voxel aneinandergereiht, sondern ein kontinuierlicher Strang. Somit muss die Auflösung auf andere Art dargestellt werden. Ein grundlegender Unterschied besteht zwischen XY und Z Ebenen. In XY wird vom Detaillierungsgrad gesprochen, der sich aus der Strangbreite ableitet. Das ist die resultierende Breite des Stranges nach dem Auftragen. Die Auflösung in Z Richtung ist durch die Schichtdicke festgelegt. Das bedeutet, je mehr Schichten in einem Raum abgelegt werden, desto höher die Auflösung.

Mechanisch ist ein Kunststoff durch Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit definiert (Bonten, 2016). Die Festigkeit beschreibt den inneren Zusammenhang eines Werk-

stoffes gegen eine entgegenwirkende Kraft. Sie kann mit *Widerstand gegen Rissbildung* beschrieben werden. Die Steifigkeit ist der *Widerstand gegen Verformung*. Ist dieser hoch, wird ein Werkstoff als *steif* bezeichnet. Ist er gering, so ist das Material *nachgiebig*. Unter Zähigkeit wird die *Energieaufnahmefähigkeit* eines Werkstoffes gesehen. Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit werden durch Primär-, Sekundär- und Tertiärstrukturen der Polymerketten sowie durch Art und Ausrichtung von Additiven bestimmt (Bonten, 2016). Eine Besonderheit additiver Verfahren besteht darin, dass mechanische Eigenschaften zu einem bestimmten Teil aus dem Herstellungsprozess resultieren. Damit ergeben sich besondere Ansprüche an Fähigkeit und Stabilität des additiven Prozesses. Physikalische Phänomene und deren Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften werden in Kapitel 5.4 im Rahmen der technischen Hintergründe betrachtet. Im Folgenden wird zunächst die zeitliche Abfolge der Prozessschritte betrachtet.

### **5.3 Syntaktische Betrachtung**

Aus syntaktischer Betrachtung wird der additive Fertigungsprozess in einen Pre, In und Post Process unterteilt. Entsprechende Prozessschritte sind in Abbildung 19 auf der linken Seite abgetragen. Auf der gegenüberliegenden Seite sind Einflussparameter aufgeführt, die auf jeweilige Prozessschritte wirken. Der Pre Process umfasst vorgelagerte Schritte, die nicht direkt mit dem physischen Bauprozess in Verbindung stehen. Dennoch haben sie einen Einfluss auf die Bauteilqualität. Er setzt sich zusammen aus Produktentwicklung, Werkstoff, Konstruktion und Einstellgrößen sowie der Slicing- und Ablagestrategie. Der In Process besteht aus den in Kapitel 2.1.1 eingeführten Prozessschritten. Diese werden folgend unter dem Gesichtspunkt der Qualitätssicherung diskutiert.

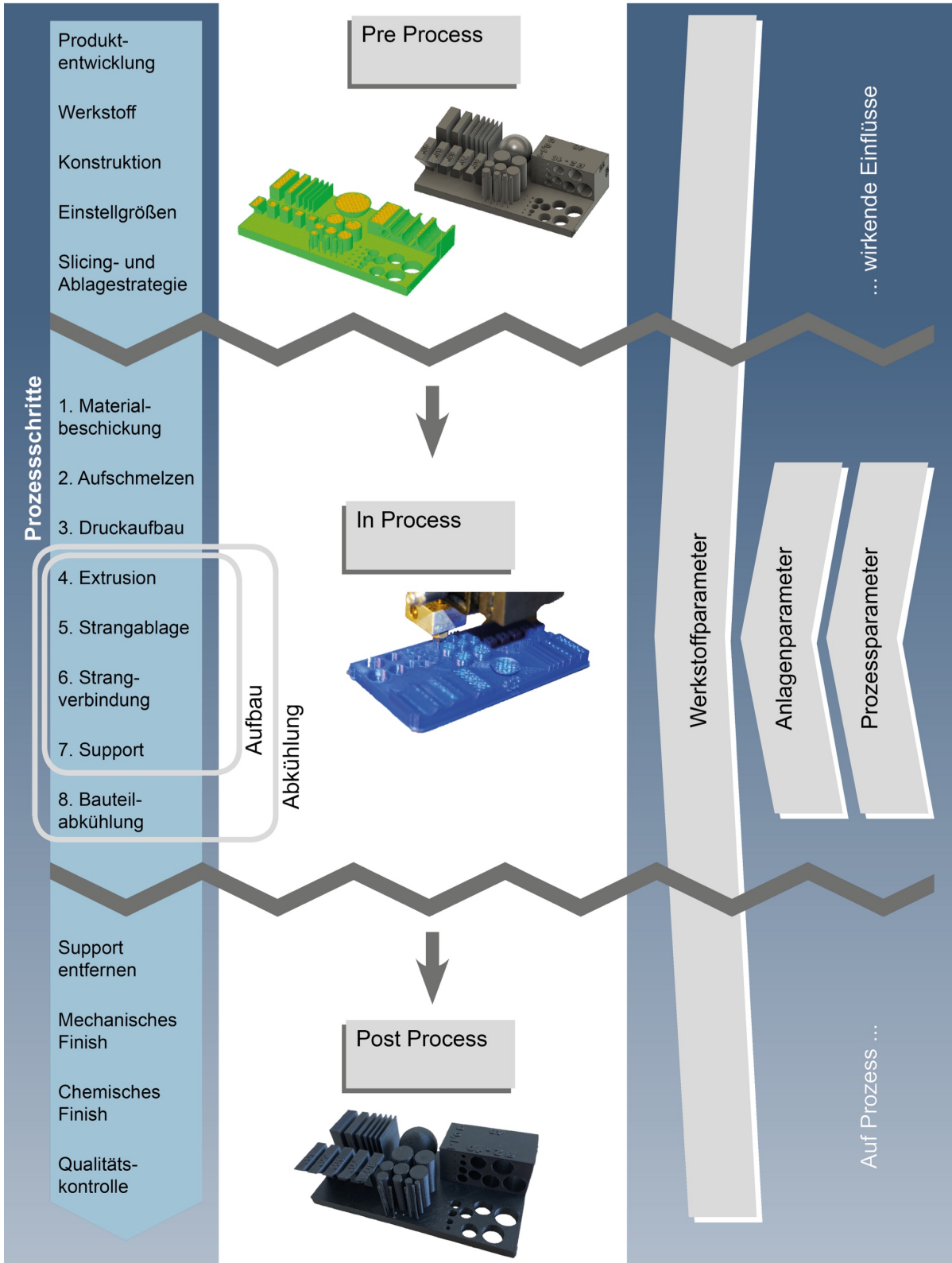


Abbildung 19 - Prozessschrittmodell

### 5.3.1 Materialbeschickung

Eine Grundvoraussetzung ist ausreichende Festigkeit und Zähigkeit des Filaments. So wird Brechen, Reißen und Dehnen verhindert. Wird der Druck unterbrochen, muss das Bauteil in vielen Fällen verworfen und der Prozess neu gestartet werden. Das kann durch eine aufgebrauchte Vorratsspule verursacht werden. Aus diesem Grund ist vor Baubeginn sicher zu stellen, dass ausreichend Material für den Baujob vorhanden ist. Ein Qualitätsmerkmal von Filament ist die Kontinuität des Durchmessers. Variationen rufen zu einer Über- oder Unterextrusion hervor, da in der Slicing- und Ablagestrategie ein einheitlicher Durchmesser für die Berechnung einer kontinuierlichen Austragsmenge angenommen wird. Zu großem Durchmesser kann zu einer zu großen Durchmesser zum Verklemmen des Filaments in der Vorschubeinrichtung oder rutschenden Vorschubwalzen (Slippage) führen. Ist der Durchmesser kleiner als gefordert, kann Schmelze im Druckkopf aufsteigen und den Materialaustrag verringern beziehungsweise den Extruder verstopfen.

### 5.3.2 Aufschmelzen

Die Schmelze in der Plastifiziereinheit sollte in einem flüssigen Zustand gehalten werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Temperatur so gering wie möglich ist, da manche Polymere schnell degradieren und leicht entflammbar sind. Rückstände sind schwer zu beseitigen und kontaminieren folgendes Material. Lange Verweilzeiten im geschmolzenen Zustand führen ebenfalls zu Degradierung und sind zu verhindern. Fällt die Temperatur auf einen zu geringen Wert, wird das Anschmelzen angrenzender Stränge gehemmt. Im Extremfall blockiert hochviskose Schmelze die Düse. Wertebereiche der Verarbeitungstemperatur und maximale Verweildauer werden vom Lieferanten angegeben oder können einschlägiger Literatur aus Kunststofftechnik und Spritzgießen entnommen werden (Johannaber und Michaeli, 2004; Bonten, 2016).

### 5.3.3 Druckaufbau

Der aufgebaute Druck muss ausreichen, um den durch Reibung und Scherkraft bedingten Druckabfall im Extruder zu überwinden. Übersteigt die von den Walzen eingebrachte Kraft den Extrusionsdruck, knickt das Filament ein (Buckling) oder die Walzen beginnen zu rutschen (Slippage). Dies gilt es zu verhindern. Die Feed Rate ist

mit der Wärmeeinbringung der Plastifiziereinheit zu synchronisieren, um eine gleichbleibende Extrusionstemperatur sicher zu stellen. Darüber hinaus sind Verfahrensgeschwindigkeit und Feed Rate so aufeinander abzustimmen, dass die extrudierte Menge pro Wegeinheit konstant ist. Insbesondere entlang der Beschleunigungsrampen ist dies eine Herausforderung.

#### 5.3.4 Extrusion

Optimale Ergebnisse werden erreicht, wenn der Extrusionsstrang mit kontinuierlichem Maß und Volumen aufgequetscht wird. Form und Größe werden in Kapitel 5.4 betrachtet.

#### 5.3.5 Strangablage

Die Strangablage wird durch die Slicing- und Ablagestrategie geplant. Diese hat einen erheblichen Einfluss auf qualitative Eigenschaften am finalen Produkt. Zwei Ansätze existieren. Ist der Slicer nicht in die Anlage integriert, wird der Slicing Vorgang vor dem eigentlichen Bauprozess an einem separaten Computer durchgeführt. Auf Basis zunehmend verfügbarer Rechenleistung entwickelte sich der Ansatz, den Prozess adaptiv laufen zu lassen. Mit dem sogenannten *Slicing on the fly* kann neben dem Steuern simultan geregelt werden (Gebhardt, 2016). Das heißt, in der Anlage werden regelmäßig Signale aufgegriffen, ausgewertet und die Resultate in die Steuerung rückgeführt. So wird beispielsweise die Modellhöhe in regelmäßigen Abständen durch eine optische Einrichtung gemessen und die Schichtdicke entsprechend angepasst. So lassen sich Maßabweichungen in Baurichtung reduzieren.

#### 5.3.6 Strangverbindung

Die Verbindung von einem Strang mit der Bauplattform beziehungsweise mit angrenzenden Kunststoffbereichen ist ein elementarer Bestandteil beim Generieren der Bauteileigenschaften. Der im Englischen als Bonding bezeichnete Phänomen ist wichtiger Bestandteil des Aufbauprozesses und unterliegt einer Vielzahl an Einflüssen und physikalischen Phänomenen. Diese werden im folgenden Kapitel 5.4 beschrieben.



### 5.3.7 Support

Mit Blick auf die Oberfläche, Überhänge und Material ist zu entscheiden, ob und welche Art von Support eingesetzt werden soll. Wenn möglich, ist von Support abzusehen. Dessen Erzeugung und Entfernung ist nicht wertschöpfend. Supportgenerierung stellt zusätzlichen zeitlichen und manuellen Aufwand sowohl im Druckvorgang als auch in der Nachbearbeitung dar. In der Praxis müssen Überhänge oberhalb eines bestimmten Neigungswinkels abgestützt werden. Andernfalls scheitert die Erzeugung der überhängenden Geometrie. Der maximale Neigungswinkel ist von der Anlage, der Schichtdicke und dem Werkstoff abhängig. Ist der spezifische Grenzwinkel unbekannt, wird empfohlen bei einem Überhangwinkel größer gleich  $45^\circ$  mit Stützgeometrien zu arbeiten (VDI 3405 Blatt 3.4, 2019).

### 5.3.8 Bauteilabkühlung

Wird das Bauteil in der Anlage auf Umgebungstemperatur gebracht, kann die Abkühlung thermisch geregelt werden. Abhängig von temperierter Bauplattform und Bauplattform, Luftbewegung, Wärmetransportvorgängen und weiteren Faktoren ist das Abkühlen an sich einer der komplexesten Teilprozesse im FDM. Darüber hinaus bedingt die Homogenität der Abkühlung in weitem Maße geometrische Merkmale des Bauteils.

Im Anschluss an den Bauprozess folgt der Post Process. Zunächst ist Support Material zu entfernen. Für herausgebrochene Strukturen ist mit sichtbaren Oberflächenschädigungen, dem Support Grat (Support Structure Burrs) zu rechnen (vgl. Kapitel 2.1.5). Mechanische Nachbearbeitung kann aus Schleifen, Sägen, Feilen, Entgraten, Löcher aufbohren und anderen Bearbeitungsschritten bestehen. Die chemische Behandlung umfasst das Glätten der Oberfläche mit Lösemittel, Beschichten, Anrauen und Ätzen. Möglichkeiten zur Nachbearbeitung hängen von dem Werkstoff ab. So ist PLA resistent gegenüber Lösemitteln, während ABS sich auflösen lässt. Vor der Auslieferung wird das Bauteil entsprechend vereinbarter Vorgaben auf Qualität überprüft.

Schritte vier bis sieben des *In Process* umfassen den Aufbau des Werkstückes. Infolge der schichtweisen Produktion kühlt das Bauteil simultan zum Aufbau ab. Während Aufbau und Abkühlung treten physikalische Phänomene auf, die einen signifikanten Einfluss auf das Bauergebnis haben. Sie werden im folgenden Kapitel betrachtet.

## 5.4 Modellierungsansatz

Für die Prognose von Bauteileigenschaften im FDM durch numerische Simulation eignet sich der Grey Box Ansatz. Die innere Struktur des Systems wird bis zu einem bestimmten Aggregationsgrad untersucht. Prozesswissen über den Aufbau- und Abkühlprozess ist notwendig, um eine realitätsnahe Simulation zu erstellen. Die Untersuchung ist generischer Natur. Das bedeutet, sie ist unabhängig von Werkstoff, Anlage und Prozessparametern. In der folgenden Analyse werden Richtwerte für ABS und PLA zur Veranschaulichung genannt. Im gegebenen Fall wird ein Vergleich mit anderen Werkstoffen angeführt.

### 5.4.1 Der Aufbauprozess

Der Aufbauprozess beginnt mit Ausbringen und Ablegen von Baumaterial auf die Bauplatzform. Bei der Extrusion einer polymeren Schmelze durch eine Verengung vergrößert sich deren Volumen. Grund ist die Zurückstellung der unter Druck elastisch deformierten Anteile der Polymerketten. Durch die Strangaufweitung, auch Barus-Effekt genannt, vergrößert sich die resultierende Strangbreite. Der Effekt ist im FDM weitestgehend vorhersagbar. Aktuelle Slicer berücksichtigen die Abweichungen durch aktive Fehlerkompensation. Mittels programmierter Offset Vorgaben wird die Berechnung angepasst. Der Aufbau eines FDM Modells läuft folgendermaßen ab.

Nebeneinander abgelegte Stränge bilden eine Schicht, oft auch im deutschen Sprachgebrauch als Layer bezeichnet (vgl. Abbildung 20). Mehrere aufeinander aufgebaute Schichten ergeben einen Materialverbund, den Körper. Das Materialgefüge wird durch eine Vielzahl an Verbindungsstellen gebildet, die in jedem einzelnen Fall einer Schweißverbindung gleichen. Problematisch an Schweißverbindungen ist die reduzierte Fähigkeit zur Kraftübertragung gegenüber gegossenem, homogenem Material (Bonten, 1999). Im FDM wird dieser Effekt als Verbundfestigkeit (Bond Strength)

bezeichnet. Für den gesamten Körper ist sie stets so hoch wie die schwächste Stelle im Gefüge. Für gleichbleibende, vorhersagbare Materialkennwerte muss eine einheitliche Verbundfestigkeit sichergestellt sein. Sie hängt ab von der Strangfestigkeit (Road Strength), Strangverbindung (Bonding), Hohlräumen (Voids) und der Schichtverbindung (Inter Layer Strength).

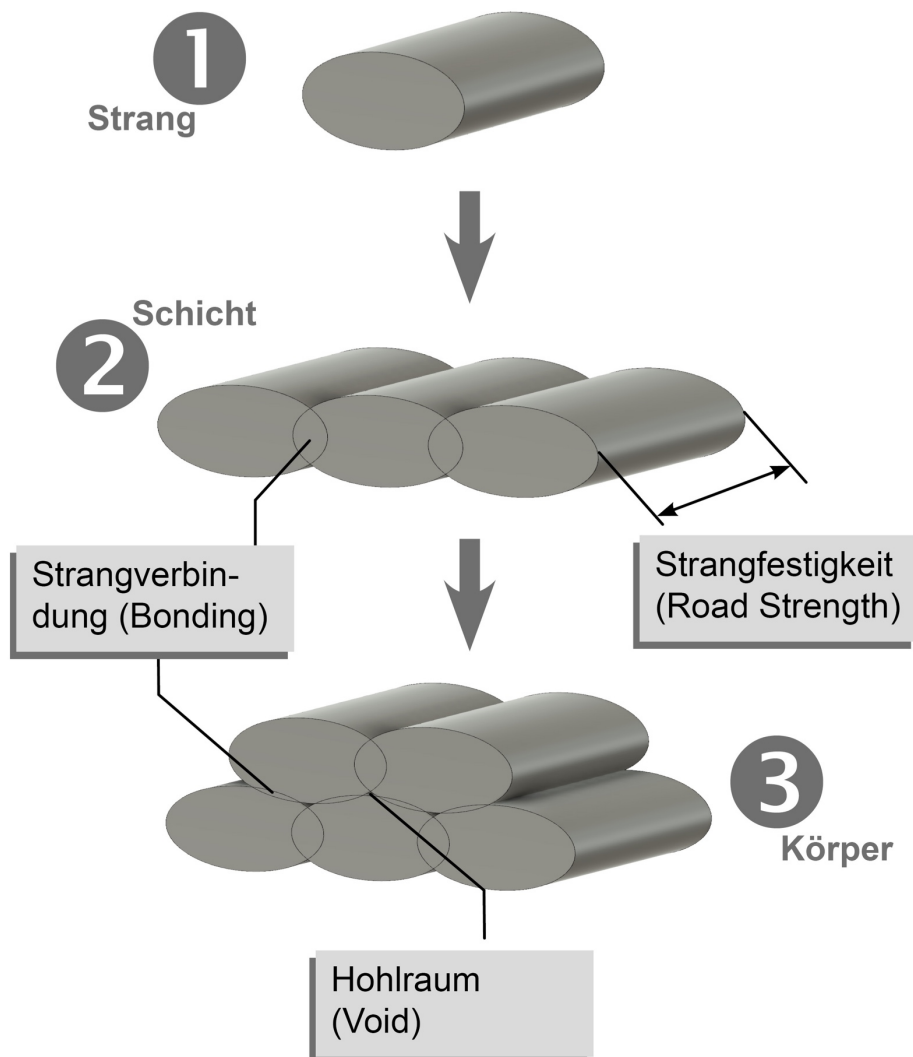


Abbildung 20 - Mesostruktur von FDM Bauteilen

Die Strangfestigkeit ist der Widerstand gegen Rissbildung in Extrusionsrichtung. In der Ebene wird der Werkstoff unterbrechungslos abgelegt. Das Materialgefüge ist homogen. Festigkeitswerte sind äquivalent zu gegossenen Bauteilen (Bellini und Güçeri, 2003). Die Verbindung einzelner Stränge beeinflusst die Kraftübertragung

des gesamten Körpers. Strangverbindungen weisen inhomogene Bereiche auf. Deren mechanische Eigenschaften entsprechen nicht denen entlang des Stranges. Hohlräume existieren. In dem Bereich kann keine Kraft aufgenommen werden. Sie stellen Schwachstellen im Materialgefüge dar. Strangverbindungen und Hohlräume entstehen, wenn ein heißer Strang neben oder auf einen kalten gelegt wird. Es kommt zur Benetzung.

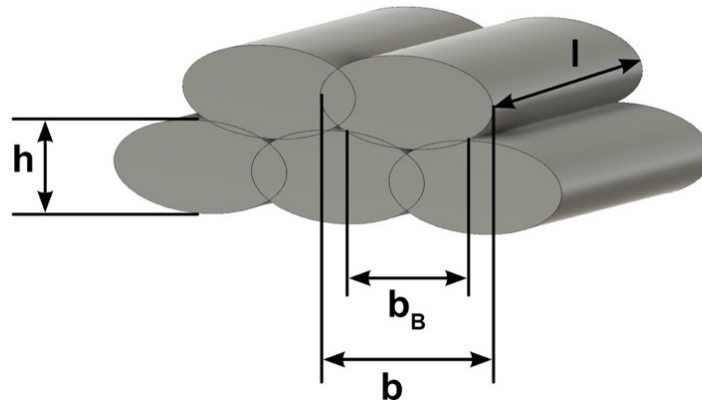


Abbildung 21 - Benetzung verschiedener Stränge

Unter Benetzung wird der Grad beschrieben, mit dem sich ein Fluid bei Kontakt mit einem Festkörper auf diesem ausbreitet (Bonten, 2016). Das Fluid entspricht dem heißen Strang. Der Festkörper ist der zuvor extrudierte, teilweise abgekühlte Strang. Die Benetzungsfläche  $A$  ergibt sich aus Benetzungsbreite  $b_B$  und Stranglänge  $l$  (vgl. Abbildung 21). Sind in diesem Bereich Hohlräume vorhanden, reduziert deren Breite die Benetzungsfläche.

$$A = l \times b_B \quad (4)$$

Die Fläche ist maximal, wenn Benetzung über die gesamte Strangbreite  $b$  vorliegt.

$$A_{max} = l \times b \quad (5)$$

Der Benetzungsgrad ist der Quotient aus Benetzungsfläche  $A$  und maximaler Benetzungsfläche  $A_{max}$ . Er wird in Prozent ausgedrückt.

$$B = \frac{A}{A_{max}} [\%] \quad (6)$$

Abbildung 22 zeigt in vier Szenarien, welche Form ein Strang einnehmen kann. Dabei entstehen drei verschiedene Grade der Benetzung. Bei annähernd kreisrunder Form (Szenario I) liegt keine Benetzung vor. Es gilt  $B = 0$ , eine Benetzungsfläche ist nicht vorhanden. Die Hohlräume nehmen ein maximales Volumen ein. Eine Annäherung an diesen Zustand kann bei freier Extrusion erreicht werden, ist jedoch nicht opportun. In dem Fall  $0 < B < 1$  handelt es sich um partielle Benetzung (Szenario II). Die Benetzungsfläche der elliptischen Stränge ist groß, jedoch nicht maximal. Dazwischen bestehen kleine Hohlräume. Vollständige Benetzung liegt vor, wenn  $B = 1$  (Szenario III und IV).

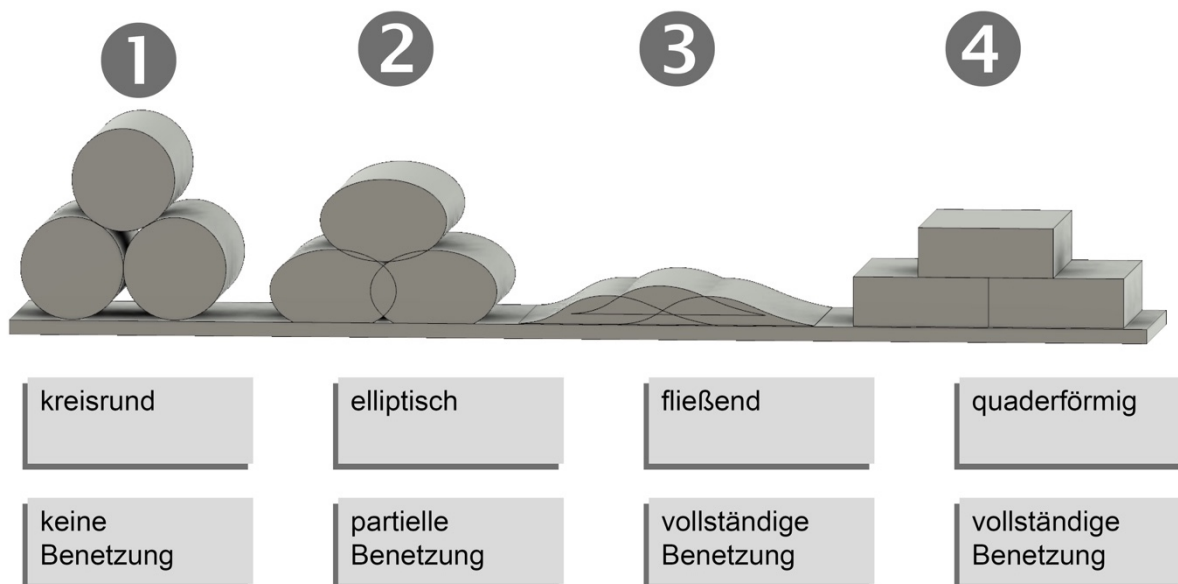


Abbildung 22 - Benetzungsarten und Strangformen

In Szenario III hat die Schmelze eine besonders hohe Fließfähigkeit. Dadurch wird verhindert, dass sich Hohlräume bilden. Die Benetzungsfläche nimmt einen maximalen Wert an. Im letzten Fall bildet das Extrudat eine Quaderform. Bei vollständiger Benetzung entstehen auch hier keine Hohlräume. Auf die praktische Relevanz und Realisierbarkeit der Szenarien wird später eingegangen. Zunächst wird betrachtet, wie und warum sich Stränge im FDM vernetzen. Das Benetzungsverhalten der Schmelze hängt ab von

- Oberflächenspannung
- Anziehungskräften und
- Viskosität.

Im festen Trägermaterial wirkt vorrangig die Oberflächenspannung. Für die erste Schicht ist das die Bauplattform, in allen weiteren das Bauteil. Die Eigenschaften des Extrudats können über Einstellgrößen beeinflusst werden. Die Oberfläche der Bauplattform kann in Hinblick auf maximale Adhäsion angepasst werden. Äußere Schichten aus Baumaterial hingegen bieten keine Möglichkeiten zur Anpassung. Zusammenhänge zwischen Oberflächenspannung und Benetzung werden nachstehend betrachtet.

Stoffe streben stets an, ihre Oberfläche so klein wie möglich zu halten. Aufgrund von molekularen Kohäsionskräften entsteht eine Spannung entlang der außenliegenden Moleküle. Geringe Oberflächenspannung eines Fluides sorgt für gute Benetzung des Festkörpers. Auch dieser lässt sich bei geringen Werten besser benetzen. Die Oberflächenspannung  $\gamma$  ist der Quotient aus Kraft  $F$  und doppelter Grenzflächenlänge  $L$ . Sie ist parallel zur Flüssigkeitsoberfläche gerichtet.

$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (7)$$

Benetzung findet nur dann statt, wenn die Kohäsionskräfte  $F$  im Fluid geringer sind als die Adhäsionskräfte gegenüber dem Feststoff. Bei einer vergleichsweise hochviskosen Kunststoffschmelze ist das nicht der Fall. Freie Extrusion bewirkt minimale Benetzung (vgl. Abbildung 22, Szenario eins). Dieser Fall ist unvorteilhaft für die Bauteilqualität. Das Bauteil würde gewissermaßen zerfallen. Das bedeutet, die hohe Oberflächenspannung der Schmelze muss zunächst reduziert werden.

Formel vier zufolge können hierzu entweder Kohäsionskräfte reduziert oder die Länge vergrößert werden. Die Länge der Grenzfläche der ersten Schicht wird von dem bedruckten Substrat bestimmt. Das Profil der Oberfläche, also deren Rauheit,

ist maßgebend. Erhöhte Rauheit sorgt für eine größere Grenzfläche. Im Resultat verringert sich die Oberflächenspannung der Bauplattform. Die Adhäsion zwischen extrudiertem Strang und Bauplattform verstärkt sich. Zusätzlich wird der Strang aufgequetscht. So wird der Querschnitt verlängert und das Anhaften des Stranges an der Grundplatte oder am Modell verbessert. In Abbildung 22, Szenario zwei ist partielle Benetzung durch Aufquetschen dargestellt. Dieser Fall entspricht der Realität gängiger FDM Anlagen. Das optimale Breiten-Höhenverhältnis des Schichtquerschnitts liegt zwischen 3,5 bis sechs (Gebhardt, 2016). So wird ein Benetzungsfaktor  $B$  nahe eins erreicht. Solide Strukturen und glatte Oberflächen entstehen.

Eine weitere Reduzierung der Oberflächenspannung  $\gamma$  kann durch geringere Kohäsionskräfte  $F$  erreicht werden. Diese stehen im Zähler des Quotienten (s. Formel 4). Kohäsionskräfte werden durch die Viskosität bestimmt. Die Viskosität ist eine Funktion der Temperatur. Erhöhte Extrusionstemperatur sorgt entsprechend für geringe Viskosität und geringe Kohäsionskräfte. Damit erhöht sich die Benetzung und die Intensität der Strangverbindung. Da Thermoplasten ab einem gewissen Temperaturlevel degradieren, ist die praktische Anwendung der Maßnahme nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus neigt niederviskose Schmelze zum Fließen (vgl. Abbildung 22, Szenario drei). Sowohl Schichtdicke als auch Strangbreite werden schlechter kontrollierbar. Verschwommene Konturen am Erzeugnis bis zu vollkommener Deformierung sind das Resultat. In Szenario IV wird schematisch ein quaderförmiger Querschnitt des Stranges gezeigt. Damit wird eine maximale Benetzung erzielt. In der Praxis kann dieser Fall nicht erreicht werden. Ziel ist es, sich dem Szenario so weit wie möglich zu nähern.

Eine besondere Bedeutung kommt im FDM der Viskosität der extrudierten Schmelze zu. Kunststoffe verhalten sich strukturviskos. Sie weisen ein nicht newtonsches Fließverhalten auf. Unter Druck stehende Schmelze unterliegt einer Schergeschwindigkeit. In der Folge sinkt die Viskosität. Aus dem Grund werden in der Kunststofftechnik Viskositätswerte typischerweise in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit angegeben. Im FDM Verfahren hingegen ist die Schmelze nach der Extrusion keinem Druck ausgesetzt. Man spricht von der Nullviskosität. Abbildung 23 zeigt, dass die Nullviskosität von PLA und ABS mit steigender Temperatur exponentiell abnimmt. Zur Verarbeitung

eignet sich ein Temperaturfenster der Düse für ABS von 210 °C bis 270 °C (Johannaber und Michaeli, 2004; Gibson et al., 2015). Für PLA liegt es bei 180 °C bis 230 °C (Huang, T. et al., 2015; Gebhardt, 2016). Diese Werte wurden empirisch ermittelt. Sie entsprechen dem Stand der Technik. Übersteigt die Temperatur diesen Bereich für eine bestimmte Zeit, beginnt der Werkstoff zu degradieren oder zu fließen. Unterhalb der Grenzwerte stellt sich eine hohe Viskosität ein, die Benetzung und Sintern hemmt. PLA weist innerhalb des Bearbeitungsfensters eine Viskosität von etwa  $1 - 9 \times 10^3 \text{ Pas}$  auf. Für ABS ergeben sich Werte von  $0,8 - 31 \times 10^3 \text{ Pas}$  (s. Tabelle 5).

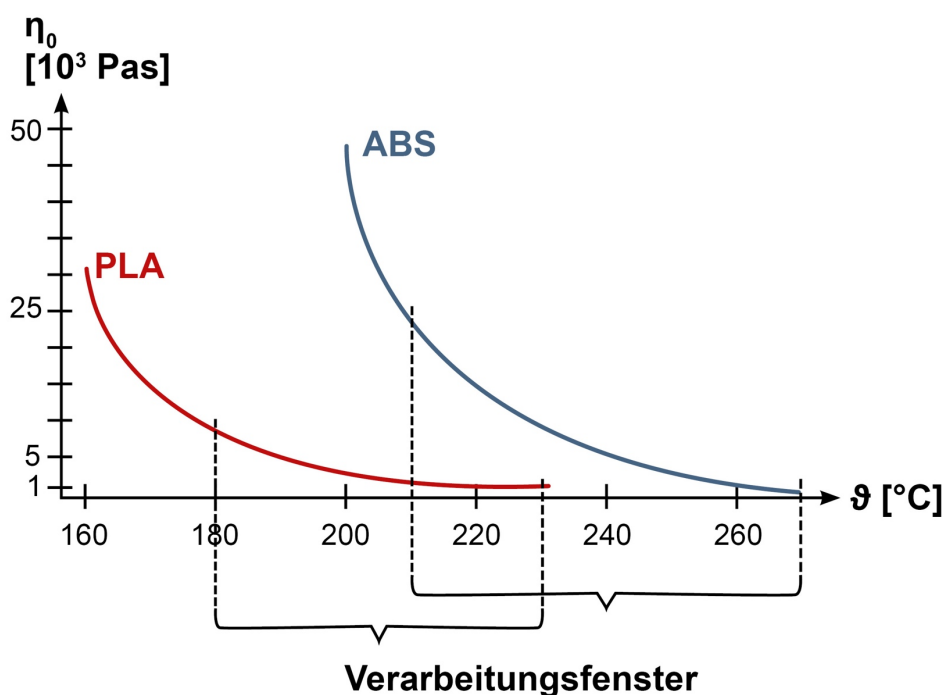


Abbildung 23 - Nullviskosität von PLA und ABS (Quellen siehe Tabelle 5)

Im Vergleich zu alltagstypischen Werkstoffen handelt es sich in beiden Fällen um ein äußerst zähflüssiges Fluid. Wasser als bedeutsames newtonsches Fluid weist bei Zimmertemperatur eine Viskosität von sechs bis sieben Zehnerpotenzen unterhalb der Polymerschmelzen auf (s. Tabelle 5). Honig mit deutlich höherer wahrnehmbarer Zähigkeit gegenüber Wasser hat Werte im Bereich von Hundertstel bis Tausendstel der verflüssigten Kunststoffe. Straßenbaubitumen bei 60 °C kommt den Polymerschmelzen näher. Bei hoher Extrusionstemperatur sind PLA und ABS etwa um den Faktor zehn zäher. Das zeigt, mit welchem zähflüssigem Material in additiven Schmelzverfahren gearbeitet wird sowie den großen Einfluss der Extrusionstemperatur.



Für einen homogenen Schichtaufbau und -zusammenhalt sind insbesondere starkes Fließen sowie Hohlräume und schlechte Strangverbindung zu vermeiden. Geeignete Verarbeitungstemperaturen sind vom Werkstoff und dessen Zusammensetzung abhängig. Sie können nicht pauschal vorgegeben werden, sondern werden empirisch ermittelt. Hier aufgeführte Hintergründe über physikalische Phänomene helfen, geeignete Werte einzustellen. Die Extrusionstemperatur und die Viskosität spielen eine wichtige Rolle im Abkühlprozess. Ebenso hängt die Verbindung aufeinandersitzender Schichten davon ab.

*Tabelle 5 - Viskositätswerte ausgewählter Werkstoffe*

Werkstoff	Viskosität [ $10^3$ Pas]	Quelle
Wasser (20 °C)	0,00000089	
Honig	0,01	(VP-Scientific, 2019)
Polymerschmelzen	0,001 bis $10^7$	(Mezger, 2007)
Straßenbaubitumen (60 °C)	0,09	(BITEX BIMOID AG, 2009)
<b>Nullviskosität von ABS</b>		
<b>Schmelze bei</b>		
200 °C	48	(Bellehumeur et al., 2004)
220 °C	14	(Bellehumeur et al., 2004)
240 °C	5	(Bellehumeur et al., 2004)
260 °C	1	(Johannaber und Michaeli, 2004)
270 °C	0,8	(Altinkaynak et al., 2011)
<b>Nullviskosität von PLA</b>		
<b>Schmelze bei</b>		
160 °C	31	(Lehermeier und Dorgan, 2001)
180 °C	9	(Lehermeier und Dorgan, 2001)
200 °C	3	(Lehermeier und Dorgan, 2001)
230 °C	1	(Othman, 2012, p. 90)

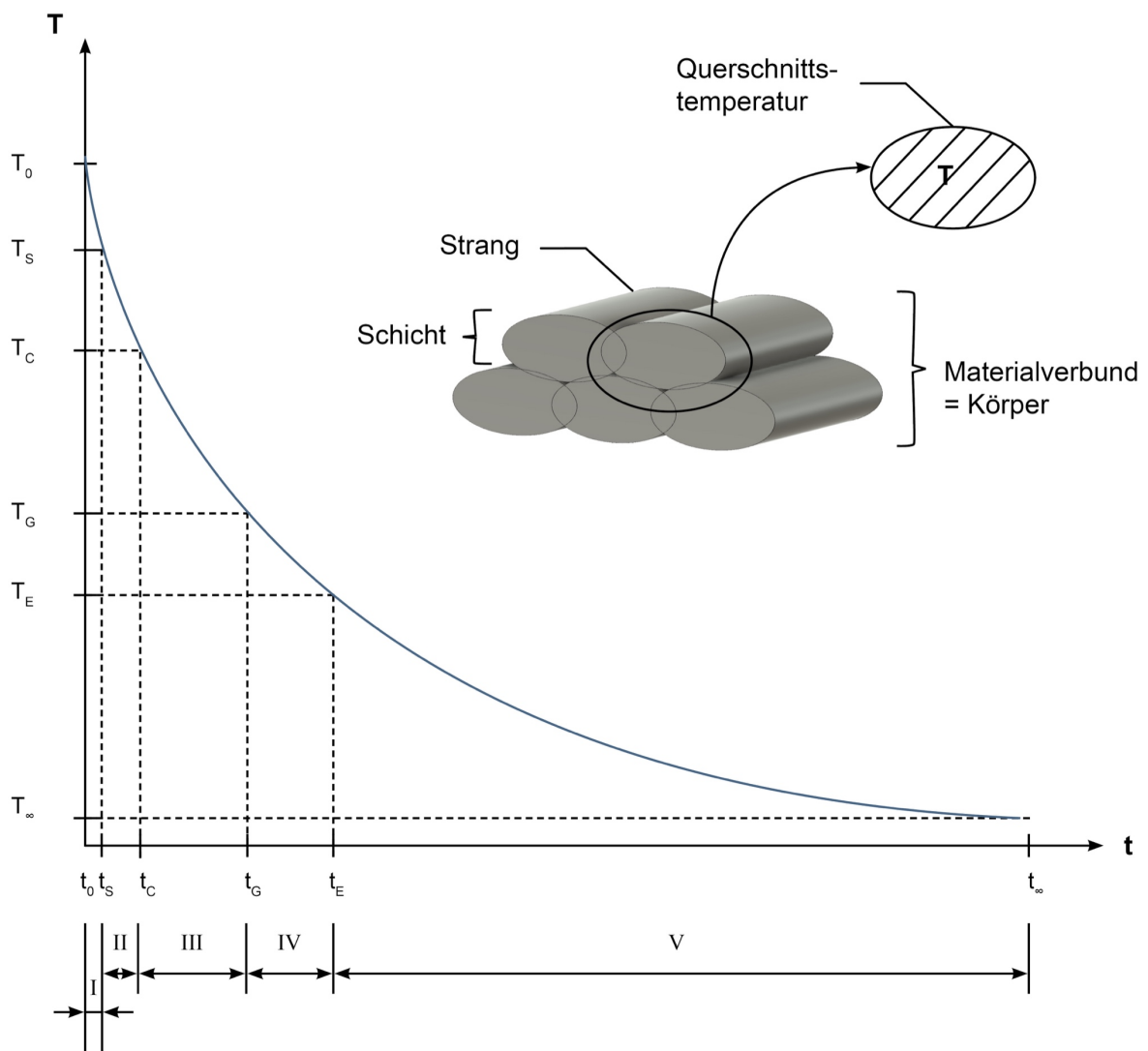
Die Schichtverbindung entspricht der Strangverbindung in Baurichtung. Jedoch unterliegt das Verschweißen von Layern anderen Bedingungen als in der Ebene. Ein kontinuierlich extrudierter Perimeter, die Außenkontur, gibt der Schicht in sich Halt. Dafür sorgt die hohe Strangfestigkeit. Zwischen zwei Schichten hingegen besteht ausschließlich die angehaftete Verbindung. Der Schichtzusammenhalt stellt von Grund auf das schwächste Glied im Körper dar. Verringerte Fähigkeit zur Kraftübertragung in Baurichtung ist das Resultat. Die Festigkeit in Baurichtung beträgt lediglich 13 % bis 35 % gegenüber der Ebene (Sun et al., 2008; Duty et al., 2017; Kishore et al., 2017; Shih et al., 2019). Verringerte Werte sind nach aktuellem Stand der Technik vorhersagbar, jedoch nicht vermeidbar. Dies kann unter anderem zum Versagen von dünnen Wandungen und Zapfen führen. In der Praxis wird die Restriktion typischerweise konstruktiv kompensiert. Eine weitere Herausforderung besteht in der Beherrschung der vom Abkühlprozess induzierten Merkmale am Bauteil. Die Hintergründe werden nachfolgend betrachtet.

#### 5.4.2 Der Abkühlprozess

Die Abkühlung erfolgt in Teilen parallel zum Aufbau. Im Prozess entstehende Einflüsse auf Bauteileigenschaften sind elementar. Zum Zeitpunkt der Extrusion beginnt die Schmelze abzukühlen. Der Vorgang erstreckt sich über Ablage und Verbindung des Stranges sowie die Abkühlung des fertig aufgebauten Bauteils. Supportstrukturen entstehen in dieser Phase und kühlen äquivalent ab. Folgende Rahmenbedingungen werden der Betrachtung zugrunde gelegt. Das Temperaturprofil bezieht sich auf den Querschnitt des Extrusionsstrangs. Die Temperaturverteilung über die Fläche wird homogen angenommen (Costa et al., 2015). Thermoplastische Kunststoffe durchlaufen während des Abkühlprozesses verschiedene temperaturabhängige Schritte, die als Phasen bezeichnet werden (s. Abbildung 24). Die chemische Zusammensetzung und der molekulare Aufbau eines langkettigen Polymers sind hierfür verantwortlich.

Der kritische Sinterpunkt, die Kristallisationstemperatur und der Glasübergang bilden Grenzen der hier eingeführten Phasen. Darüber hinaus werden Extrusionstemperatur, Bauraumtemperatur und Umgebungstemperatur zur Abgrenzung von Phasen

herangezogen. In jeder Phase beeinflussen physikalische Phänomene bestimmte Bauteileigenschaften.



$T_0$ ... Extrusionstemperatur	$T_G$ ... Glasübergangstemperatur
$T_S$ ... Kritische Sintertemperatur	$T_E$ ... Bauraumtemperatur
$T_C$ ... Kristallisationstemperatur	$T_\infty$ ... Umgebungstemperatur

Abbildung 24 - Abkühlprozess im FDM

### I) Sinterphase

Die Sinterphase beschreibt die Zeit von der Extrusion des flüssigen Kunststoffes bis zum Erreichen der kritischen Sintertemperatur. Die kritische Sintertemperatur von ABS liegt bei etwa 200 °C (Li et al., 2001; Sun et al., 2003; Bellehumeur et al., 2004),

für PLA liegen keine Werte vor. Die Dauer des Sinterns beträgt Bruchteile von Sekunden bis zu einigen Sekunden (Bellehumeur et al., 2004). In direktem Anschluss an die Extrusion findet Benetzung statt. Zwischen benachbarten Strängen bildet sich das sogenannte *Neck* (s. Abbildung 25). Wärmestrahlung sowie Konduktion sorgen dafür, dass Wärmeenergie vom heißen zum kalten Strang übergeht, was zum Anschmelzen führt. Molekülketten diffundieren über die Grenzfläche in beide Richtungen. Dafür verantwortlich ist zum einen die brownsche Molekularbewegung. Teilchen bewegen sich unregelmäßig und ruckartig in der flüssigen Grenzphase. Zum anderen bewegen sich die Ketten entsprechend dem Temperaturgefälle gemäß den Gesetzen der Wärmeströmung (Konvektion).

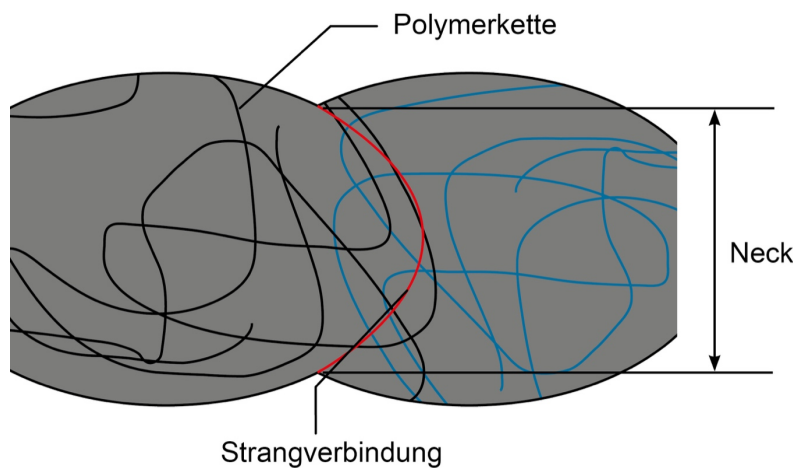


Abbildung 25 - Polymerkettendiffusion

Insbesondere bei anfänglich niedriger Viskosität spielt die Konvektion eine große Rolle. Es wird vom sogenannten Sinterphänomen gesprochen. Unterhalb der kritischen Sintertemperatur steigt die Viskosität auf ein Level, bei dem nunmehr unerhebliche Diffusion möglich ist. Die Fähigkeit zur Kraftübertragung im entstandenen Materialverbund hängt von der Anzahl der diffundierten Molekülketten ab. Daraus resultiert ein Teil der mechanischen Eigenschaften des Bauteils.

## II) Kristallisationsphase

Im Zeitabschnitt zwischen Sinterpunkt und Erreichen der Kristallisationstemperatur ordnet sich ein Teil der langkettigen Moleküle eines teilkristallinen Kunststoffes in einer dichten Packung an. Kristalline Bereiche entstehen in Bruchteilen von Sekunden

bis wenigen Sekunden (Costa et al., 2015). Zwischen kristallinen Strukturen bestehen stets amorphe Bereiche mit ungleichmäßig angeordneten Ketten (vgl. Abbildung 26).

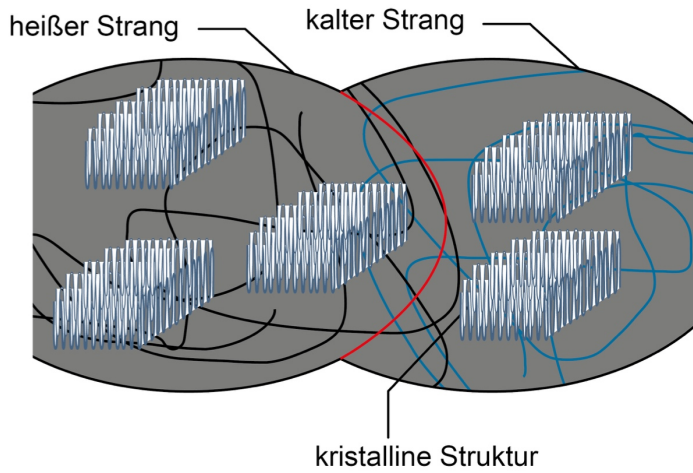


Abbildung 26 - Kristallisation

Die Kristallisationstemperatur ist eine Materialkonstante, die mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) ermittelt werden kann. In Abbildung 27 sind die DSC Kurven von ABS und PLA dargestellt.

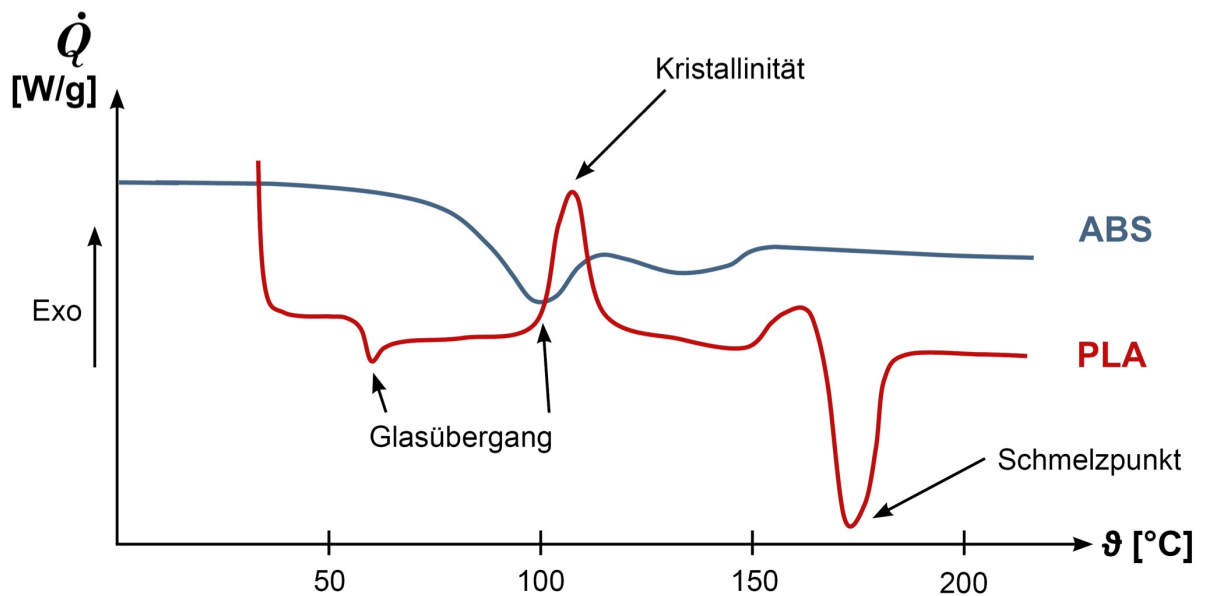


Abbildung 27 - Differential Scanning Calorimetry (DSC) Kurve von ABS und PLA, Werte aus (Day et al., 2006; Cuiffo et al., 2017)

In Abhängigkeit der Temperatur wird die aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge einer definierten Probe ermittelt. Ausschläge der Kurve weisen auf Phasenänderungen hin. Auf diese Weise werden Glasübergangstemperatur, Kristallisationspunkt und Schmelzpunkt von Thermoplasten ermittelt. Einige Werkstoffe können im Anschluss an die Verarbeitung bis zu Jahren nachkristallisieren (Bonten, 2016). In kristallisierten Bereichen wirken sekundäre Valenzkräfte zwischen benachbarten Ketten aufgrund der örtlichen Nähe besonders stark. Die Fähigkeit zur Kraftübertragung ist in kristallinen Bereichen signifikant größer als in amorphen (Bonten, 1999). Je langsamer der Abkühlprozess, desto mehr Ketten ordnen sich dicht an einander. Der Prozess erfolgt bis zu einem materialbedingten maximalen Volumenanteil der kristallinen Bereiche. Ein höherer Kristallisationsgrad geht mit besseren mechanischen Eigenschaften einher. Im Fall von ABS lässt die innermolekulare Struktur keine Bildung von kristallinen Bereichen zu. Der Stoff weist ausschließlich amorphe Strukturen auf. Die Kristallisationstemperatur von PLA beträgt etwa 100 °C.

### III) Glasübergangsphase

Der Übergang von einem elastisch nachgiebigen zu einem spröde-steifen Zustand wird als Glasübergang bezeichnet. Phase III beschreibt das Temperaturfenster zwischen Kristallisation und Glasübergang. Für ABS liegt dieser bei etwa 100 °C, für PLA bei etwa 60 °C. Von der Extrusion bis zum Glasübergang liegt der Werkstoff in einem thermoplastischen Zustand vor, in dem er zum Fließen neigen kann. Je mehr er fließt, desto geringer sind die Hohlräume zwischen benachbarten Strängen. Unkontrolliertes Fließen auf der anderen Seite kann einen Einfluss auf die Formtreue des Bauteils haben. Die Glasübergangstemperatur definiert die Obergrenze für den thermischen Einsatz eines Produktes.

### IV + V) Schwindungsphase

Schritt IV und V ergeben zusammen die Phase, in der der Werkstoff schwindet. Schritt IV existiert nur bei Anlagen mit beheiztem Bauraum. Er nimmt Minuten bis Stunden in Anspruch, bedingt durch Anlage, Bauteilgröße, Material und Steuerung der Abkühlung. Der einzustellende Wert der Bauraumtemperatur hängt primär vom Werkstoff ab. Er wird fallspezifisch analytisch ermittelt. Schwindung ist für Temperaturwerte unterhalb des Glasüberganges definiert.

In Abbildung 28 ist ein Ausschnitt des extrudierten Stranges in abstrahierter, rotationssymmetrischer Form dargestellt. Die blaue Umrandung zeigt die Form, die ohne Volumenreduktion eintreten würde.

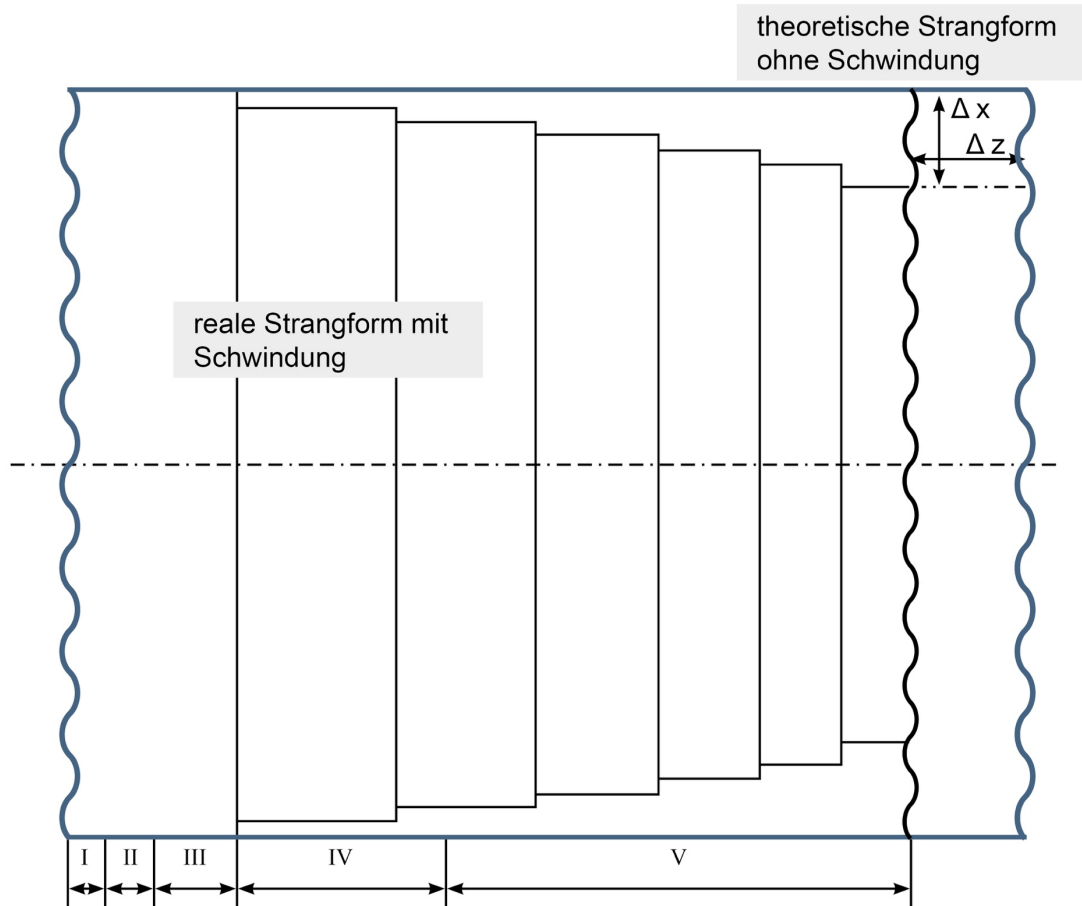


Abbildung 28 - Schwindung von FDM Bauteilen, Ausschnitt eines Stranges

Durch Schwindung reduziert sich das Volumen des Stranges in alle Richtungen. Das Verhalten ist bei vielen Werkstoffen in diversen Herstellverfahren zu beobachten und zu beachten. Die Besonderheit additiver Verfahren besteht im schichtweisen Aufbau. Über einen vergleichsweise langen Zeitraum wird kontinuierlich Wärme über den extrudierten Strang in das Bauteil eingebracht. Es kommt zu inhomogener Temperaturverteilung, dem thermischen Gradienten. Einzelne Schichten befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Schwindung. Die Inhomogenität führt zu Eigenspannungen im Werkstück. Die Volumenreduktion in der wärmeren Schicht erzeugt Zugspannungen (Abbildung 29 - Obere Darstellung). Angrenzende Schichten erfahren entgegen gerichtete Druckspannungen. Wie im unteren Teil der Abbildung aufgezeigt,

pflanzen sich die Spannungen im Werkstück fort und können zu Verformung und Verzug führen. Abweichungen der Form, Lage und Maßhaltigkeit vom Model gehen damit einher. Darüber hinaus wirken Eigenspannungen auf ein Werkstück wie von außen aufgeprägte Kräfte. Die resultierende Fähigkeit zur Kraftaufnahme wird reduziert.

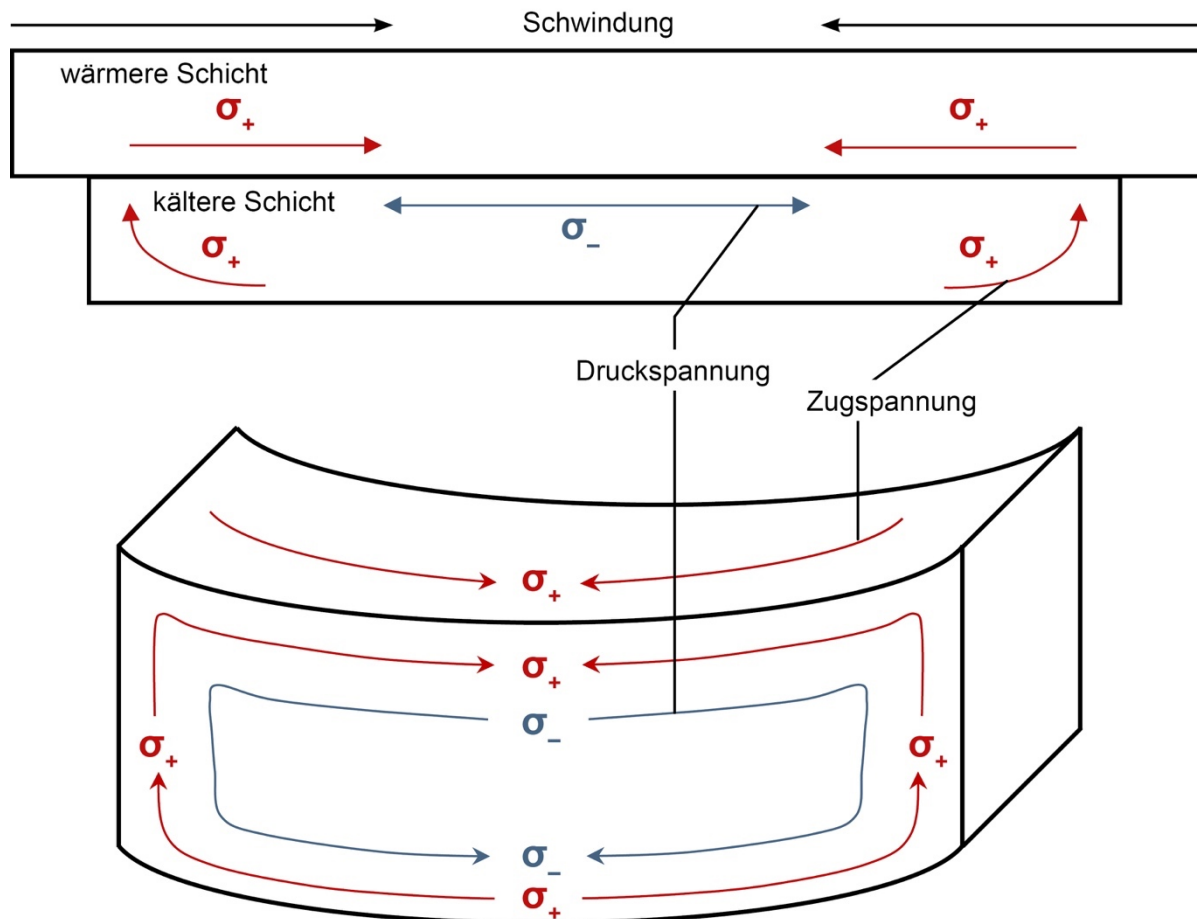


Abbildung 29 - Oben: Entstehung von Eigenspannungen, unten: Entstehung von Verzug im FDM

Schwindung entsteht grundsätzlich unterhalb des Glasübergangs. Werkstoffe mit hoher Glasübergangstemperatur unterliegen dem Effekt entlang der Abkühlkurve länger als andere. Entsprechend ist das Risiko von Verzug in Abhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten stärker ausgeprägt. Werkstoffe mit niedrigem Glasübergangspunkt hingegen sind aufgrund der geringen Wärmeformbeständigkeit für praktische Anwendungen limitiert. ABS mit einer Glasübergangstemperatur von etwa 100 °C ist anfälliger für Verzug als PLA mit etwa 60 °C. Jedoch können ABS Bauteile bei höheren Temperaturen dauerhaft eingesetzt werden. Ihre Wärmeformbeständigkeit nach



ISO 75 HDT/A (1,8 MPa) liegt bei 80 °C (KERN, 2019). Nach der gleichen Messmethode ist PLA nur bis 49 °C dauerhaft belastbar (sd3d, 2019). Die in diesem Abschnitt beschriebenen physikalischen Phänomene basieren auf dem Transport von Wärme.

Wärmetransport im FDM Bauteil erfolgt durch

- Konvektion (Wärmestrom)
- Konduktion (Wärmeleitung) und
- Radiation (Wärmestrahlung).

Im Bauprozess interagieren Schichten thermisch miteinander sowie mit der Bauplattform und der umgebenen Luft. Die Bauplattform tauscht Wärmeenergie mit der ersten Schicht durch Konduktion aus. Gleiches gilt für aneinander angrenzende Schichten. Konvektion herrscht zwischen Perimetern des Bauteils mit der Umgebung und zwischen innenliegenden Strängen mit Hohlräumen. Durch Strahlung wird Wärme zwischen Bauplattform und Bauteil, dem Bauteil und der Umgebung sowie von Schicht zu Schicht übertragen.

Die **Konvektion** stellt den wichtigsten der Wärmetransportvorgänge im Abkühlprozess von FDM Bauteilen dar (Costa et al., 2015). Sie ist abhängig von dem Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{conv}$  des entsprechenden Werkstoffes. Rodriguez et al. adaptierten die Churchill Beziehung für natürliche Konvektion und schätzen einen Wert von  $h_{conv} = 67 \frac{W}{m^2 \times K}$  für ein elliptisches Filament, das mit 270 °C in einem Baupraum von 70 °C extrudiert wird (Rodriguez et al., 2000). Vom Bauteil konvektiv an die Umgebung abgegebene Wärme wird im großen Teil durch die Luftbewegung bestimmt. Diese kann durch erzwungene Ventilation beeinflusst werden. Costa et al. fanden heraus, dass durch eingestellte Konvektion die Abkühlung auf Glasübergangstemperatur bis zu 40-fach gegenüber unbewegter Luft beschleunigt werden kann (Costa et al., 2015). Werte von  $60 \frac{W}{m^2 \times K}$  bis  $150 \frac{W}{m^2 \times K}$  wurden angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient erhöht sich bei erzwungener Luftbewegung. Im Kontext des Aufbauprozesses wurde auf Hohlräume hingewiesen, die zwischen Strängen entstehen. Darin befindliche Luft leistet einen Teil zum konvektiven Abtransport von

Wärme aus dem Bauteil. Bei Einbeziehung des Effektes in Simulationen lag der Einfluss auf den gesamten Temperaturgradienten bei etwa einem Kelvin Abweichung. Damit ist Konvektion mit Hohlräumen vernachlässigbar (Costa et al., 2015).

Liegt in oder zwischen flüssigen und festen Stoffen ein Temperaturunterschied vor, fließt Wärme in Richtung des geringeren Wertes. Dieser Wärmetransportvorgang wird als **Konduktion** bezeichnet. Im Abkühlprozess wird Wärme sowohl von einer Schicht an eine andere als auch von der unteren Schicht an die Bauplattform geleitet. Das Fouriersche Gesetz beschreibt die durch Wärmeleitung übertragene Wärmemenge  $\dot{Q}$  eines festen Körpers mit zwei parallelen Wandflächen.

$$\dot{Q} = A \times \lambda \times \frac{\Delta T}{l} \text{ [W]} \quad (8)$$

$A$  steht für die Kontaktfläche,  $\lambda$  für die stoffabhängige Wärmeleitfähigkeit,  $\Delta T$  für die Temperaturdifferenz und  $l$  für die Dicke des Körpers von Wand zu Wand. Die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ist im Allgemeinen vergleichsweise gering. Sie sind gute Isolatoren und benötigen entsprechend viel Zeit zum Abkühlen. Häufig für Bauplattformen verwendetes Aluminium hat die Möglichkeit, Wärme in das Bauteil einzubringen oder von diesem abzuleiten. Zur Modellierung der Abkühlung muss der Wärmefluss vom Bauteil in die Bauplattform berücksichtigt werden.

Stoffe mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt emittieren Wärme durch Strahlung. Sie wird durch den dimensionslosen Emissionsgrad  $\varepsilon$  ausgedrückt, der zwischen null und eins liegt. Insbesondere bei hohen Temperaturen ist der am Wärmetransport beteiligte Anteil der Strahlung hoch. Untersuchungen haben ergeben, dass bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von  $h_{conv} > 60 \frac{W}{m^2 \times K}$  der Wärmetransport von Konvektion dominiert wird und die Strahlung in den Hintergrund gerät (Costa et al., 2015). Das entspricht der Anwendung im FDM. Mit Einfluss der Strahlung ergab sich eine Differenz der Werkstücktemperatur von 0,3 K, die in der Modellierung vernachlässigt werden kann.

### 5.4.3 Fazit Aufbau- und Abkühlprozess

Die im Generierprozess wirkenden physikalischen Grundlagen für die Verbundfestigkeit, Strangfestigkeit, Strangverbindung und Entstehung von Hohlräumen wurden betrachtet. Benetzung, Oberflächenspannung, Viskosität und intermolekulare Anziehungskräfte wirken auf den Prozess.

Tabelle 6 - Einfluss von Aufbau- und Abkühlprozess auf Bauteileigenschaften

Parameter beeinflusst ...		... Eigenschaft	Geometrie			Oberfläche	Werkstoff	
			Maß	Form	Lage	Rauheit	Mechanische Eigenschaften	Dichte
Aufbauprozess	Physikalische Phänomene	Benetzung				x	x	x
		Oberflächenspannung				x	x	x
		Viskosität				x	x	x
		Anziehungskräfte				x	x	x
		Verbundfestigkeit (Bond strength)					x	x
		Strangfestigkeit (Road strength)					x	
		Strangverbindung (Bonding)				x	x	x
		Hohlräume (Voids)				x	x	x
Abkühlprozess	Physikalische Phänomene	Sintern					x	
		Kristallisation					x	
		Fließverhalten		x		x	x	x
		Schwindung	x	x	x			
		Eigenspannungen	x	x	x		x	
		Werkstoffparameter	Kritische Sintertemperatur					x
	Kristallisationstemperatur						x	
	Glasübergangstemperatur						x	
	Prozessparameter	Düsentemperatur				x	x	x
		Bauraumtemperatur	x	x	x			

Untersuchte Zusammenhänge mit Bauteileigenschaften sind in Tabelle 6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Eigenschaften des Werkstoffes entscheidend vom Aufbauprozess sowie der Sinter- und Kristallisationsphase während der Abkühlung abhängen.

Das sind Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit sowie die Materialdichte. Der nicht direkt steuerbare Anteil der Oberflächenbeschaffenheit wird im Aufbauprozess sowie der Glasübergangsphase geprägt. Schwer zu beherrschende geometrische Größen sind das Resultat von Schwindung in der Glasübergangsphase während des Abkühlens. Im Hinblick auf Eigenspannungen und Verzug spielt die Bauraumtemperatur eine entscheidende Rolle. Mit Blick auf die in Kapitel 5.2 vorgestellte Prozessübersicht werden folgend weitere Einflussparameter betrachtet.

## **5.5 Modellierungsumsetzung**

Modelle von Fertigungsprozessen können unterteilt werden in konkrete, mathematisch-analytische und Computermodelle (Müller und Bähr, 2021). Im vorliegenden Fall zielt die Analyse auf ein Computermodell. Um das aufbauen zu können werden zunächst zugrundeliegende Zusammenhänge betrachtet. Dazu wird die Matrix der Beeinflussung von Eigenschaften durch Einflussparameter weiterentwickelt. Physikalische Phänomene fließen ein und mögliche Fehler am Bauteil werden aufgenommen. Darauf basierend wird in einem nächsten Schritt ein für das FDM Verfahren repräsentativer Prüfkörper entwickelt. Dieser dient als Grundlage für eine numerische Simulation.

In Tabelle 7 sind die auf den FDM Prozess wirkenden Parameter und daraus hervorgehende Eigenschaften am Werkstück dargestellt. Deren Zusammenhänge werden als Wirkmechanismen bezeichnet. Horizontal sind Bauteileigenschaften entsprechend der Gruppierung in Kapitel 5.2 nach Geometrie, Oberfläche und Werkstoff aufgeführt. Mögliche Abweichungen und Fehler werden dem Materialgefüge, der Oberfläche und sonstigen zugeordnet. Vertikal sind die Parameter des Werkstoffes, des Prozesses, der Anlage und sonstige aufgelistet. Physikalische Phänomene werden ebenso vertikal dargestellt. Teilweise können Parameter und Phänomene dem Aufbau- oder Abkühlprozess zugeordnet werden. Die Bewertung der jeweiligen Zusammenhänge basiert auf einer umfangreichen Analyse entsprechender Literatur. Eine Liste der verwendeten Quellen wird in Kapitel 8.2 separat dargestellt.

Tabelle 7 - Wirkmechanismen im FDM Verfahren (Quellen siehe Literaturverzeichnis in Kapitel 8.2)

Legende  
 1 ... Beeinflussung (Literatur)  
 0 ... keine Beeinflussung  
 E ... Erkenntnis Autor

... Eigenschaft

Parameter beeinflusst ...

		Geometrie			Oberfläche			Werkstoff			Abweichungen und Fehler im FDM											
		Maß	Form	Lage	Rauheit	Auflösung XY	Auflösung Z	Mechanisch: Festigkeit, Steifigkeit, Zähigkeit	Dichte	Delamination	Strangverbindungsdefekt (Inter-Road-Defect)	Oberfläche					Sonstige					
												Stufeneffekt (Stair-Step)	Herausquellen (Oozing)	Schattenbildung (Shadowing)	Defekte Grund- / Deckschicht	Start-Stop-Defekt	Filamentrutschen (Slippage)	Support Grat (Support Burrs)	Verzug	Under / Over Extrusion	Lochdurchmesser zu gering	
Aufbauprozess	physikalische Phänomene	Strangaufweitung	E1	E1	E0	E1	1	E0	E0	E0	E0	E1	1	E0	E0	1	0	0	0	1	E1	
		Benetzung	0	0	0	1	E0	E0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	E1	0	0	0	
		Oberflächenspannung	E0	E0	E0	0	0	0	1	E0	0	0	0	0	E0	E0	0	0	0	0	0	1
		Viskosität	1	1	1	1	0	0	1	1	1	E1	1	1	E0	E0	E0	0	E0	0	E1	E1
		Anziehungskräfte	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	E0	E0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Verbundfestigkeit (Bond strength)	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	E1	0	0	0
		Strangfestigkeit (Road strength)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Strangverbindung (Bonding)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	E1	0	0	E1	0	0	0
		Hohlräume (Voids)	0	0	0	1	E0	E0	1	1	1	1	0	0	0	E1	0	0	0	0	0	0
		Abkühlprozess	Werkstoffparameter	Sintern	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	E0	0	0	E1	0
Kristallisation	0			0	0	0	0	0	1	0	E1	E0	0	0	0	E0	0	0	E1	0	0	0
Fließverhalten	E0			1	0	1	0	0	1	1	E0	E0	1	1	E0	E0	0	0	E1	0	0	E1
Schwindung	1			1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	E1	0	0	0	1	0	1
Eigenstressungen	1			1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	E1	0	0	0	1	0	1
Werkstoff (Art, Zusammensetzung, Farbe)	1			1	1	0	0	0	1	1	1	E1	0	1	0	E1	0	1	0	1	0	1
Kritische Sintertertemperatur	0			0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kristallisationstemperatur	0			0	0	0	0	0	1	0	1	E1	0	0	0	0	0	0	E1	0	0	0
Glasübergangstemperatur	1			1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E1	1	0	0
Wärmeleitfähigkeit	1			1	1	0	0	0	1	0	1	E1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Prozessparameter	Düsentemperatur	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	
	Bauraumtemperatur	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	Bauplattformtemperatur	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
	Schichtdicke	1	0	0	1	0	1	1	0	E1	0	1	0	0	E1	0	0	0	0	0	0	
	Strangbreite	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	E0	0	0	0	0	0	0	E0	0	0	
	Verfahrensgeschwindigkeit	1	1	1	1	0	0	0	0	E0	E1	0	0	1	E0	1	1	0	0	1	0	
	Supporterzeugung und -entfernung	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E0	0	0	1	0	0	0	
	Infill	0	0	0	E1	0	0	1	1	1	1	0	0	E0	E1	0	0	0	E1	0	0	
	Konstellation	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	
	Steuerung von Positionierung und Extrusion	1	1	1	0	1	1	1	1	E0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	
Slicing- und Ablagestrategie	1	1	1	0	0	0	1	E1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	E1	1		
Anlagenparameter	Düsendurchmesser	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	E0	0	E1	0	0	0	1	
	Material- und Oberfläche Bauplattform	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	Positioniergenauigkeit	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
Sonstige	Maschinensteifigkeit	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	Produktentwicklung	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	
	Konstruktion	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	E1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	
	Mechanisches Finish	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	E0	1	0	1	0	0	1	
Chemisches Finish	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0		

Liegt eine nachweisbare Beeinflussung einer Eigenschaft durch einen Parameter vor, ist das Feld mit einer 1 gefüllt. Ist das nicht der Fall, ist das Feld mit einer 0 gefüllt. In

Fällen fehlender Literatur trifft der Autor logisch hergeleitete Annahmen, die auf Basis des Literaturstudiums als Erkenntnisse verstanden werden. Einflussgrößen, physikalische Phänomene sowie Bauteileigenschaften wurden in vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben.

Zur Darstellung und Überprüfung entsprechender Eigenschaften am Bauteil eignen sich geometrische Features. Die für ein Fertigungsverfahren vereinten Features ergeben ein Bauteil. Dieses wird als Prüfkörper bezeichnet. Prüfkörper können herangezogen werden, um werkstoff- und verfahrensbedingte Einschränkungen additiver Fertigungsverfahren zu untersuchen (VDI 3405 Blatt 3.2). Darüber hinaus kann ein Prüfkörper zur Leistungsbewertung und Kalibrierung eines AM-Systems verwendet werden (ISO/ASTM 52902, 2019). Ein FDM spezifischer Prüfkörper wird im nächsten Schritt entwickelt. Der Fokus liegt auf geometrischen und Oberflächenattributen sowie auf der möglichen Ausprägung von Fehlern. Zur Quantifizierung mechanischer Eigenschaften eignen sich standardisierte Zugstäbe. Deren Auswertung im Zugversuch erfolgt nach Vorgaben der VDI 3405 (VDI 3405 Blatt 7, 2019). Die Dichte kann zerstörend oder zerstörungsfrei überprüft werden. Dazu kann ein Bauteil zerschnitten und die Trennfläche analysiert werden. So können Aussagen über einzelne Bereiche getroffen werden. Kostenintensiver, jedoch aussagekräftiger ist die Durchstrahlung des Werkstückes mit einem Industriellen Computertomographen (ICT). Die Homogenität des Materialgefüges kann über den ganzen Körper hinweg zerstörungsfrei abgebildet werden. Für die Analyse FDM spezifischer Charakteristika eignen sich folgende geometrische Features:

- Überhangschrägen verschiedener Winkel
- Kugel
- Löcher verschiedener Durchmesser in der XY-Ebene
- Löcher verschiedener Durchmesser in der Z-Ebene
- Zylindrische Zapfen verschiedener Durchmesser
- Grundplatte
- Rippen verschiedener Stärken
- Quader
- Beschriftung jeweiliger Maße

Tabelle 8 - Geometrische Features und überprüfbare Bauteileigenschaften

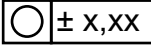
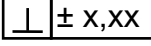
Eigenschaft	Überhangsträgen	Kugel	Löcher in der XY-Ebene	Löcher in der Z-Ebene	Zylindrischer Zapfen	Grundplatte	Rippen	Quader
Maß		x	x	x	x	x	x	x
Form (Geradheit, Rundheit)			x	x	x	x		
Lage (Rechtwinkligkeit)	x					x	x	x
Rauheit						x		x
Auflösung XY						x	x	x
Auflösung Z		x			x			x
Mechanische Eigenschaften (qualitativ)	x				x	x	x	
Dichte						x		x
Delamination						x	x	x
Strangverbindungsdefekt						x		x
Stufeneffekt	x	x						

Herausquellen			x	x	x		x	
Schattenbildung						x		x
Defekte Grund- / Deckschicht						x	x	x
Start-Stop-Defekt						x		x
Filamentrutschen						x		x
Support Grat	x							
Verzug			x	x		x	x	x
Under / Over Extrusion						x		x
Zu geringer Loch- durchmesser			x	x				

In Tabelle 8 sind überprüfbare Eigenschaften dem jeweiligen geometrischen Feature zugeordnet. Nachdem geeignete Elemente identifiziert wurden, sind deren Ausführungen und Nennmaße festzulegen. In Tabelle 9 werden diese entsprechend aufgeführt. Für die Fertigung relevante Toleranzen werden festgelegt. Gemäß der VDI Richtlinie 3405, Blatt 7 werden Toleranzen der Gruppen vier bis sieben für nicht werkzeuggebundene Maße (NW) für ABS im Extrusionsverfahren empfohlen (VDI 3405 Blatt 7, 2019). Entsprechende Werte sind der DIN 16742 für Kunststoffformteile zu entnehmen (DIN 16742, 2013). Im vorliegenden Fall wurde die Toleranzgruppe fünf ausgewählt. Die im Einzelfall auszuwählende Toleranzgruppe hängt von den Anforderungen an das Bauteil ab. In der rechten Spalte der Tabelle 9 sind Hinweise zur Art der Überprüfung gegeben.



Tabelle 9 - Geometrische Features: Ausführungen, Toleranzen und Überprüfung

Geo- metrisches Feature	Ausführungen, Nennmaße	Toleranz [mm] nach DIN 16742	Art der Prüfung
Überhang- schräge	40°, 50°, 60°, 70°, 80°	Machbarkeit	Sichtprüfung
Kugel	Ø 20 mm	Rauheit, fallspezifisch	Oberflächen- messgerät
Loch in XY	Ø 0,1 bis Ø 1 mm (10tel Schritte) Ø 2 bis Ø 10 mm (1mm Schritte)	Ø 0,1 - Ø 3: Nicht verfügbar (NA)  > Ø 3 - Ø 6: ± 0,11  > Ø 6 - Ø 10: ± 0,14  Rundheit fallspezifisch 	Messschieber, Messschraube, Laser, Industrieller Computertomo- graph (ICT), Flächenbegutach- tung durch Sicht- prüfung
Loch in Z	Ø 0,1 bis Ø 1 mm (10tel Schritte) Ø 2 bis Ø 10 mm (1 mm Schritte)		
Zapfen	Ø 0,1 bis Ø 1 mm (10tel Schritte) Ø 2 bis Ø 10 mm (1 mm Schritte)		
Grundplatte	X = 100 mm Y = 50 mm Z = 25 mm		
Rippe	0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8 / 1 / 2 / 4 / 6 mm	0,2 - 3: NA 4 / 6: ± 0,5	
Quader	X / Y / Z = 40 x 25 x 20 mm	Rechtwinkligkeit fallspezifisch 	Laser, ICT
Beschriftung	5 mm x 0,3 mm	--	Sichtprüfung

Überhangschrägen sind im Allgemeinen bei Werten kleiner als  $45^\circ$  unkritisch. Ein Wert von  $90^\circ$  kann technisch nicht über weite Strecken erreicht werden, da der Strang frei im Raum abgelegt würde. Kurze Wege können durch die Zähigkeit eines Thermoplasten jedoch überbrückt werden. Es wird von dem *Bridging* gesprochen. Entsprechend wurden Winkel in Zehnerschritten von  $40^\circ$  bis  $80^\circ$  für den Prüfkörper gewählt (s. Abbildung 30-1). Die einzelnen Überhänge sind durch freistehende Features dargestellt. So wird das Anhaften an benachbarte Flächen verhindert. Eine Kugel des Durchmessers 20 mm veranschaulicht in erster Linie den Stufeneffekt, der je nach Neigung geringer oder stärker ausfällt (Abbildung 30-2).

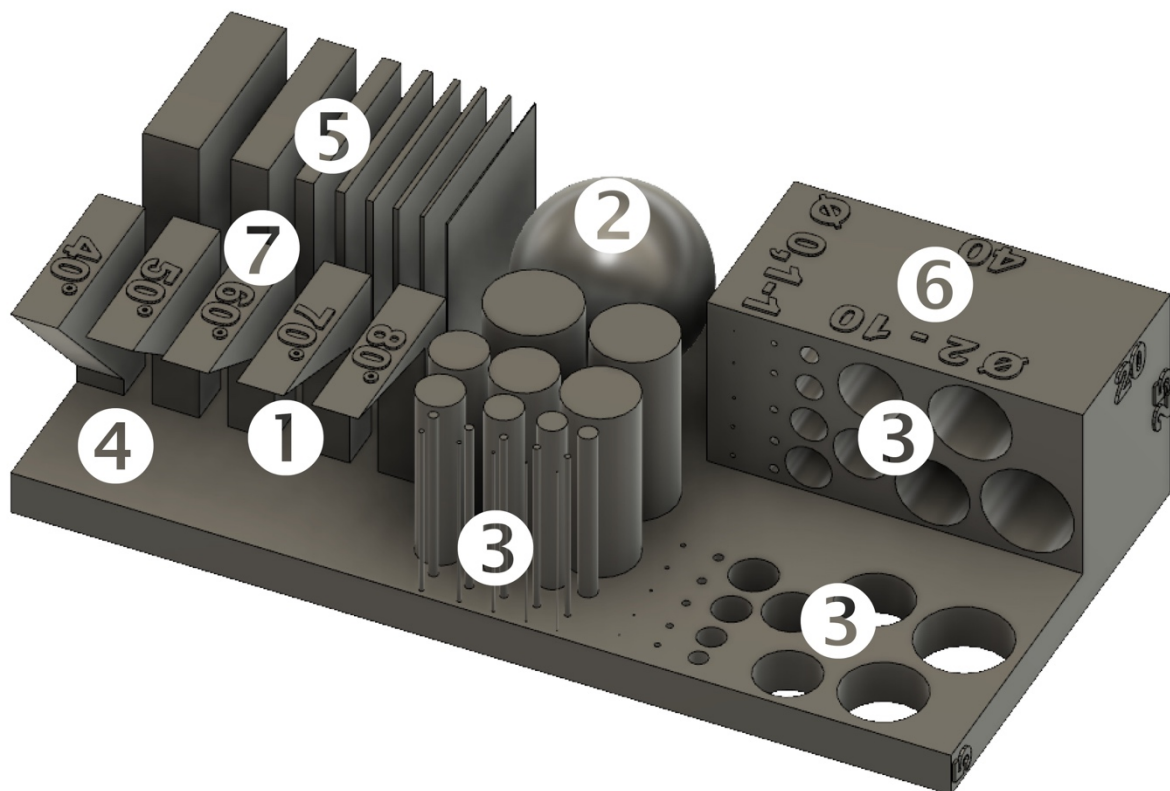


Abbildung 30 - Prüfkörper für FDM

An der Unterseite wird ein Überhang mit veränderlichem Winkel realisiert. Löcher in der XY Ebene, Z Ebene sowie zylindrische Zapfen werden in äquivalenten Durchmessern eingebracht (Abbildung 30-3). Durch die Abstufung in Zehntel Schritte von 0,1 mm bis 1 mm kann der minimale Detaillierungsgrad festgestellt werden. In der Praxis typische Düsendurchmesser betragen 0,2 mm bis 0,4 mm. Eine ähnliche Strangbreite definiert die kleinsten Konturen. Löcher und Zapfen der Durchmesser 2

mm bis 10 mm sind in Millimeterschritten eingebracht. Maßgenauigkeit, Rundheit und andere geometrische Eigenschaften können daran überprüft werden. Als Träger der Features dient eine Grundplatte (Abbildung 30-4). Auf ihr wird die Grundsicht als Negativ der Bauplattform abgebildet. Sowohl an der Unter- als auch Oberseite kann die Ebenheit der Fläche begutachtet oder gemessen werden. Neigt der Körper zu Delamination, tritt diese mit hoher Wahrscheinlichkeit zuerst gegenüber der Grundplatte auf. Herstellbarkeit und Qualität einer Wandung geringer Dicke wird durch Rippen überprüft (Abbildung 30-5). Gewählte Dimensionen betragen 0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8 / 1 / 2 / 4 und 6 mm. Für guten Materialzusammenhalt werden mindestens zwei Strangbreiten für eine Wandung verwendet. Entsprechend muss bei einer Strangbreite von 0,3 mm die Rippe mindestens 0,6 mm dick sein. Um auch die kleinste Rippe von 0,1 mm Dicke darstellen zu können, sollte die Anlage eine Strangbreite von 0,05 mm unterstützen.

Der Quader (Abbildung 30-6) dient zum einen der Unterbringung der in Z Richtung liegenden Löcher. Zum anderen können Lagetoleranzen wie Rechtwinkligkeit und Parallelität überprüft werden. Der Prüfkörper hat Dimensionen von 25 x 50 x 100 mm. Die Größe ist geeignet, um die geometrischen Features unterzubringen. Sie müssen sowohl gut sichtbar als auch mit Messmitteln erreichbar sein. Zum anderen wurde darauf geachtet, die Materialmenge gering zu halten. Dies erspart Fertigungszeit und Materialkosten. Um die Zuordenbarkeit zu vereinfachen wurden die Maße in dreidimensionaler Schrift nahe dem jeweiligen Element untergebracht (Abbildung 30-7). Letter von 5 mm Höhe und 0,3 mm Dicke erzeugen gute Lesbarkeit. Die Werte wurden empirisch ermittelt. Für die konstruktive Gestaltung wurde das CAD Programm Fusion360 von Autodesk genutzt.

Der vorgestellte Prüfkörper eignet sich für verschiedene Anwendungen. Er kann zur Qualifizierung einer Anlage eingesetzt werden. Dazu zählt die Überprüfung der maximalen Auflösung und Überhangwinkel. Darüber hinaus kann er zur Überprüfung der Maschinenfähigkeit sowie der Stabilität und Fähigkeit eines FDM Prozesses in der praktischen Anwendung herangezogen werden. Dazu ist eine repräsentative Menge von typischerweise mindestens 50 Bauteilen zu fertigen und die Tendenz des relevanten Qualitätsmerkmals zu überprüfen. Durch Auswertung des Mittelwertes und der Streuung können Aussagen über Fähigkeit und Stabilität des entsprechenden

Prozesses getroffen werden. In der vorliegenden Arbeit gilt es nicht, die Fähigkeit und Stabilität einer bestimmten Maschine beziehungsweise eines Prozesses zu überprüfen. Der Prüfkörper dient als Grundlage für eine numerische Simulation und die Validierung dieser gegenüber einem ausgedruckten Objekt.

## 6 Verifizierung und Validierung

Zunächst wird eine FEM Verformungssimulation mit dem Prüfkörper durchgeführt. Anschließend wird er gefertigt. Die Vermessung definierter Werte und deren Abgleich mit der Simulation dient der Validierung des Modells.

### 6.1 Verifizierung durch numerische Simulation

ISO definiert die Verifizierung als „Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass Anforderungen für eine bestimmte Anwendung [...] erfüllt sind“.

Die Anforderung besteht in der Eignung der vorgestellten Methode zur Qualitätssicherung im FDM Verfahren. Anwendung findet die Methode mit der Vorhersage geometrischer Eigenschaften im sicheren Prozessfenster. In einer Simulation sollen Aussagen über die Verformung getroffen werden. Die Verformung ist abhängig von der Schwindung, die aus dem thermischen Materialausdehnungskoeffizienten hervorgeht. FEM Simulationsmodelle für FDM sind nicht weit verbreitet. Vorhandene Ansätze treffen im Allgemeinen Aussagen über den Trend der Verformung (vgl. Kapitel 2.3). Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmalig der Versuch unternommen, die Verformung quantitativ zu prognostizieren. Das grafische Ergebnis des geometrischen Verhaltens soll die Formabweichung am jeweiligen Punkt in entsprechender Ausprägung aufzeigen und somit den objektiven Nachweis darstellen.

Für den Aufbau einer numerischen Simulation additiver Fertigungsverfahren wurde ein Vorgehen in fünf Schritten entwickelt:

- 1) Analyseart und Simulationssoftware
- 2) Prozessbezugsgröße
- 3) Werkstoffmodell
- 4) Aufbau der Analyse
- 5) Durchführung der Analyse.

### 6.1.1 Analyseart und Simulationssoftware

Das Ziel ist die Darstellung der absoluten Verformung des Bauteils gegenüber dem digitalen Modell bis zur vollständigen Abkühlung auf Umgebungstemperatur. Basis ist die Materialschwindung bei inhomogener Abkühlung und daraus resultierenden Eigenspannungen. Für die Untersuchung des Verhaltens von geometrisch komplexen Formen eignet sich die Finite Elemente Methode (FEM) (vgl. Kapitel 2.2.7). Um Rückschlüsse auf die Verformung ziehen zu können, muss zunächst der Temperaturgradient entlang des Abkühlprozesses analysiert werden. Dies erfolgt in einer thermischen Analyse. Basierend darauf folgt eine mechanische Analyse. Ein dafür in Betracht kommendes Softwaretool muss zum einen die beiden Arten der Analyse beherrschen. Zum anderen muss die Möglichkeit bestehen, das Slicen abbilden zu können. Einzelne Layer müssen zeitgesteuert spannungsfrei aktiviert werden. Man spricht von der Birth & Death Funktion. Grundsätzlich kommen verschiedene kommerzielle und Open Source Programme in Frage. Das sind unter anderem CalculiX, ANSYS, Abaqus und SAMCEF. Lediglich ANSYS bietet die Möglichkeit der spannungsfreien Aktivierung der Schichten und wurde somit für die Analyse ausgewählt.

### 6.1.2 Prozessbezugsgröße

Eine FEM Simulation kann nur am konkreten Bauteil durchgeführt werden. Um die generische Aussagekraft der Analyse sicher zu stellen, wird der in Kapitel 5.5 vorgestellte Prüfkörper genutzt. Durch die Verwendung repräsentativer geometrischer Features werden die Charakteristika des FDM abgedeckt.

### 6.1.3 Werkstoffmodell

Der Bauprozess unterliegt werkstoffspezifischen Kennwerten. Für die numerische Analyse wurde ABS ausgewählt. Der technische Thermoplast kommt für professionelle Anwendungen im FDM vorrangig zum Einsatz. Ein typischer Werkstoff für die Bauplattform ist Aluminium. In Tabelle 10 sind entsprechend relevante Materialkennzahlen von ABS und Aluminium aufgeführt. Auf die Herleitung verfahrensspezifischer Werte wird an späterer Stelle eingegangen.

Tabelle 10 - Materialkennwerte für eine numerische FEM Simulation

Kennwert	ABS	Aluminium
Wärmeleitfähigkeit [ $\frac{W}{m \times K}$ ]	0,17	237,5
Spezifische Wärme [ $\frac{J}{kg \times K}$ ]	2.300	951
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [ $\frac{1}{K}$ ]	$2,3 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-5}$
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	930	2.689
Zug-Streckgrenze [MPa]	25	280
Zugfestigkeit [MPa]	33	310
E-Modul [MPa]	$1,1 \times 10^3$	$7,1 \times 10^4$

#### 6.1.4 Aufbau der Analyse

Betrachtungsgrundlage stellt ein abstrahierter, zeitabhängiger und schichtweiser Aufbau des Bauteils dar. Die Schichten werden zeitlich verzögert übereinander spannungsfrei aktiviert. Ab einem Temperaturabfall unterhalb der Glasübergangstemperatur entsteht gegenseitige mechanische Beeinflussung. Das betrachtete Temperaturfenster wird in zwei Schritte unterteilt. Während des Bauprozesses wird der Abkühlvorgang von der Glasübergangstemperatur von 100 °C auf eine Bauraumtemperatur von 70 °C analysiert. In einem nächsten Schritt nach Beendigung des Drucks kühlt das gesamte Modell gleichmäßig auf 23 °C Umgebungstemperatur ab. Thermische Interaktion besteht in Form von Konduktion, Konvektion und Strahlung. Der konvektive, natürliche Wärmeübergangsfaktor wird nach der Churchill-Bernstein Korrelation für ABS mit

$$h_{conv} = 67 \frac{W}{m^2 \times K} \quad (9)$$

angenommen (Rodriguez et al., 2000; Costa et al., 2015). Der Kunststoff wird mit einer Düsentemperatur von 270 °C in einem vorgeheizten Bauraum bei 70 °C extrudiert.

Durch Konduktion wird thermische Energie aus dem Prüfkörper in die Bauplattform geleitet. Die dabei transportierte Wärmemenge  $\dot{Q}$  berechnet sich folgendermaßen:

$$\dot{Q} = \frac{A \times \lambda \times \Delta T}{l} \quad (10)$$

Dabei steht  $A$  für die wärmeleitende Fläche. Diese entspricht der Grundfläche des Prüfkörpers mit  $0,005 \text{ m}^2$ . Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für ABS beträgt  $0,17 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$  (vgl. Tabelle 10). Der Wert für Aluminium ist um ein Vielfaches höher. Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus dem Abfall von der Glasübergangstemperatur  $T_G = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  auf die Bauraumtemperatur  $T_E = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  im ersten Schritt mit  $\Delta T_1 = 30 \text{ K}$ . In dem zweiten Schritt wird die Umgebungstemperatur von  $T_\infty = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht. Entsprechend ergibt sich  $\Delta T_2 = 47 \text{ K}$ . Die durchströmte Länge entspricht der Höhe des Prüfkörpers mit  $l = 0,025 \text{ m}$ . Es wird vernachlässigt, dass der Prüfkörper nicht durchgehend aus Vollmaterial besteht.

$$\dot{Q}_1 = \frac{0,005 \text{ m}^2 \times 0,17 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}} \times 30 \text{ K}}{0,025 \text{ m}}$$

$$\dot{Q}_1 = \underline{1,02 \text{ W}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{0,005 \text{ m}^2 \times 0,17 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}} \times 47 \text{ K}}{0,025 \text{ m}}$$

$$\dot{Q}_2 = \underline{1,56 \text{ W}} \quad (12)$$

Die Werte werden für die beiden Simulationsschritte angewendet. Die Wärmestrahlung wird vernachlässigt, wie in Kapitel 5.4 erläutert. Sie hat einen unerheblichen Einfluss auf den Abkühlprozess.

Um das Slicing nachzuempfinden, wird der Prüfkörper über eine Planes Funktion in drei Schichten geschnitten. Für eine Schicht wird eine Bauzeit von 60 s angenommen. Der transiente Vorgang wird durch aufeinanderfolgende Lastschritte realisiert. Für eine numerische Analyse stehen verschiedene Elemente zur Auswahl. SOLID87



Tetraeder Elemente besitzen zehn Knoten mit je einem Freiheitsgrad pro Knoten. Sie eignen sich zur Analyse von Temperaturänderungen und unterstützen die Birth & Death Funktion. Vor der Berechnung wird der Körper in finite Elemente aufgeteilt, die Vernetzung. Für realitätsnahe Ergebnisse wird diese auf sehr feinem Niveau durchgeführt.

```
! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit
! See Solving Units in the help system for more information.

! Selecting Pruefkoerperl
esel,s,type,,pkl

! Bringing Pruefkoerperl alive
ealive,all

! Select all
allsel
```

Abbildung 31 - APDL Kommandozeile für Birth & Death

Der schichtweise Aufbau des Modells wird durch Deaktivierung und Aktivierung der Layers simuliert (Birth & Death). Diese Vorgehensweise kommt in Simulationen im Bergbau, Tunnelbau, gestuftem Bau und sequentieller Montage zum Einsatz. Sie ist für schichtweise arbeitende additive Verfahren geeignet. Die spannungsfreie Aktivierung der Schichten wird mittels Befehlsfolgen in ANSYS Parametric Design Language (APDL) über die Kommandozeile eingefügt. Die Befehlsabfolge zum einfachen Aktivieren einer Schicht ist in Abbildung 31 dargestellt.

### 6.1.5 Durchführung der Analyse

Mit Austritt der Kunststoffschmelze aus der Extrusionsdüse beginnt der Abkühlprozess. Thermoplastisches Material beginnt unterhalb der Glasübergangstemperatur zu schwinden und wird somit Anfällig für Formabweichungen. Das für die Verformung relevante Temperaturfenster von ABS liegt zwischen 100 °C (Glasübergang) und 23 °C Raumtemperatur.

### Phase 1: thermisch-transient

In einer ersten Phase wird der thermische Gradient während des Generierprozesses von 100 °C bis zur Abkühlung des gesamten Körpers auf 70 °C Bauraumtemperatur betrachtet. Wie oben hergeleitet wird der Wert für die Konduktion wird mit  $\dot{Q}_1 = 1,02 \text{ W}$  angenommen. Die Schichten werden in Lastschritten mit jeweils 60 Sekunden Bauzeit in der Simulation realisiert. Mit Beginn der Simulation wird die erste, auf der Bauplattform aufliegende Schicht, aktiviert. Mit Aufbringen der zweiten Schicht nach weiteren 60 Sekunden ist die erste bereits auf 80 °C bis 90 °C abgekühlt (s. Abbildung 32). Auffällig ist, dass das kugelförmige Geometrieelement im Hintergrund bereits nach zwölf Sekunden auf etwa 95 °C abgekühlt ist. Die minimale Temperatur von 69,36 °C weicht von den eingestellten 70 °C der Bauplattform ab. Derartige Abweichungen bei FEM Analysen entstehen durch die Berechnung von Näherungslösungen und können vernachlässigt werden.

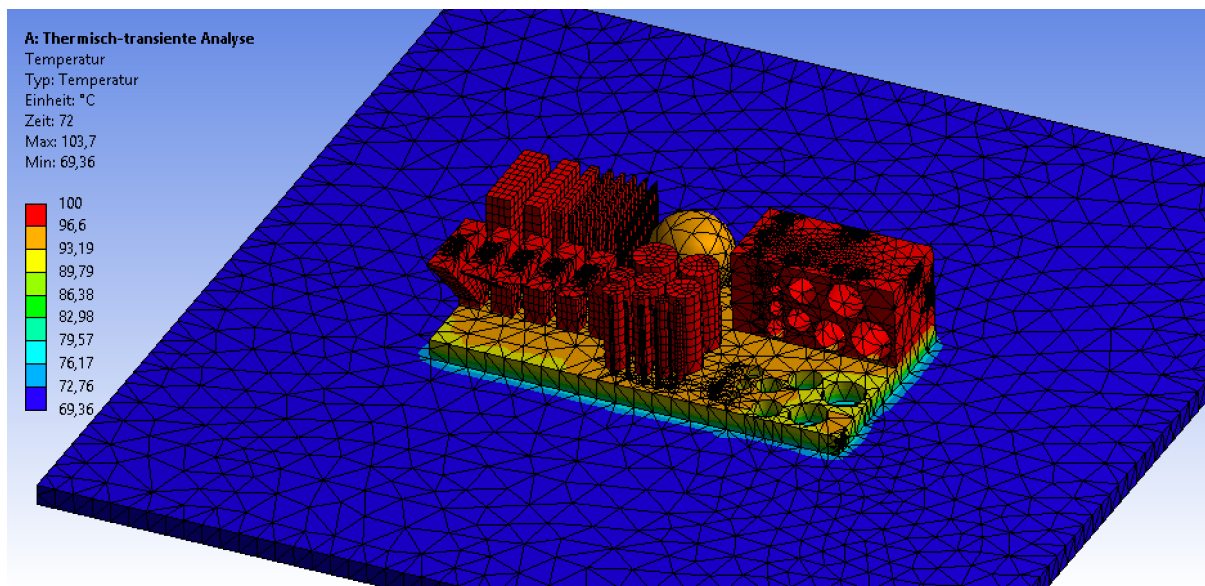


Abbildung 32 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 1

Im folgenden Lastschritt, nach 120 Sekunden, wird die obere Schicht des Körpers aktiviert (Abbildung 33). Die Abkühlung der zweiten Schicht ist nicht so schnell vorangeschritten wie in Schritt eins. Als Ursache ist die höhere Konduktion zwischen der ersten Schicht und Bauplattform gegenüber der Schichten im Prüfkörper zu vermuten.

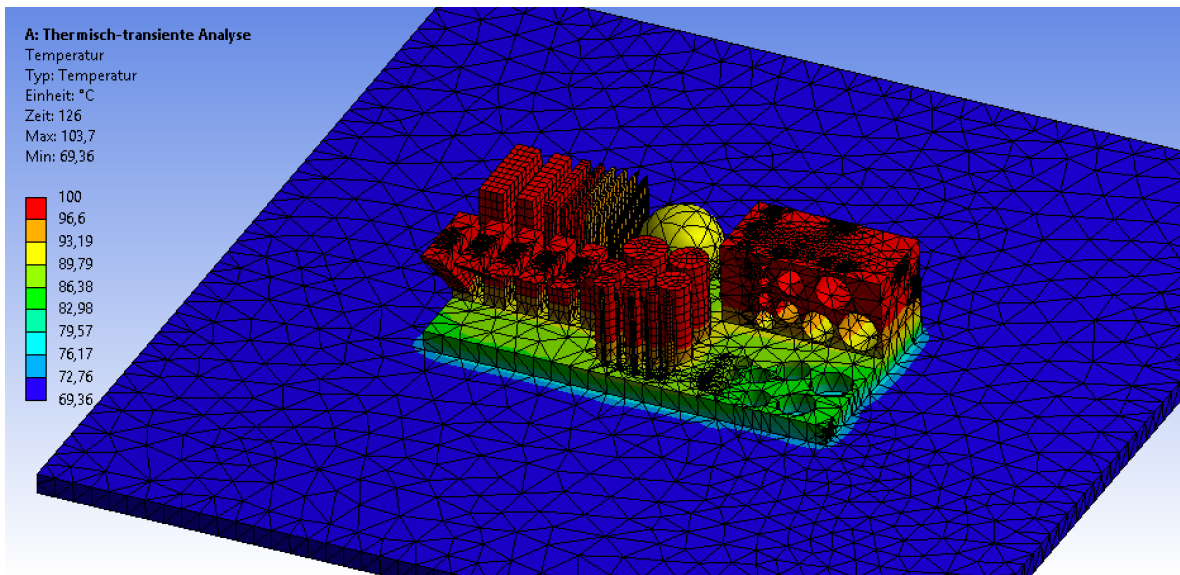


Abbildung 33 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 2

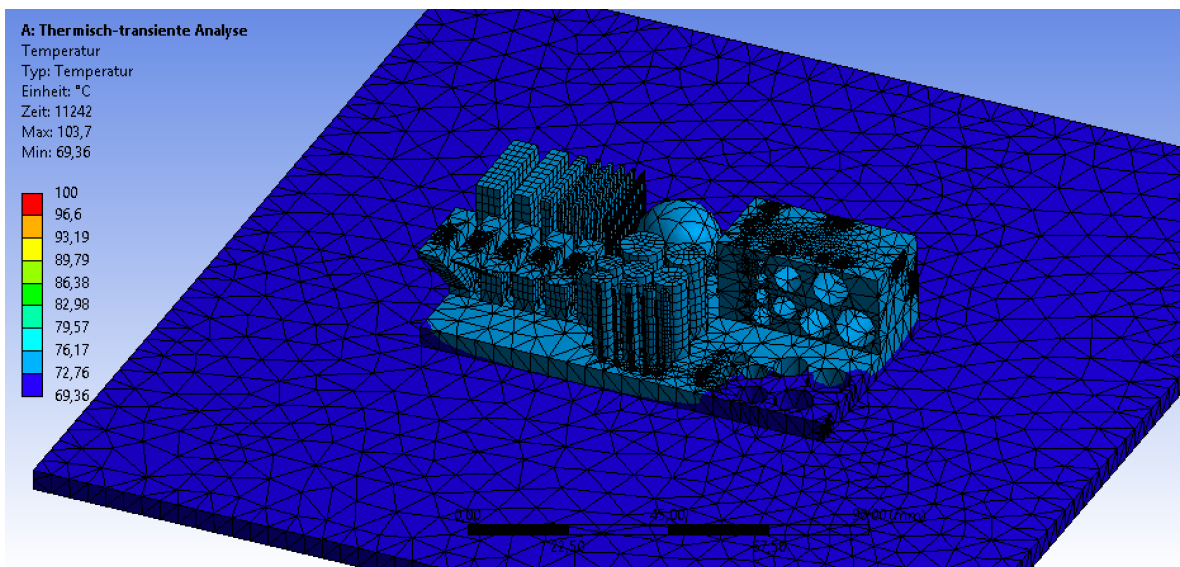


Abbildung 34 - Phase 1: thermisch-transient, Schritt 3

Nach Aktivierung der dritten Schicht wird eine gewisse Zeit benötigt, bis der Prüfkörper auf Bauraumtemperatur abgekühlt ist. Nach 11.242 Sekunden, also 187 Minuten, weist keine Stelle mehr Temperaturen über 76 °C auf. Ab diesem Zeitpunkt wird die Wärmezuführung durch die Bauplattform eingestellt. Die weitere Abkühlung wird in Schritt zwei analysiert. Die gesamte Zeitspanne des ersten Schrittes wird auf 11.300 Sekunden festgesetzt.

## Phase 2: thermisch-transient

Im folgenden Schritt wird die Temperatur der Bauplattform und des Bauraums von 70 °C auf eine Umgebungstemperatur von 23 °C herabgesetzt. Dazu werden Wärme emittierende Elemente deaktiviert. Der Wärmeübergang erfolgt passiv ohne gezwungene Konvektion. Der Wärmefluss beträgt  $\dot{Q}_1 = 1,56 \text{ W}$ .

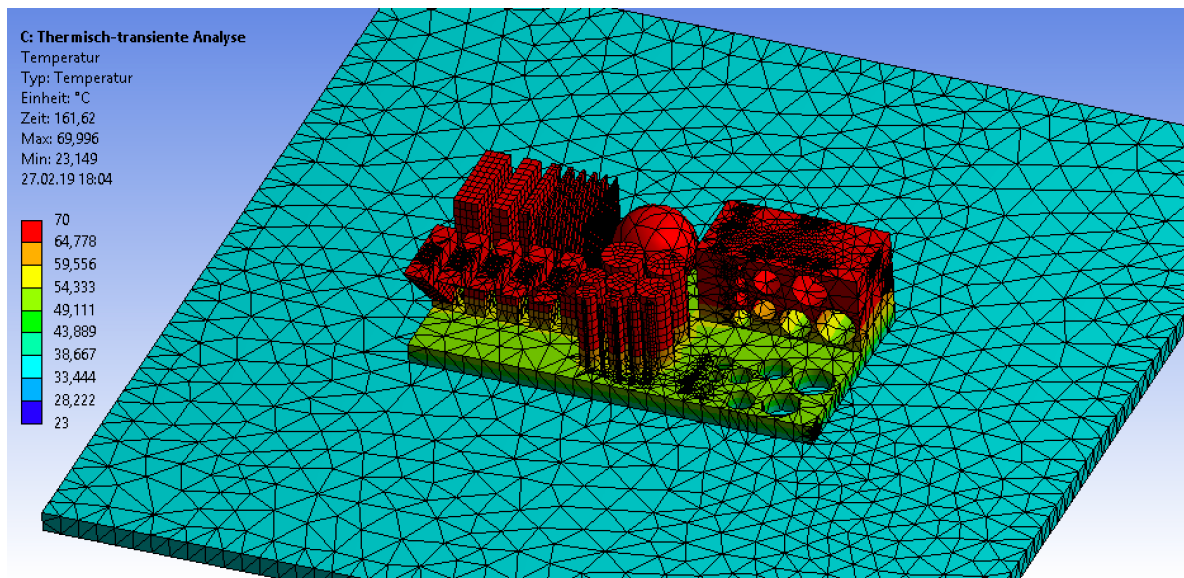


Abbildung 35 - Phase 2: thermisch-transient, Schritt 1

Bereits nach etwa 161 Sekunden hat sich die Temperatur der Bauplattform auf unter 40 °C reduziert (Abbildung 35).

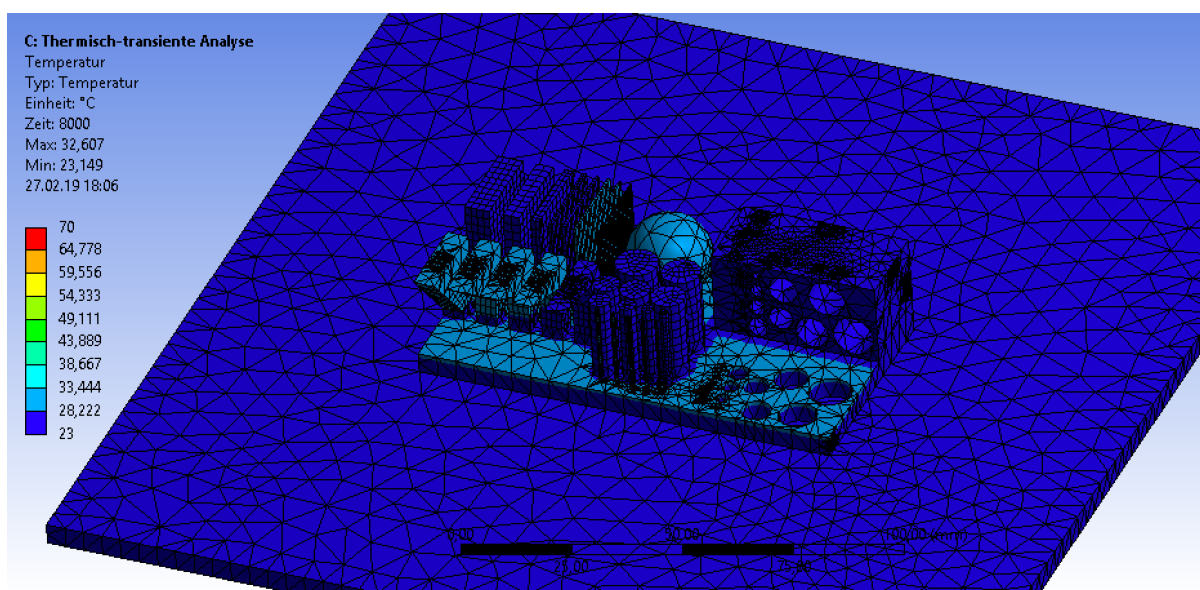


Abbildung 36 - Phase 2: thermisch-transient, Schritt 2

Der Prüfkörper gibt kontinuierlich Wärme ab. Nach 8.000 Sekunden, (133 1/3 Minuten), ist die Temperatur des Prüfkörpers an jeder Stelle auf unter 33 °C gesunken (Abbildung 36). Der erzeugte Temperaturgradient wird über die Funktion der importierten Last in eine statisch-mechanische Analyse überführt.

### Phase 3: statisch-mechanisch

Dieser Schritt der Simulation dient dazu, die Verformung des Körpers aufgrund von temperaturinduzierten Eigenspannungen und Schwindung festzustellen. Dieser Analyse liegen mechanische Kennwerte zugrunde. Die verwendeten Kennzahlen für ABS und Aluminium wurden in Tabelle 10 aufgeführt. Besondere Relevanz hat der materialspezifische thermische Materialausdehnungskoeffizient. Abbildung 37 zeigt den Zustand der Verformung nach der gesamten Abkühlzeit von 19.300 Sekunden.

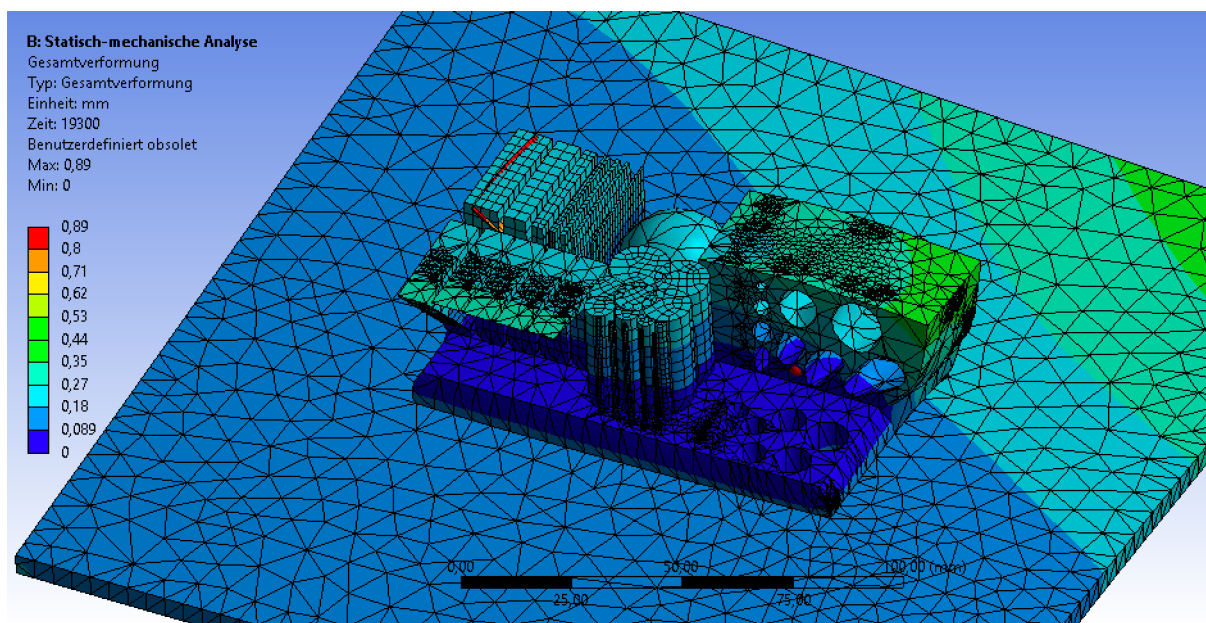


Abbildung 37 - Phase 3: statisch-mechanisch, Ansicht I

Das Ergebnis wird 37-fach skaliert dargestellt, um die Tendenz der Verformung zu veranschaulichen. Die geringste Formabweichung von 0,089 mm ist im Bereich der Grundplatte des Prüfkörpers zu beobachten. Nach oben verstärken sich Maßabweichungen im mittleren Bereich bis etwa 0,3 mm. In den Randzonen des Körpers reichen sie bis zu 0,5 mm. Einen Ausreißer stellt die dünnste der Rippen dar. Sie biegt sich in Betrachtungsrichtung um etwa 0,9 mm in linker Richtung (orange-rote Einfärbung).



In Ansicht II ist die Abweichung der Rundheit der horizontalen Löcher sichtbar (Abbildung 38). Eine einheitliche Richtung ist nicht erkennbar. Obere Löcher unterliegen geringeren Rundheitsabweichungen als untere.

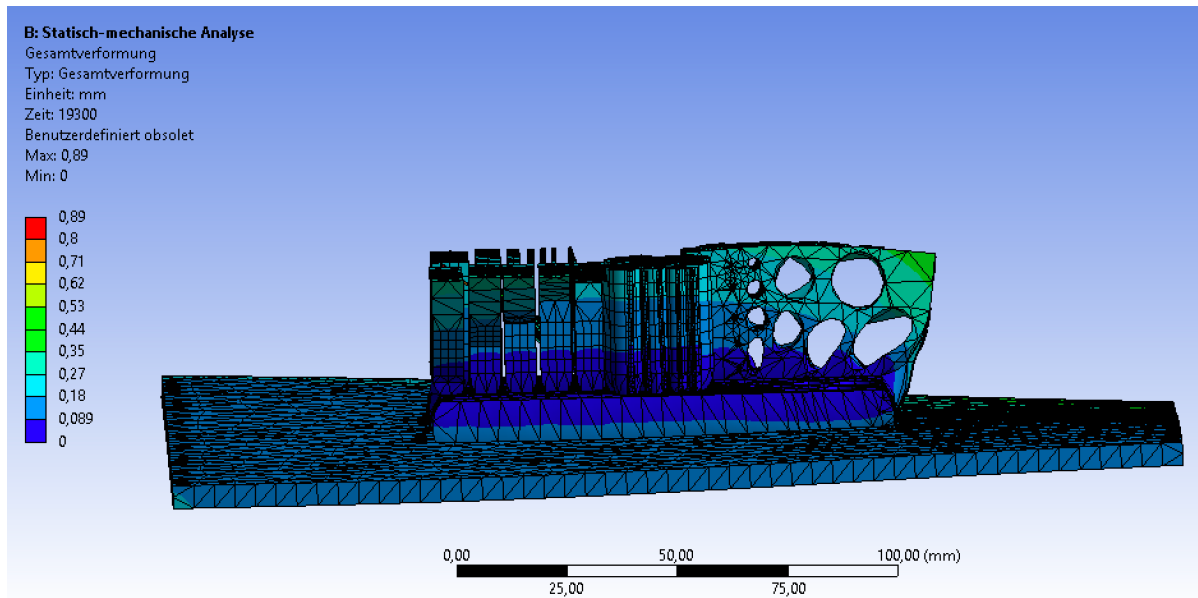


Abbildung 38 - Phase 3: statisch-mechanisch, Ansicht II

Für die Simulation wurde ein Rechner mit einem zwei Gigahertz Intel Core i5 mit acht Gigabyte Arbeitsspeicher verwendet.

## 6.2 Auswertung der Simulation

In den ersten zwei Phasen wurden thermische Analysen durchgeführt. In dem ersten Schritt der ersten Phase fällt die Temperatur rapide ab. Grund dafür ist die anfänglich hohe Temperatur des Materials, wodurch insbesondere Konduktion und Radiation verstärkt auftreten. Phase eins ist nach etwa drei Stunden abgeschlossen. Der Prüfkörper hat an allen Stellen eine Temperatur von nahezu 70 °C erreicht. Die Abkühlung der einzelnen Schichten erfolgte erwartungsgemäß größtenteils homogen. Zu Beginn der Phase zwei fällt die Temperatur der Bauplattform schnell. Innerhalb von zweieinhalb Minuten sinkt sie auf etwa 40 °C, während Teile vom Prüfkörper noch annähernd 70 °C aufweisen. Der schnelle Temperaturabfall der Bauplattform gegenüber dem Prüfkörper resultiert aus der vielfach höheren thermischen Konvektion von Aluminium gegenüber ABS.

Die Dauer von Phase zwei wurde auf 8.000 Sekunden (zwei Stunden und 13 Minuten) gesetzt. Nach der Zeit weist der Prüfkörper an den Meisten Stellen Umgebungstemperatur auf. An einigen Stellen sind Werte von bis zu 33 °C zu sehen. Die Betrachtung wurde an dieser Stelle angehalten, da keine weitere Verformung zu erwarten ist. Die einzelnen Schritte der Abkühlung gehen mit keiner unplausiblen Auffälligkeit einher.

In Phase drei wird eine statisch-mechanische Analyse über die Zeitspanne der Abkühlung durchgeführt. Die resultierende Verformung reicht von null bis 0,9 mm. Tendenziell verformen sich untere Bereiche des Körpers weniger als obenliegende. Im Bereich der Grundplatte des Bauteils findet geringe Verformung statt. Die dünnste der Rippen kippt um 0,9 mm seitlich. Horizontal liegende Löcher weichen 0,1 mm bis 0,5 mm von der Soll-Rundheit ab. Die vertikalen Löcher hingegen unterliegen minimalen Formabweichungen von bis zu 0,09 mm. Die Resultate scheinen auf den ersten Blick für das FDM Verfahren realitätsnah. Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse experimentell validiert. Dazu wird das Bauteil gefertigt und vermessen.

### **6.3 Validierung am physischen Objekt**

Unter der Validierung wird die Anwendbarkeit einer Methode zur Problemlösung verstanden. Das Problem im vorliegenden Fall stellt die Vorhersagegenauigkeit von Bauteileigenschaften im FDM dar. In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methode zur Qualitätssicherung additiver Verfahren vorgestellt und deren Verifizierung durch eine FEM Simulation umgesetzt. In diesem Abschnitt folgt ein qualitativer Vergleich der Simulationsergebnisse mit einem Ausdruck des Prüfkörpers. Neben Maßen werden Kriterien wie die Realisierbarkeit von Überhängen, Flächenbegutachtung und weitere qualitative Aspekte beurteilt. In einem zweiten Schritt werden die in Kapitel 5.5 ermittelten geometrischen Toleranzen mit dem Druckergebnis abgeglichen. Dabei kommt das in der VDI Richtlinie 3405 vorgeschlagene Toleranzsystem zum Einsatz (VDI 3405 Blatt 7, 2019). In dem vorliegenden Fall wurde die Toleranzgruppe fünf ausgewählt.

Vor dem Ausdruck des physischen Modells wird aus den gewonnenen Erkenntnissen das Prozessfenster für die vorliegende FDM Anlage aufgespannt. Es handelt sich um

eine nicht kommerzielle FDM Maschine mit CoreXY Bauweise und Bowden Extruder-System, wodurch hohe Verfahrensgeschwindigkeiten gewährleistet werden. Das System ist mit einem Single-Extruder ausgestattet. Die Z Achse ist in Gantry Bauweise gestaltet, um möglichst hohe Positioniergenauigkeit zu gewährleisten. Folgend werden die für die Produktion relevanten Parameter betrachtet. Schwarzes ABS Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm kommt zum Einsatz. Dessen Glasübergangstemperatur liegt bei 100 °C. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfes wird mit 80 mm/s angenommen. Bei diesem Wert arbeitet die Anlage erfahrungsgemäß mit hoher Positioniergenauigkeit. Für einen hohen Detaillierungsgrad wurde eine Schichtdicke von 0,1 mm ausgewählt. Die Strangbreite wird auf 0,4 mm eingestellt. Der 3,5 bis 6-fache Wert der Schichtdicke wird empfohlen (Gebhardt, 2016). Eine für ABS geeignete Bauraumtemperatur von 70 °C wird angenommen.

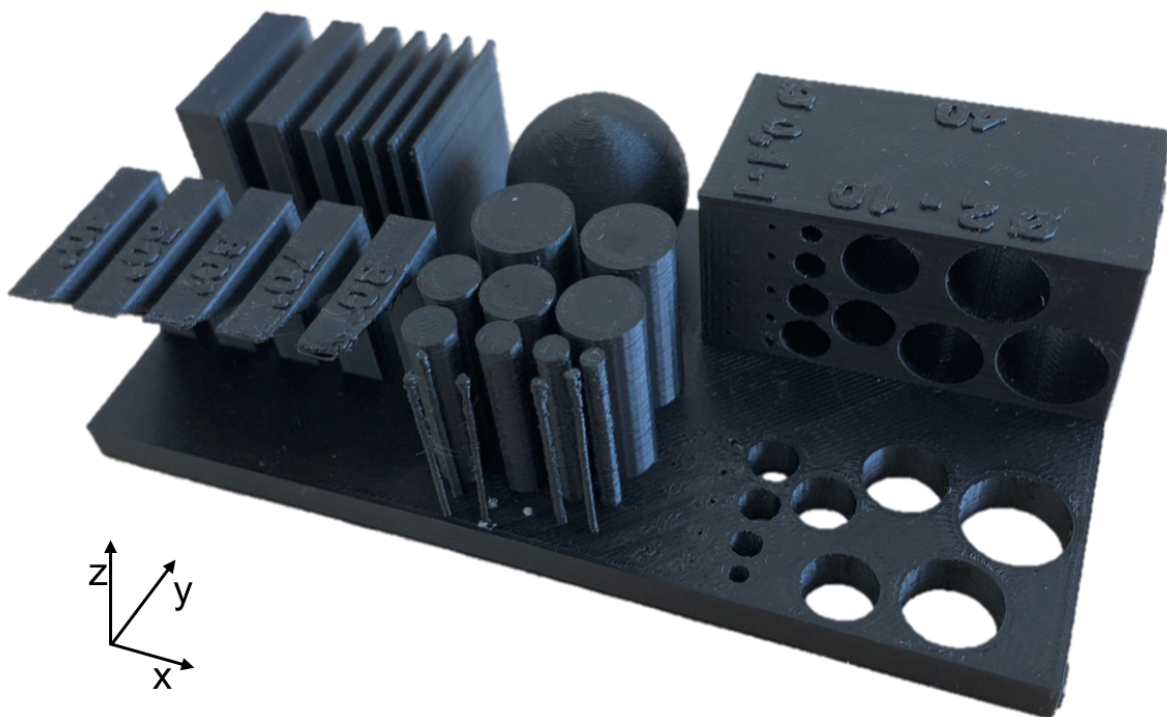


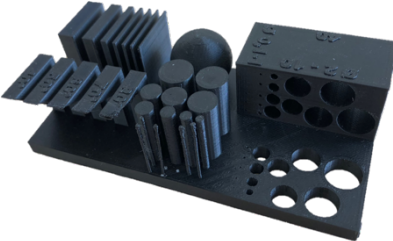
Abbildung 39 - Gedruckter Prüfkörper aus ABS

Die Temperatur der Bauplattform beträgt 100 °C. Der Durchmesser der Düse beträgt 0,4 mm. Die Maschine ist gezielt sehr steif ausgelegt. Dazu tragen ein verzahntes Gehäuse aus Aluminiumverbundpanel sowie Achsenführungen aus Edelstahl bei. Die Bauplattform ist mit dem Phenolharzverbundwerkstoff FR2 bestückt. Die Oberfläche wurde durch feinkörniges Schleifen angeraut. Der Prüfkörper ist so konstruiert,



dass keine Supportstrukturen benötigt werden. Bereiche aus Vollmaterial werden mit Infill in triangularer Form gefüllt. Da bei Dreiecken ausschließlich Belastung in Längsrichtung der Infill-Bahnen anliegt, entsteht kein Biegemoment. Diese Struktur gewährt somit die höchsten Festigkeitswerte. Standardgemäß wird der Prüfkörper im Bau- raum mittig positioniert. Er ist so konstruiert, dass die ebene Bodenfläche auf der Bauplattform positioniert werden kann und in dieser Ausrichtung alle geometrischen Features baubar sind. Die Steuerung der Positionierung und Extrusion wird vom Sli- cer vorgegeben. Die CAD Datei wird mit dem PC Programm Simplify3D für den Bau- prozess vorbereitet. Die entsprechende Slicing- und Ablagestrategie ist im Pro- grammcode hinterlegt. Die Entwicklung und Konstruktion des Prüfkörpers erfolgte entsprechend der Vorgaben für extrudierende additive Verfahren nach der VDI 3405 Blatt 3.4. Post Processing in Form von chemischen oder mechanischem Finish ist nicht notwendig. Die im Bauprozess generierten Merkmale soll originalgetreu aus der Anlage überprüft werden. Die Druckzeit für den Prüfkörper (vgl. Abbildung 39) betrug 3,5 Stunden. Nach dem Druck wurde der gesamte Bauraum gleichmäßig durch ab- geschaltete Wärmezufuhr abgekühlt. Nach Abkühlung des Modells auf Zimmertem- peratur wurden Messungen vorgenommen und in einem Messprotokoll dokumentiert (Tabelle 11).

*Tabelle 11 - Messprotokoll Prüfkörper FDM*

<b>Messprotokoll Prüfkörper FDM</b>		
	Name	Baehr
	Datum	01.10.2019
	Unternehmen	GSaME
	Ergebnis	29 Messwerte i.O. 11 Messwerte n.i.O.
	Kommentar	Ausdruck auf FDM Anlage mit ABS in Schwarz, siehe technische Zeichnung

Nr.	Geometrisches Feature	Attribut	Ausführung / Nennmaß [mm]	Messwert	Abweichung vom Nennmaß	Toleranz nach VDI 3405, Blatt 7, TG5 [mm]	Art der Prüfung	Kommentar	i.O. / n.i.O.	
1	Überhang-schräge	Überhang	40° 50° 60° 70° 80°	NA	NA	Machbarkeit	Sichtprüfung	Auswertung in Kapitel 6.2	i.O.	
2	Kugel	Stufen-effekt	Ø 20	NA	NA	NA	Sichtprüfung	Auswertung in Kapitel 6.2	i.O.	
3	Loch in Ebene	Ø in X und Y Richtung	0,1 – 0,9	NA	NA	NA	±0,08	Messschieber Marke <i>insize</i> , 10tel mm Genauigkeit	0,1 – 0,6 nicht gedruckt, 0,7 – 0,9 nicht messbar	NA
			1	X 0,85, y 0,85	X -0,15 Y -0,15	±0,11			n.i.O.	
			2	X 1,96 Y 1,87	X -0,04 Y -0,13				n.i.O.	
			3	X 2,95 Y 2,88	X -0,05 Y -0,12	±0,14	n.i.O.			
			4	X 3,90 Y 3,88	X -0,10 Y -0,12		n.i.O.			
			5	X 4,98 Y 4,85	X -0,02 Y -0,15		n.i.O.			
			6	X 5,92 Y 5,94	X -0,08 Y -0,06	±0,14	i.O.			
			7	X 6,93 Y 6,90	X -0,07 Y -0,10		i.O.			
			8	X 7,90 Y 7,92	X -0,10 Y -0,08		i.O.			
			9	X 8,99 Y 8,89	X -0,01 Y -0,11		i.O.			
			10	X 9,95 Y 9,94	X -0,05 Y -0,06	i.O.				

4	Loch in Z-Richtung	Ø in X und Z Richtung	0,1 – 0,9	NA	NA	NA	Messschieber	0,1 und 0,2 nicht gedruckt, 0,3 – 0,9 nicht messbar	NA
			1	X 0,94 Z 1,05	X -0,06 Z +0,05	±0,08		Auswertung in Kapitel 6.2	i.O.
			2	X 1,94 Z 1,96	X -0,06 Z -0,04				i.O.
			3	X 2,97 Z 2,99	X -0,03 Z -0,01				i.O.
			4	X 3,97 Z 3,90	X -0,03 Z -0,10	±0,11			i.O.
			5	X 4,98 Z 4,97	X -0,02 Z -0,03				i.O.
			6	X 5,99 Z 6,11	X -0,01 Z +0,11				i.O.
			7	X 7,01 Z 7,10	X +0,01 Z +0,10	±0,14			i.O.
			8	X 7,92 Z 7,96	X -0,08 Z -0,04				i.O.
			9	X 9,00 Z 9,05	X 0,00 Z +0,05				i.O.
10	X 9,97 Z 10,03	X -0,03 Z +0,03	i.O.						
5	Zylindrischer Zapfen	Ø Zapfen in X und Y Richtung	0,1 – 0,3	NA	NA	NA	Messschieber	Nicht gedruckt	NA
			0,4	X 0,70 Y 0,75	X +0,30 Y +0,35			Unglatte Oberfläche, einzelne Schichten klar erkennbar versetzt voneinander	NA
			0,5	X 0,78 Y 0,77	X +0,28 Y +0,27				NA
			0,6	X 0,88 Y 0,88	X +0,28 Y +0,28				NA
			0,7	X 0,96 Y 0,99	X +0,26 Y +0,29				NA
			0,8	X 0,98 Y 0,91	X +0,18 Y +0,11				NA
			0,9	X 0,92	X +0,02				NA

				Y 1,02	Y +0,12				
			1	X 1,00 Y 1,00	X 0,00 Y 0,00	±0,08			i.O.
			2	X 2,03 Y 2,14	X +0,03 Y +0,14				n.i.O.
			3	X 3,09 Y 3,17	X +0,09 Y +0,17				n.i.O.
			4	X 4,12 Y 4,16	X +0,12 Y +0,16	±0,11			n.i.O.
			5	X 5,01 Y 5,16	X +0,01 Y +0,16				n.i.O.
			6	X 6,03 Y 6,05	X +0,03 Y +0,05				i.O.
			7	X 7,01 Y 7,09	X +0,01 Y +0,09	±0,14			i.O.
			8	X 8,01 Y 8,09	X +0,01 Y +0,09				i.O.
			9	X 9,03 Y 9,10	X +0,03 Y +0,10				i.O.
			10	X 9,94 Y 9,98	X -0,06 Y -0,02				i.O.
6	Grundplatte	Maßhaltigkeit, Verzug	X 100	99,80	-0,20	±0,50	Messschieber		i.O.
			Y 50	49,89	-0,11	±0,36			i.O.
			Z 25	24,73	-0,27	±0,20			n.i.O.
7	Rippe	Maßhaltigkeit Wandung	0,2	NA	NA	NA	NA	Nicht gedruckt	
			0,4	0,59	+0,19	NA	Messschieber		NA
			0,6	0,69	+0,09	NA			NA
			0,8	0,79	-0,01	NA			NA
			1	1,11	+0,11	±0,08			n.i.O.
			2	2,07	+0,07				i.O.
			4	4,06	+0,06	±0,11			i.O.
			6	6,05	+0,05				i.O.
8	Quader	Rechtwinkligkeit,	NA	NA	NA	NA		Messschieber	Auswertung in Kapitel 6.2

		Gerad- heit					, Sicht- prüfung		
--	--	----------------	--	--	--	--	---------------------	--	--

In Kapitel 5.5 wurden die geometrischen Elemente des Prüfkörpers beschrieben. Im Folgenden werden Maße und qualitative Merkmale der geometrischen Features mit der Simulation verglichen und mit Blick auf Toleranzen ausgewertet.

Alle fünf Überhangschrägen konnten ohne Stützstrukturen realisiert werden. Die Ausführungen mit 40° und 50° zeigen geringe Unebenheiten an der Unterseite. Ab 70° wird die Fläche uneben und die Spitze neigt sich nach oben. Der 80° Überhang konnte im Groben realisiert werden. Vor dem Hintergrund, dass im letzteren nahezu horizontal ohne Stützen gedruckt wurde, ist das Resultat positiv zu bewerten. Die einzelnen Stränge sind an der Unterseite deutlich erkennbar und weisen eine schlechte Verbindung untereinander auf.

An der Spitze der Kugel sind die einzelnen Bahnen deutlich erkennbar, der Stufenef-  
fekt kommt zum Tragen. Mit steigendem Neigungswinkel zum Zentrum des Features nimmt der Effekt sichtbar ab. An einigen Stellen ist eine ungleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit sichtbar. Das deutet auf den Start-Stop-Defekt hin. Durch den schichtweisen Versatz von Anfangs- und Endpunkt kam es nicht zur Bildung einer Binde-  
naht.

Die horizontalen Löcher der Durchmesser 0,1 mm bis 0,6 mm weisen keine Lichtdurchdringung auf. Diese wurden nicht realisiert. Ab einem Durchmesser von einem Millimeter sind die Löcher mit einem Messschieber überprüfbar. In allen Fällen sind die Löcher kleiner als das entsprechende Nennmaß. Das Phänomen und mögliche Ursachen geringer Lochdurchmesser wurde bereits diskutiert. Abweichungen der Durchmesser betragen -0,01 mm bis -0,15 mm. Die vorgegebenen Toleranzen werden in der Hälfte der Fälle eingehalten (vgl. Tabelle 11). Die FEM Analyse ergab für Löcher in der Ebene Abweichungen von 0,00 mm bis 0,09 mm. Die Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. In Z Richtung sind lediglich die Löcher der Durchmesser 0,1 mm und 0,2 mm nicht realisiert worden. Ab einem Durchmesser von einem Millimeter können auch hier die Maße mittels Messschieber ermittelt werden. Fünf von 20 Messwerten zeigen einen größeren Durchmesser als im Modell.

Alle anderen fallen kleiner aus, äquivalent der Löcher in der Ebene. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von 0,00 mm bis +0,11 mm. Alle ermittelten Werte liegen innerhalb der zulässigen Toleranzen. Die FEM Analyse zeigt in dem Bereich Nennmaßabweichungen von bis zu 0,4 mm. Die realen Abweichungen unterschreiten diese um etwa den Faktor drei.

Zylindrische Zapfen der Durchmesser 0,1 mm bis 0,3 mm wurden aufgrund des verwendeten Düsendurchmessers von 0,4 mm nicht gedruckt. Eine unebene Oberfläche ist bei den Zapfen mit 0,4 mm bis 0,9 mm zu erkennen. Die einzelnen Schichten sind klar erkennbar und liegen teilweise versetzt voneinander. Bei geringen Zapfendurchmessern treten hohe Abweichungen vom Modell auf. Dies ist durch den Versatz der Schichten zu erklären. Da die Auflagefläche des Messschiebers stets über mehrere Schichten anliegt, ist jeweils die am weitesten nach außen verschobene Schicht für die Messung ausschlaggebend. Ab 0,8 mm Durchmesser aufwärts liegen die Abweichungen bei < 0,2 mm. Für Maße unterhalb von 1,00 mm liegen keine Werte für Toleranzen nach DIN 16742 vor. Ein größerer Teil der Zapfendurchmesser liegt innerhalb der Toleranzgrenzen. Bis auf den Zapfen von zehn Millimetern sind alle Durchmesser größer als der Nennwert. Die Messungen wurden am oberen Rand der Zapfen durchgeführt. An dieser Stelle zeigt die Simulation Maßabweichungen von maximal 0,27 mm. Es besteht eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Die Abweichungen der Maße der Grundplatte in X, Y und Z Orientierung betragen - 0,11 mm bis -0,27 mm. Die X und Y Werte liegen innerhalb der Toleranz, der Z Wert übersteigt sie. In der Simulation wurden Abweichungen von 0,00 mm bis 0,18 mm aufgezeigt. Die dünnste der Rippen mit einer Dicke von 0,2 mm wurde nicht gedruckt. Der Vergleich mit der in der Simulation ermittelten Formabweichung kann nicht aufgestellt werden. Bei allen anderen Rippen liegen die Abweichungen bei 0,01 mm bis 0,19 mm. Die Simulation erzielte Werte von 0,18 mm bis 0,27 mm.

Rechtwinkligkeit und Geradheit wurden an dem Quader, der die Löcher in Baurichtung beherbergt, überprüft. Durch Anlegen der jeweiligen Fläche beziehungsweise Winkels des Messschiebers können Abweichungen optisch erkannt werden. Das ist

nicht der Fall, sodass aus qualitativer Sicht sowohl Geradheit als auch Rechtwinkligkeit in hohem Maß erreicht worden sind. Die aufgedruckten Zahlen sind gut lesbar. Sie weisen eine glatte Oberfläche und klare Konturen auf.

#### Fazit

Der Stufeneffekt ist besonders gut an der Kugel zu erkennen. Überhänge konnten bis zum einem Winkel von  $80^\circ$  ohne Stützen realisiert werden. Eingebrachte Löcher sind in nahezu allen Fällen kleiner als das Nennmaß. Mögliche Ursachen dafür wurden in Kapitel 2.1.5 diskutiert. Insbesondere bei Löchern in der Ebene kommt es zu Abweichungen des Durchmessers, die teils die Toleranzgrenzen übersteigen. Die Löcher in vertikaler Ausrichtung weisen in der Tendenz geringere Abweichungen auf. Bei zylindrischen Zapfen wirkt ein entgegen gesetztes Phänomen. In nahezu allen Fällen übersteigen die Durchmesser den Nennwert. Eine mögliche Ursache liegt im schichtweisen Aufbau. Insbesondere dünne Zapfen erwecken den Anschein, dass Materialschichten nicht genau übereinander abgelegt wurden. Dadurch entsteht ein gewisser Versatz. Die Auflagefläche des Messschiebers kontaktiert den Zapfen jeweils an der breitesten Stelle mehrerer Schichten. Somit wird ein größerer Durchmesser gemessen, als die einzelnen Schichten real aufweisen. Das in der VDI 3405 vorgeschlagene Toleranzsystem wurde angewendet (VDI 3405 Blatt 7, 2019). Elf von 40 Messungen lagen innerhalb der Toleranzgrenzen. Die verwendete FDM-Anlage wird mittleren Qualitätsanforderungen gerecht.

Es wurde gezeigt, dass die mit der Simulation berechneten Formabweichungen vom Modell sowohl in der Tendenz als auch quantitativ nahe der Messwerte des gefertigten Bauteils liegen. Damit wurde bewiesen, dass die entwickelte numerische Analyse für realitätsnahe Vorhersagen von geometrischen Bauteileigenschaften geeignet ist und die in dieser Arbeit vorgestellte Methode ihre Funktion erfüllt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden Inhalte und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und eingeordnet. Darauf basierend werden aus der Betrachtung hervorgehende Ansätze für weiterführende Forschung aufgezeigt.

### 7.1 Zusammenfassung

Additive Fertigungsverfahren wie das Fused Deposition Modeling bieten sich aufgrund der formlosen Formgebung für die wirtschaftliche Fertigung mit Losgröße eins an. Der erfolgreiche Einsatz der Technologien ist zu großen Teilen von der Qualität der gefertigten Produkte abhängig. Teilweise kann die Erzeugung von Merkmalen am Bauteil innerhalb der Toleranzkorridore sichergestellt werden. Teils unzureichende Prozessfähigkeit und –stabilität äußert sich bei der Einzelteilerfertigung in nicht präzise prognostizierbaren Eigenschaften am Bauteil. Auf nachträglicher Überprüfung basierende Ansätze zur Qualitätssicherung sind nicht anwendbar. Eine ganzheitliche Betrachtung qualitativer Aspekte entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses rückt in den Fokus. Dazu ist ein hohes Maß an Prozessverständnis erforderlich. Die Problematik wurde in der vorliegenden Arbeit adressiert. Es wurde eine Methode zur präventiven Qualitätsabsicherung im Fused Deposition Modeling vorgestellt. Diese basiert auf der Modellierung der inneren Systemstruktur und Interaktionen zwischen Input und Output Parametern. Die Methode ist generisch und materialunabhängig (s. Abbildung 40). Ziel ist die Prognose von Abweichungen und daraus resultierenden Fehlern sowie deren präventive Abschaltung. Für jeden Schritt wurden Werkzeuge zur Anwendung entwickelt. In einem ersten Schritt wurde das Problemfeld definiert. Dazu erfolgte eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Produktentstehungsprozess. Im Folgenden wurden Größen identifiziert, die potenziell Einfluss auf qualitative Eigenschaften des Bauergebnisses haben können. Deren Zusammenstellung erfolgte in einer Prozessübersicht. Es folgt die syntaktische Betrachtung. Einzelne Prozessschritte wurden untersucht und beschrieben. Die Betrachtung beinhaltet, zu welchem Zeitpunkt welche Parameter auf den jeweiligen Prozessschritt wirken. Es wurde gezeigt, dass im FDM Prozess insbesondere die Abkühlung des Bauteils schwer beherrschbaren Einflussgrößen unterliegen.



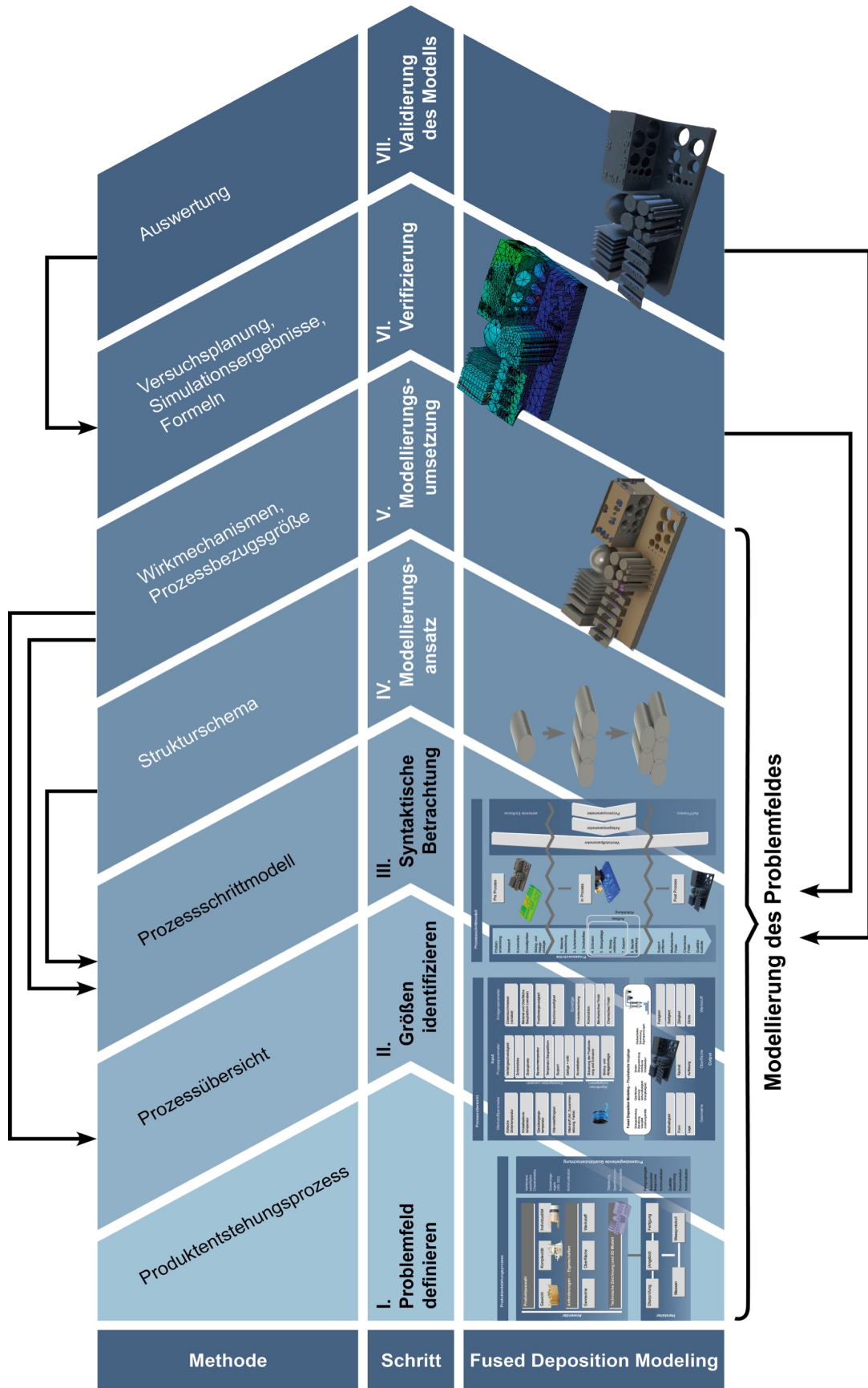


Abbildung 40 - Zusammenfassung Methode zur modellierungs-basierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling

Im anschließenden Schritt Modellierungsansatz wurden die kritischen Prozessschritte in ihren physikalischen Grundzügen betrachtet. Der Aufbau- und Abkühlprozess einzelner Layer und Bahnen wurde im Strukturschema dargestellt. Darauf folgte die Umsetzung der Modellierung. Dazu wurden die Wirkmechanismen umfangreich betrachtet. Einflussparameter der Anlage, des Prozesses und des Werkstoffes fanden Beachtung. Deren ursächliche Verknüpfung mit Eigenschaften am Bauteil wurden hinterfragt und diskutiert. Eine verfahrensrepräsentative Prozessbezugsgröße in Form eines Prüfkörpers wurde entwickelt. Im Rahmen der Verifizierung wurde ein numerisches Modell unter Einbeziehung des Prüfkörpers aufgebaut. Es umfasst die Simulation der Formveränderung eines Bauteils während und nach dem Fertigungsprozess. Der Fokus lag auf thermisch induzierter Schwindung, Eigenspannungen und Verformung. In einem letzten Schritt wurde das Modell validiert. Dafür wurde das Simulationsergebnis mit Werten eines gefertigten Prüfkörpers abgeglichen. Geometrische Merkmale wurden sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet. Die Werte von Simulation und Bauteil zeigten in den meisten Fällen näherungsweise Übereinstimmung. Die entwickelte Simulation kann zur Vorhersage der Verformung im FDM verwendet werden. Es wurde bewiesen, dass die vorgestellte Methode zur qualitativen Absicherung eines Fused Deposition Modeling Prozesses beitragen kann. Sie stellt einen Schritt in Richtung fähiger und beherrschter Prozesse dar.

## **7.2 Bewertung der Ergebnisse und Ableitung von zukünftigem Forschungsbedarf**

Zum Aufbau der numerischen Analyse wurde eine generische Vorgehensweise vorgestellt. Diese wurde für eine Verformungssimulation im FDM herangezogen und validiert. Ein Proof of Concept wurde erbracht. Darüber hinaus sind andere Formen der Analyse realisierbar, wie etwa von mechanischen Materialeigenschaften und der Oberfläche. Des Weiteren besteht Potenzial in der Verfeinerung der präsentierten Simulation. Es können mehr Schichten sowie die Bahnsteuerung der Strangablage in die Berechnung einbezogen werden. Zudem wird der universellen Gestaltung der Simulation ein großer Wert zugeschrieben. Mit der Weiterentwicklung hin zur automatisierten Anwendbarkeit für jegliche Bauteilgeometrien geht praktischer Nutzen einher. Eine derartige Software kann etwa in ein Slicer Programm eingebunden werden.

Die entsprechenden Bauparameter werden auf Basis der Berechnung für ein optimales Fertigungsergebnis angepasst. Derartige Simulationen sind äquivalent für weitere additive Verfahren umsetzbar. Verfahrensspezifische Erkenntnisse können vertieft, erweitert und gefestigt werden.

### **7.3 Summary**

Additive manufacturing processes such as Fused Deposition Modeling are suitable for economical production with batch size one due to the moldless design. The successful implementation of these technologies is largely dependent on the quality of the manufactured products. In some cases, the generation of component features can be ensured within the tolerance corridors. Sometimes insufficient process capability and process stability in the production of individual parts results in characteristics on the component that cannot be precisely predicted. Approaches to quality assurance based on subsequent verification are not applicable. A holistic view of qualitative aspects along the entire product development process is becoming increasingly important. This requires a high degree of process understanding. The problem has been addressed in this thesis. A method for preventive quality assurance in Fused Deposition Modeling was presented. It is based on the modeling of the inner system structure and interactions between input and output parameters. The method is generic and material independent (see Figure 40). The aim is to predict the deviation and resulting errors and to prevent them from occurring. For each of these steps, application tools have been developed. In a first step the problem was defined. This was followed by a detailed examination of the product development process. In a subsequent step, variables were identified that could potentially influence the qualitative characteristics of the manufacturing result. These were summarized in a process overview. The syntactic consideration follows. Individual process steps were examined and described. The consideration includes at certain times which parameters have an effect on the respective process step. It was shown that in the FDM process, especially the cooling of the component is subject to influencing variables that are difficult to control. In the following step, the modelling approach, critical process steps were considered in their physical fundamentals. The build-up and cooling process of individual layers and roads was shown in the structure scheme. This was followed by the implementation of modeling. For this purpose the effect mechanisms were extensively considered.

Influencing parameters of the machine, the process and the material were considered. Their causal link with properties on the component were questioned and discussed. A process representative process reference model in the form of a test specimen was developed. Within the scope of verification, a numerical model was built up including the test specimen. It consists of the simulation of the modification of the shape of a component during and after the manufacturing process. The focus was on thermally induced shrinkage, residual stresses and distortion. In a final step the model was validated. For this purpose, the simulation result was compared with values of a manufactured test specimen. Geometric features were evaluated both qualitatively and quantitatively. The values of simulation and component showed approximate agreement in most cases. The developed simulation can be used to predict the deformation in FDM. It was proven that the presented method can contribute to the qualitative validation of a fused deposition modeling process. It shows a step towards capable and controlled processes.

## 8 Literatur

Im ersten Teil des Literaturverzeichnis werden Quellen aufgeführt, die im Text dieser Arbeit zitiert werden. In einem zweiten Teil werden wissenschaftliche Werke aufgelistet, mit deren zusätzlicher Zuhilfenahme die Wirkmechanismen im FDM untersucht wurden. In Kapitel 5.5 wurden die Erkenntnisse in einer Matrix zusammengestellt.

### 8.1 Literaturverzeichnis

- Ahn et al. 2009                      Ahn, D., J. Kweon, S. Kwon, J. Song, und S. Lee. 2009. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology* 209(15–16):5593–5600. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016
- Altinkaynak et al. 2011              Altinkaynak, A., M. Gupta, M. A. Spalding, und S. L. Crabtree. 2011. Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations. *International Polymer Processing* 26(2):182–96. DOI: 10.3139/217.2419
- Anitha et al. 2001                      Anitha, R., S. Arunachalam, und P. Radhakrishnan. 2001. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling. *Journal of Materials Processing Technology* 118(1–3):385–88. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3
- ASME 1994                              ASME. 1994. *Dimensioning and Tolerancing ANSI Y14.5M-1994: ASME Y14.5M-1994 - An ASME National Standard*. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, U.S.

- Bähr und Westkämper 2018 Bähr, F. und E. Westkämper. 2018. Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 72:1214–19. DOI: 10.1016/j. procir.2018.03.048
- Bellehumeur et al. 2004 Bellehumeur, C., L. Li, Q. Sun, und P. Gu. 2004. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Processes* 6(2):170–78. DOI: 10.1016/S1526-6125 (04)70071-7
- Bellini et al. 2003 Bellini, A. und S. Güçeri. 2003. Mechanical Characterization of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling. *Rapid Prototyping Journal* 9(4):252–64. DOI: 10.1108/ 13552540310489631
- BGH, 14.05.1998 BGH, 14.05.1998 - VII ZR 184/97. 1998. *Rechtsprechung*.
- Bikas et al. 2016 Bikas, H., P. Stavropoulos, und G. Chryssolouris. 2016. Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83(1–4):389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2
- BITEX BIMOID AG 2009 Technisches Merkblatt Bitumen B70. *BITEX BIMOID AG*. 2009. Abgerufen am 22. Januar 2021 ([https://www.gri-sard.ch/fileadmin/redaktion/BITEXBIMOID\\_AG/pdf/Technische\\_Merkblaetter/Technisches\\_Merkblatt\\_B70\\_100.pdf](https://www.gri-sard.ch/fileadmin/redaktion/BITEXBIMOID_AG/pdf/Technische_Merkblaetter/Technisches_Merkblatt_B70_100.pdf)).
- Bonten 1999 Bonten, C. 1999. Beitrag zur Erklärung des Wirkmechanismus in Schweißverbindungen aus teilkristallinen Thermoplasten. Aachen: Shaker, Essen, Univ., Diss. 1998, ISBN: 978-3826560286

- Bonten 2016                      Bonten, C. 2016. *Kunststofftechnik: Einführung Und Grundlagen*. 2., aktualisierte. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44674-8
- Boschetto und Bottini 2014                      Boschetto, A. und L. Bottini. 2014. Accuracy Prediction in Fused Deposition Modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73(5–8):913–28. DOI: 10.1007/s00170-014-5886-4
- Boschetto et al. 2013                      Boschetto, A., V. Giordano, und F. Veniali. 2013. Surface Roughness Prediction in Fused Deposition Modelling by Neural Networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67(9–12):2727–42. DOI: 10.1007/s00170-012-4687-x
- Boschetto et al. 2015                      Boschetto, A. und L. Bottini. 2015. Roughness Prediction in Coupled Operations of Fused Deposition Modeling and Barrel Finishing. *Journal of Materials Processing Technology* 219:181–92. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.12.021
- Caviezel et al. 2017                      Caviezel, C., R. Grünwald, S. Ehrenberg-Silies, S. Kind, T. Jetzke, und M. Bovenschulte. 2017. Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Arbeitsbericht Nr. 175:248.
- Compton et al. 2017                      Compton, B. G., B. K. Post, C. E. Duty, L. Love, und V. Kunc. 2017. Thermal Analysis of Additive Manufacturing of Large-Scale Thermoplastic Polymer Composites. *Additive Manufacturing* 17:77–86. DOI: 10.1016/j.addma.2017.07.006

- Costa et al. 2015 Costa, S. F., F. M. Duarte, und J. A. Covas. 2015. Thermal Conditions Affecting Heat Transfer in FDM/FFE: A Contribution towards the Numerical Modelling of the Process: This Paper Investigates Convection, Conduction and Radiation Phenomena in the Filament Deposition Process. *Virtual and Physical Prototyping* 10(1):35–46. DOI: 10.1080/17452759.2014.984042
- Courter et al. 2017 Courter, B. Z., V. Savane, und C. J. Hansen. 2017. Finite Element Simulation of the Fused Deposition Modelling Process. *Proceedings NAFEMS World Congress* 28:1728-1741.
- Crump 1989 Crump, S. 1989. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. Patent US5121329A, USA.
- Cuiffo et al. 2017 Cuiffo, M. A., J. Snyder, A. M. Elliott, N. Romero, S. Kannan, und G. P. Halada. 2017. Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. *Applied Sciences* 7(6):579. DOI: 10.3390/app7060579
- Day et al. 2006 Day, M., A. V. Nawaby, und X. Liao. 2006. A DSC Study of the Crystallization Behaviour of Polylactic Acid and Its Nanocomposites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 86(3):623–29. DOI: 10.1007/s10973-006-7717-9
- DIN 2019 DIN. 2019. DIN - Kurz erklärt. Abgerufen am 22. Januar 2021 (<https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/basiswissen>).
- DIN 16742 2013 DIN 16742. 2013. *DIN 16742:2013-10, Kunststoff-Formteile - Toleranzen und Abnahmebedingungen; Text Deutsch und Englisch*.



DIN 55350 2008	DIN 55350. 2008. <i>DIN 55350-11:2008-05, Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005.</i>
DIN EN ISO 291 2008	<i>DIN EN ISO 291:2008-08, Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung (ISO 291:2008); Deutsche Fassung EN ISO 291:2008.</i>
DIN EN ISO 1101 2017	<i>DIN EN ISO 1101:2017-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2017); Deutsche Fassung EN ISO 1101:2017.</i>
DIN EN ISO 7200 2004	<i>DIN EN ISO 7200:2004-05, Technische Produktdokumentation - Datenfelder in Schriftfeldern und Dokumentenstammdaten (ISO_7200:2004).</i>
DIN EN ISO 9000 2015	<i>DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015).</i>
DIN EN ISO/ASTM 52900 2018	<i>DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM DIS 52900:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO/ASTM 52900:2018.</i>
DIN EN ISO/ASTM 52901 2018	<i>DIN EN ISO/ASTM 52901:2018-12, Additive Fertigung - Grundlagen - Anforderungen an erworbene additiv gefertigte Bauteile (ISO/ASTM 52901:2017); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52901:2018.</i>
DIN EN ISO/ASTM 52902 2018	<i>DIN EN ISO/ASTM 52902:2018-06, Additive Fertigung - Testkörper - Allgemeine Leitlinie für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme (AM-</i>

	<i>Systeme) (ISO/ASTM DIS 52902:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO/ASTM 52902:2018.</i>
DIN EN ISO/ASTM 52915 2017	<i>DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10, Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2 (ISO/ASTM_52915:2016); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52915:2017.</i>
DIN EN ISO/ASTM 52921 2017	<i>DIN EN ISO/ASTM 52921:2017-01, Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung - Koordinatensysteme und Prüfmethodologien (ISO/ASTM 52921:2013); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52921:2016.</i>
DIN ISO 2768 1991	<i>DIN ISO 2768-1:1991-06, Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung; Identisch mit ISO 2768-1:1989.</i>
Duty et al. 2017	Duty, C. E., V. Kunc, B. Compton, B. Post, D. Erdman, R. Smith, R. Lind, P. Lloyd, and L. Love. 2017. Structure and Mechanical Behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Materials. <i>Rapid Prototyping Journal</i> , Vol. 23 No. 1, pp. 181-189. DOI: 10. 1108/RPJ-12-2015-0183
Dyckhoff und Spengler 2010	Dyckhoff, H. und T. S. Spengler. 2010. <i>Produktionswirtschaft: Eine Einführung</i> . 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-13683-2
Eschey 2013	Eschey, C. 2013. <i>Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung</i> . München:UTZ, München, Univ., Diss. 2013. ISBN: 978-3-8316-4270-0
Faes 2009	Faes, G. 2009. <i>SPC - Statistische Prozesskontrolle: eine praktische Einführung in die statistische Prozesskontrolle</i>

- und deren Nutzung*. Norderstedt: Books on Demand. ISBN: 978-3837051568
- Ferreira et al. 2017 Ferreira, R. T. L. und R. Queelho de Macedo. 2017. Residual Thermal Stress in Fused Deposition Modelling. in *Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM. DOI: 10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-0124
- Gebhardt 2016 Gebhardt, A. 2016. *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing Und 3D-Drucken Für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., aktualisierte und erweiterte. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44401-0
- Gebhardt et al. 2016 Gebhardt, A., J. Kessler, und L. Thurn. 2016. *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-44672-4
- Gibson et al. 2015 Gibson, I., D. W. Rosen, und B. Stucker. 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Second edition. New York; London: Springer. ISBN: 978-1-4939-2112-6
- Gordon und Meyer 2012 Gordon, L. und B. Meyer. 2012. Accuracy in Additive Manufacturing. *Machine Design*. Stratasys Inc. Eden Prairie, Minn. Abgerufen am 22. Januar 2021 (<https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21832746/accuracy-in-additive-manufacturing>)
- Hangos und Cameron 2001 Hangos, K. M. und I. T. Cameron. 2001. *Process Modeling and Model Analysis*. San Diego: Academic Press. ISBN: 9780121569310

- Herrmann und Huber 2013 Herrmann, A. und F. Huber. 2013. *Produktmanagement: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 3. Aufl. Gabler Verlag. ISBN: 978-3-409-12550-5
- Huang 2014 Huang, B. 2014. Alternate Slicing and Deposition Strategies for Fused Deposition Modelling. Auckland University of Technology, Univ., Diss.
- Huang et al. 2015 Huang, T., S. Wang, und K. He. 2015. Quality control for fused deposition modeling based additive manufacturing: Current research and future trends. *2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)* 1–6. DOI: 10.1109/ICRSE.2015.7366500.
- Huang et al. 2015b Huang, Y., M. C. Leu, J. Mazumder, und A. Donmez. 2015. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137(1):014001. DOI: 10.1115/1.4028725
- ISO/ASTM DIS 52903-2 2018 Additive Manufacturing – Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials – Part 2: Process Equipment, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- ISO/ASTM 52910 2018 Guidelines for Design for Additive Manufacturing. ASTM International.
- Johannaber und Michaeli 2004 Johannaber, F. und W. Michaeli. 2004. *Handbuch Spritzgießen*. 2. München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-22966-2

- Jungmittag und Mangelsdorf 2000 Jungmittag, A. und A. Mangelsdorf. 2000. The Economic Benefits of Standardization. Deutsches Institut für Normung DIN:24.
- KERN 2019 Datenblattsammlung. *Kern GmbH*. Abgerufen am 22. Januar 2021 (<https://www.kern.de/de/technische-datenblaetter-kunststoffe>).
- Kishore et al. 2017 Kishore, V., C. Ajinjeru, A. Nycz, B. Post, J. Lindahl, V. Kunc, und C. Duty. 2017. Infrared Preheating to Improve Interlayer Strength of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) Components. *Additive Manufacturing* 14:7–12. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.008
- Klahn et al. 2018 Klahn, C.; M. Meboldt; F. F. Fontana; B. Leutenecker-Twelsiek. 2018. *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten*. 1. Aufl. Würzburg: Vogel Business Media. ISBN: 978-3-8343-3395-7
- König und Bruggink 2011 König, B. und S. Bruggink. 2011. Vorlesung Modellierungsmethoden der Informatik im Wintersemester 2011/12. *Unified Modeling Language* 17.
- Lauber und Göhner 1999 Lauber, R. und P. Göhner. 1999. *Modellierungskonzepte und Automatisierungsverfahren, Softwarewerkzeuge für den Automatisierungsingenieur, Vorgehensweise in den Projektphasen bei der Realisierung von Echtzeitsystemen*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-65319-6
- Lehmeier und Dorgan 2001 Lehermeier, H. J. und J. R. Dorgan. 2001. Melt Rheology of Poly (Lactic Acid): Consequences of Blending Chain Architectures. *Polymer Engineering & Science* 41(12):2172–84. DOI: 10.1002/pen.10912

- Li et al. 2001                      Li, L., Q. Sun, C. Bellehumeur, und P. Gu. 2001. Composite Modeling and Analysis of FDM Prototypes for Design and Fabrication of Functionally Graded Parts. *Journal of Manufacturing Processes* 6(2):1667–75. DOI: 10.26153/tsw/3262
- Melnik 2015                         Melnik, R., Hrsg. 2015. *Mathematical and Computational Modeling: With Applications in Natural and Social Sciences, Engineering, and the Arts*. 1 edition. Hoboken, New Jersey: Wiley. ISBN: 978-1-118-85398-6
- Mezger 2007                         Mezger, T. 2007. *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und oszillationsrheometern - 2nd edition*. Vincentz Network. ISBN: 978-3-87870-175-0
- Mohamed et al. 2016                Mohamed, O. A, S. H. Masood, und J. L. Bhowmik. 2016. Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters for Dimensional Accuracy Using I-Optimality Criterion. *Measurement* 81:174–96. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.12.011
- Müller und Bähr 2021                Müller, S. und F. Bähr. 2021. A Holistic Method for Manufacturing Process Modeling. Derzeit im Veröffentlichungsprozess. Zielkonferenz: euspen 2021
- Neubauer et al. 2015                Neubauer, W., T. Becker, und C. Herrmann. 2015. *Wissenschaftssymposium Komponente - Thema: Energie- und Ressourceneffizienz: Aktuelle Themen aus der Forschung in der Volkswagen Komponente*. Berlin: Logos Verlag. ISBN: 978-3832538699

- Neurath et al. 1938      Neurath, O., R. Carnap, und C. F. W. Morris, Hrsg. 1938. *Foundations of the Theory of Signs*. 1st Edition. Chicago London: University of Chicago Press.
- Rapidobject 2019      Fused Deposition Modeling (FDM). *Rapidobject GmbH*. Abgerufen am 22. Januar 2021 ([https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Fused-Deposition-Modeling-FDM\\_1246.html](https://www.rapidobject.com/de/Wissenswertes/3D-Druckverfahren/Fused-Deposition-Modeling-FDM_1246.html)).
- Rodriguez et al. 2000      Rodriguez, J. F., J. P. Thomas, und J. E. Renaud. 2000. Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials. *Rapid Prototyping Journal* 6:175–85. DOI: 10.1108/13552540010337056
- Ropohl 2009      Ropohl, G. 2009. *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek. ISBN: 978-3-86644-374-7
- sd3d 2019      Technical Data Sheet PLA. *SD3D*. Abgerufen am 22. Januar 2021 ([https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA\\_01.pdf](https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf)).
- Shah et al. 2016      Shah, P., R. Racasan, und P. Bills. 2016. Comparison of Different Additive Manufacturing Methods Using Computed Tomography. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation* 6:69–78. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.05.008
- Shih et al. 2019      Shih, C., M. Burnette, D. Staack, J. Wang, und B. L. Tai. 2019. Effects of Cold Plasma Treatment on Interlayer Bonding Strength in FFF Process. *Additive Manufacturing* 25:104–11. DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.005

- Sood et al. 2009 Sood, A. K., R. K. Ohdar, und S. S. Mahapatra. 2009. Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling Processed Part Using Grey Taguchi Method. *Materials & Design* 30(10):4243–52. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.04.030
- Stachowiak 1973 Stachowiak, H. 1973. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer. ISBN: 978-3-540-13393-3
- Stephens et al. 2013 Stephens, B., P. Azimi, Z. El Orch, und T. Ramos. 2013. Ultrafine Particle Emissions from Desktop 3D Printers. *Atmospheric Environment* 79:334–39. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.050
- Stratasys, Ltd. 2019 3D Printing & Additive Manufacturing. *Stratasys, Ltd.* Abgerufen am 22. Januar 2021 (<https://www.stratasys.com>).
- Sun et al. 2003 Sun, Q., G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, und P. Gu. 2003. Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostructures and Properties of Prototypes. *Texas Scholar Works* 11. DOI: 10.26153/tsw/5566
- Tang und Zhao 2016 Tang, Y. und Y. F. Zhao. 2016. A Survey of the Design Methods for Additive Manufacturing to Improve Functional Performance. *Rapid Prototyping Journal*. 22 No. 3, 569-590. DOI: 10.1108/RPJ-01-2015-0011
- Thompson et al. 2016 Thompson, M. K., G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, und F. Martina. 2016. Design for Additive Manufac-



	<p>turing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. <i>CIRP Annals</i> 65(2):737–60. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004</p>
Tilton et al. 2017	<p>Tilton, B., E. Dobner, und J. Holdowsky. 2017. 3D opportunity for standards. <i>Deloitte Insights</i>. Abgerufen am 22. Januar 2021 (<a href="https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-standards-for-3d-printed-products.html">https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-standards-for-3d-printed-products.html</a>)</p>
Ultimaker 2019	<p><i>Ultimaker.com</i>. Abgerufen am 22. Januar 2021 (<a href="http://ultimaker.com/">http://ultimaker.com/</a>).</p>
VDI 3405 2014	<p><i>VDI 3405 - Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen.</i></p>
VDI 3405 Blatt 2 2013	<p><i>VDI 3405 Blatt 2 - Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung.</i></p>
VDI 3405 Blatt 3.2	<p><i>VDI 3405 Blatt 3.2 - Additive Fertigungsverfahren - Gestaltungsempfehlungen - Prüfkörper und Prüfmerkmale für limitierende Geometrieelemente.</i></p>
VDI 3405 Blatt 3.4 2019	<p><i>VDI 3405 Blatt 3.4 - Additive Fertigungsverfahren - Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Materialextrusionsverfahren.</i></p>
VDI 3405 Blatt 4.1 2019	<p><i>VDI 3405 Blatt 4.1 - Additive Fertigungsverfahren - Ergänzungen zu ISO/ASTM DIS 52903-1: Materialextrusion von Kunststoffbauteilen - Charakterisierung des Filaments.</i></p>
VDI 3405 Blatt 7 2019	<p><i>VDI 3405 Blatt 7 - Additive Fertigungsverfahren - Güteklassen für additiv gefertigte Kunststoffbauteile.</i></p>

- VP-Scientific 2019      Viscosity Tables. *V&P Scientific, Inc.* Abgerufen am 22. Januar 2021 ([http://www.vp-scientific.com/Viscosity\\_Tables.htm](http://www.vp-scientific.com/Viscosity_Tables.htm)).
- Weber 1998              Weber, Helmut. 1998. *Rentabilität, Produktivität und Liquidität: Größen zur Beurteilung und Steuerung von Unternehmen*. 2. Aufl. Wiebaden: Gabler Verlag. ISBN: 978-3-409-12800-1
- Weisberg 2015          Weisberg, Michael. 2015. *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*. *Biol Philos* 30, 299–310. DOI: 10.1007/s10539-015-9475-1
- Westkämper 1991      Westkämper, E., Hrsg. 1991. *Integrationspfad Qualität*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-53247-7
- Westkämper 1997      Westkämper, E., Hrsg. 1997. *Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-60373-0
- Westkämper und  
Löffler 2016          Westkämper, E. und C. Löffler. 2016. *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-48913-0
- Westkämper und  
Zahn 2009              Westkämper, E. und E. Zahn, Hrsg. 2009. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-21889-0

- Wohlers, Terry 2017 Wohlers, T. 2017. *Additive Manufacturing State of the Industry Report*. 22. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates.
- Wohlers, Terry 2018 Wohlers, T. 2018. *Additive Manufacturing State of the Industry Report*. 23. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates.
- Wohlers, Terry 2019 Wohlers, T. 2019. *Additive Manufacturing State of the Industry Report*. 24. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates.
- Zhang und Chou 2008 Zhang, Y. und K. Chou. 2008. A Parametric Study of Part Distortions in Fused Deposition Modelling Using Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 222(8):959–68. DOI: 10.1243/2F09544054JEM990
- Zhang und Shapiro 2018 Zhang, Y. und V. Shapiro. 2018. Linear-Time Thermal Simulation of As-Manufactured Fused Deposition Modeling Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140(7):071002. DOI: 10.1115/1.4039556
- Zhou und Hsieh 2017 Zhou, X. und S. Hsieh. 2017. Thermal analysis of fused deposition modeling process using infrared thermography imaging and finite element modeling. Proc. SPIE 10214, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX, 1021409. DOI: 10.1117/12.2262796
- Zhou et al. 2016 Zhou, Y., T. Nyberg, G. Xiong, und D. Liu. 2016. Temperature Analysis in the Fused Deposition Modeling Process.

S. 678–82 in *2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Beijing, China: IEEE. DOI: 10.1109/ICISCE.2016.150

## 8.2 Literatur Wirkmechanismen

Alafaghani, A., A. Qattawi, B. Alrawi, und A. Guzman. 2017. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing* 10:791–803. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.079

Anitha, R., S. Arunachalam, und P. Radhakrishnan. 2001. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling. *Journal of Materials Processing Technology* 4. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3

Bellini, A., S. Güçeri, und M. Bertoldi. 2004. Liquefier Dynamics in Fused Deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126(2):237–46. DOI: 10.1115/1.1688377

Boschetto, A., V. Giordano, und F. Veniali. 2013. Surface Roughness Prediction in Fused Deposition Modelling by Neural Networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67(9–12):2727–42. DOI: 10.1007/s00170-012-4687-x

Chacón, J. M., M. A. Caminero, E. García-Plaza, und P. J. Núñez. 2017. Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection. *Materials & Design* 124:143–57. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065

Dinwiddie, R. B., L. J. Love, und J. C. Rowe. 2013. „Real-Time Process Monitoring and Temperature Mapping of a 3D Polymer Printing Process“. S. 87050L in, herausgegeben von G. R. Stockton und F. P. Colbert. Baltimore, Maryland, USA. DOI: 10.1117/12.1518454

Faes, M., F. Vogeler, K. Coppens, H. Valkenaers, E. Ferraris, W. Abbeloos, und T. Goedemé. o. J. Process Monitoring of Extrusion Based 3D Printing via Laser Scanning. 2014. Conference Proceedings PMI 6: 363-367. DOI: 10.13140/2.1.5175.0081

Galantucci, L. M., F. Lavecchia, und G. Percoco. 2009. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals* 58(1):189–92. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.071

Li, L., Q. X. Sun, C. T. Bellehumeur, und P. Gu. 2002. Investigation of Bond Formation in FDM Process. DOI: 10.26153/tsw/4500

Li, L. und Q. Sun. 2008. Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 4, Issue 2: 129-141. DOI: 10.1016/S1526-6125(02)70139-4

Martínez, J., J. L. Diéguez, E. Ares, A. Pereira, P. Hernández, und J. A. Pérez. 2013. Comparative between FEM Models for FDM Parts and their Approach to a Real Mechanical Behaviour. *Procedia Engineering* 63:878–84. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.230

Mitchell, G. R. und A. Tojeira, Hrsg. 2016. *Controlling the Morphology of Polymers: Multiple Scales of Structure and Processing*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-39320-9

Mohamed, O. A., S. H. Masood, und J. Bhowmik. 2016. Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters for Dimensional Accuracy Using I-Optimality Criterion. *Measurement* 81:174–96. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.12.011

Montero, M., S. Roundy, D. Odell, S. Ahn, und P. K. Wright. 2001. Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments. *Society of Manufacturing Engineers*. Abgerufen am 22. Januar 2021 ([http://ode11.com/publications/sme\\_rp\\_2001.pdf](http://ode11.com/publications/sme_rp_2001.pdf))

Pandey, P. M., N. V. Reddy, and S. G. Dhande. 2003. Real time adaptive slicing for fused deposition modelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43(1):61–71. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00164-5

Ramanath, H. S., C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah. 2008. Melt Flow Behaviour of Poly-Epsilon-Caprolactone in Fused Deposition Modelling. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine* 19(7):2541–50. DOI: 10.1007/s10856-007-3203-6

Reddy, B. V., N. V. Reddy, and A. Ghosh. 2007. Fused deposition modelling using direct extrusion. *Virtual and Physical Prototyping* 2(1):51–60. DOI: 10.1080/17452750701336486

Rodriguez, M. J.f. 1999. Modeling the Mechanical Behavior of Fused Deposition Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Polymer Components.

Sood, A. K., R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra. 2012. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research* 3(1):81–90. DOI: 10.1016/j.jare.2011.05.001

Sun, Q., G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu. 2003. Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostuctures and Properties of Prototypes. DOI:10.26153/tsw/5566

Sun, Q., G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu. 2008. Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments. *Rapid Prototyping Journal* 14(2):72–80. DOI: 10.1108/13552540810862028

Turner, N., R. Strong, and S. A. Gold. 2014. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling. *Rapid Prototyping Journal* 20(3):192–204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012

Wu, H., Z. Yu, and Y. Wang. 2017. Real-Time FDM Machine Condition Monitoring and Diagnosis Based on Acoustic Emission and Hidden Semi-Markov Model. *The*

*International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90(5–8):2027–36. DOI: 10.1007/s00170-016-9548-6

Ziemian, C., M. Sharma, und S. Ziemian. o. J. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. *Mechanical Engineering* 24. DOI: 10.5772/34233

# Anhang

Toleranzen für additive Extrusionsverfahren (VDI 3405 Blatt 7 2019; DIN 16742, 2013)

Toleranzgruppe		Grenzabmaße (GA) für Nenngrößenmaßbereiche															
		1 bis 3	> 3 bis 6	> 6 bis 10	> 10 bis 18	> 18 bis 30	> 30 bis 50	> 50 bis 80	> 80 bis 120	> 120 bis 180	> 180 bis 250	> 250 bis 315	> 315 bis 400	> 400 bis 500	> 500 bis 630	> 630 bis 800	> 800 bis 1 000
TG1	W	± 0,007	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	–	–	–	–	–	–	–	–
	NW	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	± 0,050	–	–	–	–	–	–	–	–
TG2	W	± 0,013	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	–	–	–
	NW	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	± 0,22	–	–	–
TG3	W	± 0,020	± 0,031	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70
	NW	± 0,031	± 0,050	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70	± 0,77
TG4	W	± 0,03	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15
	NW	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15	± 1,30
TG5	W	± 0,05	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80
	NW	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80	± 2,10
TG6	W	± 0,07	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80
	NW	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80	± 3,10
TG7	W	± 0,13	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50
	NW	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50	± 5,00
TG8	W	± 0,20	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00
	NW	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00	± 7,75
TG9		± 0,30	± 0,49	± 0,75	± 0,90	± 1,05	± 1,25	± 1,50	± 2,25	± 3,15	± 3,60	± 4,05	± 4,45	± 6,20	± 8,50	± 10,00	± 11,50
ANMERKUNG 1	W: werkzeuggestandene Maße; NW: nicht werkzeuggestandene Maße.																
ANMERKUNG 2	Für TG9 ist die Differenzierung von W- und NW-Maßen nicht erforderlich.																
ANMERKUNG 3	Als Nenngrößenmaße für Formteilzeichnungen gelten Toleranzmittelpunkte (N <sub>F</sub> = C <sub>F</sub> ). Zur Tolerierung des Abstandes paralleler Flächen, die sich nicht direkt gegenüberstehen, sondern zueinander versetzt angeordnet sind, ist als Nenngrößenmaß das D <sub>F</sub> -Maß nach 7.2 dieser Norm anzuwenden.																
ANMERKUNG 4	Maße unter 1 mm und über 1 000 mm sind vereinbarungspflichtig.																
ANMERKUNG 5	Für Allgmeintoleranzen sind ausschließlich die Grenzabmaße für nicht werkzeuggestandene Maße zu verwenden.																
ANMERKUNG 6	Toleranzen für Materialdicken sind vereinbarungspflichtig.																
ANMERKUNG 7	Allgmeintoleranzen sind in den Konstruktionsdokumentationen wie folgt anzugeben. Beispiel: DIN 16742 – TG6.																
ANMERKUNG 8	Nachweis von Maschinen- oder Prozessfähigkeit siehe Anhang E.																



## **Kurzvita des Autors**

Friedrich Bähr studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit Vertiefung der industriellen Produktion an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena. Ein Auslandssemester absolvierte er an der RMIT Melbourne, ein Praxissemester bei der EDAG in Detroit. 2010 schloss er das Studium mit dem Bachelor of Science durch Anfertigen einer Bachelorthesis bei Mercedes Benz EvoBus in Mannheim ab. Inhalt der Abschlussarbeit stellte die Analyse von Faktoren für Lieferengpässe bei der Montage von Linienbussen und die Entwicklung von Instrumenten zu deren Reduzierung dar.

Im Anschluss belegte er den Masterstudiengang Creación y Gestión de Empresas Innovadoras de Base Tecnológica (Gründung und Führung innovativer Unternehmen auf Technologiebasis) an der Universidad de Barcelona. 2012 schloss er den Studiengang mit der Masterthesis in Form eines Businessplans ab.

2013 begann Friedrich die Promotion an der Graduiertenschule GSaME der Universität Stuttgart. Er entwickelte eine Methode zur modellierungsbasierten, präventiven Qualitätssicherung im Fused Deposition Modeling (FDM). Inhalte der Dissertation stellen unter anderem die Untersuchung der physikalischen Wirkmechanismen, die Entwicklung eines FDM-spezifischen Prüfkörpers, eine FEM Simulation zur prädiktiven Abschätzung der Verformung und eine empirische Validierung dar. Im Rahmen der Forschungstätigkeit publizierte Friedrich verschiedene Fachbeiträge und referierte auf Konferenzen in Frankfurt und Stockholm.

2019 arbeitete er für die Unternehmensberatungsgesellschaft agiplan GmbH in Stuttgart und 2020 in dem 3D-Druck Start-Up eloprint in Esslingen. Im Anschluss beschäftigt er sich im Rahmen einer Technologieausgründung mit der Entwicklung einer Laservorheizeinrichtung für das FDM Verfahren. In dem Start-Up infrar3D werden innovative FDM Anlagen zum Generieren hochfester Bauteile entwickelt.