

# **DLR-IB-FA-BS-2017-272**

**Untersuchung des Einflusses von  
Prozessparametern bei der  
additiven Fertigung auf akustische  
Materialeigenschaften**

**Studienarbeit**

Arne Rotermund



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**DLR-IB-FA-BS-2017-272**

**Untersuchung des Einflusses von Prozess-  
parametern bei der additiven Fertigung  
auf akustische Materialeigenschaften**

**Zugänglichkeit:**

Stufe 1 (intern und extern unbeschränkt zugänglich)

Braunschweig, Juli, 2017

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Abteilungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. H. P. Monner

Der Bericht umfasst: 103 Seiten

Autoren:

Arne Rotermund



Autor 2 / Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer

Sebastian Rothe

Martin Radestock



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt





Technische  
Universität  
Braunschweig



INSTITUT FÜR  
KONSTRUKTIONSTECHNIK

# Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern bei der additiven Fertigung auf akustische Materialeigenschaften

## Studienarbeit

Arne Rotermund

Matr.-Nr.: 4141697

Juli 2017

Betreuer: M. Sc. Sebastian Rothe, Dipl.-Ing. Martin Radestock

**Erstprüfer:** Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer



## Studienarbeit / Bachelorarbeit / Masterarbeit

zum Thema:

### **Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern im 3D Druck auf akustische Materialeigenschaften**

#### Aufgabenstellung

Zur Effizienzsteigerung werden besonders in der Luftfahrt Leichtbaustrukturen verwendet. Dabei ist das Rapid Prototyping aktuell ein neues Verfahren zur Produktion von individuellen und gewichtsreduzierten Bauteilen. Jedoch sind diese Bauteile darauf ausgelegt, gleichmäßig verteilte Spannungen im Bauteil zu erreichen bei gleichzeitiger Minimierung der Masse. Meist wird bei dieser Konstruktion das vibroakustische Verhalten nicht weiter berücksichtigt. Die geringe Masse fördert die Schallabstrahlung in die Umgebung, wie z.B. in eine Flugzeugkabine.

Da bei generativen Fertigungsverfahren unterschiedliche Werkstoffe genutzt werden können, soll im Rahmen dieser Arbeit für ein gewähltes Material die vibroakustischen Eigenschaften untersucht werden. Weiterhin erzeugen die 3D Druckverfahren anisotrope Werkstoffeigenschaften, die Einfluss auf die Struktureigenschaften haben und diese verändern. Es sollen bei einem Fused Deposition Modelling (FDM) Verfahren verschiedene Prozessparameter bestimmt und experimentell untersucht werden, um durch die Anordnung von Material aus dem 3D Druck optimal für vibroakustische Anwendungen zu ermöglichen. Weiterhin sollen die im Experiment ermittelten Eigenschaften auf ein numerisches Simulationsmodell übertragen und validiert werden. Die Arbeit gliedert sich dabei in folgende Punkte:

- Literaturrecherche zu den vibroakustischen Eigenschaften von FDM Materialien
- Numerische Simulation einer Referenzstruktur zur Ermittlung von vibroakustischen Parametern
- Auslegung einer Referenzstruktur für ein 3D Druckverfahren
- Variation und Herstellung von Proben zur Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter
- Aufbau eines Prüfstands zur Bestimmung der vibroakustischen Parameter
- Schritthaltende Dokumentation der Ergebnisse

Die Arbeit wird am Institut für Konstruktionstechnik der TU Braunschweig und am Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig durchgeführt und von Herrn M. Sc. Christopher Blech, M. Sc. Sebastian Rothe und Dipl.- Ing. Martin Radestock betreut. Für die Arbeit stehen die Einrichtungen des TU Instituts IK und des DLR Instituts FA zur Verfügung.

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Arne Rotermund, durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Studienarbeit mit dem Titel Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern bei der additiven Fertigung auf akustische Materialeigenschaften selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Insbesondere sind auch solche Inhalte gekennzeichnet, die von betreuenden wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Konstruktionstechnik eingebracht wurden.

Die Arbeit oder Auszüge daraus haben noch nicht in gleicher oder ähnlicher Form dieser oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bewusst, dass Verstöße gegen die Grundsätze der Selbstständigkeit als Täuschung betrachtet und entsprechend der Prüfungsordnung geahndet werden.

Unterschrift:

---

Datum:

---

# Inhaltsangabe

In dieser Arbeit werden die Schwingeeigenschaften von Proben, hergestellt mit dem Fused-Layer-Manufacturing-Verfahren, untersucht. Dafür wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt und überprüft welche Prozessparameter des Verfahrens sich für die Messungen eignen. Nach der Auslegung einer Referenzstruktur wird ein Versuchsplan mit sechs verschiedenen untersuchten Faktoren und zwölf verschiedenen Probengruppen erstellt. Es werden unterschiedliche Drucker, Materialien, Bauteilorientierungen, Füllstrukturen, Schichtdicken und Extrudertemperaturen bei der Herstellung der Proben verwendet.

Die akustischen Materialeigenschaften werden in Ausschwingversuchen von einseitig eingespannten Balken untersucht. Es erfolgt eine Impulsanregung mittels Impulshammer und eine Messung der Schwingungsantwort mithilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers. Aus der ersten Biegeeigenfrequenz wird analytisch der Elastizitätsmodul berechnet und mit dem Körperschallnachhallzeitverfahren die Dämpfung des Systems ermittelt. Zudem werden Maßabweichungen und Streuungen der Probenmassen ermittelt und bei der Berechnung berücksichtigt.

Neben der analytischen Berechnung der Referenzstruktur erfolgt ein Vergleich der gemessenen Biegeeigenfrequenzen mit den Ergebnissen einer Modalanalyse eines einfachen Finite-Elemente-Modells.

# Abstract

This thesis investigates the influence of process parameters of the fused layer manufacturing process on acoustic material properties. Based on literature research several process parameters are chosen to be further investigated in this thesis. After the dimensioning of a reference structure to compare the measurements with calculations an experimental design is established. Six different factors are examined in twelve different specimen groups. The groups differ in the used printers, the materials, the part orientation, the infill structure, the layer heights and the extruder temperature.

The acoustic material properties are determined in a test with free oscillations of a cantilever beam. An impact hammer is used for the excitation of the structure and a laser Doppler vibrometer for the measurement of the oscillation. The first bending eigenfrequency is used to analytically calculate the Young's modulus of the material. The system damping loss factor at the eigenfrequencies is determined with a reverberation time method. In addition to the acoustical measurements the accuracy of the specimen's dimensions is determined as well as the specimen masses. The results are included in the calculation of the Young's modulus.

Furthermore, a simple mechanical finite-element model is created and a modal analysis is conducted. The results are compared with the measured and analytically calculated bending eigenfrequencies.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Vibroakustik</b>	<b>3</b>
2.1	Definition wichtiger akustischer Größen . . . . .	3
2.2	Akustische und strukturdynamische Messungen . . . . .	6
2.3	Numerische Simulation akustischer Phänomene . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Grundlagen der additiven Fertigung</b>	<b>16</b>
3.1	Prozesskette der additiven Fertigung . . . . .	16
3.2	Überblick verbreiteter additiver Verfahren . . . . .	18
3.2.1	Strahlschmelzverfahren . . . . .	18
3.2.2	Polymerisationsverfahren . . . . .	19
3.2.3	Extrusionsverfahren/Strangablegeverfahren . . . . .	19
3.2.4	Pulver-Binder-Verfahren . . . . .	20
3.3	Verwendete 3D-Drucker . . . . .	21
3.4	Prozessparameter im FLM-Verfahren . . . . .	23
3.4.1	Allgemeine Prozessparameter im FLM-Verfahren . . . . .	23
3.4.2	Spezielle Einstellungen der 3D-Drucker . . . . .	32
3.5	Materialübersicht des FLM-Verfahrens . . . . .	32
3.5.1	Standardkunststoffe . . . . .	33
3.5.2	Leistungskunststoffe . . . . .	34
3.5.3	Flexible Kunststoffe . . . . .	35
3.5.4	Verbundwerkstoffe . . . . .	35
3.5.5	Weitere Materialien . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Auslegung und Herstellung der Proben</b>	<b>38</b>
4.1	Auslegung der Referenzstruktur . . . . .	38
4.2	Erstellung des Versuchsplans . . . . .	42
4.2.1	Auswahl der Faktoren für den Versuchsplan . . . . .	42
4.2.2	Konstant gehaltene Parameter . . . . .	46
4.2.3	Versuchsplan . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Experimentelle Bestimmung des akustischen Übertragungsverhaltens</b>	<b>50</b>
5.1	Versuchsaufbau . . . . .	50
5.1.1	Vorversuche zur Ermittlung des Sensoreinflusses . . . . .	51
5.1.2	Vorversuche zur Ermittlung des Einflusses der Einspannung . . . . .	52
5.2	Durchführung . . . . .	55

---

<b>6</b>	<b>Simulation</b>	<b>58</b>
6.1	Analytische Berechnung der Referenzstruktur . . . . .	58
6.2	Numerische Berechnung der Referenzstruktur . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Auswertung</b>	<b>62</b>
7.1	Auswirkungen der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit . . . . .	62
7.1.1	Vergleich der Maßhaltigkeit der Drucker . . . . .	65
7.2	Auswirkung der Prozessparameter auf die Probenmasse . . . . .	65
7.3	Auswirkung der Prozessparameter auf den Elastizitätsmodul . . . . .	68
7.3.1	Auswirkung der Drucktemperatur auf den Elastizitätsmodul . . . . .	68
7.3.2	Auswirkung der Schichtdicke auf den Elastizitätsmodul . . . . .	69
7.3.3	Auswirkung der Probenorientierung auf den Elastizitätsmodul . . . . .	69
7.3.4	Auswirkung des Füllmusters auf den Elastizitätsmodul . . . . .	70
7.3.5	Unterschiede der zwei PLA-Materialien Natur und Weiß . . . . .	71
7.3.6	Einfluss der Variation des Druckers auf den Elastizitätsmodul . . . . .	73
7.4	Auswirkung der Prozessparameter auf die Dämpfung . . . . .	73
7.5	Zusammenfassung der ermittelten Faktoreinflüsse . . . . .	76
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Probenzahltable</b>	<b>79</b>
	<b>Literatur</b>	<b>80</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Impulshammer (Brüel & Kjør)	7
2.2	Messdaten eines Ausschwingversuchs im Zeitbereich (Versuchsaufbau siehe Kapitel 5.1)	8
2.3	Messdaten eines Ausschwingversuchs im Frequenzbereich	8
2.4	Messdaten eines Ausschwingversuchs im Frequenzbereich (logarithmische Darstellung)	9
2.5	Übertragungsfunktion. Ausschwingversuch. Messdaten im Frequenzbereich	10
2.6	Übertragungsfunktion. Ausschwingversuch. Messdaten im Frequenzbereich (logarithmische Darstellung)	10
2.7	Mechanisches Modell der Montage eines Beschleunigungssensors nach [KSA06, S.201]	14
3.1	Ultimaker Original [Ult16a]	22
3.2	DeltaWASP 2040 Turbo [DEL17]	22
3.3	Wanddickenvariation von oben nach unten mit 1, 5, 15 und 20 Linien	24
3.4	Wanddickenvariation von links nach rechts mit einer Wanddicke von 1, 3, 6 und 17	24
3.5	Variation der oberen und unteren Dicke. Von links nach rechts: 1 Schicht, 2 Schichten, 5 Schichten und 9 bzw. 10 Schichten (9 untere und 10 obere)	25
3.6	Füllmuster mit variierender Fülldicke. Links nach rechts: Oktogramm Spirale ( <i>Octagram Spiral</i> ), <i>Archimedische Kreise (Archimedean Chords)</i> , <i>Hilbert-Kurven (Hilbert Curve)</i> , <i>Geradlinig (Rectilinear)</i> , <i>Linien (Lines)</i> , <i>Konzentrisch (Concentric)</i> , <i>Honigwaben (Honeycomb)</i> . Oben nach unten: 20 %, 40 %, 60 %, 80 % [Sli16]	26
3.7	Infillorientierung mit Linienmuster und 20 % Infilldicke (Screenshot aus <i>Cura</i> )	27
3.8	Auswirkung der Bauteilorientierung auf die Wanddicke und obere/untere Dicke	28
3.9	Der Treppenstufeneffekt als Folge des Parameters Schichtdicke	29
3.10	Die häufig verwendeten Hilfsstrukturen <i>Brim</i> und <i>Raft</i>	30
4.1	Reduzierung der maximalen Länge bei einer 30 mm breiten Probe	40
4.2	Reduzierung der maximalen Länge bei 3 Proben mit 20 mm Breite	40
4.3	Abmessungen der gewählten Referenzstruktur in mm	42
4.4	Orientierungen von links nach rechts: flach, seitlich, vertikal	45
5.1	Einspannung einer Probe im Ausschwingversuch	51

---

5.2	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Drehmoments an der Einspannung auf die 1. Biegeeigenfrequenz mit verschiedenen Drehmomenten . . . . .	53
5.3	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Drehmoments an der Einspannung auf die erste Biegeeigenfrequenz mit 10 Nm sowie 20 Nm Drehmoment . . . . .	54
5.4	Nichtlineares Schwingverhalten . . . . .	56
5.5	Auswirkungen eines Medianfilters auf das Messsignal . . . . .	57
6.1	Undeformierte Struktur und Biegeeigenformen aus dem Finite-Elemente-Modell . . . . .	61
7.1	Gemessene Verlustfaktoren aller Probengruppen . . . . .	75

# Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der Faktoren und konstant gehaltenen Parameter für den Versuchsplan . . . . .	48
4.2	Versuchsplan . . . . .	49
5.1	Gemessene Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur . . . . .	57
6.1	Eigenwerte des Kragbalkens aus [DH16] . . . . .	58
6.2	Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur nach analytischer Berechnung mit verschiedenen Elastizitätsmoduln . . . . .	59
6.3	Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur nach analytischer und numerischer Berechnung . . . . .	60
7.1	Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-12 (PLA Natur, vertikal, Konzentrisch) . . . . .	64
7.2	Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-6 (PLA Natur, flach, Konzentrisch, 0,05 mm) . . . . .	64
7.3	Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-9 (PLA Natur, flach, Linien, 215°C) . . . . .	65
7.4	Gemessene Massen der Probengruppe UMO-5 (PLA Natur, flach, konzentrisch, 0,1 mm) . . . . .	66
7.5	Gemessene Massen der Probengruppe UMO-9 (PLA Natur, flach, Linien, 215°C) . . . . .	66
7.6	Gemessene Massen der Probengruppe UMO-7, UMO-8, UMO-9 und UMO-10 (Temperaturvariation) . . . . .	67
7.7	Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-7, UMO-8, UMO-9 und UMO-10, (Temperaturvariation) . . . . .	69
7.8	Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-4, UMO-5 und UMO-6 (Schichtdickenvariation) . . . . .	69
7.9	Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-4, UMO-11 und UMO-12 (Variation der Orientierung) . . . . .	70
7.10	Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-1, UMO-4 und UMO-8 (Füllmustervariation mit flacher Orientierung) . . . . .	71
7.11	Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-12 und UMO-13 (Füllmustervariation mit vertikaler Orientierung) . . . . .	71
7.12	Vergleich der Probengruppen UMO-8 und UMO-2 (Materialvariation mit UMO, flach, Linien) . . . . .	72
7.13	Vergleich der Probengruppen UMO-4 und UMO-3 (Materialvariation mit UMO, flach, konzentrisch) . . . . .	72

---

7.14 Vergleich der Probengruppen DW-1 und DW-2 (Materialvariation mit DW, vertikal, konzentrisch) . . . . .	73
7.15 Vergleich der Probengruppen DW-1 und UMO-12 (Druckervariation) . . .	73
7.16 Zusammenfassung der ermittelten Faktoreinflüsse . . . . .	76
A.1 Tabelle zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Proben pro Parametergruppe. Auszug für 4 Stufen aus [SvH10] . . . . .	79

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b>	<b>A</b> cylnitril <b>B</b> utadien <b>S</b> tyrol
<b>AM</b>	<b>A</b> dditive <b>M</b> anufacturing
<b>ASA</b>	<b>A</b> crylester- <b>S</b> tyrol- <b>A</b> crylnitril
<b>BDP</b>	<b>B</b> iodegradable <b>P</b> lastics
<b>CAD</b>	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>D</b> esign
<b>DLP</b>	<b>D</b> igital <b>L</b> ight <b>P</b> rocessing
<b>DW</b>	<b>D</b> elta <b>W</b> asp Turbo 2040
<b>EBM</b>	<b>E</b> lectron <b>B</b> eam <b>M</b> elting
<b>FDM</b>	<b>F</b> used <b>D</b> eposition <b>M</b> odelling
<b>FEM</b>	<b>F</b> inite <b>E</b> lemente <b>M</b> ethode
<b>FFF</b>	<b>F</b> used <b>F</b> ilament <b>F</b> abrication
<b>FFT</b>	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform
<b>FLM</b>	<b>F</b> used <b>L</b> ayer <b>M</b> odelling/ <b>M</b> anufacturing
<b>FRF</b>	<b>F</b> requency <b>R</b> esponse <b>F</b> unction
<b>HIPS</b>	<b>H</b> igh <b>I</b> mpact <b>P</b> olystyrene
<b>PA</b>	<b>P</b> olyamid
<b>PC</b>	<b>P</b> olycarbonat
<b>PEI</b>	<b>P</b> olyetherimid
<b>PET</b>	<b>P</b> olyethyletherephthalat
<b>PETG</b>	<b>P</b> olyethyletherephthalat- <b>G</b> lycol
<b>PLA</b>	<b>P</b> oly <b>L</b> actic <b>A</b> cid
<b>PMMA</b>	<b>P</b> oly <b>m</b> ethyl <b>m</b> ethacrylat
<b>PP</b>	<b>P</b> olypropylen
<b>PPSF</b>	<b>P</b> olyphenylsulfone

---

<b>PS</b>	<b>P</b> olystyrol
<b>PVA</b>	<b>P</b> olyvinylalcohol
<b>RM</b>	<b>R</b> apid <b>M</b> anufacturing
<b>RP</b>	<b>R</b> apid <b>P</b> rototyping
<b>SBC</b>	<b>S</b> tyrol- <b>B</b> utadien- <b>B</b> lockcopolymer
<b>SL</b>	<b>S</b> tereolithographie
<b>SLM</b>	<b>S</b> elective <b>L</b> aser <b>M</b> elting
<b>SLS</b>	<b>S</b> elektives <b>L</b> aser <b>S</b> intern
<b>STL</b>	<b>S</b> tandard <b>T</b> ransformation/ <b>T</b> riangulation <b>L</b> anguage
<b>TPA</b>	<b>T</b> hermoplastische Copolyamide
<b>TPC</b>	<b>T</b> hermoplastische Copolyester
<b>TPE</b>	<b>T</b> hermoplastische <b>E</b> lastomere
<b>TPU</b>	<b>T</b> hermoplastische <b>E</b> lastomere auf <b>U</b> rethanbasis
<b>TPS</b>	<b>T</b> hermoplastische <b>S</b> tyrol- <b>B</b> lockcopolymer
<b>UMO</b>	<b>U</b> ltimaker <b>O</b> riginal+

# Symbolverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Benennung</b>	<b>Einheit</b>
$a$	Beschleunigung	$m/s^2$
$v$	Geschwindigkeit	$m/s$
$v$	Schnelle	$m/s$
$p$	Schalldruck	$Pa$
$L_p$	Schalldruckpegel	$dB$
$P$	Leistung	$W (Js^{-1})$
$f$	Frequenz	$Hz$
$\omega$	Kreisfrequenz	$rad/s$
$\Lambda$	Logarithmisches Dekrement	-

# Kapitel 1

## Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Produkte gewinnt die Optimierung der akustischen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung. Dies hat zum einen technische und zum anderen gesellschaftliche, soziale und politische Gründe. Ein technischer Grund für neue akustische Herausforderungen in der Produktentwicklung stellt beispielsweise der Ersatz eines Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor dar. Hierdurch werden viele Geräusche wahrgenommen, die zuvor durch die Geräusche der Verbrennungskraftmaschine verdeckt wurden. Auch die zunehmende Sensibilisierung für die negativen Auswirkungen von Lärm und die daraus entwickelten Normen zum Schutz von Arbeitnehmern und Umwelt stellen Produktentwickler vor vibroakustische Herausforderungen. Dadurch steigt der Bedarf, akustisches Verhalten frühzeitig zuverlässig vorhersagen und bestimmen zu können. Um den zukünftigen akustischen Problemstellungen gewachsen zu sein, werden zudem neue Lösungsansätze benötigt.

Der Fortschritt in der additiven Fertigung ermöglicht es kostengünstig und frühzeitig im Produktentwicklungsprozess produktnahe Prototypen herzustellen und die Produktentwicklungszeit damit zu verkürzen. In manchen Bereichen ist sogar die additive Fertigung von Endprodukten (Rapid Manufacturing) wirtschaftlich sinnvoll geworden. Es besteht die Möglichkeit, komplexe Strukturen angepasst an die Bedürfnisse des Kunden ohne erhöhte Fertigungskosten herzustellen.

Es stellt sich nun die Frage, ob durch die Nutzung der vielfältigen Freiheiten der additiven Fertigung ein gewünschtes akustisches Verhalten eingestellt werden kann. Hierdurch

könnte der Mehrwert additiver Fertigung erhöht und das Leichtbaupotential besser ausgeschöpft werden. Des Weiteren ist von Interesse, inwieweit additiv gefertigte Prototypen ein reproduzierbares Materialverhalten sowie eine Abhängigkeit von den Prozessparametern der Fertigung aufweisen. Dies ist für die additive Fertigung akustischer Funktionsprototypen von großer Bedeutung.

Mehrere Studien [ES14, MKM<sup>+</sup>16, CRD<sup>+</sup>17] haben ergeben, dass die Prozessparameter, insbesondere die Füllstruktur und Bauteilorientierung, einen Einfluss auf die Steifigkeit und Festigkeit von Bauteilen besitzen. Diese Eigenschaften wurden mittels Zugproben ermittelt. In dieser Arbeit wird der Einfluss der Prozessparameter auf akustische Eigenschaften untersucht.

Es wird zunächst der Stand der Technik in der Vibroakustik und der additiven Fertigung dargestellt. Nachfolgend wird die Herstellung der für die Untersuchung relevanten Proben beschrieben. Die experimentelle Untersuchung der akustischen Eigenschaften schließt sich daran an gefolgt von der Simulation. Eine Auswertung der Experimente und der Simulation wird danach durchgeführt. Abschließend wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick gegeben.

## Kapitel 2

# Grundlagen der Vibroakustik

In diesem Kapitel werden einige für diese Arbeit relevante Grundlagen der Vibroakustik erläutert. Nach einer kurzen Einführung in die Akustik wird auf Schwingungsmessungen und abschließend auf die Berechnung vibroakustischer Probleme eingegangen.

### 2.1 Definition wichtiger akustischer Größen

Die Vibroakustik, auch als Maschinenakustik bezeichnet, beschäftigt sich mit der Schallentstehung, Schallausbreitung und Schallabstrahlung durch Maschinen [KSA06]. Es wird deshalb zunächst darauf eingegangen, was Schall ist.

**Schall** stellt eine Schwingung eines elastischen Mediums im vom Menschen wahrnehmbaren Frequenzbereich dar, welche sich in Form von Schallwellen ausbreitet [KSA06]. Die Grenzen der Wahrnehmbarkeit werden im Tieffrequenzbereich als Infraschall und im Hochfrequenzbereich als Ultraschall bezeichnet [Deu09]. Dazwischen, also in einem Bereich von 16 Hz bis 16.000 Hz [Mös15], spricht man von Schall. Diese Grenzen sind jedoch von Mensch zu Mensch sehr unterschiedlich und vom Alter, Geschlecht und weiteren Faktoren wie der Lärmbelastung am Arbeitsplatz oder in der Freizeit abhängig. Ältere Menschen können zum Beispiel hohe Frequenzen schlechter bis gar nicht mehr wahrnehmen [Mös15]. Das liegt daran, dass das Gehör bereits ab einem Alter von etwa 25 Jahren altert.

Schall kann in Luftschall, Flüssigkeitsschall und Körperschall unterschieden werden. Luftschall stellt eine Dichtekonzentrationsschwankung von Luftteilchen dar. Eine Luftschallwelle breitet sich immer in Form von Longitudinalwellen aus, bei denen die Richtung der Schwingung gleich der Ausbreitungsrichtung der Welle ist. Diese Dichtewellen werden durch den **Schalldruck** charakterisiert. Der vom Menschen wahrnehmbare Schalldruck stellt dabei den Wechseldruck dar, der sich dem statischen Luftdruck überlagert.

Wahrgenommen werden Druckschwankungen ab etwa  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ <sup>1</sup> abhängig von der Frequenz des Schalls sowie der Hörfähigkeit des Menschen. Das bedeutet, dass unser Ohr bereits die Bewegung weniger Luftteilchen wahrnimmt und damit ein sehr sensibles Sinnesorgan ist. Die Altersabhängigkeit, Geschlechterabhängigkeit und individuelle Unterschiede des Hörvermögens machen aus der Akustik eine Disziplin, die nicht rein aus mechanischer Sicht betrachtet werden kann, sondern auch physiologische und soziologische und viele weitere Aspekte berücksichtigen muss. Ab einem Schalldruck von etwa  $20 \text{ Pa}$ <sup>2</sup> wird dieser nicht mehr als Geräusch, sondern als Schmerz wahrgenommen. Dieser Bereich von der Hörschwelle bis zur Schmerzgrenze umfasst  $6^3$  Dekaden, was zu einer erschwerten Interpretation des Schalldrucks führt. Aus diesem Grund wird in der Akustik oft stattdessen mit dem **Schalldruckpegel** oder anderen Pegeln gearbeitet [Mös15].

Ein Pegel in dB, der für Pegel üblichen Pseudoeinheit Dezibel, ist durch folgende Gleichung für Energiegrößen, also Größen, die proportional zur Energie sind, definiert:

$$L_{x,Energiegroesse} = 10 \cdot \lg\left(\frac{x}{x_0}\right) dB. \quad (2.1)$$

Der Buchstabe L steht hierbei für level (engl.: Pegel). Für  $x$  wird der betrachtete Wert und für  $x_0$  ein Bezugswert eingesetzt. Der Faktor 10 ergibt sich durch die Definition der Pseudoeinheit Dezibel. Die Einheit Bel kennzeichnet, dass der dekadische Logarithmus eines Verhältnisses zweier Größen ermittelt wurde. Ein Dezibel ist ein Zehntel Bel [Deu13]. Diese Gleichung wird für die Berechnung von Energiegrößenpegeln verwendet.

Bei der Berechnung eines Feldgrößenpegels muss berücksichtigt werden, dass Feldgrößen in einem quadratischen Verhältnis zur Energie stehen. Die Pegeldefinition ist deshalb wie

<sup>1</sup> Der Wert bezieht sich auf die Hörfähigkeit gesunder Menschen bei 1000 Hz. Bei tiefen Frequenzen liegt die Hörschwelle höher. Siehe 0 dB Isophone z.B. in [Mös15, S.10].

<sup>2</sup> Wie oben bezieht sich der Wert auf einen Ton mit einer Frequenz von 1000 Hz. Teilweise ist auch der Wert 200 Pa als Schmerzschwelle in der Literatur zu finden. Siehe [Mös15, S.6/S.14] und [KSA06, S.4].

<sup>3</sup> Laut [Mös15, S.6] 7 Dekaden bis zur Schmerzschwelle bei 200 Pa

folgt:

$$L_{x,Feldgroesse} = 10 \cdot \lg\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{x}{x_0}\right) \text{ dB}. \quad (2.2)$$

Der Schalldruckpegel lässt sich durch Einsetzen des Schalldrucks  $p$  sowie des Bezugswerts  $p_0$ <sup>4</sup> berechnen:

$$L_p = 10 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB}. \quad (2.3)$$

Die Nutzung des Logarithmus bei der Betrachtung Schalldrucks ergibt insbesondere unter dem Hintergrund des Weber-Fechner-Gesetzes Sinn. Dieses besagt, dass Reiz und Empfindung in einem logarithmischen Verhältnis zueinander stehen [Mös15, S.5].

Das Ergebnis der Pegelberechnung aus dem Schalldruck ist eine Skala von der Hörschwelle bei 0 dB bis zur Schmerzschwelle bei 120 dB. Eine Pegeländerung von 1 dB entspricht etwa der minimal wahrnehmbaren Pegeländerung.

Pegel sind für Körperschallgrößen von ebenso großem Interesse wie für Luftschallgrößen. **Körperschall** stellt die Schwingung eines Festkörpers dar und kann sich im Gegensatz zum Luftschall in Form verschiedener Wellentypen ausbreiten. Neben der eher unwichtigen reinen Longitudinalwelle sind die Transversalwellen bzw. Wellen mit transversalem Anteil von großem Interesse. Bei Transversalwellen liegt eine Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle vor. Dies ist bei Schubwellen, Biege-Wellen, Torsionswellen und Dehnwellen der Fall. Letztere haben trotz des vorwiegend longitudinalen Charakters der Schwingung einen transversalen Anteil aufgrund der Querkontraktion, welche infolge der Dehnung auftritt. Zur Beschreibung von Körperschallwellen können die Feldgrößen Auslenkung, Körperschallschnelle oder Beschleunigung oder Energiegrößen wie die Strukturintensität bzw. Pegel davon verwendet werden.

Während Körperschall und Luftschall nahezu immer in einem mechanischen System vorkommen, ist Flüssigkeitsschall nur dann vorhanden, wenn ein Arbeitsmedium in der flüssigen Phase im System enthalten ist [KSA06]. Da dies in dieser Arbeit nicht der Fall ist, wird nicht weiter auf Flüssigkeitsschall eingegangen.

<sup>4</sup> Der Bezugsschalldruck  $p_0$  entspricht genau der Hörschwelle bei 1000 Hz, also  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

## 2.2 Akustische und strukturdynamische Messungen

Zum Verständnis akustischer Phänomene und zum Abgleich (Validierung) mit numerischen Berechnungen werden Messungen durchgeführt. In diesem Kapitel werden einige Grundlagen der akustischen Messtechnik sowie strukturdynamischer Messungen beschrieben. Diese werden zum Verständnis der Untersuchungen des Einflusses der Prozessparameter auf die akustischen Eigenschaften benötigt.

Untersuchungen der Schwingungseigenschaften und der damit verbundenen Schallabstrahlung einer Struktur können in Prüfstandsmessungen oder im realen Betrieb erfolgen. Bei der Messung im realen Betrieb eines Automobils sind viele Schallquellen (Motor, Getriebe, Fahrwerk, etc.) vorhanden. Alternativ kann ein Teil des Fahrzeugs demontiert werden und in einem Prüfstand separat mit einer künstlichen Anregung beaufschlagt und das Schwingungsverhalten gemessen werden. Beide Varianten haben ihre Vorteile. Im Folgenden wird auf künstliche Anregungen eingegangen, da in dieser Arbeit eine allgemeine produktunabhängige Strukturuntersuchung erfolgt.

Eine in der Praxis verbreitete Untersuchung von Bauteilen ist die experimentelle Modalanalyse [Pff10, S.55]. Hierbei werden die Eigenformen (Moden), Eigenfrequenzen und die modale Dämpfung einer Struktur untersucht. Die Eigenfrequenzen und Moden haben eine große Bedeutung in der Akustik, da bei der Anregung einer Mode eine besonders starke Antwort (Resonanz) der Struktur erfolgt. Die experimentelle Modalanalyse kann in Phasenresonanzverfahren und Phasentrennungsverfahren unterschieden werden [Nat14]. Bei der Phasenresonanz wird gezielt eine einzelne Eigenschwingung angeregt. Durch die direkte Messung der Resonanzfrequenz kann eine hohe Genauigkeit erzielt werden, die jedoch mit vergleichsweise hohem experimentellen Aufwand verbunden ist. Phasenresonanztechnik wird deshalb vorwiegend bei sicherheitsrelevanten Untersuchungen angewandt [Nat14]. Die künstliche Anregung einer Resonanzfrequenz kann durch eine generierte Sinusschwingung eines elektrodynamischen Schwingerregers (Shaker) erfolgen. Bei Verfahren der Phasentrennung wird dagegen in Form eines Impulses oder einer instationären Anfangsbedingung angeregt [MPS16, S.13]. Für eine Impulsanregung kann ein Impulshammer, zu sehen in Abbildung 2.1, verwendet werden. Dieser ist mit einem Kraftsensor an der Spitze versehen, sodass der genaue Kraftverlauf bei der Anregung berücksichtigt werden kann. Durch die Messung der Schwingungsantwort und die Analyse der Messdaten durch mathematische Verfahren werden in einer einzelnen

Messung die Systemeigenschaften bestimmt, wodurch der experimentelle Aufwand, verglichen mit Phasenresonanzverfahren, auf Kosten des rechentechnischen Aufwands sinkt [Nat14, S.349]. Aufgrund der heutzutage kostengünstig verfügbaren Rechenleistung ist der deutlich geringere experimentelle Aufwand ein großer Vorteil der Phasentrennungstechnik, da mit einer einzelnen Messung ein großer Frequenzbereich mit ausreichender Genauigkeit untersucht werden kann.



ABBILDUNG 2.1: Impulshammer (Brüel & Kjær)

Eine bewährte Methode zur Ermittlung von Dämpfungskennwerten stellt der Ausschwingversuch dar [DH16], bei dem eine Struktur in Form eines Impulses oder einer Anfangsauslenkung angeregt wird und das Ausschwingverhalten der Struktur in Folge der Anregung gemessen wird. Aus den Messwerten des Ausschwingvorgangs können die Eigenfrequenzen mit Hilfe von Frequenzanalysen wie der Fast-Fourier-Transformation (FFT), einem Algorithmus zur Abbildung von Signalen vom Zeitbereich in den Frequenzbereich, ermittelt werden.

Abbildung 2.2 zeigt die Messdaten eines Ausschwingversuchs im Zeitbereich. In Abbildung 2.3 ist dagegen das Ergebnis der FFT, also das Schwingverhalten im Frequenzbereich, dargestellt. Es ist ein eindeutiges Maximum im Bereich unterhalb von 100 Hz zu erkennen. Ein zweites lokales Maximum liegt etwas unter 500 Hz. Diese Maxima sind die dominierenden Anteile der Schwingung und ihre Frequenzen können als Eigen- oder Resonanzfrequenzen bezeichnet werden.

Durch die logarithmische Darstellung der FFT in Abbildung 2.4 können weitere Schwingungsanteile sichtbar gemacht werden, die deutlich weniger dominant sind. In Abbildung

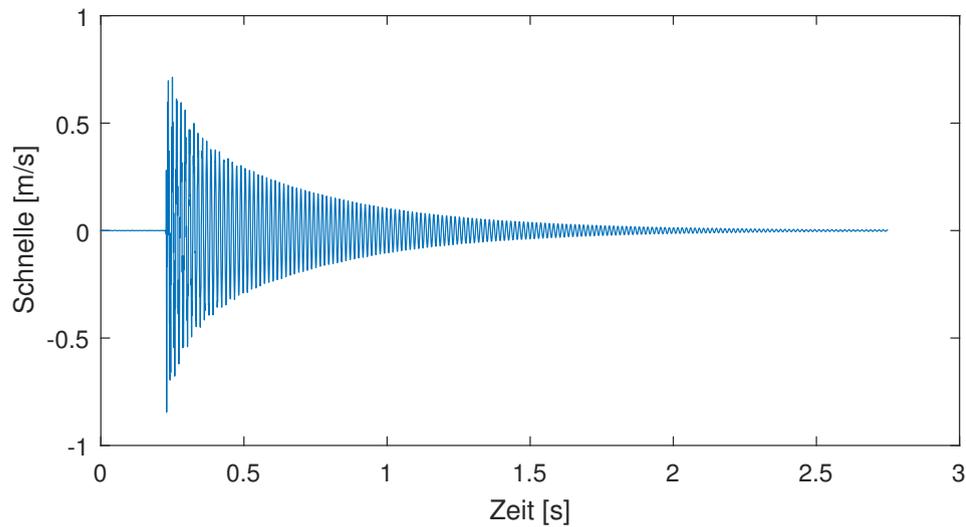


ABBILDUNG 2.2: Messdaten eines Ausschwingversuchs im Zeitbereich (Versuchsaufbau siehe Kapitel 5.1)

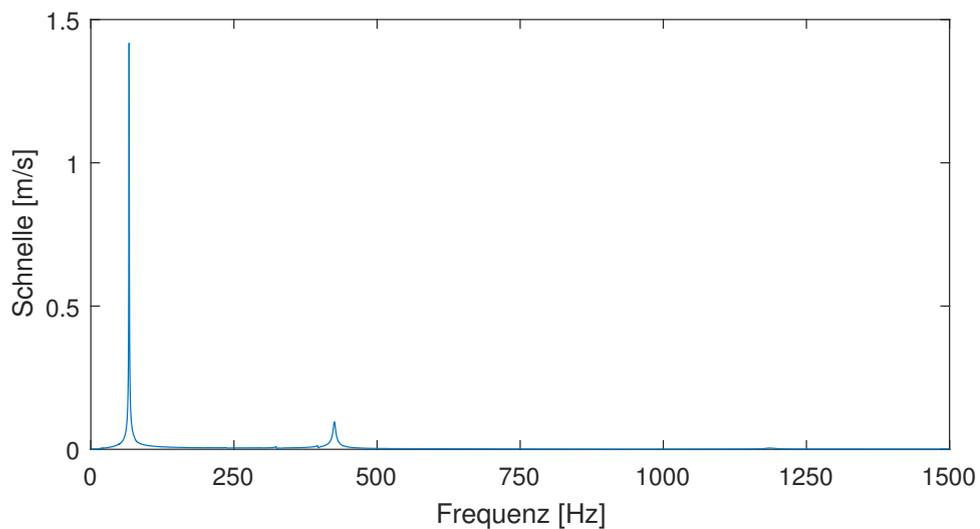


ABBILDUNG 2.3: Messdaten eines Ausschwingversuchs im Frequenzbereich

2.3 ist oberhalb von 500 Hz kein Maximum mehr zu erkennen. Die logarithmische Darstellung in Abbildung 2.4 zeigt dagegen deutlich ein weiteres lokales Maximum bei etwa 1200 Hz, einer weiteren Resonanzfrequenz.

Die FFT berücksichtigt in diesem Fall nur das Ausschwingverhalten, jedoch nicht die Anregung. Ist das Verhältnis von Anregungs- zu Antwortverhalten von Interesse, wird dieses mit einer Übertragungsfunktion (Frequency Response Function - FRF) beschrieben [Mös10, S.502]. Allgemein wird die Übertragungsfunktion häufig mit dem Buchstaben  $H$  bezeichnet. Das Antwortverhalten der Struktur kann dabei über die Auslenkung,

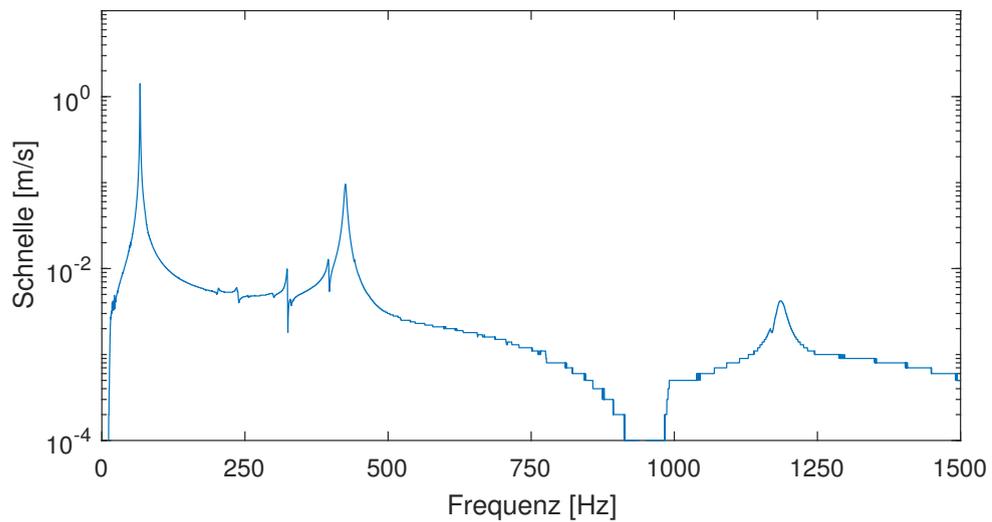


ABBILDUNG 2.4: Messdaten eines Ausschwingversuchs im Frequenzbereich (logarithmische Darstellung)

Schnelle oder die Beschleunigung beschrieben werden. Das Verhältnis der Schnelle zur Anregungskraft wird als Admittanz oder Mobilität bezeichnet. Gleichung 2.4 beschreibt diesen Zusammenhang. Es handelt sich bei der Admittanz, Kraft und der Schnelle um vektorielle Größen. In diesem Fall wird der Zusammenhang jedoch auf den eindimensionalen Fall vereinfacht und durch skalare Größen beschrieben.

$$Y(\omega) = \frac{v(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.4)$$

Abbildung 2.5 zeigt die Übertragungsfunktion der bereits in Abbildung 2.4 betrachteten Messung. Durch die Berücksichtigung der Anregungskraft in der jeweiligen Frequenz kann offensichtlich noch deutlicher die dritte Resonanzfrequenz dargestellt werden.

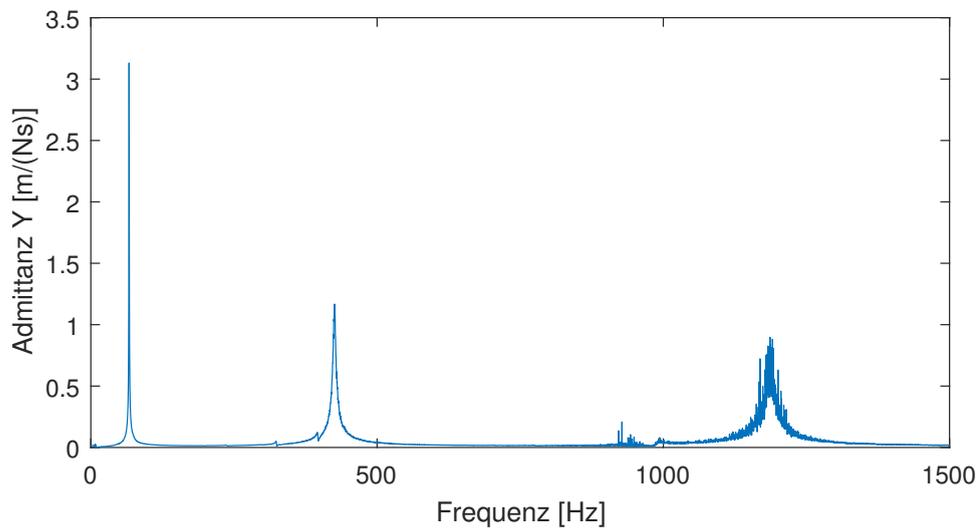


ABBILDUNG 2.5: Übertragungsfunktion. Ausschwingversuch. Messdaten im Frequenzbereich

In Abbildung 2.6 ist die Admittanz logarithmisch aufgetragen und der Frequenzbereich von 1500 Hz auf 3000 Hz erweitert. Es ist deutlich eine weitere Resonanzfrequenz bei etwa 2300 Hz zu erkennen. Für die Analyse weiterer Moden ist eine weitere Aufbereitung der Messdaten erforderlich, da ab etwa 1500 Hz zunehmend Störungen und Rauschen das Signal dominieren<sup>5</sup>.

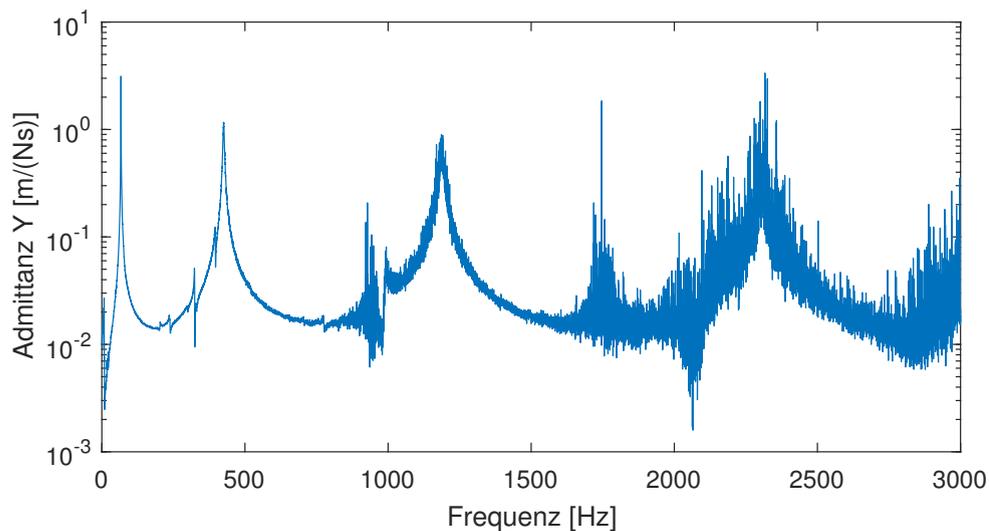


ABBILDUNG 2.6: Übertragungsfunktion. Ausschwingversuch. Messdaten im Frequenzbereich (logarithmische Darstellung)

<sup>5</sup> Zu beachten ist zudem, dass die Anregung bei dieser Messung mit einem Impulshammer und einer Kunststoffspitze erfolgte, welche sich nicht für die Anregung hoher Frequenzen eignet. Für höhere Frequenzen ist eine Aluminiumspitze vorzuziehen.

Zur Ermittlung der Dämpfung aus der Ausschwingkurve stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Eine sehr einfache ist die des logarithmischen Dekrements.

Hierbei werden zwei aufeinanderfolgende Schwingungsmaxima und daraus die Amplitudenabnahme pro Periode ermittelt [MK10, S.167]. Mit der Formel 2.5 wird das logarithmische Dekrement  $\Lambda$  mit einer Schwingungsamplitude  $A_n$  und der darauffolgenden Amplitude  $A_{n+1}$  berechnet:

$$\Lambda = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right). \quad (2.5)$$

Bei nicht direkt aufeinanderfolgenden Maxima kann auch Formel 2.6 aus [DH16, S.51] verwendet werden, wobei  $T$  die Periodendauer und  $k$  die Anzahl der Perioden darstellt:

$$\Lambda = \frac{1}{k} \ln\left|\frac{A_n}{A_{n+kT}}\right|. \quad (2.6)$$

Das häufig zur Beschreibung gedämpfter Schwingungen verwendete Lehr'sche Dämpfungsmaß  $D$  kann aus  $\Lambda$  mit der Formel 2.7 aus [MPS16, S.65] berechnet werden:

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}. \quad (2.7)$$

Eine weitere Methode zur Dämpfungsermittlung stellt das Verfahren der Halbwertsbreite (Peak-Picking) dar [DH16, S.51]. Hier werden an den Resonanzfrequenzen die Punkte ermittelt, die 6 dB<sup>6</sup> unterhalb des Resonanzgipfels liegen [Mös10, S.523]. Die Differenz der Frequenz oberhalb der Resonanz  $f_2$  und unterhalb der Resonanz  $f_1$  geteilt durch die Resonanzfrequenz  $f_0$  führt auf den Dämpfungsgrad. Gleichung 2.8 aus [DH16, S.51] zeigt diesen Zusammenhang:

$$D = \frac{f_2 - f_1}{f_0}. \quad (2.8)$$

Bei sehr kleinen Dämpfungen sollte anstelle des Peak-Picking besser das Verfahren der Körperschallnachhallzeit verwendet werden [MK10, S.173]. Die Körperschallnachhallzeit  $T$  wird, wie bei der Nachhallzeitmessung in der Raumakustik, als die Zeit bestimmt, in der ein Schwingungsenergiepegel um 60 dB abfällt [MK10]. Der Verlustfaktor  $\eta$  kann aus der Körperschallnachhallzeit über die Formel 2.9 aus [MK10, S.173] ermittelt werden:

$$\eta = \frac{\ln 10^6}{\omega T} \approx \frac{2,2}{fT}. \quad (2.9)$$

<sup>6</sup> 6 dB bei der Verwendung von Feldgrößen, 3 dB bei Energiegrößen

Eine Umrechnung kann nach [MK10, S.150] durch die Formeln 2.10 oder 2.11 erfolgen:

$$\Lambda = \eta\pi, \quad (2.10)$$

$$D = 2\eta. \quad (2.11)$$

Ein wesentlicher Nachteil am Ausschwingversuch ist, dass die Schwingung von den ersten Eigenfrequenzen dominiert wird und hochfrequente Schwingungsanteile sehr schnell abklingen. Dieser Effekt erschwert die Ermittlung der höherfrequenten Eigenschwingungen sowie der Dämpfung in diesem Frequenzbereich. Die gezielte Untersuchung sollte hier besser mit Phasenresonanztechnik erfolgen. Aufgrund des deutlich höheren Aufwands beim Messen vieler Proben wird in dieser Arbeit auf diese Methoden verzichtet und ausschließlich das Ausschwingverhalten nach der Impulsanregung mit einem Impulshammer untersucht. Dies hat den Vorteil der einfachen Handhabung des Impulshammers, welcher keine feste Verbindung zum Messobjekt benötigt und dadurch Ankopplungsprobleme vermieden werden [MK10, S.493].

Um die Antwort der Struktur auf die Anregung zu erfassen, sind Messgeräte erforderlich. Das wohl am weitesten verbreitete Messgerät der akustischen Messtechnik ist das Mikrofon zur Messung des Schalldrucks. Es existieren viele verschiedene Funktionsprinzipien und Bauformen von Mikrofonen, auf die hier im Detail nicht weiter eingegangen werden soll, da bei vibroakustischen Messungen meist auf andere Messgeräte zurückgegriffen wird. Das gebräuchlichste Mikrofon-Funktionsprinzip ist das Kondensatormikrofon, welches eine vom Schalldruck abhängige Kondensatorspannung misst, die infolge einer Membranauslenkung auftritt. Da die Membran eine Seite des Kondensators ist, verändert sich der Elektrodenabstand und damit die Spannung. Über diese Spannung kann im Nachhinein das Schallereignis rekonstruiert werden, vorausgesetzt die Übertragungsfunktion des Mikrofons ist bekannt [Mös15, S.366]. In Spezialfällen werden Mikrofone auch für vibroakustische Messungen wie der Bestimmung von Biegewellenresonanzen verwendet. Hierfür müssen diese sehr nah an der zu messenden Probe befestigt werden um den abgestrahlten Luftschall ausreichend aufzunehmen [MK10, S.171].

Für Körperschallmessungen werden meistens andere Sensoren verwendet. Weit verbreitet sind die Beschleunigungssensoren, die mithilfe einer Piezokeramik eine elektrische Spannung erzeugen, sobald das Messobjekt und somit der damit verbundene Sensor und

eine darin enthaltene seismische Masse beschleunigt werden [Zel12, S.376]. Zwei große Nachteile dieser Sensoren sind die Beeinflussung der Schwingeneigenschaften des Messobjektes durch die Masse des Sensors sowie die Entstehung eines eigenen Schwingensystems durch die Ankopplung des Sensors [KSA06, S.200]. Dies führt zu einer Limitierung des Frequenzbereiches.

Ersteres kann durch die Gleichung 2.12 aus [KSA06, S.200] verdeutlicht werden. Hier ist  $\omega_{Ae}$  die Eigenfrequenz mit Sensor,  $\omega_e$  die Eigenfrequenz ohne Sensor,  $m_O$  die an der Schwingung beteiligte Masse des Messobjekts<sup>7</sup> und  $m_A$  die Sensormasse:

$$\omega_{Ae} = \omega_e \sqrt{\frac{m_O}{m_O + m_A}}. \quad (2.12)$$

Bei einem sehr leichten Messobjekt und einer Sensormasse, die der schwingenden Masse des Messobjektes entspricht, ist die Eigenfrequenz nach dieser Abschätzung mit Sensor nur etwa 71 % so hoch wie ohne Sensor. Selbst bei einem Sensor, der nur ein Zehntel der schwingenden Masse des Messobjektes besitzt, erhalten wir in der Messung nur etwa 95 % der tatsächlichen Eigenfrequenz des Messobjektes.

Der zweite Effekt, dass ein neues Schwingensystem durch den Sensor entsteht, ist in Abbildung 2.7 abgebildet. Eine ideale Montage würde bedeuten, dass die Piezokeramik, dargestellt durch die Steifigkeit  $c$ , direkt mit dem Bauteil, dargestellt durch die Masse  $M$ , und der seismischen Masse  $m_S$  verbunden ist. Durch die reale Montage wird das Schwingungssystem jedoch von der Steifigkeit  $c_B$  und der Dämpfung  $d_B$  der Verbindung zwischen Bauteil und Sensor, beispielsweise einer Verschraubung, einer Klebung oder der Verbindung mit Wachs, beeinflusst.

<sup>7</sup> Es ist nicht die gesamte Masse an der Schwingung beteiligt, sondern nur ein von der Frequenz abhängiger Anteil.  $m_O$  ist also für alle Frequenzen kleiner als die eigentliche Probenmasse [KSA06, S.199].

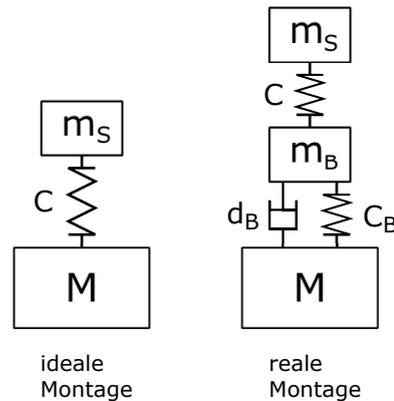


ABBILDUNG 2.7: Mechanisches Modell der Montage eines Beschleunigungssensors nach [KSA06, S.201]

Eine Alternative stellt die Messung der Schwing-/Körperschallschnelle mithilfe eines Laservibrometers dar. Hier wird der Dopplereffekt eines Laserstrahls genutzt, welcher an der zu messenden Struktur reflektiert wird. Durch die Frequenzverschiebung der reflektierten Strahlen kann die Oberflächenschnelle ermittelt werden. Diese Messmethode wird als Laserinterferometrie bezeichnet [Zel12, S.371]. Die Laserstrahlen beeinflussen das Messobjekt bei dieser Methode selbst bei kleinsten Objekten vernachlässigbar gering [Zel12, S.371]. Eine Ankopplung des Messsystems, wie dies bei mechanischen Sensoren erforderlich ist, entfällt ebenfalls. Der messbare Frequenzbereich ist dadurch sehr groß. Nachteile sind hier die höheren Anschaffungskosten sowie die geringe Eignung dieser Messtechnik in speziellen Messungen wie bei Realfahrtmessungen in der Fahrzeugtechnik. Voraussetzung für das Verfahren ist eine gute Lichtreflektion der Oberfläche, die gegebenenfalls mithilfe von Reflektorfolie sichergestellt werden muss.

Ein einzelner Laserstrahl ermöglicht lediglich die Messung der Schwingung in einer Richtung. Zur Ermittlung des räumlichen Schwingverhaltens werden häufig drei Laser in einer gemeinsamen Messeinrichtung (3D-Laser-Scanning-Vibrometer) verwendet. Für dünnwandige Strukturen (z.B. Bleche) ist gegebenenfalls ein Laser und die Schwingung in einer Richtung ausreichend, da diese hauptverantwortlich für die Schallabstrahlung ist [Zel12, S. 371].

## 2.3 Numerische Simulation akustischer Phänomene

Eine große Schwierigkeit in der Simulation akustischer Phänomene stellt die Frequenzabhängigkeit des Schalls dar. Abhängig von der Frequenz treten Beugungseffekte auf oder können vernachlässigt werden. Zudem ist es von großer Bedeutung, wie das Verhältnis von der Wellenlänge zu den betrachteten Objekten ist. Um diesen unterschiedlichen Problemen zu begegnen existieren verschiedene Ansätze. Es ist je nach Problemtyp ein passendes Verfahren auszuwählen.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit eignet sich besonders die Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie eignet sich hervorragend für vibroakustische Probleme mit einem begrenztem Volumen und der Betrachtung eines eingeschränkten Frequenzbereichs. Für andere Problemtypen stehen weitere Verfahren zur Verfügung wie das Spiegelquellenverfahren, die statistische Energieanalyse, die Randelementmethode oder Hybridverfahren, die mehrere Verfahren kombinieren.

In dieser Arbeit wird neben analytischen Berechnungen nur die FEM verwendet. Die Grundidee der FEM ist die Aufteilung eines Gebietes in viele einzelne (finite) Elemente, für die einfache physikalische Zusammenhänge gelten. Durch das schrittweise Lösen der Gleichungen für einzelne Elemente kann das Verhalten großer und komplexer Bauteile berechnet werden. Dabei ist die Methode nicht nur für mechanische Probleme anwendbar, sondern kann ebenfalls für die Berechnung thermischer, chemischer, elektrischer und weiterer Größen verwendet werden. In dieser Arbeit ist ein einfaches mechanisches Modell ausreichend, welches für eine Modalanalyse verwendet wird.

## Kapitel 3

# Grundlagen der additiven Fertigung

Die Additive Fertigung, welche oft auch als generative Fertigung, 3D-Druck, Rapid Prototyping oder Rapid Manufacturing bezeichnet wird (siehe [VDI14] für eine Abgrenzung der Begriffe), erlebte in den letzten Jahren ein erhebliches Wachstum [Woh17]. Bei der Produktentwicklung wird sie für die Prototypenfertigung (Rapid Prototyping) eingesetzt und ist im Begriff, sich ebenfalls in manchen Bereichen als Fertigungstechnologie für Endprodukte (Rapid Manufacturing - Direct Manufacturing [Geb13]), zum Beispiel für Hörgeräte, Implantate oder Triebwerksschaufeln, in der Industrie zu etablieren [Gru15]. Durch die Designfreiheiten und Prozesseigenheiten der additiven Fertigung ergeben sich neue Möglichkeiten, ein gewünschtes akustisches Verhalten einzustellen oder akustische Funktionsprototypen herzustellen. Zum Verständnis der Technologie und der daraus entstehenden Potentiale werden in diesem Kapitel die Grundlagen der additiven Fertigung behandelt. Hierfür wird zunächst die Prozesskette der additiven Fertigung beschrieben, nach der die Fertigung von Bauteilen abläuft. Darauf aufbauend wird ein Überblick über die verbreiteten Verfahren gegeben. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Drucker und die damit zusammenhängenden Prozessparameter diskutiert. Abschließend wird auf die erhältlichen Materialien eingegangen.

### 3.1 Prozesskette der additiven Fertigung

So unterschiedlich die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren sein mögen, verbindet sie doch fast immer die gleiche Prozesskette bei der Bauteilentstehung. Die typische

Prozesskette<sup>1</sup> beginnt mit der Idee für ein Bauteil, welche dann in einem CAD-Programm zu einem CAD-Modell konstruiert wird. Da verschiedene CAD-Programme sich in ihren Dateiformaten unterscheiden, ist eine Umwandlung der Datei in ein programmunabhängiges Format erforderlich. Hier hat sich das STL-Format<sup>2</sup> (Standard Transformation Language [Geb13]) durchgesetzt, in welchem das Bauteil in Form von unterschiedlich großen Dreiecken beschrieben wird [Geb13, S.35]. Der Prozess der Umwandlung des Modells in das Dreieck-Flächenmodell wird als Triangulation bezeichnet [Geb13]. Abhängig von der Form des Bauteils und der gewählten Größe der Dreiecke kann es zu Abweichungen zwischen STL- und CAD-Modell kommen, da bei der Darstellung unebener Flächen durch Dreiecke nur eine Annäherung erfolgen kann. Es ist wichtig, dass das fertige Flächenmodell vollständig geschlossen ist, damit es im folgenden Schritt durch die Slicing-Software in einzelne Schichten zerlegt werden kann. Diese virtuellen Schichten aus dem STL-Modell werden später als reale Materialschichten hergestellt. Der Aufbau eines Bauteils aus einzelnen Materialschichten ist fast immer die Fertigungsgrundlage in aktuellen additiven Fertigungsverfahren<sup>3</sup>. Die virtuellen Schichten können mit Informationen zum Aufbau des Bauteils versehen werden wie der Wandstärke oder dem Füllmuster (siehe 3.4 auf Seite 23). Die Schichtinformationen werden von der Slicing-Software in den druckerabhängigen G-Code gespeichert. Der G-Code enthält alle Anweisungen für den Drucker um das Bauteil zu fertigen. Er wird im Drucker zuletzt in Maschinsprache übersetzt.

Alternativ zu der Erzeugung der 3D-Geometrie in einem CAD-Programm besteht die Möglichkeit, die Geometriedaten mithilfe eines 3D-Scans oder mit Computer-Tomographie eines physisch vorliegenden Bauteils zu erzeugen (Reverse Engineering) [VDI17].

Bei manchen Verfahren ist nach der Erzeugung des Bauteils eine Nachbearbeitung (Post-Processing) erforderlich. Dies beinhaltet zum Beispiel das Entfernen von Pulverrückständen oder Stützmaterial, das Aushärten in Sinter- oder UV-Öfen (Stereolithografie<sup>4</sup>) oder das Imprägnieren mit Wachs bzw. Infiltrieren mit Harz (3D-Druck<sup>5</sup>) nach der Entnahme aus der Anlage [VDI14].

---

<sup>1</sup> Insbesondere gültig für das Extrusionsverfahren vieler Druckerhersteller, welches in dieser Arbeit behandelt wird

<sup>2</sup> Es existieren viele weitere Formate, die möglicherweise im Hinblick auf aktuelle Entwicklungen wie dem Multimaterialdruck an Bedeutung gewinnen werden

<sup>3</sup> Einzelne Verfahren erzeugen Bauteile nicht schichtweise siehe [ARB16]

<sup>4</sup> Siehe Kapitel 3.2.2

<sup>5</sup> Siehe Kapitel 3.2.4

Entscheidender Vorteil der Prozesskette additiver Fertigung ist die fehlende Notwendigkeit bauteilabhängiger Werkzeuge. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Fertigung kleinster Serien bzw. individueller Produkte sowie problemlos Änderungen am Bauteil vorzunehmen.

## 3.2 Überblick verbreiteter additiver Verfahren

Unter dem Begriff additive Fertigungsverfahren werden eine Vielzahl an sehr unterschiedlichen Verfahren gesammelt. Die am weitesten verbreiteten sind im Folgenden kurz beschrieben und nach ihrem physikalischen Prinzip zur Erzeugung der Materialschichten geordnet.

### 3.2.1 Strahlschmelzverfahren

Bei den Strahlschmelzverfahren wird mithilfe eines Laser-, Infrarot- oder Elektronenstrahls eine Pulverschicht in einem Pulverbett verbunden.

Beim **Lasersintern**, auch bekannt unter Selektives Laser-Sintern (**SLS**<sup>®</sup>), wird mithilfe eines Lasers Pulver gesintert [VDI14]. Die Anlagen für dieses Verfahren sind vergleichsweise komplex und kostenintensiv. Aufgrund der hohen Qualität der Metall- oder Kunststoffbauteile hat sich dieses Verfahren jedoch schon in einigen Bereichen etabliert [Gru15].

Das **Selektive Laserschmelzen (SLM**<sup>®</sup>) ist dem SLS<sup>®</sup>-Verfahren sehr ähnlich. Das Pulver wird hier länger bzw. stärker erhitzt und dabei vollständig aufgeschmolzen. Dadurch entsteht ein dichteres Bauteil als beim Sintern [Geb13]. Es werden vorwiegend Metalllegierungen mit diesem Verfahren verarbeitet [VDI14].

Beim **Elektronenstrahlschmelzen** (engl.: Electron Beam Melting (**EBM**)) wird statt eines Lasers ein Elektronenstrahl verwendet und das Material wie beim Laserschmelzen vollständig aufgeschmolzen [VDI14]. Dies erfordert die Vakuumierung des Bauraums und ermöglicht die Verarbeitung hochwertiger Materialien wie Titanlegierungen für die Medizin- oder Luft- und Raumfahrttechnik [Geb13].

**Selective Mask Sintering (SMS)** verwendet Infrarotstrahler, mit denen Kunststoffpulver durch eine Maske hindurch aufgeschmolzen wird [Geb13].

Da das Ausgangsmaterial bei den Strahlschmelzverfahren in Pulverform vorliegt, ist hier eine in das Bauteil integrierte Dämpfung durch loses Pulver in der Struktur naheliegend und wird zurzeit erforscht [DMRa].

### 3.2.2 Polymerisationsverfahren

Die Polymerisationsverfahren nutzen einen Polymerisationsmechanismus, um aus einem flüssigen Polymer<sup>6</sup> eine feste Schicht zu erzeugen. Hierzu können Photoinitiatoren genutzt werden, welche durch Lichteinwirkung den Polymerisationsprozess in Gang setzen.

**Stereolithografie (SL)**, welche einen Laser für die Photopolymerisation nutzt, ist eines der ältesten generativen Verfahren und das genaueste Polymerisationsverfahren [Geb13, Gebhardt]. Das Ausgangsmaterial befindet sich in flüssiger Form auf dem Druckbett, welches sich Schicht für Schicht absenkt und immer wieder von einer flüssigen Schicht überdeckt wird. Die feste Struktur wird dann immer auf der Oberfläche des flüssigen Materials im Bauraum erzeugt [VDI14].

**Digital Light Processing (DLP)** ist eng mit der Stereolithografie verwandt, jedoch wird hier ein DLP-Prozessor verwendet und eine ganze Schicht gleichzeitig belichtet [VDI14]. Dadurch kann ein Bauteil besonders schnell erzeugt werden.

Beim **Poly-Jet Modelling (PJM)** erfolgt die Aushärtung des Materials über UV-Strahlung und Photopolymerisation. Das Ausgangsmaterial liegt nicht in einem flüssigen Druckbett vor, sondern wird durch mehrere Druckköpfe aufgetragen [VDI14]. Dies ermöglicht die Verarbeitung verschiedener Materialien und Materialmischungen in einem Bauteil. Neben mehrfarbigen Bauteilen eignet sich das Verfahren auch für die lokale Anpassung mechanischer Eigenschaften.

### 3.2.3 Extrusionsverfahren/Strangablegeverfahren

Die Strangablegeverfahren sind insbesondere unter dem Namen **Fused Deposition Modelling (FDM<sup>®</sup>)**, dem eingetragenen Markennamen der Firma *Stratasys* bekannt. Diese wurde 1989 gegründet und das FDM-Verfahren im gleichen Jahr patentiert [Geb13].

<sup>6</sup> Genauer einem Monomer/Prepolymer/Oligomer, bei dem eine geringere Kohlenstoffkettenlänge vorliegt als bei Polymeren

2009 ist dieses Patent ausgelaufen, sodass in der Folge viele neue Unternehmen die Technologie kommerzialisierten und unter anderen Namen vertrieben. *Stratasys* ist heute jedoch immer noch Weltmarktführer im Bereich 3D-Druck [Str16a] und vertreibt Maschinen verschiedener Verfahren mit hoher Qualität der erzeugten Bauteile.

Weitere gängige Namen für das Verfahren sind *Fused Filament Fabrication (FFF)*, der in der VDI Richtlinie 3405 verwendete Name *Fused Layer Manufacturing (FLM)* [VDI14] oder die von [Geb13] verwendete Bezeichnung *Fused Layer Modeling*. Im Folgenden wird die Abkürzung FLM für das Verfahren verwendet. FLM basiert auf dem physikalischen Wirkprinzip des Aufschmelzens und Erstarrens eines thermoplastischen Werkstoffes<sup>7</sup>. Das Material, meist in Form von Filamenten, wird hierfür einem Extruder zugeführt, in dem es aufgeschmolzen wird. Durch den Vorschub des Filaments kann die Extrudatmenge reguliert werden. Der Extruder verfährt über einer Bauplattform, während Material zugeführt wird. Nach dem Austreten und Abkühlen des Extrudats erstarrt dieses aufgrund der Wärmeleitung auf der Bauplattform bzw. der zuletzt generierten Schicht [Geb13]. Das Verfahren ist aufgrund der geringen Komplexität seiner Anlagen und der vorwiegend unproblematischen Handhabung seiner Materialien eines der am weitesten verbreiteten generativen Verfahren [DMRa]).

Ein dem FLM sehr ähnliches Verfahren ist das Arburg Kunststoff Freiformen, welches anstatt des Filaments handelsübliche Granulate aus der Spritzgusstechnik nutzt und die Bauplattform mehrachsrig bewegen bzw. drehen kann. Hier wird jedoch ein Piezoaktor genutzt um tropfenweise das aufgeschmolzene Material aufzubringen [ARB16].

### 3.2.4 Pulver-Binder-Verfahren

Beim Pulver-Binder-Verfahren, welches auch als **3D-Druck/3D-Printing**<sup>8</sup> (**3DP**) bezeichnet wird, wird eine Tinte bzw. ein Binder über einen Druckkopf gezielt auf einem Pulverbett verteilt. Hierdurch können mehrfarbige Bauteile verschiedener Materialien hergestellt werden.

---

<sup>7</sup> Nicht-thermische Extrusionsverfahren finden sehr selten Anwendung [Geb13].

<sup>8</sup> Die Bezeichnung 3D-Druck für dieses Verfahren ist nicht zu verwechseln mit der allgemeinen Klasse additiver Fertigungsverfahren oder dem FLM-Verfahren. 3D-Druck ist laut [VDI14] nur die Bezeichnung für das Pulver-Binder-Verfahren. Dies liegt vermutlich an dem von herkömmlichen Druckern bekannten Druckköpfen, die den Binder auf das Pulverbett auftragen.

### 3.3 Verwendete 3D-Drucker

Durch das Auslaufen des Patents des *FDM*- bzw. *FLM*-Verfahrens der Firma *Stratasys* im Jahre 2009 sind heute viele neue Hersteller und eine Vielzahl von verschiedenen Druckern<sup>9</sup> dieses Verfahrens auf dem Markt. Die Hersteller bedienen dabei Kunden von Hobbybastlern bis zu Großunternehmen. Die hergestellten Teile können einerseits einfache Anschauungsmodelle sein oder aber robuste Funktionsprototypen oder Endprodukte. Drucker variieren aus diesen Gründen von den Kosten von unter 1.000 € bis über 100.000 € [Hag15]. Die hochpreisigen Maschinen sollen ohne schwierige Bedienung in kurzer Zeit ein gutes und reproduzierbares Ergebnis liefern. Es besteht jedoch selten die Möglichkeit, den Druckprozess im Detail anzupassen. Hierin liegt ein großer Vorteil der günstigen Open-Source-Drucker. Sie bieten volle Transparenz und Anpassbarkeit des Druckprozesses. Zudem ist eine große Gemeinde von Hobbybastlern vorhanden, die in Internetforen ihre Erfahrungen teilt.

Für die Herstellung der Proben für diese Arbeit werden zwei einfache Anlagen verwendet; zum einen der *Ultimaker Original+* (**UMO**), siehe Abbildung 3.1, und zum anderen der *DeltaWASP 2040 Turbo* (**DW**), siehe Abbildung 3.2. Dies sind vergleichsweise einfache Drucker mit einer großen Anpassbarkeit des Druckprozesses. Sie verfügen über ähnlich große Druckbetten, welche beheizbar<sup>10</sup> sind. Die Bauraumtemperatur lässt sich bei beiden Anlagen jedoch nicht einstellen. Ein wesentlicher Unterschied der Anlagen ist die Kinematik. Während der UMO mit einer sogenannten Plotter-Kinematik arbeitet, bei der sich der Druckkopf über unabhängige X- und Y-Achsen über dem Druckbett bewegt, welches mit der Z-Achse hoch oder herunter gefahren werden kann, basiert der DW auf einer sogenannten *Delta-Kinematik*. Der Druckkopf befindet sich dabei zwischen drei vertikalen Achsen, durch deren kombinierte Bewegung der Druckkopf über dem Druckbett verfahren wird.

---

<sup>9</sup> Trotz der möglichen Missverständnisse werden die beschriebenen Anlagen des *FLM*-Verfahrens als Drucker bezeichnet

<sup>10</sup> Siehe Druckbetttemperatur unter 3.4

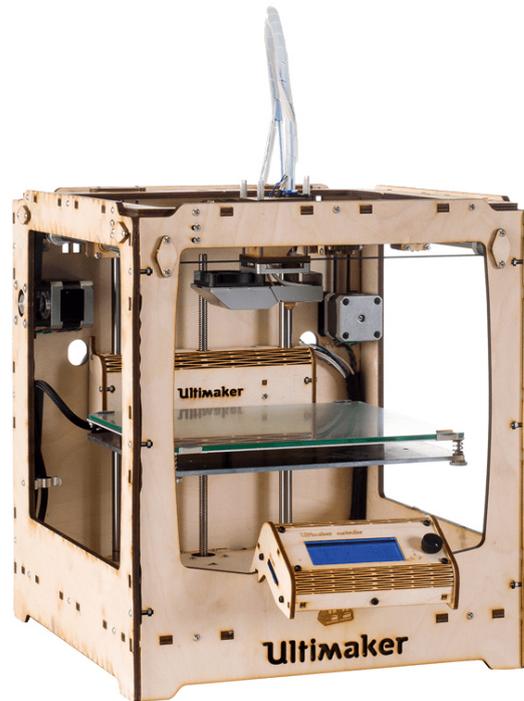


ABBILDUNG 3.1: Ultimaker Original [Ult16a]



ABBILDUNG 3.2: DeltaWASP 2040 Turbo [DEL17]

## 3.4 Prozessparameter im FLM-Verfahren

In diesem Kapitel wird zunächst auf die wichtigsten Prozessparameter eingegangen unabhängig von der Untersuchung der Parameter in dieser Arbeit<sup>11</sup> und eine Einteilung in (wichtige) allgemeine Prozessparameter und spezielle Einstellungen der 3D-Drucker durchgeführt. In Kapitel 4 wird die Auswahl einiger Parameter für den Versuchsplan erläutert. Es werden größtenteils die Bezeichnungen der Prozessparameter und Einstellungen der benutzten Slicing-Software *Cura* in der Version 2.5.0 verwendet. Dabei handelt es sich um eine Auswahl der zahlreichen möglichen Einstellungen verfügbarer Slicing-Programme.

### 3.4.1 Allgemeine Prozessparameter im FLM-Verfahren

Im FLM-Verfahren sind neben den Geschwindigkeits- und Temperaturparametern insbesondere geometrische Parameter von großer Bedeutung. Diese spielen bei herkömmlichen Fertigungsverfahren wie dem Spritzguss oder der spanenden Bearbeitung keine Rolle, da mit diesen Verfahren eine Herstellung von Hohlräumen im Bauteil nicht möglich ist. Beim FLM-Verfahren ist dagegen die Fertigung einer komplexen Hohlraumstruktur zeit- und materialsparender als die Fertigung eines zu 100 % gefüllten Bauteils.

Dies führt zur wichtigen Parametergruppe der **Gehäuseparameter**. Sie definieren, aus wie viel Material die äußere Struktur des Bauteils besteht. Im Speziellen sind dies die Parameter **Wanddicke** und **Obere/Untere Dicke**. Je größer die Gehäuseparameter gewählt werden, desto massiver und stabiler wird das Bauteil. Das Gewicht nimmt jedoch zu.

Abbildung 3.3 zeigt einen Screenshot aus der Slicing-Software *Cura*, bei dem viermal das gleiche Bauteil mit unterschiedlicher Wanddicke dargestellt wird. Oben ist nur eine Wanddicke, die Außenhaut (rot), darunter weitere Wanddicken (hellgrün) dargestellt mit Sicht von oben auf das Druckbett (X-Y-Ebene).

---

<sup>11</sup> Nach [SvH10, S.5] ist zunächst eine möglichst vollständige Liste der möglichen Eingangsgrößen zu erstellen.

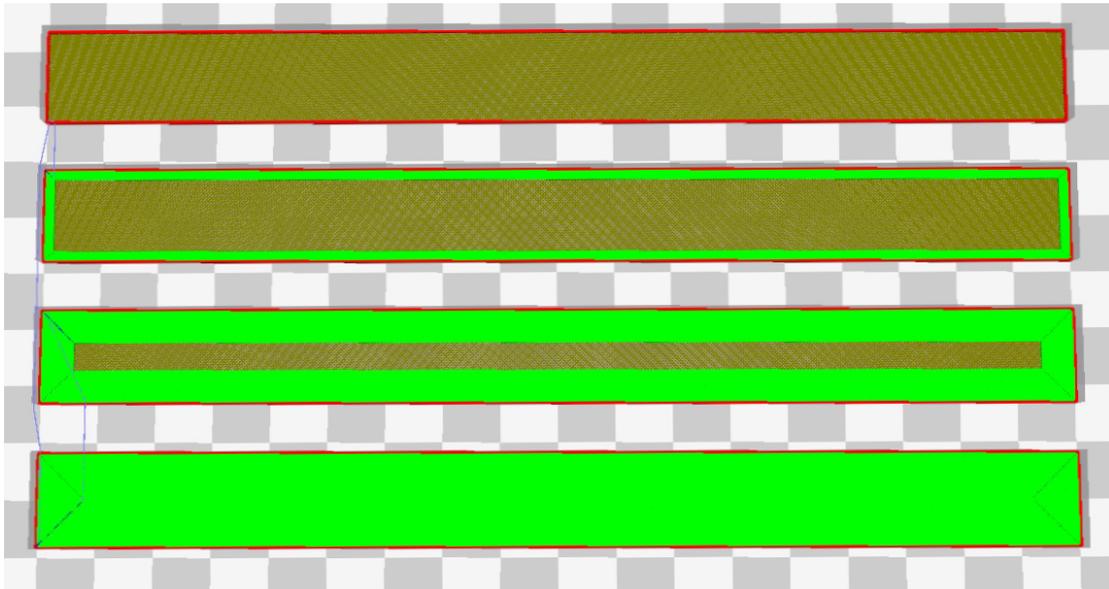


ABBILDUNG 3.3: Wanddickenvariation von oben nach unten mit 1, 5, 15 und 20 Linien

In Abbildung 3.4 ist nochmal eine Wanddickenvariation in der X-Z-Ebene schematisch dargestellt. Die abwechselnde Farbe von oben nach unten soll die Schichtfolge verdeutlichen.

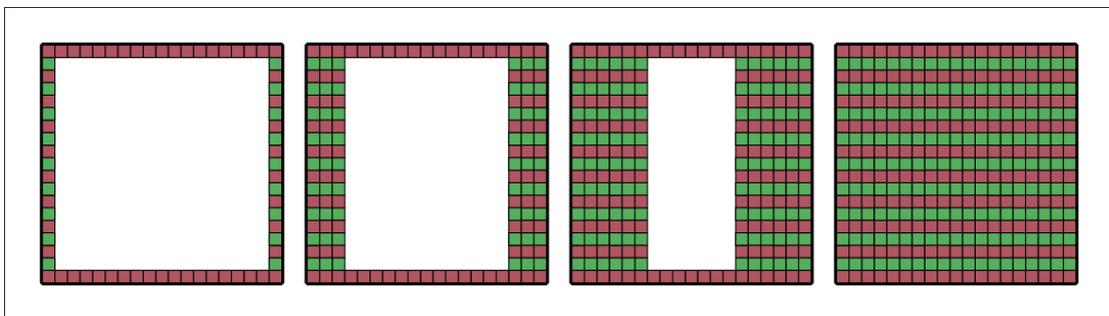


ABBILDUNG 3.4: Wanddickenvariation von links nach rechts mit einer Wanddicke von 1, 3, 6 und 17

Die obere und untere Dicke ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Beim Vergleich der Abbildung 3.5 mit der Abbildung 3.4 zur Darstellung der Wanddicke ist zu erkennen, dass beide Parameter einen ähnlichen, aber keinesfalls gleichen Effekt auf das Bauteil haben.

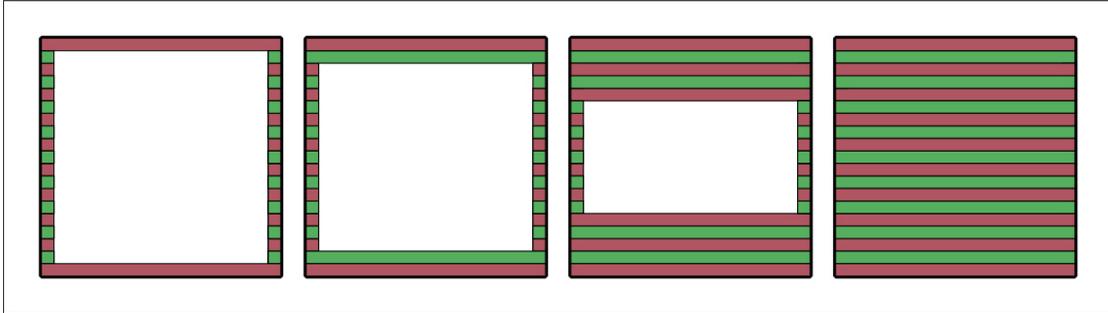


ABBILDUNG 3.5: Variation der oberen und unteren Dicke. Von links nach rechts: 1 Schicht, 2 Schichten, 5 Schichten und 9 bzw. 10 Schichten (9 untere und 10 obere)

In den obigen Abbildungen ist zwischen den Wänden bzw. den oberen und unteren Schichten ein Hohlraum. Dies ist in der Regel nicht der Fall, da die oberen Schichten eine Stütze brauchen. Der Hohlraum innerhalb des Bauteils wird deshalb von der sogenannten **Füllung** bzw. dem **Infill** gefüllt. Die wesentlichen Parameter der Füllung sind das **Füllmuster** und die **Fülldicke**. Eine Fülldicke von 100 % führt zu einem massiven Bauteil, eine Dichte von 0 % zu einer vollständig leeren Hülle. Aufgrund der fehlenden Stützung der oberen Schichten bei einer Fülldicke von 0 % ist diese Einstellung problematisch. Dieser Fall liegt in den Abbildungen 3.4 und 3.5 vor und wird in der Praxis durch Fülldichten von mindestens 10-20 %<sup>12</sup> vermieden.

In Abbildung 3.6 sind verschiedene Füllmuster mit unterschiedlichen Fülldichten aus der Sicht von oben auf das Druckbett zu sehen. Je nach Slicing-Software können mehr oder weniger Muster ausgewählt werden. *Cura* bietet die Möglichkeit, die Muster: *Gitter* (*Grid*), *Linien* (*Lines*), *Dreiecke* (*Triangles*), *Würfel* (*Cubic*), *Tetraedral* (*Tetraedral*), *Konzentrisch* (*Concentric*), *Zickzack* (*Zig Zag*) auszuwählen. Die Software *Makerbot Desktop* bietet neben Standardmustern eher ungewöhnliche Muster mit den Bezeichnungen *Catfill*, *Sharkfill* und *Marroccanstar* an, welche eher aus Designaspekten bei transparenten Bauteilen gewählt werden.

<sup>12</sup> Die minimal notwendige Fülldicke ist abhängig von der Anwendung. Eine geringe Fülldicke kann neben der verringerten Maßhaltigkeit, aufgrund mangelnder Stützung der oberen Schicht, zu einer geringen Steifigkeit und Festigkeit führen [MKM<sup>+</sup>16].

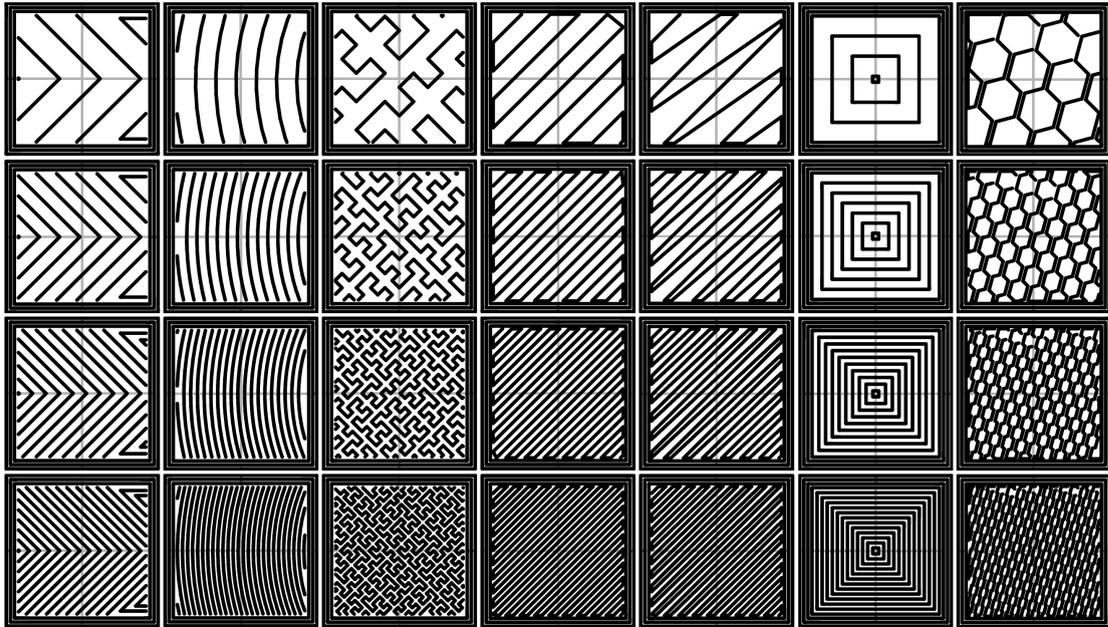


ABBILDUNG 3.6: Füllmuster mit variierender Fülldichte. Links nach rechts: Oktogramm Spirale (*Octagram Spiral*), Archimedische Kreise (*Archimedean Chords*), Hilbert-Kurven (*Hilbert Curve*), Geradlinig (*Rectilinear*), Linien (*Lines*), Konzentrisch (*Concentric*), Honigwaben (*Honeycomb*). Oben nach unten: 20 %, 40 %, 60 %, 80 % [Sli16]

Durch die **Bauteilorientierung** kann die Füllstruktur weiter beeinflusst werden. Das Standard-Füllmuster *Linien* führt bei einer Orientierung in Richtung der X-, bzw. Y-Achse zu dem gleichen Ergebnis; die Füllstruktur wird abwechselnd in  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  zur X-Achse gedruckt. Bei einer Orientierung des Bauteils mit  $45^\circ$  zur X-Achse führt dasselbe Füllmuster zu Füllstrukturschichten von abwechselnd  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist. Ein Einfluss dieser Infillorientierung auf die Steifigkeit konnte bereits von [CRD<sup>+</sup>17] nachgewiesen werden. Zugproben aus Polycarbonat<sup>13</sup> (PC) wurden dabei flach im Bauraum platziert mit Infillorientierungen von  $0^\circ/90^\circ$ ,  $15^\circ/75^\circ$ ,  $30^\circ/60^\circ$  und  $+45^\circ/-45^\circ$  und ein linearer Anstieg des E-Moduls festgestellt.

Unterschiedliche Orientierungen im Bauraum haben ebenfalls einen großen Einfluss auf den Schichtaufbau, wie in Abbildung 3.8 verdeutlicht wird. Auf der linken Seite ist das gleiche Bauteil einmal in der X-Y-Ebene liegend und rechts daneben vertikal in der Z-Achse orientiert. Es ist offensichtlich, dass durch die vertikale Orientierung mehr Schichten erforderlich sind. Das verwendete Material ist in diesem Fall (die Wanddicke entspricht der unteren und oberen Dicke) bei beiden Orientierungen gleich. Bei der Darstellung auf der rechten Seite der Abbildung 3.8 ist dies nicht der Fall. Aufgrund der viermal

<sup>13</sup> Siehe Polycarbonat unter 3.5.2

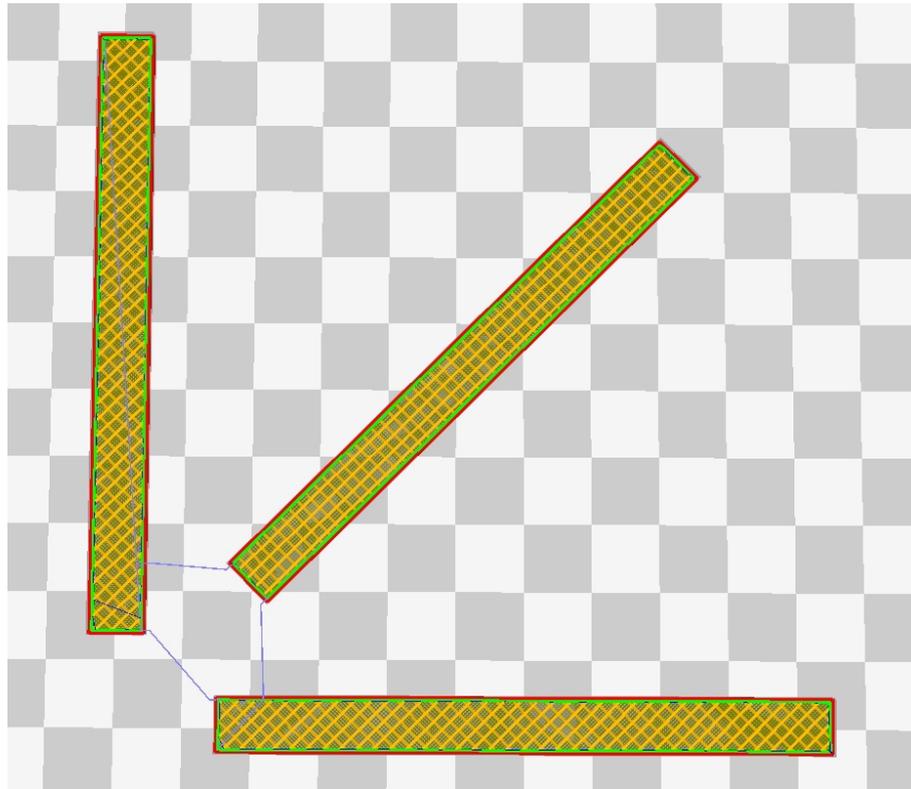


ABBILDUNG 3.7: Infillorientierung mit Linienmuster und 20% Infilldichte (Screenshot aus *Cura*)

so großen unteren und oberen Dicke im Vergleich zur Wanddicke wird abhängig von der Orientierung unterschiedlich viel Material verwendet. Dies verdeutlicht die möglichen Abhängigkeiten der Prozessparameter untereinander. [KV15] zeigte bereits einen Einfluss der Orientierung auf die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Polyamid-12<sup>14</sup> (PA12) Zugproben. Der Einfluss auf den E-Modul fiel geringer aus, was sich mit den Materialdaten von [Str17] deckt. Interessanterweise wurde eine deutlich stärkere Anisotropie des Zug- und des Biegemoduls beim Material Polyamid-6<sup>15</sup> (PA6) festgestellt [Str17]. Auch [CRD<sup>+</sup>17] konnte einen Einfluss der Orientierung auf die mechanischen Eigenschaften von Zugproben aus Acrylnitril-Butadien-Styrol<sup>16</sup> (ABS) und PC nachweisen. Insbesondere die Bruchdehnung zeigte eine starke Abhängigkeit von der Orientierung. Vertikal im Bauraum orientierte Proben wiesen eine deutlich geringere Bruchdehnung auf als flach orientierte Proben; der E-Modul war jedoch überraschenderweise am höchsten bei diesen Proben. Bei PC-Zugproben wurde dieser Effekt nicht nachgewiesen. Während bei den ABS-Proben insgesamt eine geringe Anisotropie des E-Moduls festgestellt wurde, zeigten

<sup>14</sup> Siehe Polyamid unter Kapitel 3.5.2

<sup>15</sup> Siehe Polyamid unter Kapitel 3.5.2

<sup>16</sup> Siehe Acrylnitril-Butadien-Styrol unter Kapitel 3.5.1

die PC-Proben eine größere Anisotropie (höchster E-Modul bei seitlicher Orientierung), welche im Vergleich zur Bruchdehnung dennoch gering ausfiel. Die Anisotropie des ABS wird auch von den Materialdaten des Marktführers *Stratasys* für das Material ABS-M30 bestätigt. Der Zugmodul weist eine geringe Anisotropie auf, der Biegemodul dagegen eine etwas größere [Str17]. Bei PC wurde im Gegensatz zu [CRD<sup>+</sup>17] eine sehr geringe Anisotropie des Zugmoduls und eine leichte Anisotropie des Biegemoduls von *Stratasys* festgestellt [Str17]. Das PLA<sup>17</sup>-Material von *Stratasys* hat laut dem Materialdatenblatt eine nicht zu vernachlässigende Anisotropie im Zug- und Biegemodul [Str17]. Es lässt sich abschließend feststellen, dass der Einfluss der Bauteilorientierung stark von dem verwendeten Material abhängt.

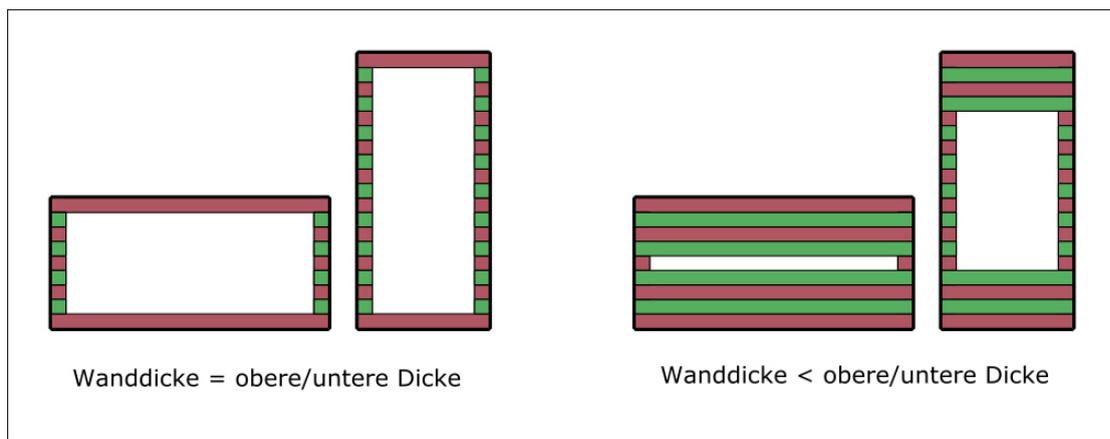


ABBILDUNG 3.8: Auswirkung der Bauteilorientierung auf die Wanddicke und obere/untere Dicke

Damit ein maßhaltiges Bauteil gefertigt wird, sollte die Wanddicke als ein Vielfaches der **Spurbreite** gewählt werden. Dieser Parameter beschreibt die Breite der abgelegten Extrudatstrangspur. Die Spurbreite ist nur geringfügig anpassbar, da sie stark mit dem **Düsensendurchmesser** gekoppelt ist. Dieser beträgt bei vielen Druckern 0,4 mm, kann jedoch durch einen Umbau auch verändert werden. Erhältlich sind vor allem 0,1 mm, 0,2 mm, und 0,3 mm Düsen. Größere Düsensendurchmesser als 0,4 mm werden nur in Einzelfällen verwendet, wenn die Oberfläche und die Feinheit im Vergleich zur Druckgeschwindigkeit geringe Bedeutung haben oder das Extrudat eine sehr hohe Viskosität aufweist. Für den *Delta WASP 2040 Turbo* ist zum Beispiel eine Düse mit 1,0 mm Durchmesser für die Verarbeitung von Ton erhältlich. Der *Ultimaker Original+*, der *Delta WASP 2040 Turbo* und viele weitere Drucker haben standardmäßig einen 0,4 mm großen Düsensendurchmesser.

<sup>17</sup> PLA ist ein Standardmaterial im FLM-Verfahren, siehe Kapitel 3.5.1 auf Seite 33

So wie die Wanddicke ein Vielfaches der Spurbreite sein sollte, so sollte die obere/untere Dicke ein Vielfaches der **Schichtdicke** sein. Die Schichtdicke gibt an, wie dick eine einzelne Schicht gedruckt wird bzw. wie weit sich das Druckbett nach dem Druck einer Schicht absenkt. Nach oben ist die Schichtdicke begrenzt durch den Düsendurchmesser. Damit die abgelegte Spur auf der vorherigen Schicht haftet, muss die Schichtdicke kleiner sein als der Düsendurchmesser und ein gewisser Anpressdruck wirken [Geb13, S.71]. Eine Schichtdicke von 0,2 mm wäre bei einer 0,4 mm Düse also möglich, jedoch verbessert sich die Oberflächenqualität bei sinkender Schichtdicke, sodass in der Praxis auch niedrigere Werte gewählt werden (z.B. 0,1 mm). Nach unten bestehen Begrenzungen durch die Präzision der Schrittmotoren in der Z-Achse. Für den *Ultimaker Original+* wird eine minimale Schichtdicke von 0,02 mm angegeben. Stark von der Schichtdicke abhängig und besonders auffällig ist der sogenannte „Treppenstufeneffekt“, welcher bei schräg im Bauraum gedruckten Oberflächen auftritt und eine Oberflächenrauheit darstellt, wie in Abbildung 3.9 verdeutlicht wird. Eine geringere Schichtdicke führt zu einem weniger ausgeprägten „Treppenstufeneffekt“, jedoch auch zu einer erheblich höheren Druckzeit, da eine Halbierung der Schichtdicke bedeutet, dass doppelt so oft die Druckkontur abgefahren werden muss. In Abbildung 3.9 ist zu sehen, dass das abgebildete Modell mit einer Schichtdicke von 0,05 mm aus 16 Schichten besteht, wohingegen für eine Schichtdicke von 0,2 mm vier Schichten ausreichen.

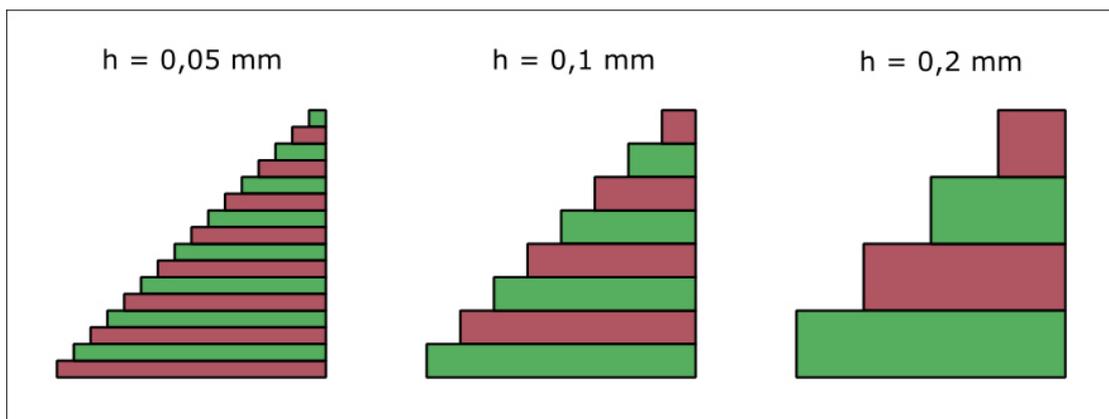


ABBILDUNG 3.9: Der Treppenstufeneffekt als Folge des Parameters Schichtdicke

Das **Druckmaterial** stellt einen sehr wichtigen Parameter dar. Da es hier große Unterschiede gibt, wird im folgenden Kapitel gesondert im Detail auf die verfügbaren Materialien eingegangen.

Abhängig vom Material spielt auch die **Drucktemperatur** eine Rolle. Über die Temperatur des Extruders kann die Viskosität des Materials eingestellt werden, sodass das Material flüssig genug ist um extrudiert werden zu können, an der Druckplattform bzw. der letzten Schicht haftet, sich jedoch noch nicht zersetzt oder zu dünnflüssig aus dem Extruder läuft und die gewünschte Formgebung nicht erreicht wird. [Wen09, Wendel] konnte bereits eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung von der Drucktemperatur bei ABS-Filamenten nachweisen. Auch optische Materialeigenschaften können teilweise von der Drucktemperatur beeinflusst werden. Dies ist bei Filamenten mit Holzpartikeln der Fall, die mit steigender Temperatur einen dunkleren Farbton annehmen. Eine Anpassung anderer Eigenschaften über die Drucktemperatur ist ebenfalls denkbar durch das gezielte Auflösen oder Bilden von Bindungen im Material<sup>18</sup>.

Um die Haftung des Bauteils auf der Bauplattform während des Drucks zu gewährleisten und thermischen Verzug zu verringern, kann die **Bauraumtemperatur** bzw. **Druckbetttemperatur** angepasst werden, falls ein beheizbarer abgeschlossener Bauraum bzw. ein beheizbares Druckbett vorhanden ist. Einige Materialien erfordern dies mehr als andere (z.B. ABS mehr als PLA). Alternativ oder zusätzlich können **Hilfsstrukturen** erzeugt werden. Häufig wird ein sogenannter **Brim** oder **Raft** verwendet. Sie bestehen aus einer einstellbaren Anzahl von Linien bzw. Schichten, die vor der Erzeugung neben bzw. unter dem Bauteil erzeugt werden, wie in Abbildung 3.10 gezeigt wird.

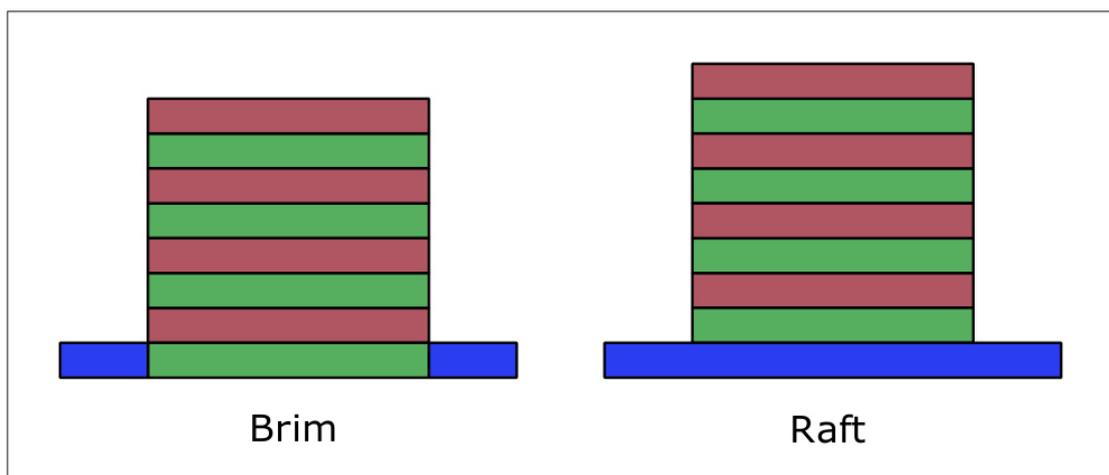


ABBILDUNG 3.10: Die häufig verwendeten Hilfsstrukturen *Brim* und *Raft*

<sup>18</sup> Thermoinitiatoren anstelle von Photoinitiatoren, ähnlich [CLD08], jedoch mit höherer Initiierungstemperatur. Geeignete Thermoinitiatoren sind z.B. Azoverbindungen wie Azodiisobutyronitril (AIBN) oder Peroxide wie Dibenzoylperoxid (BPO).

Der **Anpressdruck** und die **Druckbettoberfläche** sind ebenfalls wichtig für gute Druckbetthaftung und die Qualität der ersten Schichten eines Drucks. Der Anpressdruck kann über die Höheneinstellungen des Extruders zur Bauplattform sowie bei vielen Druckern mit Hilfe von Schrauben am Druckbett eingestellt werden. Diese Einstellung wird als Druckbett-Nivellierung (engl.: Bed-Levelling) bezeichnet. Eine mangelhafte Nivellierung führt nicht nur zu einer schlechten Oberflächenqualität, sondern auch zu einem höheren Verschleiß aufgrund von fehlendem Zusammenhalt der Extrudatstränge. Die Druckbettoberfläche ist bei vielen Druckern eine Glasplatte, welche mit Kreppband<sup>19</sup>, Kapton-Band<sup>20</sup>, wasserlöslichem Kleber und weiterem beschichtet werden kann, um die Druckbetthaftung und die Oberflächenqualität der unteren Schicht zu beeinflussen. Der Anpressdruck ist entsprechend der Druckbettoberflächenbeschichtung anzupassen.

Die **Druckgeschwindigkeit** kann bei Bedarf detailliert angepasst werden. Es können zum Beispiel unterschiedliche Geschwindigkeiten zur Erzeugung der äußeren Wände (**Wandgeschwindigkeit**), der oberen/unteren Schichten (**Geschwindigkeit obere/untere Schicht**) sowie der Füllstruktur (**Füllgeschwindigkeit**) gewählt werden. Dadurch können äußere Maße präziser gedruckt werden durch die Reduzierung von Schwingungen des Druckkopfes bei geringerer Druckgeschwindigkeit und der Druck insgesamt beschleunigt werden durch hohe Druckgeschwindigkeiten bei der Herstellung des Infills.

Der **Filamentdurchmesser**, standardmäßig 1,75 mm oder 2,85 mm bei den meisten Druckern, stellt ein, in welcher Abmessung das Filament dem Extruder zugeführt wird. Liegt eine Abweichung zwischen eingestelltem und tatsächlichem Filamentdurchmesser auf der Spule vor, so wird eine fehlerhafte Menge durch den Extruder gefördert. Über den **Fluss** kann dann eine Feinjustierung der Extrudatmenge erfolgen. Ein Fluss von 100 % gibt an, dass das Material normal extrudiert wird. Im Falle von zu dünnen, sich nicht berührenden Extrudatsträngen<sup>21</sup> kann der Fluss erhöht werden, sodass mehr Material extrudiert wird. Da in den verwendeten Druckern keine Kontrolle des Filamentdurchmessers erfolgt, können Schwankungen des Filamentdurchmessers zu einer schwankenden Extrudatmenge führen.

---

<sup>19</sup> 3M BlueScotch

<sup>20</sup> DuPont Markenname für Polyimidfolie

<sup>21</sup> In höheren Schichten, in der ersten Schicht ist der Anpressdruck anzupassen

### 3.4.2 Spezielle Einstellungen der 3D-Drucker

In diesem Unterkapitel werden spezielle Optionen der Slicing-Software gesammelt, die einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Druckqualität haben könnten, jedoch nicht zu den Standard-Einstellungen gehören.

Durch das häufige Starten der Extrudatablage einer neuen Schicht können sogenannte „Z-Nähte“ entstehen. Diese können optisch auffallen sowie sich auf die Bindung an der entsprechenden Stelle auswirken. Über die Option **Justierung der Z-Naht** kann eingestellt werden, ob der Druck immer mit dem **kürzesten Weg** oder an einer **zufälligen** Position beginnen soll.

Der **Prozentsatz Füllung überlappen** gewährleistet die Bindung der Wandstruktur zur Füllstruktur. Standardmäßig sind hier 10 % eingestellt.

Die **Füllschichtdicke** kann separat von der allgemeinen Schichtdicke erhöht werden, wenn die Druckgeschwindigkeit erhöht werden soll, ohne dabei die Auflösung der Oberfläche negativ zu beeinflussen. Sie sollte dabei als ein Vielfaches der Schichtdicke gewählt werden.

Die Anpassung der **Lüfterdrehzahl** und der damit verbundenen Kühlung durch erzwungene Konvektion kann die Qualität von schnell aufeinander folgend gedruckten Schichten oder Überhängen verbessern [U16b].

Werden mehrere Teile in einem Druckvorgang erzeugt, kann die **Druckreihenfolge** festgelegt werden. Bei gleichzeitigem Drucken mehrerer Teile erhöht sich die Abkühlzeit einer Schicht, sodass diese sich möglicherweise schlechter mit der nächsten Schicht verbindet. Beim Druck mehrerer Teile nacheinander muss die Bewegung des Druckkopfes im Baureaum berücksichtigt werden, damit dieser nicht das Bauteil oder sich selbst beschädigt.

## 3.5 Materialübersicht des FLM-Verfahrens

So wie die generative Fertigung verschiedene Verfahren beschreibt, so können auch zahlreiche Materialien verarbeitet werden. Da diese Arbeit das FLM-Verfahren behandelt, werden im Folgenden nur die verfügbaren Materialien für dieses Verfahren betrachtet. Diese sind zum größten Teil Polymere aus der Gruppe der Thermoplaste. Es können zwar

auch niedrigschmelzende Metalle und weitere Materialien verarbeitet werden, die jedoch die Ausnahme darstellen.

Polymere aus den Gruppen der Duromere und Elastomere werden aufgrund des physikalischen Wirkprinzips des FLM-Verfahrens (siehe 3.2.3 auf Seite 19) nicht verwendet. Eine Ausnahme stellen lediglich thermoplastische Elastomere (siehe 3.5.3 auf Seite 35) dar.

Die gängige Weise, Material im FLM-Verfahren zuzuführen, ist über Filamente mit einem Durchmesser von 1,75 mm bzw. 2,85 mm. Material in anderen Formen (Stäbe, Granulate [ARB16]) wird von einigen Herstellern ebenfalls angeboten. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die auf dem Markt verfügbaren Materialien in Filamentform eingegangen. Diese werden hierfür in die Gruppen Standardkunststoffe, Leistungskunststoffe, Flexible Kunststoffe, Verbundwerkstoffe und weitere Materialien eingeteilt.

### 3.5.1 Standardkunststoffe

Unter die Standardkunststoffe fallen vor allem **Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)** und **Polylactide (PLA)**. Sie sind die meistverwendeten Materialien im FLM-Verfahren.

**ABS** ist ein amorpher Thermoplast und stellt eine Polymermischung dar. Aufgrund der verschiedenen Zusammensetzungsmöglichkeiten von ABS sowie zusätzlichen Additiven können die Materialeigenschaften von ABS-Filamenten variieren. Dies hat zur Folge, dass viele verschiedene Sorten von ABS auf dem Markt sind. Ein Beispiel hierfür ist *smartABS*. Diese Zusammensetzung soll für eine bessere Schichthftung und weniger Temperaturverzug (warping) sorgen [Ger16a].

**PLA**, auch Polymilchsäure genannt, ist ein Thermoplast, der aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden kann und unter speziellen Bedingungen biologisch abbaubar ist. Er wird aufgrund kostengünstiger Herstellung und einfacher Handhabung beim Verarbeiten häufig im FLM-Verfahren verwendet. Glasübergangstemperatur und Schmelzpunkt liegen jedoch vergleichsweise niedrig, sodass es für viele Anwendungen ungeeignet ist. Auch bei PLA variieren die Eigenschaften mit den Additiven. Es bestehen beispielsweise Zusammensetzungen mit besserer Wärmebeständigkeit wie beim *High-Temp Premium PLA* [OT16a], glatterer Oberfläche wie beim *Performance PLA* [Ger16b], niedrigerer Viskosität wie bei *MF-PLA* [Ext16a], besserer Biegsamkeit wie beim *Soft-PLA* [OT16b] oder

geringerer Sprödigkeit wie beim *PLA-PHA* [Col16a]. Beim *innorange* [Inn16e] bzw. *Magicfil* [For16f] sorgen dagegen einzelne Additive dafür thermochromatische Eigenschaften zu erzeugen. Das Material ändert dadurch bei 29°C die Farbe und wird transparent.

Zusätzlich existieren Compounds, welche durch die Kombination mit weiteren Polymeren das ursprüngliche Material stark verändern. Dies ist zum Beispiel beim *Inno FR PLA Compound* der Fall, welches hitzebeständig und selbstlöschend ist aufgrund zusätzlicher Polymere [Inn16b].

### 3.5.2 Leistungskunststoffe

Unter die Gruppe der Leistungskunststoffe<sup>22</sup> fallen die **Polyamide (PA)**, **Polycarbonate (PC)**, **Polystyrol (PS)**, **Polyetherimid (PEI)**, **Polyethylenterephthalat (PET)** sowie Copolymere und Compounds dieser Kunststoffe.

**Polyamide** sind teilkristalline Thermoplaste mit regelmäßigen NH-Gruppen (Aminogruppen). Je nach Aufbau und Anordnung dieser wird das Material beispielsweise als PA6 [Nex16d], PA12 [Str16c] oder PA666 [Nex16c] bezeichnet. Duktilität, Schmelzpunkt, Temperaturbeständigkeit und Festigkeit variieren bei den verschiedenen Polyamiden. PA ist aufgrund vieler positiver Eigenschaften ein häufig verwendeter Werkstoff im Maschinenbau und weiteren Branchen. Bekannt ist das Material insbesondere unter dem Namen *Nylon*, welcher PA-Fasern bezeichnet. Laut [Str17] weist PA6 eine deutlich höhere Anisotropie der Steifigkeit und Festigkeit auf als PA12.

**Polycarbonate** sind amorphe Thermoplaste mit hoher Steifigkeit und Festigkeit. **PC-ABS** kombiniert die guten mechanischen und thermischen Eigenschaften des Polycarbonats mit der Flexibilität des ABS [Str16d]. Das unter dem Namen *PC-ISO* erhältliche PC ist zudem sterilisierbar, bioverträglich und hitzebeständig und damit für bestimmte medizintechnische Anwendungen geeignet.

**PEI** ist ein Kunststoff mit hoher Festigkeit und Hitzebeständigkeit [Str16f]. In Kombination mit PC entsteht das Polymerblend PEI-PC, ein noch leistungsfähigerer Kunststoff [Str16g].

**PET** ist ein weit verbreiteter amorpher oder teilkristalliner Thermoplast, der insbesondere durch PET-Flaschen bekannt ist, aber auch in vielen anderen Bereichen genutzt wird,

<sup>22</sup> Teils auch normale, Massen- oder Hochleistungskunststoffe

da PET sich durch hohe Maßhaltigkeit auszeichnet [Inn16a] [Nex16a]. **Polyethylen-Terephthalat-Glycol (PETG)** ist mit Glycol copolymerisiertes PET. Das Glycol verhindert die Kristallisation des Polymers. PETG ist hierdurch amorph und besitzt eine geringere Schmelztemperatur und Viskosität als PET, was für die Verarbeitung im FLM-Verfahren günstig ist und unter anderem zu einem geringeren thermischen Verzug führt [For16a] [Ext16c].

### 3.5.3 Flexible Kunststoffe

Flexible Kunststoffe zeichnen sich durch höhere Elastizität und Duktilität aus, die insbesondere durch Elastomere erzeugt wird. Da für das FLM-Verfahren thermoplastische Eigenschaften benötigt werden, eignet sich die Gruppe der thermoplastischen Elastomere (**TPE**). Diese kann je nach Elastomertyp unterschieden werden in thermoplastische Copolyester (**TPC/TPE-E**), thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis (**TPU/TPE-U**), Styrol-Blockcopolymer (**TPS/TPE-S**), thermoplastische Copolyamide (**TPA/TPE-A**) und weitere [Deu15]. Es eignen sich Compounds zwischen Standard-FLM-Materialien und thermoplastischen Elastomeren, da sie Steifigkeit und Festigkeit mit Elastizität und Duktilität verbinden.

Das Material *Innoflex* von *Innofil3D* ist ein PLA-Compound mit **TPC**. Es ist in verschiedenen Sorten erhältlich, die sich aufgrund eines angepassten TPC-Anteils in ihren Bruchdehnungen unterscheiden [Inn16c]. Polymerblends auf **TPC**-Basis bieten *formfutura* unter dem Namen *FlexiFil<sup>TM</sup>* [For16d] und *Nexeo3D* unter dem Namen *Arnitel<sup>®</sup>ID 2045* an [Nex16b]. **TPA** wird von *Taulman3D* unter der Bezeichnung **PCTPE** angeboten, was für *plasticized copolyamide TPE* steht [tau16]. *Volaprint* vertreibt ein **TPU**, welches sich durch gute Fließeigenschaften und hohe Elastizität auszeichnen soll [Vol16]. Ein **TPS** wird von *formfutura* unter dem Namen *Crystal Flex<sup>TM</sup>* angeboten. Es handelt sich hierbei um ein **Styrol-Butadien-Blockcopolymer (SBC)** [For16j].

### 3.5.4 Verbundwerkstoffe

Unter Verbundwerkstoffen werden Materialien verstanden, die aus zwei unterschiedlichen Werkstoffen bestehen. In diesem Fall handelt es sich um thermoplastische Kunststoffe mit

Metallpulver (Bronze<sup>23</sup>, Aluminium<sup>24</sup>), Kalkpulver<sup>25</sup>, Kohlenstoffnanoröhrchen<sup>26</sup>, Karbonfasern<sup>27</sup>, Korkfasern<sup>28</sup>, Bambusfasern<sup>29</sup> oder Holzpartikeln<sup>30</sup>. Neben den optischen Eigenschaften ändern sich insbesondere bei der Verwendung von Fasermaterialien die Steifigkeit und Festigkeit der damit erzeugten Bauteile.

### 3.5.5 Weitere Materialien

Unter *Weitere Materialien* fallen diverse Werkstoffe mit vergleichsweise seltenen Eigenschaften. Dies sind beispielsweise Hitzebeständigkeit, UV-Beständigkeit, Biokompatibilität, Sterilisierbarkeit, Rezyklierbarkeit oder besondere optische Eigenschaften.

**Polyphenylsulfone (PPSF/PPSU)** zeichnet sich durch starke Hitzebeständigkeit bei hoher mechanischer Festigkeit aus [Str16e]. **Polymethylmethacrylat (PMMA)**, häufig als Plexiglas bezeichnet, weist eine hohe Härte sowie Lichtechtheit auf [Avi16]. **Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA)** ist ein UV- und witterungsbeständiger Kunststoff [Str16b] [Mar16]. **Tribo-Filamente** von *igus* sollen besonders abriebfest sein und sich dadurch für Gleitlagerstellen eignen [Igu16]. **Polypropylen (PP)** ist ein sehr einfacher Kunststoff, der für Produkte verwendet werden kann, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen [Ger16c].

**Polystyrol** ist ein kostengünstiger Thermoplast, der vor allem in aufgeschäumter Form unter dem Namen *Styropor* bekannt ist. PS ist hart, spröde und besitzt eine geringe Dichte [Ger16c]. Mit Kautschuk/Elastomeren modifiziertes PS ist besonders schlagfest und wird entsprechend als hochschlagfestes PS (high impact polystyrene (HIPS)) bezeichnet. Eine Besonderheit des HIPS ist, dass es sich in Limonen, einem flüssigen Kohlenwasserstoff, auflöst. Dies befähigt das Material zur Herstellung von speziellen Stützstrukturen oder trennenden Bereichen, wie dies beispielsweise bei der Herstellung eines Kugellagers erforderlich bzw. vorteilhaft ist [For16e].

Compounds mit **Polyvinylalkohol (PVA)** sind dagegen wasserlöslich. Aus diesen Filamenten können ebenfalls Stützstrukturen oder trennende Bereiche hergestellt werden

<sup>23</sup> *MetalFil* - PLA mit 80 % Metallpulver [For16g]

<sup>24</sup> *Sainsmart* - 60 % PLA mit 40 % Aluminium [Sai16]

<sup>25</sup> *LAYBRICK* - Copolyester mit Kalk [For16h]

<sup>26</sup> *FilaOne Gray* - Mit Kohlenstoffnanoröhren [Fil16]

<sup>27</sup> *Carbonfil* - PETG mit 20 % Karbonfasern [For16b]

<sup>28</sup> *EasyCork* - PLA mit 30 % Korkfasern [For16c]

<sup>29</sup> *Bamboofil* - 80 % PLA mit 20 % Bambusfasern [Col16b]

<sup>30</sup> *EasyWood* - Polymer mit 40 % Holzpartikeln [For16i]

[Inn16d]. Eine Besonderheit stellt hier das **PoroLay** der Firma *Orbi-Tech* dar. Es handelt sich hierbei um ein 2-Komponenten-Filament, das einen Elastomer mit wasserlöslichem PVA kombiniert. Durch Auflösen des PVAs können damit poröse Strukturen hergestellt werden [OT16c].

Optische Effekte können durch Pigmente im Filament erzeugt werden. **Reflect-O-Lay** weist beispielsweise eine starke Lichtreflektion auf [OT16d], die für optische Messungen vorteilhaft sein könnte.

**Biopolymere**, biologisch abbaubare Materialien, die keine spezielle Behandlung oder Laborbedingungen zur Kompostierung benötigen, sind ebenfalls erhältlich. Die *biodegradable plastics* (**BDP**) sind Holzfilamente aus Fichte mit zusätzlichen thermoplastischen Biopolymeren [Ext16b].

Ein ebenfalls für das FLM-Verfahren denkbarer, jedoch nur vereinzelt eingesetzter Werkstoff sind **niedrigschmelzende Metalle**. Es wurden bereits erfolgreich Versuche mit Zinnlegierungen durchgeführt [Vio16]. Eine weitere Verbreitung von reinem Metallfilament ist jedoch noch nicht vorhanden.

## Kapitel 4

# Auslegung und Herstellung der Proben

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte bei der Probenherstellung beschrieben. Zunächst wird eine passende Referenzstruktur diskutiert. Anschließend werden die einzelnen Schritte der Herstellung samt Auswahl der Prozessparameter dokumentiert.

### 4.1 Auslegung der Referenzstruktur

Um die Messungen der Probekörper sowie die Berechnungen miteinander vergleichen zu können ist eine Referenzstruktur erforderlich. Randbedingungen und Kriterien für diese Referenzstruktur sind die Bauräume der Drucker, ein angemessenes Volumen in Hinblick auf eine akzeptable Fertigungszeit der Proben, die Eignung der Struktur für vibroakustische Messungen sowie für analytische und numerische Berechnungen. Eine Abbildung der gewählten Referenzstruktur ist in [Abbildung 4.3](#) aus [Seite 42](#) zu sehen. Nachfolgend wird die Auslegung beschrieben.

Für analytische Berechnungen zur Plausibilitätsüberprüfung von Messungen und numerischen Berechnungen eignen sich insbesondere einfach aufgebaute Strukturen. Aufgrund der dadurch möglichen Hypothesen und Vereinfachungen können diese Strukturen besser beschrieben werden. Es bieten sich beispielsweise Stäbe oder Balken an. Für diese Geometrien existieren bereits analytische Abschätzformeln zu gegebenen Randbedingungen, die eine schnelle Überprüfung der Ergebnisse ermöglichen.

Für strukturdynamische Messungen eignen sich insbesondere Balken. Mit ihnen können mit geringem Aufwand Ausschwingversuche durchgeführt werden. Da Strukturen mit geringer Dicke wie Balken oder Platten zur Ausbreitung von Biegewellen neigen, können in Ausschwingversuchen die Biegeeigenfrequenzen des Balkens ermittelt werden, welche die Schwingungsform dominieren.

Bezüglich des Bauvolumens und der Geometrie eignen sich Balken ebenfalls. Glatte Seiten führen nicht zu Problemen mit Überhängen oder rauen Oberflächen durch den „Treppeffekt“. Ein negativer Aspekt einer dünnen, länglichen Struktur ist dagegen der Temperaturverzug. Bei Platten ist dieser Effekt jedoch noch ausgeprägter, sodass Balken unter diesem Gesichtspunkt vorzuziehen sind.

Eine Einschränkung der Geometrie besteht durch den Bauraum der Drucker. Die Länge der Proben kann nicht länger als die längste Bauraumabmessung sein. Eine diagonale Platzierung der Probe ist zwar möglich und würde den Bauraum um den Faktor  $\sqrt{2}$ <sup>1</sup> erhöhen, jedoch wäre dies nicht vorteilhaft, wenn mehrere Proben gleichzeitig gedruckt werden sollen. Durch den Ultimaker Original+ mit einer Bauplattform von 210 mm Länge und Breite ergibt sich für diesen Drucker dieser Wert auch als maximale Probenlänge. Der DeltaWASP 2040 Turbo besitzt eine runde Bauplattform mit 200 mm Durchmesser. Da die erzeugten Proben eine endliche Breite aufweisen werden, reduziert sich die maximale Länge einer rechteckigen Probe. Dies ist in Abbildung 4.1 für eine Probenbreite von 30 mm dargestellt. Die maximale Länge reduziert sich in diesem Fall auf 197,7 mm.

---

<sup>1</sup> Vorausgesetzt das Druckbett ist quadratisch. Durch die Platzierung in der Raumdiagonale erhöht sich die maximale Länge mit dem Faktor  $\sqrt{3}$ , einen würfelförmigen Bauraum vorausgesetzt, verbunden mit negativen Aspekten wie der Notwendigkeit von Stützstrukturen

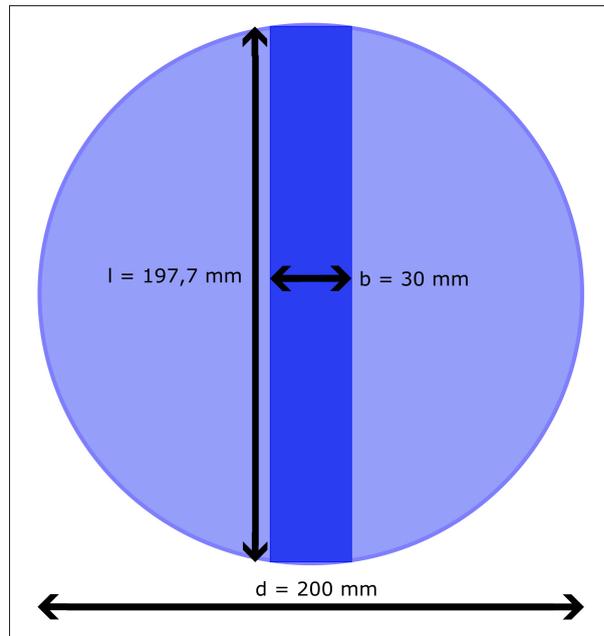


ABBILDUNG 4.1: Reduzierung der maximalen Länge bei einer 30 mm breiten Probe

Da es für die Herstellung der Proben vorteilhaft wäre, mehrere Proben gleichzeitig oder nacheinander zu produzieren, soll die Möglichkeit bestehen, drei Proben nebeneinander auf dem Druckbett zu platzieren. Hierdurch reduziert sich die maximal nutzbare Länge weiter. Bei einer gewählten Breite von 20 mm und einem Abstand von 5 mm zwischen den Proben ergäbe sich eine maximale Länge von 187,4 mm, wie in Abbildung 4.2 verdeutlicht wird.

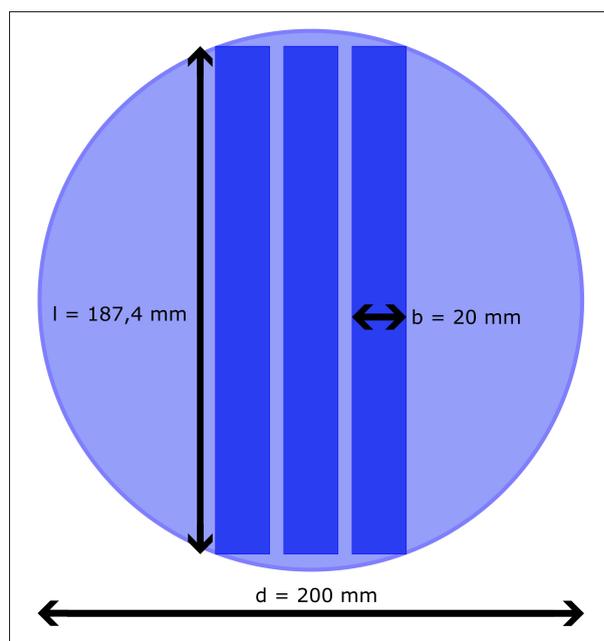


ABBILDUNG 4.2: Reduzierung der maximalen Länge bei 3 Proben mit 20 mm Breite

Durch die Verwendung von Hilfsstrukturen (siehe Hilfsstrukturen unter 3.4.1) reduziert sich die Länge beispielsweise um weitere 4 mm bei einer Brim- oder Raftbreite von 2 mm. Dies führt zu einer maximalen Länge von 183,4 mm. Um ein wenig Spielraum zu haben wird die **Probenlänge** auf **180 mm** festgelegt. Es wird eine **Einspannlänge** von **30 mm** gewählt, wodurch sich eine **schwingfähige Probenlänge** von **150 mm** ergibt.

Die Breite der Proben kann etwas besser variiert werden, wobei eine ausreichende Breite zur Befestigung von Sensoren oder einem elektrodynamischen Schwingerreger (Shaker) gegeben sein sollte. Des Weiteren sollte die Breite genug Potential bieten die Druckparameter anzupassen. Bei einer Breite von beispielsweise 8 mm und einer Spurbreite von 0,4 mm wären nur 20 nebeneinander liegende Linien zu drucken, was einer maximalen Wandstärke von 10 Linien entspricht, ohne eine Füllstruktur zu ermöglichen. Bei einer 0,8 mm Düse würde dies den Spielraum für die Parameter erheblich einschränken. Damit ein Aufbau von Proben ausschließlich aus Wandlinien problemlos erfolgen kann, wird zudem ein Vielfaches der Düsendurchmesser von 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm sowie 0,8 mm gewählt. Hierbei ist die Betrachtung von 0,6 mm und 0,8 mm ausreichend. Es wird deshalb zunächst eine **Probenbreite** von **16,8 mm** gewählt, sodass mit einer 0,8 mm Düse 21 Linien bzw. eine Wandstärke von 5 Linien plus eine Füllstruktur 8,8 mm Breite gedruckt werden können.

Ähnliche Überlegungen eignen sich auch zur Festlegung der Probendicke/-höhe. Um die Maßhaltigkeit zu gewährleisten sollte zunächst für die Standardorientierung, eine im Bauraum flach platzierte Probe, ein Vielfaches der Schichtdicke gewählt werden. Bei einer Schichtdicke von 0,2 mm ergeben beispielsweise 20 Schichten eine Höhe von 4 mm. Damit die Parameter „untere/obere Schichten“ ausreichend Spielraum für Anpassungen haben und gleichzeitig noch eine Füllstruktur realisiert werden kann, sollte die Probendicke mindestens 5 mm betragen. Bei der Variation der Orientierung würde eine Höhe von 5 mm jedoch zu dem Problem führen, dass kein Vielfaches der Standardspurbreite von 0,4 mm vorliegt. Die **Probendicke** wird deshalb auf **5,6 mm** festgelegt, sodass eine seitlich verdrehte oder vertikale Orientierung auf eine Wandstärke von 7 Linien führt.

Die festgelegte Probengeometrie (siehe Abbildung 4.3) benötigt mit normalen Einstellungen<sup>2</sup> mit dem UMO etwa 2 Stunden Druckzeit. Dieser Wert ist akzeptabel in Hinblick

---

<sup>2</sup> Beispielsweise 0,1 mm Schichtdicke, 100 % konzentrische Füllung oder 0,2 mm Schichtdicke, 100 % Linienfüllung

auf die Herstellung einer ausreichenden Anzahl von Proben verschiedener Parametereinstellungen. Deutlich größere Abmessungen in Breite oder Höhe könnten diesbezüglich jedoch problematisch sein und den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

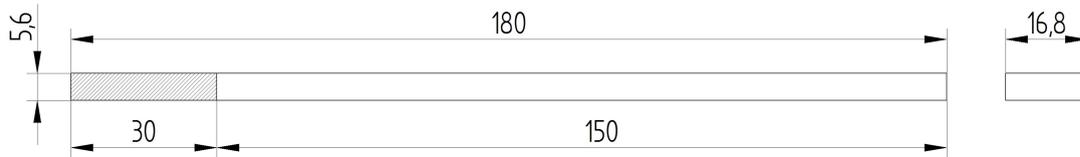


ABBILDUNG 4.3: Abmessungen der gewählten Referenzstruktur in mm

## 4.2 Erstellung des Versuchsplans

Die in Kapitel 3.4 bereits vorgestellten Prozessparameter sollen nun weiter untersucht werden in Hinblick auf ihre Eignung in den Versuchen dieser Arbeit. Es erfolgt eine Unterteilung in die Gruppe der Faktoren, welche die zu untersuchenden Parameter darstellen, und die Gruppe der möglichst konstant gehaltenen Parameter, die nicht weiter untersucht werden. Aus den Faktoren wird nachfolgend der Versuchsplan erstellt.

### 4.2.1 Auswahl der Faktoren für den Versuchsplan

Die folgenden Prozessparameter werden als zu untersuchende Faktoren ausgewählt:

**MATERIAL** Es existieren, wie in Kapitel 3.5 bereits beschrieben wurde, viele sehr unterschiedliche Materialien für das FLM-Verfahren. Den Materialdatenblättern von [Str17] ist zu entnehmen, dass die Anisotropie des Materials, welche durch die schichtweise Erzeugung des Bauteils entsteht, sich bei verschiedenen Materialien unterschiedlich auswirkt. Untersuchungen werden dennoch häufig mit den verbreiteten Materialien PLA und ABS durchgeführt. Um die Ergebnisse dieser Arbeit mit den bereits erfolgten Studien vergleichen zu können, wird ebenfalls PLA untersucht. Dies hat zudem die Vorteile, dass Probleme bei der Verarbeitung neuer Materialien mit unvorhergesehen Schwierigkeiten vermieden werden, das Material bei Bedarf kostengünstig von verschiedenen Quellen bezogen werden kann und eine gewisse Maßhaltigkeit durch den geringen Temperaturverzug von PLA gegeben ist. Um die Vergleichbarkeit der beiden verwendeten Drucker zu gewährleisten wird das gleiche Material zur selben Zeit vom selben Hersteller bestellt.

Dies sollte verhindern, dass beispielsweise veränderte Herstellungs- oder Lagerbedingungen beim Filamenthersteller zu einer schlechteren Vergleichbarkeit führen. Es wird der Hersteller *DASFILAMENT* und das Material *PLA Natur* sowie *PLA Weiß* gewählt. Der Vergleich dieser beiden Materialsorten soll mögliche Unterschiede aufgrund der Materialfarbe identifizieren. Von [WP15] konnten bereits signifikante Unterschiede bei PLA unterschiedlicher Farbe festgestellt werden.

**SCHICHTDICKE** Forscher der Hochschule Trier [MKM<sup>+</sup>16] haben bereits einen Einfluss der Schichtdicke auf den E-Modul in Zugversuchen mit PLA-Proben identifiziert<sup>3</sup>. Proben mit einer Fülldicke von 75 % und einer Schichtdicke von 0,05 mm wiesen deutlich höhere Werte auf als bei 0,1 mm oder 0,15 mm Schichtdicke. Bei 25 % und 50 % Fülldicke hatten unterschiedliche Schichtdicken keinen signifikanten Effekt [MKM<sup>+</sup>16]. Diese Ergebnisse berücksichtigend werden die Proben zur Untersuchung der Schichtdicke mit hoher Fülldicke hergestellt. Als Standardwert werden 0,2 mm gewählt um die Herstellung der Proben zu beschleunigen. Zudem wird der Einfluss einer Schichtdicke von 0,1 mm sowie 0,05 mm untersucht.

**DRUCKTEMPERATUR** Filamenthersteller geben zu ihren angebotenen Materialien häufig eine Empfehlung für die Extrudertemperatur, die sich jedoch bei verschiedenen Druckern unterschiedlich auswirken kann. Für das PLA-Material von *DASFILAMENT* wird eine Temperatur von  $215^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$  empfohlen. Dieser Temperaturbereich wird untersucht durch Proben mit einer Extrudertemperatur von  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $215^{\circ}\text{C}$  und  $230^{\circ}\text{C}$ . Zudem wird die Unterschreitung des Temperaturbereichs um  $10^{\circ}\text{C}$  mit  $190^{\circ}\text{C}$  untersucht. Die Standardtemperatur für die Untersuchung anderer Faktoren wird aufgrund der Ergebnisse von Vorversuchen mit  $200^{\circ}\text{C}$  festgelegt<sup>4</sup>.

**DRUCKER** In der Studie von [ES14] wurden mit verschiedenen Druckern hergestellte Proben miteinander verglichen. Es wurden trotz gleicher Prozessparameter große Unterschiede bei der Festigkeit sowie dem E-Modul festgestellt. Die Proben für diese Arbeit werden überwiegend mit dem *Ultimaker Original+* hergestellt. Um einen möglichen Einfluss des Druckers zu identifizieren werden zwei Probengruppen mit identischen Prozessparametern auf dem *Delta WASP 2040 Turbo* sowie dem *Ultimaker Original+* hergestellt.

<sup>3</sup> Für ABS-Proben wurde ebenfalls ein Einfluss von [RJDL16] beobachtet.

<sup>4</sup> Bei Vorversuchen kam es zunächst zu Abweichungen bei der Oberflächenqualität ab  $210^{\circ}\text{C}$ . Dies konnte später auf eine mangelhafte Temperaturregelung zurückgeführt werden, sodass nach der Optimierung der Temperaturregelung auch eine Temperatur von  $230^{\circ}\text{C}$  ohne Beeinträchtigung der Oberflächenqualität gewählt werden konnte

Sehr wichtig ist hier, dass das gleiche Material mit beiden Druckern verwendet wird, da [ES14] bereits zeigte, dass die Lagerdauer und viele weitere Faktoren das Material und damit das Bauteil beeinflussen. Material, welches nicht vom selben Hersteller kommt und möglicherweise andere Additive enthält oder anders gelagert wurde, sollte deshalb nicht verglichen werden.

Problematisch an dem Vergleich des UMO und des DW ist jedoch, dass die Kinematik der Drucker sehr unterschiedlich ist. Hierdurch können Maßabweichungen und andere Störeffekte begünstigt werden, die den Vergleich erschweren. Die Kinematik des DW weist zudem das Problem auf, dass die Bewegung des Extruders in einer geraden Linie nur durch die gleichzeitige Bewegung aller drei Achsen erfolgen kann. Damit die Bewegung in alle Raumrichtungen gleich erfolgt, sind Einstellungen in der Software bzw. Firmware des Druckers erforderlich. Außerdem muss eine hohe Genauigkeit der Hardware-Komponenten vorliegen.

**ORIENTIERUNG** Die Probenorientierung im Bauraum bestimmt, wie viele Schichten erzeugt werden und damit den Grad der interlaminaeren und intralaminaeren Haftung, welcher sich auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils auswirkt [GR14]. Da es häufig zur Nutzung der Designfreiheiten, zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit oder einer guten Oberflächenqualität an einer bestimmten Stelle, der Vermeidung von Stützstrukturen oder der Maximierung des Bauvolumens von Interesse ist, das Bauteil entsprechend zu orientieren, soll der Einfluss dieses Parameters untersucht werden.

Hierzu werden die Proben standardmäßig flach liegend im Bauraum platziert. Daraus ergibt sich eine minimale Schichtanzahl, die kürzeste Fertigungszeit und ein vermutlich geringerer Einfluss der interlaminaeren Haftung. Das seitliche Verdrehen der Probe, folgend als Orientierung *seitlich* bezeichnet, führt zu einer höheren Schichtanzahl und einer geringfügig längeren Fertigungszeit. Durch die vertikale Orientierung, folgend als Orientierung *vertikal* bezeichnet, erhöht sich die Anzahl der Schichten massiv und die Fertigungszeit geringfügig. Die Orientierungen sind in Abbildung 4.4 noch einmal verdeutlicht.

Zu beachten beim Vergleich der Orientierungen ist die unterschiedliche Fertigungszeit pro Schicht, die dazu führt, dass bei der vertikalen Orientierung deutlich weniger Zeit zum Abkühlen einer Schicht bleibt, bis die nächste gedruckt wird. Dem gegenüber steht, dass die Druckbetttemperatur bei der vertikalen Orientierung vermutlich einen deutlich

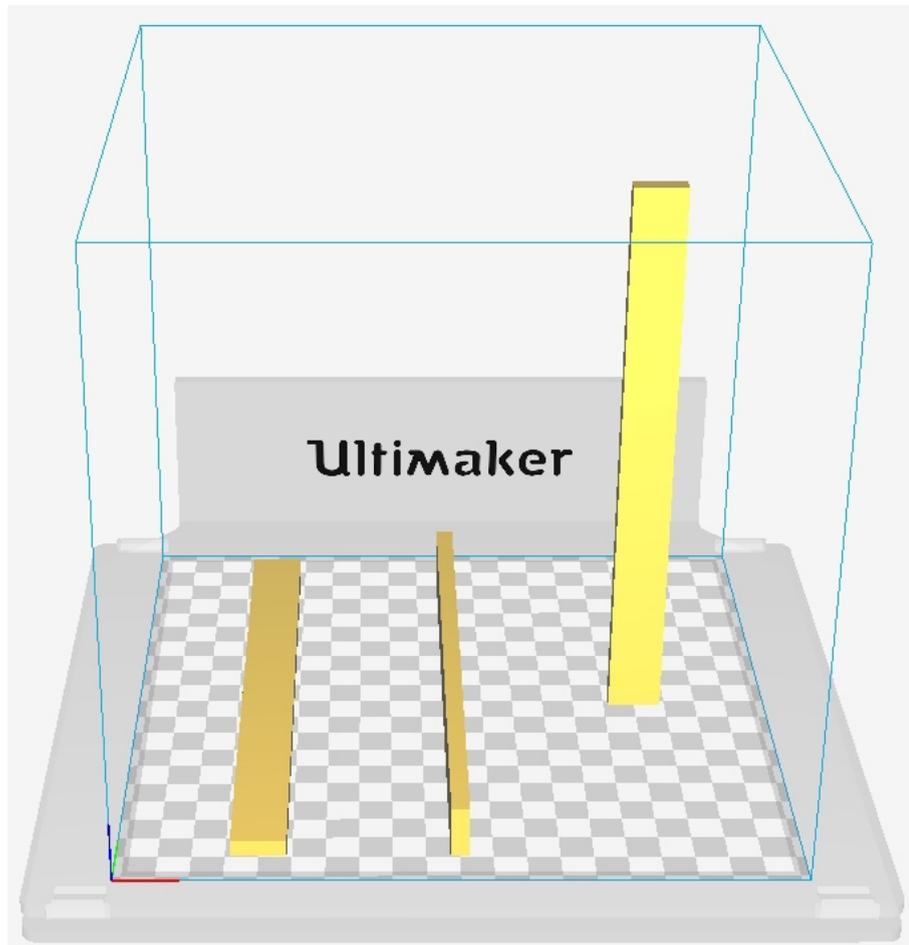


ABBILDUNG 4.4: Orientierungen von links nach rechts: flach, seitlich, vertikal

geringeren Einfluss hat als bei der flachen Orientierung. Bei der flachen Orientierung erfolgt eine Wärmeleitung vom Druckbett über eine große Fläche und eine kurze Entfernung innerhalb der Probe. Vertikale Proben haben dagegen über eine sehr kleine Fläche Kontakt zum Druckbett und in den höheren Schichten eine große Entfernung zu diesem. Letztere Problematik könnte durch einen beheizten Bauraum anstelle eines beheizten Druckbetts verhindert werden.

Der enorme Einfluss der Orientierung auf die Bruchdehnung von Zugproben aus ABS und PC und der geringere Einfluss auf den E-Modul wurde bereits von [CRD<sup>+</sup>17] festgestellt und in Kapitel 3.4 diskutiert. Insbesondere der hohe E-Modul der ABS-Proben hergestellt in vertikaler Orientierung stellte ein unerwartetes Ergebnis dar<sup>5</sup> und sollte für PLA-Proben und die Biegesteifigkeit untersucht werden.

<sup>5</sup> Widerspruch zu der Annahme, dass die Steifigkeit innerhalb einer Schicht höher ist als zwischen mehreren Schichten, wie dies bei vielen Faser-Kunststoff-Verbunden der Fall ist

**FÜLLSTRUKTUR** Die Füllstruktur hat nach [ES14] und [MKM<sup>+</sup>16] einen großen Einfluss auf den E-Modul. Aufgrund des großen Unterschiedes im Schichtaufbau werden die Muster *Konzentrisch* und *Linien* miteinander verglichen. Abhängig von der Orientierung der Proben kann die Füllstruktur unterschiedliche Auswirkungen haben, wie bereits in Kapitel 3.4 erläutert wurde. Bei der normalen flachen Orientierung ist der Schichtaufbau mit konzentrischer Füllung als 0°-Orientierung der Extrudatstränge und die Linienerfüllung als ±45°-Orientierung aufzufassen. Durch die schräge flache Orientierung wird ein 0°/90°-Aufbau mit der Linienfüllung erzeugt.

In Tabelle 4.1 sind die Faktoren noch einmal gesammelt dargestellt.

#### 4.2.2 Konstant gehaltene Parameter

In diesem Unterkapitel wird kurz auf die wichtigsten konstant gehaltenen Parameter eingegangen ohne den Anspruch auf Vollständigkeit, da der Umfang zu wählender Parameter in Open-Source Slicing-Software zu groß ist, um ihn hier vollständig zu behandeln.

**FÜLLDICHTHE** Trotz des möglicherweise großen Einflusses der Fülldichte auf den E-Modul (siehe [MKM<sup>+</sup>16]) wird der Wert konstant auf 100 % gesetzt und nicht weiter variiert. Dies hat den Vorteil, dass die Masse der Probe unabhängig von der Füllstruktur und der Wandstärke konstant bleibt. Eine Veränderung der Schwingeigenschaften ist somit auf eine Veränderung der Steifigkeit der Probe und nicht auf eine veränderte Masse zurückzuführen. Zudem führten hohe Füllgrade in einigen Studien zu den höchsten E-Modulen [MKM<sup>+</sup>16][Geb14]. Problematisch ist hierbei die von [MKM<sup>+</sup>16] festgestellte hohe Streuung der Messwerte bei hohen Füllgraden. Durch die Fülldichte von 100 % entfällt zudem der Parameter „Obere/untere Schichten“.

**FLUSS** Ebenfalls um die Masse nicht zu beeinflussen wird der Fluss konstant auf 100 % gesetzt.

**WANDDICKE** Aufgrund der in Vorversuchen ermittelten geringen Unterschiede der Proben mit variierender Wanddicke wird der Wert beim Linienmuster sowie beim schrägen Linienmuster konstant bei 0,8 mm belassen. Beim konzentrischen Muster werden die Proben ausschließlich aus Wandlinien erzeugt.

**DRUCKGESCHWINDIGKEIT** Die Druckgeschwindigkeit wird weitestgehend konstant bei 30 mm/s belassen. Eine Ausnahme stellen die Proben mit vertikaler Orientierung dar. Da die Fläche einer einzelnen Schicht bei dieser Orientierung sehr klein ist, wird die Geschwindigkeit bei diesen Proben reduziert. Vorversuche mit gleichzeitigem Erzeugen mehrerer Proben führten hierbei zu großen Streuungen und fehlerhaften Proben, sodass auf diese Option zur Erhöhung der Abkühlzeit bei gleichbleibender Druckgeschwindigkeit verzichtet wird. Ebenfalls wird darauf verzichtet, über Modifikationen des G-Codes eine Pause nach jeder erzeugten Schicht einzufügen, da dies mit weiteren Problemen verbunden wäre.

**DRUCKBETTTEMPERATUR** Die Druckbetttemperatur wird aufgrund der Ergebnisse von Vorversuchen auf 60°C festgelegt. Bei geringeren Temperaturen zeigte sich ein leichter Temperaturverzug bei der flachen Orientierung der Proben.

### 4.2.3 Versuchsplan

Die für den Versuchsplan ausgewählten Faktoren aus Kapitel 4.2.1 sowie einige wichtige konstant gehaltene Parametern bei der Probenherstellung sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Um eine Varianzanalyse durchführen zu können, also die Signifikanz von Unterschieden bei den Mittelwerten verschiedener Probengruppen festzustellen, wird eine Anzahl erforderlicher Proben pro Probengruppe ermittelt. Dazu wird nach der statistischen Modellbildung von [SvH10] verfahren. Es sind folgende Größen zu wählen:

Die  **$\alpha$ -Wahrscheinlichkeit** gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Effekt fälschlich als signifikant bestimmt wird. Dies wird teilweise als Fehler 1. Art bezeichnet. Sollte die Signifikanz des Effektes schwerwiegende Folgen haben, so sollte die  $\alpha$ -Wahrscheinlichkeit sehr klein gewählt werden. In dieser Arbeit ist jedoch eine relativ große  $\alpha$ -Wahrscheinlichkeit von 10% tolerierbar, da vorwiegend qualitative Aussagen über den Einfluss der Prozessparameter erfolgen werden und die Konsequenz lediglich eine weitere Untersuchung der Effekte mit anderen Druckern und Materialien sein sollte.

Die  **$\beta$ -Wahrscheinlichkeit**, auch bezeichnet als Fehler 2. Art, ist diejenige Wahrscheinlichkeit, einen signifikanten Effekt nicht als solchen zu erkennen. In diesem Zusammenhang

TABELLE 4.1: Übersicht der Faktoren und konstant gehaltenen Parameter für den Versuchsplan

Faktoren	Variationen			
Drucker	Ultimaker	DeltaWASP		
Material	PLA Natur	PLA Weiß		
Orientierung	flach	seitlich	vertikal	
Füllmuster	Konzentrisch	Linien	Linien (schräg)	
Temperatur	190°C	200°C	215°C	230°C
Schichtdicke	0.05 mm	0.1 mm	0.2 mm	
Konstante Parameter				
Füllichte	100 %			
Fluss	100 %			
Druckbetttemperatur	60°C			
Spurbreite	0.4 mm			
Wanddicke	0.8 mm			
Druckgeschwindigkeit	30 mm/s			

wird die sogenannte „**Power**“, definiert durch  $1-\beta$ , gewählt. Die Power gibt an, wie wahrscheinlich es ist, einen vorhandenen signifikanten Effekt zu erkennen. Es wird eine Power von 80 % festgelegt.

Eine weitere zu wählende Größe ist die sogenannte „**praktische Signifikanz**“  $\Delta$ . Diese gibt an, wie stark ein Effekt sein sollte, damit er relevant ist und als signifikanter Effekt identifiziert werden sollte.  $\Delta$  wird zu 5 % gewählt.

Ebenfalls einen Einfluss auf die Signifikanz hat die **maximale Anzahl der Stufen** eines Faktors. Für den Faktor Drucktemperatur ist eine Stufe beispielsweise 190°C. Für die Untersuchung der Temperaturen 190°C, 200°C, 215°C und 230°C ergibt sich eine maximale Anzahl von 4 Stufen.

Für die Bestimmung der erforderlichen Probenzahl ist neben den oben beschriebenen und zu wählenden Werten die **Standardabweichung** der Messungen zu bestimmen. Da diese

nicht vor der Herstellung von Proben ermittelt werden kann, waren hierfür Vorversuche durchzuführen. Hierbei ergaben sich Standardabweichungen von etwa 2,5 %.

Durch das Einsetzen dieser Werte in Tabelle A.1 im Anhang wird die erforderliche Probenanzahl zu 6 bestimmt. Durch die in Kapitel 4.2.1 bestimmten Faktoren wird schließlich der in Tabelle 4.2 dargestellte Versuchsplan abgeleitet. Jeder Faktoreinstellung wird unter *Bezeichnung* ein Kürzel zugeordnet, welches den verwendeten Drucker kennzeichnet. Der Übersichtlichkeit halber wird das Material PLA Natur mit *N* abgekürzt. PLA Weiß dagegen mit *W*. Das konzentrische Muster ( $0^\circ$ ) wird als *Konzentrisch*, das Linienmuster ( $\pm 45^\circ$ ) als *Linien* und das schräge Linienmuster ( $0^\circ/90^\circ$ ) als *Linien\** bezeichnet. Die Schichtdicke wird unter  $h_S$  und die Extrudertemperatur unter T angegeben.

TABELLE 4.2: Versuchsplan

Bezeichnung	Drucker	Material	Orientierung	Füllmuster	$h_S$ [mm]	T [°C]
UMO-1	UMO	N	flach	<b>Linien*</b>	0.2	200
UMO-2	UMO	<b>W</b>	flach	Linien	0.2	200
UMO-3	UMO	<b>W</b>	flach	Konzentrisch	0.2	200
UMO-4	UMO	<b>N</b>	flach	Konzentrisch	<b>0.2</b>	200
UMO-5	UMO	N	flach	Konzentrisch	<b>0.1</b>	200
UMO-6	UMO	N	flach	Konzentrisch	<b>0.05</b>	200
UMO-7	UMO	N	flach	Linien	0.2	<b>190</b>
UMO-8	UMO	N	flach	Linien	0.2	<b>200</b>
UMO-9	UMO	N	flach	Linien	0.2	<b>215</b>
UMO-10	UMO	N	flach	Linien	0.2	<b>230</b>
UMO-11	UMO	N	<b>seitlich</b>	Konzentrisch	0.2	200
UMO-12	UMO	N	<b>vertikal</b>	Konzentrisch	0.2	200
UMO-13	UMO	N	vertikal	<b>Linien</b>	0.2	200
DW-1	<b>DW</b>	N	vertikal	Konzentrisch	0.2	200
DW-2	<b>DW</b>	W	vertikal	Konzentrisch	0.2	200

## Kapitel 5

# Experimentelle Bestimmung des akustischen Übertragungsverhaltens

In diesem Kapitel wird die experimentelle Bestimmung des akustischen Übertragungsverhaltens beschrieben. Zu Beginn wird der Versuchsaufbau und anschließend die Versuchsdurchführung erläutert.

Untersucht wird die Schwingungsantwort der Proben auf eine Impulsanregung. Aus dieser können Rückschlüsse auf die Steifigkeit und die Dämpfung gezogen werden. Die Probenmasse und die reale Geometrie, welche einen Einfluss auf das Schwingverhalten der Probe haben, werden ebenfalls ermittelt.

### 5.1 Versuchsaufbau

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben wurde, existieren verschiedene Methoden zur Ermittlung des akustischen Übertragungsverhaltens. In dieser Arbeit wird ein Ausschwingversuch der Proben mit einseitiger Einspannung infolge einer Impulsanregung mittels Impulshammer durchgeführt. Die Anregungskraft wird am Impulshammer aufgenommen, während an einem anderen Punkt die Schnelle gemessen wird. Hieraus wird dann die Übertragungsfunktion der Struktur ermittelt. Auf eine Phasenresonanzmethode mit harmonischer Anregung wird aufgrund des hohen Zeitaufwands dieser Messmethoden verzichtet.

Abbildung 5.1 zeigt die Einspannung einer Probe in dem verwendeten Versuchsaufbau. Die Anregung der Probe erfolgt in dem als Anregungsbereich gekennzeichneten Bereich mit einem Impulshammer<sup>1</sup> (siehe Abbildung 2.1) mit einer Kunststoffspitze.

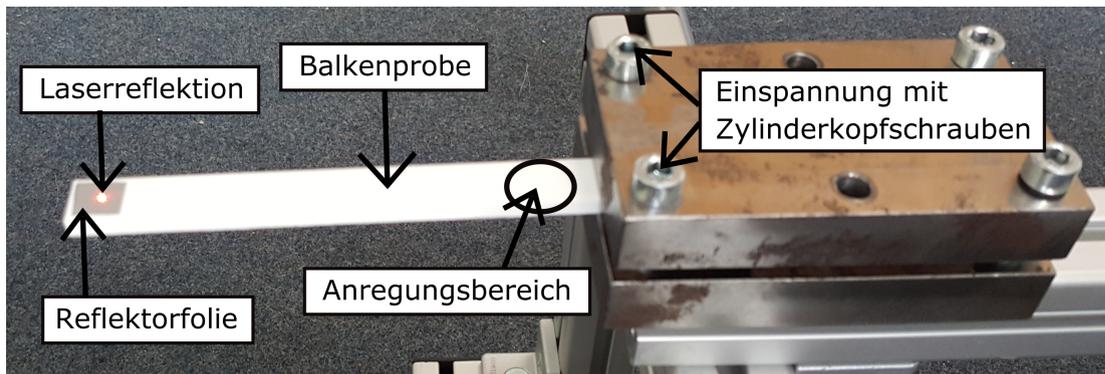


ABBILDUNG 5.1: Einspannung einer Probe im Ausschwingversuch

Die Schwingantwort wird mit einem Einpunkt-Laservibrometer<sup>2</sup> ermittelt. Um die für die Funktion des Vibrometers erforderliche Reflektion des Lasers zu gewährleisten wird Reflektorfolie<sup>3</sup> auf die Proben geklebt, wie in Abbildung 5.1 links zu sehen ist. Die Einspannung erfolgt über die zwei Zylinderkopfschrauben an der Einspannvorrichtung mit einem Drehmoment von 10 Nm.

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die Vorversuche beschrieben, die zur Auswahl des Sensors sowie zur Definition des Drehmoments führten.

### 5.1.1 Vorversuche zur Ermittlung des Sensoreinflusses

In ersten Vorversuchen wurde mit einem Beschleunigungssensor (PCB-M352C65) ein Ausschwingversuch durchgeführt. Die erste Biegeeigenfrequenz wurde dabei zu 30 Hz gemessen<sup>4</sup>. Da das Verhältnis der Sensormasse (5,8 g) zur Probenmasse (16,5 g) recht hoch war, wurde anschließend mit einem leichteren Sensor (PCB-M353B15, Masse: 2,0 g) gemessen. Die erste Biegeeigenfrequenz lag in diesem Versuch bei 40 Hz, sodass eine starke Verstimmung des Systems durch die Sensormasse anzunehmen ist. Wie in Gleichung 2.12

<sup>1</sup> Typ 8206-002 von Brüel und Kjær

<sup>2</sup> Polytec (CLV700/800/1000)

<sup>3</sup> Es wurden drei verschiedene Folien getestet ohne signifikante Unterschiede in den Messergebnissen

<sup>4</sup> Die Vorversuche wurden mit einer Probengeometrie durchgeführt, die sich von der Referenzstruktur leicht unterscheidet (Breite 15 mm statt 16,8 mm, Höhe 5 mm statt 5,6 mm). Die Ergebnisse sollten deshalb nur zur Untersuchung des Sensoreinflusses dienen.

auf Seite 13 bereits verdeutlicht wurde, sinkt die Eigenfrequenz mit steigender Sensormasse. Die reale erste Biegeeigenfrequenz der gemessenen Probe liegt also höher, als in der zweiten Messung mit dem leichteren Beschleunigungssensor gemessen wurde. Eine Abschätzung des Einflusses der Sensormasse auf die erste Biegeeigenfrequenz ist mit der Formel 2.12 einfach durchzuführen. Bei einem starken Einfluss sollte ein leichter Sensor<sup>5</sup> oder eine andere Messmethode gewählt werden. Eine Umrechnung auf die tatsächliche Eigenfrequenz ist mit dieser Formel nicht ohne weiteres möglich, da die an der Schwingung beteiligte Probenmasse nicht einfach zu bestimmen ist.

Angenommen, 15/18-tel der Probenmasse können als potentiell schwingende Masse betrachtet werden, da 3/18-tel der Probenlänge fest eingespannt sind. Dadurch wird die Gesamtprobenmasse von 16,5 g auf eine potentiell schwingende Masse von 13,75 g reduziert. Dies würde bei einem Sensor mit einer Masse von 5,8 g zu einer Reduzierung der Eigenfrequenz auf 84 % dieser führen. Der leichtere Sensor hätte dagegen 93 % als Ergebnis. Das Verhältnis dieser Frequenzen passt jedoch nicht zu den gemessenen Werten und liegt weit entfernt von der analytischen und numerischen Abschätzung (siehe 6.1). Um diese Verstimmung des Systems zu vermeiden wurde im Anschluss eine berührungslose Messung mittels Laservibrometer durchgeführt. Hierbei wurde wie erwartet mit 54 Hz eine deutlich höhere Eigenfrequenz als zuvor gemessen. Das Einsetzen dieser Frequenz in die Abschätzungsformel 2.12 zusammen mit den Messwerten und den Massen der Sensoren führt auf eine an der Schwingung beteiligte Masse von nur 2,43 g beim leichten bzw. 0,893 g beim schweren Sensor. Diese Werte sollen an dieser Stelle nicht weiter interpretiert werden, sondern nur verdeutlichen, dass die geringe Probenmasse eine berührungslose Messung erforderlich macht. Alle weiteren Messungen werden mit dem Laservibrometer durchgeführt.

### 5.1.2 Vorversuche zur Ermittlung des Einflusses der Einspannung

Die Wiederholung von Messungen derselben Probe führte in Vorversuchen zu einer starken Abweichung der gemessenen Eigenfrequenzen von ca. 10 %. Im folgenden wurde deshalb der Einfluss des Drehmoments an den Schrauben der Einspannung untersucht.

---

<sup>5</sup> Prinzipiell sollte der leichteste Sensor mit dem erforderlichen Dynamikbereich gewählt werden [KSA06]

Abbildung 5.2 zeigt Messungen der Eigenfrequenz einer Probe mit unterschiedlichen Drehmomenten in der Einspannung. In blau sind dabei Messwerte dargestellt, bei denen das Drehmoment nach jeder Messung erhöht wurde. Die Proben wurden in diesem Fall nicht aus der Einspannung entfernt oder entlastet. Es ist eine klare Tendenz zu erkennen, dass die Eigenfrequenz mit dem Drehmoment steigt. Dieser Effekt ist unterhalb von 16 Nm besonders stark ausgeprägt. In rot sind Messwerte dargestellt, bei denen die Probe neu eingespannt wurde mit 26 Nm sowie mit 30 Nm Drehmoment. Hier ist eine deutliche Verringerung der Eigenfrequenz zu erkennen, insbesondere bei 30 Nm. Eine Erklärung für diesen Effekt könnte die plastische Verformung der Proben im Einspannungsbereich sein. Ein besonders hohes Drehmoment führt folglich nicht zu dem Ergebnis einer möglichst ideal-starren Einspannung und reproduzierbaren Messergebnissen.

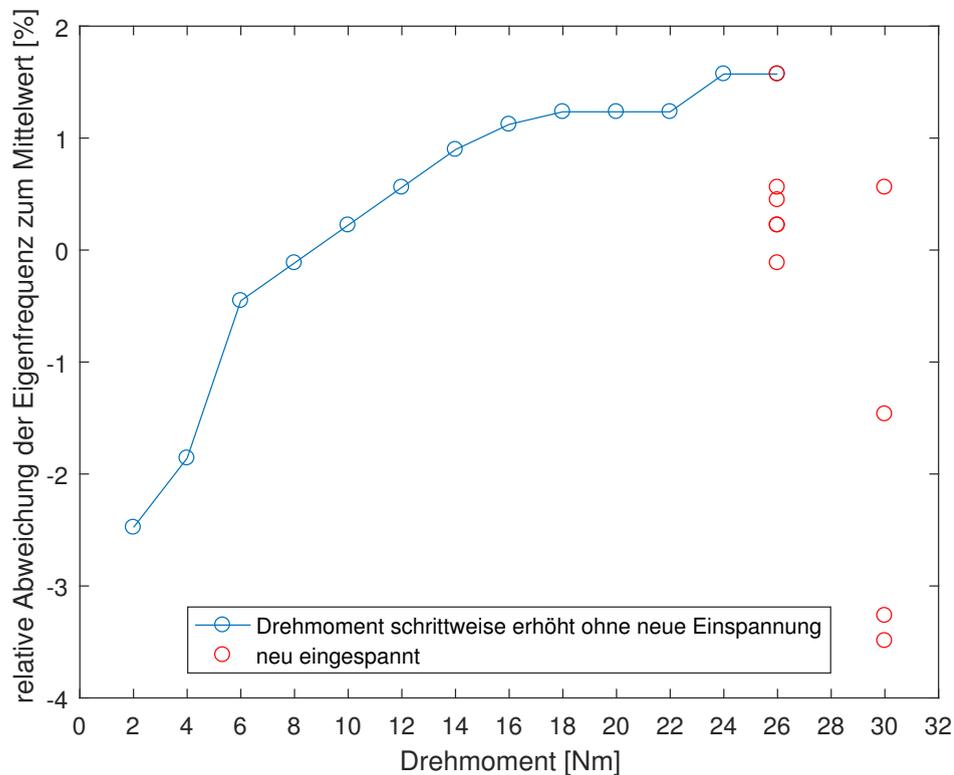


ABBILDUNG 5.2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Drehmoments an der Einspannung auf die 1. Biegeeigenfrequenz mit verschiedenen Drehmomenten

Um die Streuung der Messwerte zu vermeiden und ein angemessenes Drehmoment für reproduzierbare Messergebnisse zu ermitteln wurden weitere Proben mit unterschiedlichen Drehmomenten gemessen. In Abbildung 5.3 sind die Messwerte mehrerer Proben dargestellt, die mehrmals mit einem Drehmoment von 10 Nm bzw. 20 Nm eingespannt

wurden. Auch hier ist eine starke Streuung mit einer Spannweite von etwa 5% bei der Probe mit 20 Nm Drehmoment zu erkennen. Hier wurden allerdings zunächst niedrige und zuletzt hohe Werte gemessen. Eine Erklärung hierfür könnte wiederum die plastische Verformung innerhalb der Probe sein. Die Ergebnisse stehen jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen in 5.2, sodass eine klare Aussage über das Auftreten der Streuung auf Grundlage dieser Untersuchungen nicht möglich ist. Um die plastische Verformung der Proben zu vermeiden wurden folgend Proben wiederholt mit 10 Nm Drehmoment eingespannt und gemessen. Bei diesen Proben trat lediglich eine Streuung von etwa  $\pm 1\%$  um den Mittelwert auf.

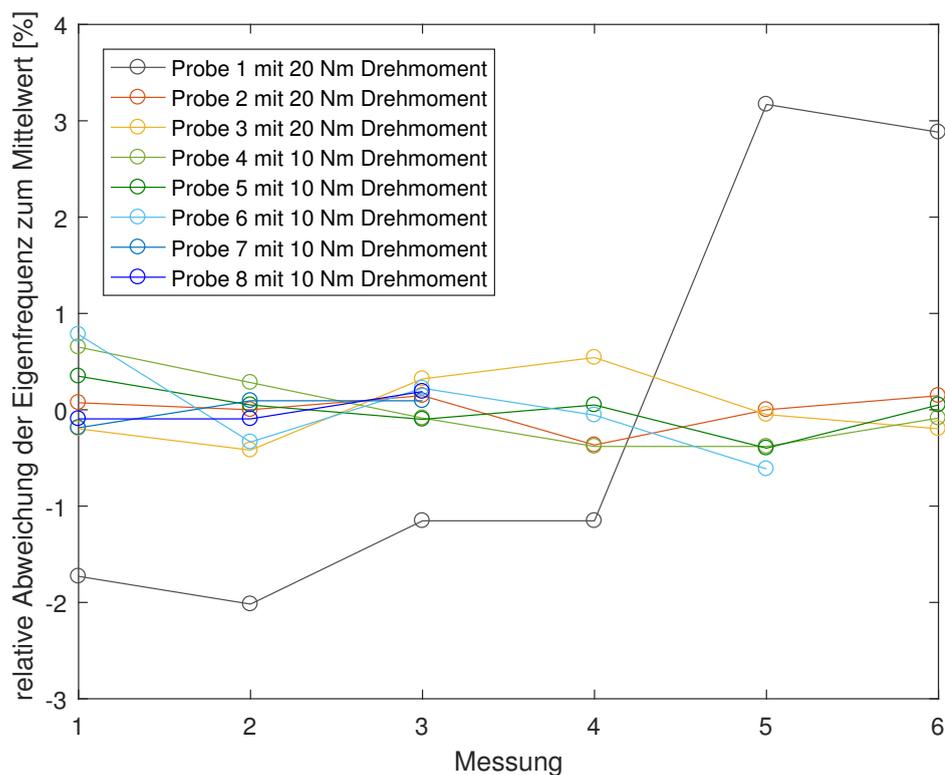


ABBILDUNG 5.3: Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Drehmoments an der Einspannung auf die erste Biegeeigenfrequenz mit 10 Nm sowie 20 Nm Drehmoment

Die in der analytischen Abschätzung vorhandenen Randbedingungen einer ideal-starren Einspannung (siehe Kapitel 6) sind also in der Praxis nicht zu realisieren und bei einer Annäherung an diese Bedingung mit dem Problem der Streuung der Werte und der plastischen Verformung der Proben verbunden. Um diese Problematik zu vermeiden ist eventuell eine freie Aufhängung mit Fäden einer Einspannung vorzuziehen [Mös10, S.517f.][MK10, S.170f.]. Da das Ziel dieser Arbeit jedoch vielmehr eine Abschätzung des

Einflusses der Prozessparameter als die genaue Ermittlung von Materialkennwerten ist, soll die Näherung an die ideal-starre Einspannung ausreichen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Streuung der Werte bei 10 Nm wird dieses Drehmoment bei allen Proben des Versuchsplans verwendet. Auf eine Korrektur der Messwerte, um die realen Randbedingungen zu berücksichtigen, wird aus oben genannter Begründung verzichtet.

## 5.2 Durchführung

Mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau erfolgt die Untersuchung der Biege-Wellen der Struktur. Weitere in der Struktur vorhandene Wellentypen wie beispielsweise Torsionswellen werden nicht gezielt untersucht, da diese für die Schallabstrahlung weniger relevant sind als Biege-Wellen und eine Untersuchung dieser zudem deutlich aufwendiger ist [MK10, S.170f.].

Die Anregung erfolgt mit dem Impulshammer mit einer möglichst geringen Kraft<sup>6</sup> und möglichst kurz<sup>7</sup>. Bereits sehr geringe Kräfte ( $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  N) führen bei der Struktur zu nichtlinearem Verhalten, welches sich in Oberschwingungen, also Resonanzverhalten bei einem ganzzahligen Vielfachen der Eigenfrequenz zeigt. Es ist deshalb eine sehr geringe Anregungskraft ( $< 1 \cdot 10^{-3}$  N) erforderlich.

Abbildung 5.4 zeigt zwei direkt nacheinander erfolgte Messungen. In der blauen Kurve ist die Übertragungsfunktion mit annähernd linearem Verhalten dargestellt, welches sich bei sehr geringer Anregung zeigte. In der orangenen Kurve ist dagegen ein deutlich nichtlineares Verhalten infolge einer stärkeren Anregung zu sehen.

<sup>6</sup> Die notwendige Kraft ist von der zu untersuchenden Struktur abhängig [MK10, S.520]

<sup>7</sup> Durch einen idealen Impuls werden alle Frequenzen angeregt. Ein nicht-idealer Impuls führt zu einer breiten Frequenzanregung, die sich jedoch zu höheren Frequenzen verschlechtert [MK10, S.520])

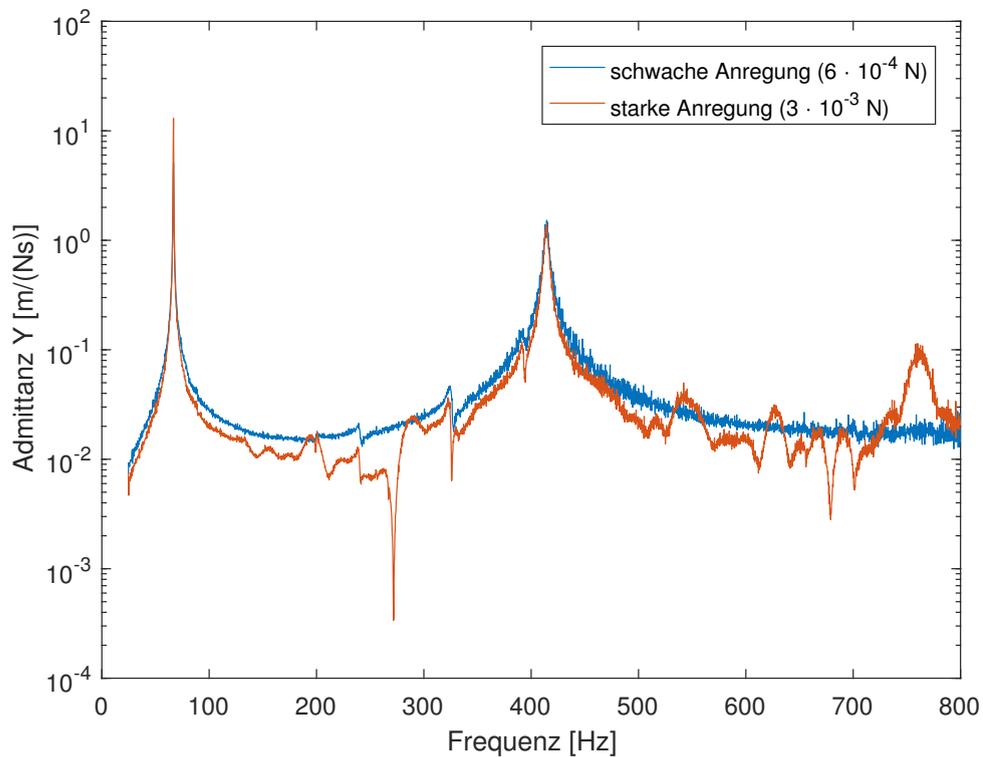


ABBILDUNG 5.4: Nichtlineares Schwingverhalten

Die ersten beiden Biegeeigenfrequenzen sind unabhängig von den Nichtlinearitäten und dem Messrauschen problemlos bestimmbar. Oberhalb von 1000 Hz zeigt sich jedoch ein verstärktes Rauschen. Mithilfe eines Medianfilters kann die Messkurve dennoch geglättet und es können weitere Eigenfrequenzen aus den Messdaten ermittelt werden. Abbildung 5.5 zeigt die Auswirkungen eines Medianfilters auf das Messsignal. Die Höhe der Maxima wird durch das Filter zwar verändert, wie insbesondere bei der ersten Eigenfrequenz zu sehen ist, die Lage der Frequenzen bleibt jedoch ausreichend genau erhalten.

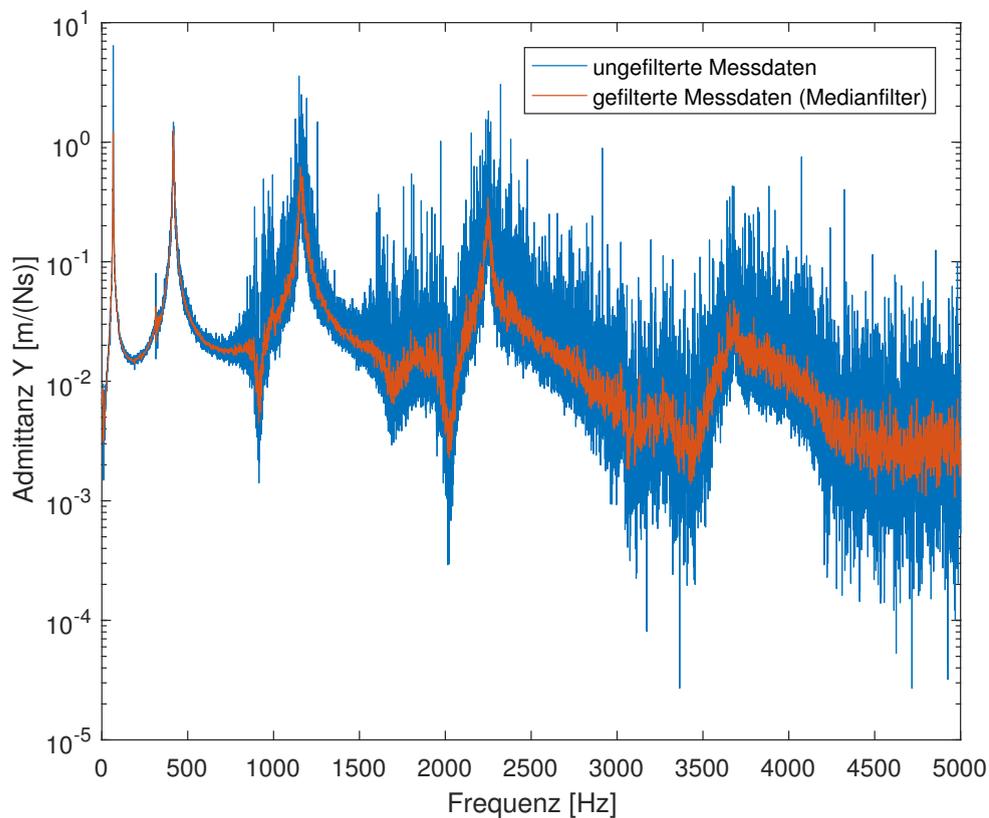


ABBILDUNG 5.5: Auswirkungen eines Medianfilters auf das Messsignal

Aus der gefilterten Kurve können die ersten fünf Eigenfrequenzen problemlos ermittelt werden. In Tabelle 5.1 sind die Eigenfrequenzen aus Abbildung 5.5 aufgeführt.

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
66,30 Hz	417,1 Hz	1156 Hz	2247 Hz	3680 Hz

TABELLE 5.1: Gemessene Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur

Eine Ursache für das mit der Frequenz zunehmende Rauschen ist die Anregung mit einem Impulshammer mit Kunststoffspitze. Die Spitze wirkt wie ein Tiefpassfilter auf die Anregung [MK10, S.520]. Der Kraftimpuls wird dadurch kleiner und breiter im Vergleich zu der härteren Aluminiumspitze [MK10, S.494].

# Kapitel 6

## Simulation

In diesem Kapitel wird die analytische Berechnung und numerische Simulation der Referenzstruktur beschrieben.

### 6.1 Analytische Berechnung der Referenzstruktur

Die analytische Berechnung der Referenzstruktur kann durch die einfachen Abschätzungen zur Eigenfrequenz aus [DH16, S.359 f.] erfolgen. Formel 6.1 wird in diesem Fall für den einseitig eingespannten Balken (Kragbalken) genutzt. Dabei ist  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $\lambda$  die Eigenwerte,  $E$  der Elastizitätsmodul,  $I$  das Flächenträgheitsmoment,  $\rho$  die Dichte,  $A$  die Querschnittsfläche und  $l$  die Länge des Balkens.

$$\omega_i = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (6.1)$$

Mit den Eigenwerten in Tabelle 6.1 können so die ersten fünf Eigenkreisfrequenzen bestimmt werden.

$\lambda_1^2$	$\lambda_2^2$	$\lambda_3^2$	$\lambda_4^2$	$\lambda_5^2$
3,52	22,0	61,7	121	200

TABELLE 6.1: Eigenwerte des Kragbalkens aus [DH16]

Bei  $i \geq 6$  lassen sich die Eigenwerte  $\lambda_i$  für den Balken mit einseitiger Einspannung mit der Formel 6.2 bestimmen.

$$\lambda_i^2 = \left(i - \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 \quad (6.2)$$

Es gilt zudem der Zusammenhang  $\omega = 2\pi f$  für die Kreisfrequenz und die Frequenz, sodass diese im folgenden für einen angenommenen E-Modul, eine Dichte und die Geometrie der Referenzstruktur berechnet werden kann.

Mit einem angenommenem E-Modul von 3000<sup>1</sup> MPa, einer Dichte von 1200<sup>2</sup> kg/m<sup>3</sup> und der Referenzgeometrie<sup>3</sup> ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgeführten Werte für die ersten fünf Biegeeigenfrequenzen. Ein Vergleich mit den gemessenen Werten aus Tabelle 5.1 zeigt, dass alle Frequenzen höher gemessen wurden als berechnet. Eine Erhöhung des E-Moduls in der Berechnung auf 3256 MPa führt zu Ergebnissen, die deutlich näher an den gemessenen Werten liegen. Der Vergleich der Ergebnisse der analytischen Berechnung mit der ermittelten Übertragungsfunktion aus Abbildung 5.5 verdeutlicht zudem, dass es sich bei den Maxima zweifelsohne um die Biegeeigenfrequenzen handelt und diese das Schwingverhalten bei der vorhandenen Impulsanregung in großem Maße bestimmen.

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
gemessen	66,30 Hz	417,1 Hz	1156 Hz	2247 Hz	3680 Hz
analytisch ( $E = 3000$ MPa)	63,64 Hz	397,8 Hz	1116 Hz	2188 Hz	3616 Hz
prozentualer Unterschied	-4,01 %	-4,63 %	-3,46 %	-2,63 %	-1,74 %
analytisch ( $E = 3256$ MPa)	66,30 Hz	414,4 Hz	1162 Hz	2279 Hz	3767 Hz
prozentualer Unterschied	$\pm 0,00$ %	-0,65 %	+0,52 %	+1,42 %	+2,36 %

TABELLE 6.2: Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur nach analytischer Berechnung mit verschiedenen Elastizitätsmoduln

Die Ergebnisse dieser analytischen Abschätzung können im Folgenden genutzt werden um die Plausibilität der Ergebnisse des numerischen Modells zu überprüfen.

<sup>1</sup> 3350 MPa laut [CCMP16], 1900 - 2600 MPa laut [ES14]

<sup>2</sup> Gemessenes Gewicht mit theoretischem Volumen der Proben führt zu 1200 kg/m<sup>3</sup>. Mit den Herstellerangaben von 750 g, 1,75 mm Durchmesser 230 m ergibt sich 1300 kg/m<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Breite: 16,8 mm, Höhe: 5,6 mm, Länge: 150 mm

## 6.2 Numerische Berechnung der Referenzstruktur

Zum Vergleich mit den Messdaten und der analytischen Berechnung wird ein einfaches Modell der Referenzstruktur mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus erstellt und eine Modalanalyse durchgeführt.

Obwohl bei den Messungen nur eine Dimension betrachtet wird und hauptsächlich die Biegeeigenfrequenzen untersucht werden, wird ein 3-dimensionales Modell erstellt um die Lage von Torsionseigenfrequenzen der Referenzstruktur ebenfalls zu ermitteln. Diese werden durch die Messung der Schnelle in der Mitte der Struktur zwar nicht speziell messtechnisch erfasst. Die Kenntnis über die Lage der Torsionseigenfrequenzen kann dennoch möglicherweise bei der Interpretation der gemessenen Übertragungsfunktion der Struktur helfen.

Da Biegewellen untersucht werden, werden quadratische Elemente gewählt. Diese können die Biegung einer Struktur deutlich besser nachbilden als lineare Elemente [KW17]. Die Referenzstruktur wird mit einer idealen Einspannung berechnet. Diese Randbedingung entspricht nicht exakt den realen Randbedingungen. In Kapitel 5.1.2 wurde bereits gezeigt, dass das gewählte Drehmoment von 10 Nm an der Einspannung nicht zu einer ideal-steifen Einspannung führt. Aufgrund des geringen Unterschiedes von weniger als 2% in der gemessenen Eigenfrequenz bei deutlich höherer Einspannungssteifigkeit wird dieser Effekt jedoch vernachlässigt. Es werden wie in der analytischen Berechnung die Werte 3256 MPa für den E-Modul und  $1200 \text{ kg/m}^3$  für die Dichte verwendet. Die Ergebnisse in Tabelle 6.3 zeigen, dass auch hier die berechneten Werte nah an den Messwerten liegen.

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
gemessen	66,30 Hz	417,1 Hz	1156 Hz	2247 Hz	3680 Hz
analytisch ( $E = 3256 \text{ MPa}$ )	66,30 Hz	414,4 Hz	1162 Hz	2279 Hz	3767 Hz
prozentualer Unterschied	$\pm 0,00 \%$	$-0,65 \%$	$+0,52 \%$	$+1,42 \%$	$+2,36 \%$
numerisch ( $E = 3256 \text{ MPa}$ )	66,93 Hz	416,6 Hz	1155 Hz	2233 Hz	3630 Hz
prozentualer Unterschied	$+0,95 \%$	$-0,12 \%$	$-0,09 \%$	$-0,62 \%$	$-1,36 \%$

TABELLE 6.3: Biegeeigenfrequenzen der Referenzstruktur nach analytischer und numerischer Berechnung

In Abbildung 6.1 sind die undeformierte Struktur sowie die ersten fünf Biegeeigenformen dargestellt. Der farbliche Verlauf stellt dabei die Auslenkung dar. Blau stellt die Bereiche minimaler Auslenkung dar.

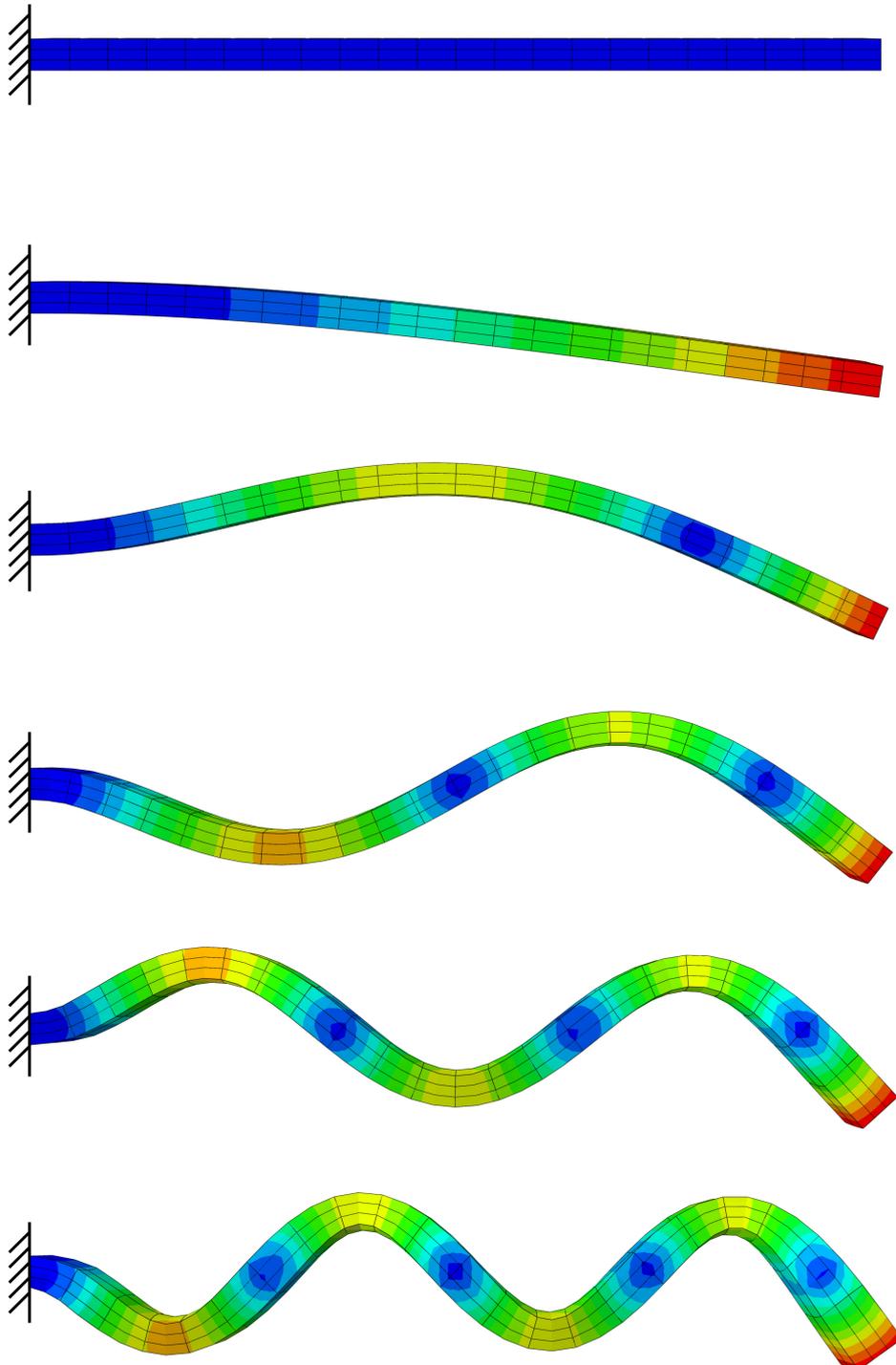


ABBILDUNG 6.1: Undeformierte Struktur und Biegeeigenformen aus dem Finite-Elemente-Modell

# Kapitel 7

## Auswertung

In diesem Kapitel werden die Auswertungen der durchgeführten Messungen beschrieben. Zu Beginn werden die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit diskutiert. Anschließend werden die Streuungen der Probenmassen beschrieben. Nachfolgend wird die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von den Faktoren des Versuchsplans untersucht. Es wird danach auf die ermittelten Dämpfungswerte eingegangen. Abschließend werden die ermittelten Faktoreinflüsse in einer Tabelle zusammengefasst.

### 7.1 Auswirkungen der Prozessparameter auf die Maßhaltigkeit

Um die Ergebnisse der Messungen mit der Simulation vergleichen zu können, ist es erforderlich zu kontrollieren, ob Maßabweichungen bei den hergestellten Proben vorliegen. Insbesondere ist hier auf systematische Maßabweichungen einzelner Faktorengruppen zu achten, damit die Auswirkung dieser nicht fälschlicherweise als eine Veränderung der Steifigkeit des Materials interpretiert wird. Aus diesem Grund werden die Breite und die Höhe aller hergestellten Proben ermittelt. Auf die Messung der Probenlänge kann in diesem Fall verzichtet werden, da sich diese aufgrund der definierten Einspannlänge von 150 mm nicht auf die Messung auswirkt<sup>1</sup>. Die Messungen der Probenhöhe und Breite erfolgen jeweils an drei Stellen. Es wird in einem Abstand von 30 mm an beiden Enden sowie in der Mitte der Proben gemessen.

---

<sup>1</sup> Fehler einer nicht korrekt eingespannten Probe können natürlich auftreten und werden bei der Gesamtfehlerabschätzung berücksichtigt

Die Maßabweichungen in der Probenbreite fallen sehr gering aus. Nur wenige Proben weisen eine Abweichung von mehr als 1 % auf. Die relative Standardabweichung liegt bei 0,6 %. Der Mittelwert der Abweichung liegt bei 0,07 %. Dies zeigt, dass insgesamt nur eine sehr geringe systematische Abweichung hin zu breiteren Proben vorliegt. Die Maßabweichungen der Probenhöhe fallen dagegen deutlich größer aus. Die Standardabweichung in der Probenhöhe liegt bei 1,8 %. Besonders die Probenorientierung scheint hier einen großen Effekt zu haben. Bei der flachen Probenorientierung liegt eine maximale Abweichung von  $-4\%$  vor. Bei der vertikalen Orientierung kann dagegen eine Abweichung von  $+4\%$  gemessen werden. Der Mittelwert der Abweichungen liegt bei  $-0,45\%$ . Diese systematische Maßabweichung hin zu flacheren Proben ist auf die ersten Schichten des Drucks zurückzuführen. Bei der flachen Orientierung ist der Anpressdruck höher in der ersten Schicht, um eine bessere Druckbetthftung zu gewährleisten. Hierdurch verringert sich jedoch die Höhe. Bei der vertikalen Orientierung liegen insgesamt eher große Probenhöhen vor, da sich die erste Schicht bei dieser Orientierung nur auf die Probenlänge auswirkt. Um diese systematische Maßabweichung zu verringern, wäre ein verringerter Anpressdruck und damit eine bessere Maßhaltigkeit der ersten Schicht oder eine um 0,1 mm größere Probenhöhe in der flachen Orientierung denkbar. Dies würde jedoch zu weiteren Problemen wie erhöhtem Temperaturverzug oder einer höheren Masse der Proben führen. Eine Alternative wäre, generell die Probengeometrie so zu vergrößern, dass die absoluten Abweichungen weniger ins Gewicht fallen und dadurch die prozentualen Abweichungen sinken. Dies wäre aber offensichtlich auch mit einer erhöhten Druckzeit und einem höheren Materialverbrauch verbunden.

Besonders ausgeprägt und damit kritisch für die Berechnung des E-Moduls sind die Maßabweichungen in der Höhe bei Gruppe UMO-12. Die vertikal orientierten Proben mit konzentrischem Füllmuster weisen durchschnittlich eine um 2,93 % zu große Probenhöhe auf. Aufgrund des starken Einflusses der Probenhöhe auf das Flächenträgheitsmoment des Balkens muss diese Maßabweichung zwingend bei der Berechnung des E-Moduls berücksichtigt werden. Wie in Tabelle 7.1 zu sehen ist, unterscheiden sich die mit der Annahme eines Idealmaßes berechneten E-Moduln stark von den Werten, bei denen das Realmaß der Proben bei der Berechnung berücksichtigt wird.

Probe	1	2	3	4	5	6
Probenhöhe [mm]	5,83	5,75	5,75	5,78	5,73	5,73
Abweichung Höhe [%]	+4,17	+2,68	+2,68	+3,27	+2,38	+2,38
E-Modul (Idealmaß) [MPa]	3272	3509	3422	3309	3331	3235
E-Modul (Realmaß) [MPa]	2892	3242	3152	3001	3107	3015

TABELLE 7.1: Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-12 (PLA Natur, vertikal, Konzentrisch)

Die Ursache für diese systematische Maßabweichung in Probengruppe UMO-12 ist nicht eindeutig erkennbar. Alleine die Orientierung ist nicht dafür verantwortlich, da bei Probengruppe UMO-13, ebenfalls in vertikaler Orientierung hergestellt, nur eine sehr geringe Maßabweichung in der Probenhöhe vorliegt. Das Füllmuster, welches Gruppe UMO-12 (*Konzentrisch*) von Gruppe UMO-13 (*Linien*) unterscheidet, ist ebenfalls als Ursache unwahrscheinlich, da Gruppe DW-1 mit bis auf den Drucker identischen Parametern zu Gruppe UMO-12 nur sehr geringe Maßabweichungen der Höhe aufweist.

Einen anderen Extremfall stellen die Parametergruppen UMO-6 und UMO-9, beide hergestellt in flacher Orientierung, dar. Die Maßabweichungen in der Probenhöhe und E-Moduln sind in den Tabellen 7.2 und 7.3 aufgeführt. In beiden Gruppen liegt bei jeder Probe eine geringe Probenhöhe und ein höherer E-Modul unter Berücksichtigung der Maßabweichungen vor.

Probe	1	2	3	4	5	6
Probenhöhe [mm]	5,45	5,48	5,48	5,47	5,55	5,57
Abweichung Höhe [%]	-2,68	-2,08	-2,08	-2,38	-0,89	-0,60
E-Modul (Idealmaß) [MPa]	3246	3177	3218	3186	3247	3211
E-Modul (Realmaß) [MPa]	3522	3388	3428	3432	3336	3275

TABELLE 7.2: Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-6 (PLA Natur, flach, Konzentrisch, 0,05 mm)

Probe	1	2	3	4	5	6
Probenhöhe [mm]	5,50	5,45	5,43	5,38	5,37	5,43
Abweichung Höhe [%]	-1,79	-2,68	-2,98	-3,87	-4,17	-2,98
E-Modul (Idealmaß) [MPa]	3414	3379	3280	3097	3158	2979
E-Modul (Realmaß) [MPa]	3590	3663	3592	3490	3602	3272

TABELLE 7.3: Maßabweichungen und Elastizitätsmoduln der Probengruppe UMO-9 (PLA Natur, flach, Linien, 215°C)

### 7.1.1 Vergleich der Maßhaltigkeit der Drucker

Die Ermittlung des Einflusses des Druckers auf die Maßhaltigkeit zeigt eine geringere Maßhaltigkeit am DeltaWasp. Dieses Ergebnis ist mit der Konfiguration des Druckers verbunden, welche aufgrund der Delta-Kinematik problematisch ist. Zur Herstellung maßhaltiger Proben muss bei dieser Kinematik neben der Druckbett-Nivellierung eine korrekte Einstellung der sogenannten *Delta-Einstellungen*<sup>2</sup> erfolgen, welche für die Umrechnung der Koordinaten der Delta-Kinematik erforderlich ist. Eine optimale Konfiguration des Druckers, welche eine gute Maßhaltigkeit bei einer guten Druckbett-Nivellierung besitzt, konnte nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund werden nur vertikal orientierte Proben verglichen. Druckbettunebenheiten wirken sich bei dieser Orientierung weniger auf die Maßhaltigkeit aus als bei flach orientierten Proben.

## 7.2 Auswirkung der Prozessparameter auf die Probenmasse

Die Masse jeder Probe wird mit einer Feinwaage<sup>3</sup> gemessen. Dabei zeigt sich eine starke Streuung der Probenmassen. Die Proben aus beiden Materialien weisen eine prozentuale Standardabweichung von über 3% auf. Genauer betrachtet fällt hier jedoch auf, dass die Probenmassen der zuerst hergestellten Proben im Mittel höher sind als die der später produzierten. Dies kann bei beiden Druckern und beiden Materialien beobachtet werden.

<sup>2</sup> Einstellung der Entfernung vom Druckkopf zu einer Achse, der Länge der Verbindungsstangen zwischen Druckkopf und Achse sowie Korrekturwerten für jede der drei Achsen

<sup>3</sup>mrc BWLC-0.6-B1

Die Vermutung, dass dieser Effekt als eine Folge der Lagerung des Materials auftritt, kann nicht eindeutig bestätigt werden. Eine neue Materialspule, welche bis zum Zeitpunkt des Drucks versiegelt war, führte ebenfalls zu einer geringen Probenmasse. Es ist also davon auszugehen, dass es zu einem gewissen Verschleiß beim Drucker (z.B. Verstopfung der Düsen, Abrieb am Extruder, ...) kommt. Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass mehrmals bei direkt nacheinander produzierten Proben die Masse kontinuierlich mit jeder Probe abnimmt. Dies ist beispielsweise bei den Probengruppen UMO-5 und UMO-9 der Fall. Die gemessenen Massen und die prozentuale Abweichung zum Mittelwert sind in den Tabellen 7.4 und 7.5 aufgeführt.

Probe	1	2	3	4	5	6	Mittelwert
gemessene Masse [g]	19,77	19,71	19,70	19,65	19,56	19,50	<b>19,65</b>
Abweichung [%]	+0,62	+0,31	+0,26	+0,01	-0,45	-0,75	

TABELLE 7.4: Gemessene Massen der Probengruppe UMO-5 (PLA Natur, flach, konzentrisch, 0,1 mm)

Bei der Probengruppe UMO-5 ist die Abnahme der Probenmasse erkennbar, jedoch fällt diese vergleichsweise gering aus. Die prozentuale Massenabweichung der Probengruppe UMO-9 ist dagegen enorm.

Probe	1	2	3	4	5	6	Mittelwert
gemessene Masse [g]	20,56	20,35	20,20	19,96	19,74	19,71	<b>20,09</b>
Abweichung [%]	+2,36	+1,31	+0,56	-0,63	-1,73	-1,88	

TABELLE 7.5: Gemessene Massen der Probengruppe UMO-9 (PLA Natur, flach, Linien, 215°C)

Diese kontinuierliche Massenabnahme der Proben stellt eine systematische Störung im Herstellungsprozess dar. Aufgrund solcher systematischer Störungen kann es leicht vorkommen, dass Faktoreinflüsse fälschlicherweise als signifikant eingestuft werden [SvH10]. Bei nachfolgend hergestellten Proben wurde eine erhöhte Randomisierung bei Herstellung angestrebt.

Eine Abhängigkeit der Masse von einigen Faktoren ist ebenfalls zu erkennen. Insbesondere die Drucktemperatur beeinflusst die Probenmasse. Dies lassen bereits die Tabellen 7.4 und 7.5 vermuten. Die Gruppe UMO-5 (Drucktemperatur: 200°C) weist mit 19,65 g einen deutlich geringeren Mittelwert auf als die Gruppe UMO-9 (Drucktemperatur: 215°C) mit 20,09 g. Da zwischen diesen beiden Gruppen jedoch neben der Drucktemperatur auch die Schichtdicke und das Füllmuster unterschiedlich sind, werden in Tabelle 7.6 die Parametergruppen UMO-7, UMO-8, UMO-9 und UMO-10 verglichen. Diese Gruppen unterscheidet ausschließlich die Drucktemperatur.

Probengruppe	UMO-7	UMO-8	UMO-9	UMO-10
Drucktemperatur [°C]	190	200	215	230
Mittelwert der Masse [g]	19,76	19,93	20,09	20,49

TABELLE 7.6: Gemessene Massen der Probengruppe UMO-7, UMO-8, UMO-9 und UMO-10 (Temperaturvariation)

Eine Erklärung für die mit der Temperatur steigende Masse könnte die Förderung des Materials am Extruder sein, welche nur durch den Schrittmotor geregelt wird. Bei einer hohen Temperatur schmilzt das Material schneller auf in der Düse, wodurch der mechanische Widerstand gegen den Vorschub des Materials verringert wird. Eine niedrige Temperatur führt dagegen zu einer hohen Viskosität der Schmelze und damit einem höheren mechanischen Widerstand. Durch diesen kann es am Extruderförderrad zu einem verringerten Vorschub infolge von Schlupf kommen.

Weitere Auswertungen für die Abhängigkeit der Masse fallen aufgrund des oben genannten Effektes der geringen Massen zuletzt hergestellter Proben schwer. Die Abhängigkeiten der Masse vom Füllmuster, der Probenorientierung sowie der Schichtdicke können aufgrund dieses Effektes nicht sinnvoll ausgewertet werden. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden PLA-Sorten kann nicht festgestellt werden.

### 7.3 Auswirkung der Prozessparameter auf den Elastizitätsmodul

Zur Untersuchung der Steifigkeit werden die Biegeeigenfrequenzen der Proben ermittelt und daraus mit Hilfe der Formel 7.1 der E-Modul bestimmt. Aufgrund der mit den Prozessparametern variierenden Massen und auftretenden Maßabweichungen kann der E-Modul nicht allein aus der 1. Biegeeigenfrequenz ermittelt werden, sondern erfordert die Berücksichtigung der Masse und der vorliegenden Maßabweichungen. Die gemessenen Werte, eingesetzt in Formel 7.1, eine Umstellung der Formel 6.1, führen so auf den E-Modul.

$$E = \left( \frac{2\pi f_1}{3,52} \right)^2 \frac{12ml^3}{bh^3} \quad (7.1)$$

Aufgrund der Unsicherheiten bei den Messungen ist diese Methode sicherlich etwas ungenau für die Ermittlung des E-Moduls. Aufgrund der Möglichkeit, aus den Schwingungsmessdaten zusätzliche schwingungscharakterisierende Größen wie der Dämpfung zu erhalten, wurde diese Methode dennoch Zug- und Biegeversuchen vorgezogen.

#### 7.3.1 Auswirkung der Drucktemperatur auf den Elastizitätsmodul

Bei der Betrachtung des Faktors Temperatur in Bezug auf den E-Modul lässt sich feststellen, dass bei der vom Materialhersteller empfohlenen Temperatur die höchsten E-Moduln gemessen wurden. Die Werte der Parametergruppen sind in Tabelle 7.7 aufgeführt. Erstaunlich ist hier, dass für die Gruppe UMO-7 höhere Werte ermittelt wurden als für Gruppe UMO-8. Dies ist teilweise auf die Maßabweichungen der Probengruppe UMO-7 zurückzuführen, welche sich positiv in der Berechnung des E-Moduls auswirken. Zudem könnte dies ein Indiz für die Verschlechterung der Herstellungsqualität sein, da die Proben der Gruppe UMO-8 zu einem späten Zeitpunkt hergestellt wurden. Andererseits wurden ähnliche nichtlineare Abhängigkeiten von der Drucktemperatur bereits von [WP15] festgestellt. Hier wiesen bei der Variation der Drucktemperatur die bei 200°C hergestellten PLA-Proben die geringsten Festigkeiten und Kristallinitätsgrade auf. Es fällt zudem auf, dass der Variationskoeffizient des E-Moduls, also die prozentuale Standardabweichung, mit der Temperatur ansteigt.

Probengruppe	UMO-7	UMO-8	UMO-9	UMO-10
Drucktemperatur [°C]	190	200	215	230
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3281	2961	3535	3319
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,30	2,81	3,62	7,19

TABELLE 7.7: Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-7, UMO-8, UMO-9 und UMO-10, (Temperaturvariation)

### 7.3.2 Auswirkung der Schichtdicke auf den Elastizitätsmodul

Die Auswirkung der Schichtdickenvariation auf den E-Modul wurde mit den Parametergruppen UMO-4, UMO-5 und UMO-6 untersucht. In Tabelle 7.8 sind die ermittelten Werte aufgeführt. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass sich eine geringe Schichtdicke positiv auf den E-Modul auswirkt, was sich mit den Ergebnissen aus Zugversuchen von [MKM<sup>+</sup>16] und [RJDL16] deckt<sup>4</sup>. Um einen signifikanten Unterschied handelt es sich allerdings nur zwischen der Gruppe UMO-4 und der Gruppe UMO6.

Probengruppe	UMO-4	UMO-5	UMO-6
Schichtdicke [mm]	0,2	0,1	0,05
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3124	3283	3397
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,34	3,90	2,29

TABELLE 7.8: Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-4, UMO-5 und UMO-6 (Schichtdickenvariation)

### 7.3.3 Auswirkung der Probenorientierung auf den Elastizitätsmodul

Der Einfluss der Probenorientierung auf den E-Modul ist Tabelle 7.9 zu entnehmen. Es wurden wider Erwarten keine signifikanten Unterschiede ermittelt. Der geringste E-Modul wurde zwar wie vermutet für die vertikale Orientierung gemessen, bei der die

<sup>4</sup> Effekt wurde bei [MKM<sup>+</sup>16] nur bei einem hohen Füllgrad und bei [RJDL16] für ABS beobachtet

interlaminare Haftung einen besonders großen Anteil hat; doch der Unterschied ist minimal. Es ist also festzustellen, dass die Anisotropie der Steifigkeit bei dem verwendeten PLA-Material vergleichsweise gering ausfällt. Insbesondere der Vergleich mit stark anisotropen Faser-Kunststoff-Verbunden fällt damit schwer. Die Ergebnisse ähneln den Ergebnissen von [RJDL16] und [CRD+17]<sup>5</sup>. Eine sorgfältige Wahl der Probenorientierung ist dennoch erforderlich, da die Ergebnisse in Abschnitt 7.3.4 eine Wechselwirkung der Probenorientierung mit dem Füllmuster zeigen.

Probengruppe	UMO-4	UMO-11	UMO-12
Orientierung	flach	seitlich	vertikal
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3124	3187	3068
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,34	7,23	3,69

TABELLE 7.9: Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-4, UMO-11 und UMO-12 (Variation der Orientierung)

### 7.3.4 Auswirkung des Füllmusters auf den Elastizitätsmodul

In Tabelle 7.10 sind die Auswirkungen des Füllmusters auf den Elastizitätsmodul aufgeführt. Bei der Gruppe UMO-1 wurde das Linienmuster mit 45°-Winkel zur X-Achse verwendet. Dieses wurde im Versuchsplan als *Linien\** aufgeführt, da es anstelle eines  $\pm 45^\circ$ -Aufbaus zu einem Aufbau aus 0°- und 90°-Schichten führt. Bei Gruppe UMO-4 wurde das Muster *Konzentrisch* gewählt, welches auch als 0°-Schichtorientierung betrachtet werden kann. Bei der Gruppe UMO-8 sind durch das Muster *Linien* die Füllschichten abwechselnd in +45° und -45° orientiert. Es fällt auf, dass sich die ermittelten Werte nur geringfügig unterscheiden. Aufgrund der Streuung der Werte ist nur zwischen den Mustern *Konzentrisch* und *Linien* ein signifikanter Unterschied vorhanden.

Beim Vergleich der Probengruppen UMO-12 und UMO-13, siehe Tabelle 7.11, fällt auf, dass sich bei der vertikalen Orientierung die E-Moduln der beiden Füllmuster *Konzentrisch* und *Linien* nicht signifikant unterscheiden. Es ist demzufolge eine starke Wechselwirkung der Prozessparameter Orientierung und Füllmuster anzunehmen.

<sup>5</sup> Untersucht wurden ABS- bzw. PC-Zugproben

Probengruppe	UMO-1	UMO-4	UMO-8
Füllmuster	Linien*	Konzentrisch	Linien
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3085	3124	2961
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,74	2,34	2,81

TABELLE 7.10: Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-1, UMO-4 und UMO-8 (Füllmustervariation mit flacher Orientierung)

Probengruppe	UMO-12	UMO-13
Füllmuster	Konzentrisch	Linien
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3068	3048
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	3,69	5,24

TABELLE 7.11: Elastizitätsmoduln der Probengruppen UMO-12 und UMO-13 (Füllmustervariation mit vertikaler Orientierung)

### 7.3.5 Unterschiede der zwei PLA-Materialien Natur und Weiß

In Kapitel 3 wurde bereits beschrieben, dass sich Prozessparameter wie die Orientierung bei verschiedenen Materialien unterschiedlich auswirken, sodass Zug- und Biegemodul bei PA-6 stark von der Orientierung abhängen, bei PA-12 dagegen deutlich weniger [Str17]. Zudem wurde genannt, dass Materialien in unterschiedlicher Qualität und Zusammensetzung angeboten werden und die Materialeigenschaften entsprechend variieren können. Es wird deshalb untersucht, inwieweit sich Material vom selben Hersteller unterscheidet. Es wurden die Materialien PLA-Natur und PLA-Weiß in verschiedenen Parametergruppen verwendet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7.12, 7.13 und 7.14 aufgeführt. Die Ergebnisse in Tabelle 7.12 lassen zunächst vermuten, dass ein großer Unterschied zwischen den beiden Materialien besteht. Die Ergebnisse in 7.13 unterstützen diese Vermutung zwar, doch der Unterschied ist hier nicht signifikant. Tabelle 7.14 zeigt dagegen eher die Tendenz, dass das Material PLA Natur einen höheren E-Modul aufweist, wenngleich auch hier kein signifikanter Unterschied vorliegt. Der große Unterschied in Tabelle 7.12

ist deshalb wohl eher auf schwankende Prozessbedingungen oder ungenaue Messungen zurückzuführen als auf unterschiedliche mechanische Materialeigenschaften. Die Unterschiede der Probenmassen in den Tabellen 7.12 und 7.13 sind ein weiteres Indiz für schwankende Prozessbedingungen bzw. das Verstopfen der Druckerdüse, da bei den in Tabelle 7.14 aufgeführten Proben, welche mit dem DW hergestellt wurden, kaum Unterschiede in den Probenmassen festgestellt wurden.

Probengruppe	UMO-8	UMO-2
Material (PLA)	Natur	Weiß
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	2961	3361
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,81	4,01
Mittelwert der Probenmassen [g]	19,93	20,66

TABELLE 7.12: Vergleich der Probengruppen UMO-8 und UMO-2 (Materialvariation mit UMO, flach, Linien)

Probengruppe	UMO-4	UMO-3
Material (PLA)	Natur	Weiß
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3124	3243
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	2,34	6,28
Mittelwert der Probenmassen [g]	18,18	20,04

TABELLE 7.13: Vergleich der Probengruppen UMO-4 und UMO-3 (Materialvariation mit UMO, flach, konzentrisch)

Probengruppe	DW-1	DW-2
Material (PLA)	Natur	Weiß
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3144	3062
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	3,02	4,90
Mittelwert der Probenmassen [g]	20,75	20,65

TABELLE 7.14: Vergleich der Probengruppen DW-1 und DW-2 (Materialvariation mit DW, vertikal, konzentrisch)

### 7.3.6 Einfluss der Variation des Druckers auf den Elastizitätsmodul

Tabelle 7.15 zeigt die ermittelten Werte für Proben mit gleichen Prozessparametern, hergestellt auf unterschiedlichen Druckern. Aufgrund der Streuung der Werte ist der geringe Unterschied im E-Modul nicht signifikant.

Probengruppe	DW-1	UMO-12
Mittelwert des E-Moduls [MPa]	3144	3068
Variationskoeffizient des E-Moduls [%]	3,02	3,69
Mittelwert der Probenmassen [g]	20,75	20,44

TABELLE 7.15: Vergleich der Probengruppen DW-1 und UMO-12 (Druckervariation)

## 7.4 Auswirkung der Prozessparameter auf die Dämpfung

Die Dämpfung wurde bei allen Proben mit der Methode der Körperschallnachhallzeit, siehe Kapitel 2.2, ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Die ermittelten Werte stellen dabei nur den Verlustfaktor bei der ersten Biegeeigenfrequenz der Proben dar. Da es sich bei der Dämpfung jedoch um eine von der Frequenz abhängige Größe handelt, wären für eine genaue Aussage weitere Untersuchungen durchzuführen, um diese Abhängigkeit zu untersuchen. Dass die Lage der Eigenfrequenzen und damit die

untersuchten Frequenzbereiche sich bei jeder Probe etwas unterscheiden, wird bei dieser Auswertung vernachlässigt.

In Abbildung 7.1 ist zu erkennen, dass aufgrund der Streuung der Werte kaum signifikante Unterschiede gemessen wurden. Faktoren wie das Füllmuster, die Probenorientierung sowie die Drucktemperatur scheinen also keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Dämpfung zu haben.

Der einzige Faktor, der einen signifikanten Einfluss zu haben scheint, ist die Schichtdicke. Bei der Probengruppe UMO-6, welche mit 0,05 mm die geringste Schichtdicke aufweist, wurden die größten Verlustfaktoren ermittelt. Der Unterschied zur Probengruppe UMO-4, mit gleichen Parametern bis auf die Schichtdicke von 0,2 mm, ist nicht enorm, aber dennoch signifikant. Die Parametergruppe UMO-5, mit einer Schichtdicke von 0,1 mm, liegt ohne einen signifikanten Unterschied zwischen beiden Gruppen. Eine mögliche Erklärung für die höhere Dämpfung bei geringerer Schichtdicke ist, dass die innere Reibung, welche einen Teil der Dämpfung ausmacht, zwischen Schichten höher ist als innerhalb einer Schicht. Aufgrund der hohen Schichtanzahl bei geringer Schichtdicke wird so möglicherweise die innere Reibung erhöht.

Bei der Untersuchung der speziellen PLA-Sorte *Zero Warp* in Vorversuchen wurde dagegen ein enormer Unterschied in der Dämpfung festgestellt. Hier wurde ein Verlustfaktor von 0,04 ermittelt. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften des PLA *Zero Warp* unterscheiden sich insgesamt stark von normalem PLA.



## 7.5 Zusammenfassung der ermittelten Faktoreinflüsse

In Tabelle 7.16 werden noch einmal die ermittelten Faktoreinflüsse aus Kapitel 7 zusammengefasst. Dabei wird ein signifikanter Einfluss mit einem „±“ markiert und zu der entsprechenden Stelle in der Auswertung verwiesen. Wurde kein signifikanter Einfluss ermittelt, so wird dies mit „0“ gekennzeichnet. Einige Ergebnisse der Auswertungen stellen Widersprüche dar. Diese werden mit einem „–“ gekennzeichnet. Dies ist beispielsweise bei dem Einfluss des Materials auf den E-Modul der Fall. Hier wurde in einer Auswertung ein signifikanter Einfluss ermittelt. In zwei weiteren Auswertungen konnte dagegen kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Die Signifikanz ist deshalb möglicherweise eine Folge mangelnder Randomisierung bei der Herstellung der Proben.

Prozessparameter	Auswirkung			
	E-Modul Siehe S.68-73	Verlustfaktor Siehe S.73-75	Maßhaltigkeit Siehe S.62-65	Masse Siehe S.65-68
Orientierung	0 (T. 7.9)	0 (A. 7.1)	± 3,0 % (T. 7.1)	– (K. 7.2)
Füllmuster	± 2,7 % (T. 7.10)	0 (A. 7.1)	– (K. 7.1)	– (K. 7.2)
Schichtdicke	± 4,2 % (T. 7.8)	± 11 % (A. 7.1)	0 (K. 7.1)	– (K. 7.2)
Temperatur	± 3,7 % (T. 7.7)	0 (A. 7.1)	± 0,9 % (K. 7.1)	± 1,8 % (T. 7.6)
Material	– (K. 7.3.5)	0 (A. 7.1)	0 (K. 7.1)	0 (K. 7.2)
Drucker	0 (T. 7.15)	0 (A. 7.1)	– (K. 7.1.1)	0 (T. 7.15)

TABELLE 7.16: Zusammenfassung der ermittelten Faktoreinflüsse

±: signifikanter Einfluss, 0: kein signifikanter Einfluss, –: problematische Ergebnisse

T.: Tabelle, K.: Kapitel, A.: Abbildung

## Kapitel 8

# Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass nur wenige der untersuchten Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf den Elastizitätsmodul oder die Dämpfung haben. Für den E-Modul konnten dabei mit der gewählten Messmethode Werte ermittelt werden, die in etwa mit den Literaturwerten<sup>1</sup> übereinstimmen. Dennoch sollten die Ergebnisse dieser Arbeit mit weiteren Messmethoden überprüft werden. Es sollten beispielsweise Zugversuche und Biegeversuche mit den Proben durchgeführt werden, um mögliche Unterschiede zwischen Biegeelastizitätsmodul und Zugmodul zu identifizieren und die Übereinstimmung mit der analytischen Berechnung aus der Eigenfrequenz zu überprüfen.

Probleme stellten die zufälligen und systematischen Maßabweichungen, die systematischen Störungen beim Herstellungsprozess (Verstopfen der Extruderdüse, Druckbettnivellierung) sowie die Feuchtigkeitsaufnahme des Materials dar. Hinzu kommen die Schwankungen bei den Messbedingungen. All diese Effekte verringern die Genauigkeit der errechneten Steifigkeit und führen zu einer starken Streuung der Ergebnisse.

Die Vergleichbarkeit von Parametergruppen wird zudem durch viele Abhängigkeiten erschwert. Es ist beispielsweise äußerst aufwendig die gleichen Temperaturen und Abkühlzeiten der Proben bei verschiedenen Probenorientierungen herzustellen.

Bei weiteren Untersuchungen und der Überprüfung der als signifikant identifizierten Faktoreinflüsse sollte unbedingt eine strenge Randomisierung bei der Herstellung der Proben

---

<sup>1</sup> z.B. [CCMP16]

erfolgen, um die durch systematische Störungen erzeugte fälschliche Signifikanz von Faktoren zu vermeiden. Da die hohe Randomisierung bei starken systematischen Störungen mit einer weiter verstärkten Streuung der Werte verbunden ist, könnte dies dazu führen, dass keine signifikanten Unterschiede mehr ermittelt werden können. Möglicherweise stellt sich somit die Messmethode als ungeeignet dar. In diesem Fall könnten Untersuchungen mit einer freien Aufhängung anstelle einer festen Einspannung durchgeführt werden um, die nicht ideal-starre Einspannungsrandbedingung zu vermeiden.

Es bleibt zu überprüfen, wie sich weitere Parameter, wie die Füllichte oder weitere Füllmuster auf die Steifigkeit und die Dämpfung auswirken. Auch die Erweiterung der Faktorstufen könnte von Interesse sein um, beispielsweise die Hypothese zu überprüfen, dass eine besonders geringe Schichtdicke zu einer hohen Dämpfung führt. In diesem Zusammenhang sollten Messungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden und verschiedene Frequenzbereiche untersucht werden, um ebenfalls die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der Dämpfung einschätzen zu können. Der Multimaterialdruck bietet jedoch vermutlich ein größeres Potential, die Dämpfung einer Struktur anzupassen, als dies über die Prozessparameter mit einem Material der Fall ist. Dies zeigte die erheblich höhere Dämpfung des speziellen PLA-Materials *Zero Warp*.

Für eine sichere Prognose des Schwingungsverhaltens eines additiv gefertigten Bauteils sind nach den Ergebnissen dieser Arbeit viele Untersuchungen durchzuführen. Es müssen die Wechselwirkungen zwischen den Parametern, der Fertigungsanlage und den speziellen Eigenschaften der verwendeten Materialien und deren Veränderung bei der Lagerung berücksichtigt werden. Durch diese zahlreichen Wechselwirkungen entsteht eine große Komplexität der Untersuchungen. Der Einfluss einiger Prozessparameter in Hinblick auf eine gezielte Anpassung des akustischen Verhaltens ist dagegen eher gering, sodass möglicherweise eine Strukturoptimierung zur Anpassung der Eigenschaften eines Bauteils einer Prozessparameteranpassung vorzuziehen ist.

Aufgrund der zahlreichen aktuellen Forschungsarbeiten im Bereich der additiven Fertigung eröffnen sich sicherlich zukünftig neue Möglichkeiten, akustisches Strukturverhalten mithilfe der Nutzung von Prozesseigenheiten in der additiven Fertigung zu nutzen. Ein Beispiel hierfür ist die Anpassung der Dämpfung von Bauteilen aus dem Laserschmelzverfahren durch nicht geschmolzenes Pulver innerhalb des Bauteils, wie dies bereits von [DMRb] erfolgreich untersucht wurde.

# Anhang A

## Probenzahltablelle

TABELLE A.1: Tabelle zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Proben pro Parametergruppe. Auszug für 4 Stufen aus [SvH10]

$\Delta/\sigma$	$\alpha = 10\%$				$\alpha = 5\%$				$\alpha = 1\%$			
	$1-\beta$				$1-\beta$				$1-\beta$			
	60%	70%	<b>80%</b>	90%	60%	70%	80%	90%	60%	70%	80%	90%
0.5	45	56	72	96	59	72	89	115	90	106	126	156
0.75	21	26	33	43	27	33	40	52	41	48	57	70
1.0	12	15	19	25	16	19	23	30	24	28	33	40
1.5	6	7	9	12	8	9	11	14	12	13	16	19
<b>2.0</b>	4	5	<b>6</b>	7	5	6	7	9	7	8	10	12
2.5	3	4	4	5	4	4	5	6	6	6	7	8
3.0	3	3	3	4	3	4	4	5	4	5	5	6
3.5	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5
4.0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4

# Literaturverzeichnis

- [ARB16] ARBURG GMBH + Co KG: *Additive Fertigung - ARBURG*. <https://www.arburg.com/de/leistungsspektrum/additive-fertigung/>.  
Version: 17.11.2016
- [Avi16] AVISTRON: *Avistron-PMMA*. [http://www.avistron.de/pdf/Datenblatt\\_AV-PMMA175-TR.pdf](http://www.avistron.de/pdf/Datenblatt_AV-PMMA175-TR.pdf). Version: 18.11.2016
- [CCMP16] CASAVOLA, C. ; CAZZATO, A. ; MORAMARCO, V. ; PAPPALETTERE, C.: Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. In: *Materials & Design* 90 (2016), S. 453–458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>. – DOI 10.1016/j.matdes.2015.11.009. – ISSN 02641275
- [CLD08] CHEN, F. ; LORENZ, R. ; DR.-ING. SHEN, J.: *Patent DE102007026006A1 - 3D-Druckverfahren und dafür geeignetes Materialsystem*. <http://www.google.com/patents/DE102007026006A1?cl=de>. Version: 2008
- [Col16a] COLORFABB: *ColorFabb - PLA / PHA Filaments*. <http://colorfabb.com/pla-pha>. Version: 17.11.2016
- [Col16b] COLORFABB: *BAMBOOFILL*. <http://colorfabb.com/bamboofill>.  
Version: 18.11.2016
- [CRD<sup>+</sup>17] CANTRELL, J. ; ROHDE, S. ; DAMIANI, D. ; GURNANI, R. ; DiSANDRO, L. ; ANTON, J. ; YOUNG, A. ; JEREZ, A. ; STEINBACH, D. ; KROESE, C. ; IFJU, P.: Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABSand Polycarbonate Parts. (2017). [http://cimar.mae.ufl.edu/rapid\\_proto/pages/3D%20Printing%20Paper%20Final%20Manuscript.pdf](http://cimar.mae.ufl.edu/rapid_proto/pages/3D%20Printing%20Paper%20Final%20Manuscript.pdf)

- [DEL17] DELTA: *Vendita Stampanti 3d | WASP*. <http://www.personalfab.it/>.  
Version: 07.05.2017
- [Deu09] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1320:2009-12 - Akustik - Begriffe*. Berlin, 2009
- [Deu13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 5493:2013-10 - Logarithmische Größen und Einheiten*. Berlin, 2013
- [Deu15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 18064:2015-03 - Thermoplastische Elastomere - Nomenklatur und Kurzzeichen*. Berlin, 2015
- [DH16] DRESIG, H. ; HOLZWEISSIG, F.: *Maschinendynamik*. 12. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg and s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-52713-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-52713-9>. – ISBN 9783662527122
- [DMRa] DMRC: *Direct Manufacturing Research Center - Annual Report 2015*. [http://www.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/04\\_DMRC/04\\_AnnualReport/dmrc\\_report\\_2015.pdf](http://www.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/04_DMRC/04_AnnualReport/dmrc_report_2015.pdf)
- [DMRb] DMRC: *Direct Manufacturing Research Center - Annual Report 2016*. [http://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/04\\_DMRC/04\\_AnnualReport/dmrc\\_report\\_2016.pdf](http://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/04_DMRC/04_AnnualReport/dmrc_report_2016.pdf)
- [ES14] EBEL, E. ; SINNEMANN, T.: Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties. In: *RTejournal* (2014), Nr. 1. <http://www.rtejournal.de/ausgabe11/3872>. – ISSN 1614–0923
- [Ext16a] EXTRUDR: *Extrudr MF-PLA black*. <http://extrudr.eu/collections/pla/products/extrudr-pla-black>. Version: 17.11.2016
- [Ext16b] EXTRUDR: *BDP biodegradable 3D printing Filament*. <http://extrudr.eu/collections/bdp>. Version: 18.11.2016
- [Ext16c] EXTRUDR: *PETG*. <http://extrudr.eu/collections/petg>.  
Version: 18.11.2016

- [Fil16] FILAONE: *FilaOne<sup>TM</sup> GRAY Injection Molding Grade Filament*.  
<https://proforma-3dprinting-store.myshopify.com/collections/all/products/filaone-gray-advanced-composite-filament-samples>.  
Version: 18.11.2016
- [For16a] FORMFUTURA: *1.75mm HDglass<sup>TM</sup> Filaments*. <http://www.formfutura.com/175mm-filaments/hdglass/>. Version: 18.11.2016
- [For16b] FORMFUTURA: *2.85mm CarbonFil<sup>TM</sup> - Black*. <http://www.formfutura.com/285mm-carbonfil-black.html>. Version: 18.11.2016
- [For16c] FORMFUTURA: *2.85mm EasyCork<sup>TM</sup> Filaments*. <http://www.formfutura.com/285mm-filaments/easycork/>. Version: 18.11.2016
- [For16d] FORMFUTURA: *2.85mm FlexiFil<sup>TM</sup> White*. <http://www.formfutura.com/formfutura-285mm-flexifil-white.html>. Version: 18.11.2016
- [For16e] FORMFUTURA: *2.85mm LimoSolve<sup>TM</sup> HIPS*. <http://www.formfutura.com/formfutura-285mm-limosolve-hips.html>. Version: 18.11.2016
- [For16f] FORMFUTURA: *2.85mm MagicFil<sup>TM</sup> Thermo PLA - Grey*. <http://www.formfutura.com/formfutura-285mm-magicfil-thermo-pla-grey.html>.  
Version: 18.11.2016
- [For16g] FORMFUTURA: *2.85mm MetalFil<sup>TM</sup> Filaments*. <http://www.formfutura.com/285mm-filaments/metalfil/>. Version: 18.11.2016
- [For16h] FORMFUTURA: *2.85mm Sandstone LAYBRICK*. <http://www.formfutura.com/285mm-sandstone-laybrick.html>. Version: 18.11.2016
- [For16i] FORMFUTURA: *EasyWood<sup>TM</sup> Filament*. <http://www.formfutura.com/285mm-filaments/easywood/>. Version: 18.11.2016
- [For16j] FORMFUTURA: *Product Overview.xlsx*. [https://static.webshopapp.com/shops/021593/files/045088838/tds-crystal-flex.pdf?\\_ga=1.190753391.510060760.1478611873](https://static.webshopapp.com/shops/021593/files/045088838/tds-crystal-flex.pdf?_ga=1.190753391.510060760.1478611873). Version: 18.11.2016
- [Geb13] GEBHARDT, A.: *Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping ; Tooling ; Produktion*. 1. Aufl. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2013 [http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok\\_id/992132](http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/992132). – ISBN 978-3-446-43651-0

- [Geb14] GEBHARDT, A.: *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. [Elektronische Ressource]. München : Hanser, 2014. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446442375>. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446442375>. – ISBN 9783446442375
- [Ger16a] GERMAN REPRAP: *Bend Lay und Smart ABS bei German Reprap*. <https://www.form-werkzeug.de/produkte/uebersicht/beitrag/bend-lay-und-smart-abs-bei-german-reprap-863854.html>.  
Version: 17.11.2016
- [Ger16b] GERMAN REPRAP: *PLA 1,75mm Filamente | German RepRap GmbH*. <https://www.germanreprap.com/pla-175mm/>. Version: 17.11.2016
- [Ger16c] GERMAN REPRAP: *Spezial Filament 1,75mm | German RepRap GmbH*. <https://www.germanreprap.com/spezial-filamente-175mm/>.  
Version: 18.11.2016
- [GR14] GURRALA, P. K. ; REGALLA, S. P.: Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. In: *Virtual and Physical Prototyping* 9 (2014), Nr. 3, S. 141–149. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2014.913400>. – DOI 10.1080/17452759.2014.913400. – ISSN 1745–2759
- [Gru15] GRUND, M.: *Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren: Mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik*. Berlin : Springer Vieweg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44266-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44266-1>. – ISBN 9783662442654
- [Hag15] HAGL, R.: *Das 3D-Druck-Kompendium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. 2. Aufl. 2015. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-07047-2>. – ISBN 978-3-658-07047-2
- [Igu16] IGUS: *igus® 3D-Drucker Filament aus Hochleistungskunststoff*. [http://www.igus.de/wpck/12019/iglidur\\_TriboFilament](http://www.igus.de/wpck/12019/iglidur_TriboFilament). Version: 18.11.2016
- [Inn16a] INNOFIL3D: *EPR InnoPET - 1.75mm - 750gr - Innofil3D*. <https://www.innofil3d.com/product/epr-innopet-1-75mm-750gr/>.  
Version: 18.11.2016

- [Inn16b] INNOFIL3D: *Inno FR - 1.75mm - 500gr - Innofil3D*. <https://www.innofil3d.com/product/inno-fr-1-75mm-500gr/>. Version: 18.11.2016
- [Inn16c] INNOFIL3D: *Innoflex 40 - Black - 1.75mm - 500g - Innofil3D*. <https://www.innofil3d.com/product/innoflex-40-black-1-75mm-500g/>.  
Version: 18.11.2016
- [Inn16d] INNOFIL3D: *InnoSolve Natural - 1.75mm - 500gr - Innofil3D*. <https://www.innofil3d.com/product/innosolve-natural-1-75mm-500gr/>.  
Version: 18.11.2016
- [Inn16e] INNOFIL3D: *PLA InnoChange - 1.75mm - 500gr - Innofil3D*.  
<https://www.innofil3d.com/product/pla-innochange-1-75mm-500gr/>.  
Version: 18.11.2016
- [KSA06] KOLLMANN, F. G. ; SCHÖSSER, T. F. ; ANGERT, R.: *Praktische Maschinenakustik*. 1. Aufl. s.l. : Springer-Verlag, 2006 <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=324329>. – ISBN 3-540-20094-0
- [KV15] KNOOP, Frederick ; V. SCHOEPPNER: *Mechanical and thermal properties of FDM parts manufactured with Polyamide 12*. <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-77-Knoop.pdf>.  
Version: 2015
- [KW17] KNOTHE, K. ; WESSELS, H.: *Finite Elemente: Eine Einführung für Ingenieure*. 5. Auflage. Berlin : Springer Vieweg, 2017. – ISBN 9783662493526
- [Mar16] MARKETING, Siewert &. Kau: *avistron | 3D-Drucker Filamente*. <http://www.avistron.de/#asa175>. Version: 18.11.2016
- [MK10] MÖSER, M. ; KROPP, W.: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49048-7>. – ISBN 9783540490487
- [MKM<sup>+</sup>16] MESSEMER, J. ; KAUFMANN, T. ; MARTIN, C. ; NEISES, M. ; SCHMIDT, A ; TE HEESEN, H.: Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad. In: *RTeJournal* -

- Fachforum für Rapid Technologie* (2016), Nr. 1. <http://www.rtejournal.de/ausgabe-13-2016/4441>. – ISSN 1614–0923
- [Mös10] MÖSER, M. (Hrsg.): *Messtechnik der Akustik*. Berlin u.a. : Springer, 2010. – ISBN 3–540–68086–1
- [Mös15] MÖSER, M.: *Technische Akustik*. 10. Auflage. Berlin and Heidelberg : Springer Vieweg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>. – ISBN 978–3–662–47703–8
- [MPS16] MAGNUS, K. ; POPP, K. ; SEXTRO, W.: *Schwingungen: Grundlagen - Modelle - Beispiele*. 10., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13821-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13821-9>. – ISBN 9783658138202
- [Nat14] NATKE, H.-G.: *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse: Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme*. 3., Aufl. Wiesbaden : Springer, 2014. – ISBN 9783322942678
- [Nex16a] NEXEO 3D: *Arnite®ID* / *Nexeo 3D*. <https://www.nexeo3d.com/de/products/arnite-id-3040.html>. Version: 18.11.2016
- [Nex16b] NEXEO 3D: *Arnitel®ID 2045* / *Nexeo 3D*. <https://www.nexeo3d.com/de/products/arnitel-id-2045.html>. Version: 18.11.2016
- [Nex16c] NEXEO 3D: *Novamid®ID 1030* / *Nexeo 3D*. <https://www.nexeo3d.com/de/products/novamid-id-1030.html>. Version: 18.11.2016
- [Nex16d] NEXEO 3D: *Novamid®ID 1070* / *Nexeo 3D*. <https://www.nexeo3d.com/de/products/novamid-id-1070.html>. Version: 18.11.2016
- [OT16a] ORBI-TECH: *Premium PLA 90 - Orbi-Tech*. [http://www.orbi-tech.de/shop/Plastic-Welding-Rod/PLA/Premium-PLA-90:::30\\_46\\_69.html](http://www.orbi-tech.de/shop/Plastic-Welding-Rod/PLA/Premium-PLA-90:::30_46_69.html). Version: 17.11.2016
- [OT16b] ORBI-TECH: *Premium PLA weich, 3 mm, natur - Orbi-Tech*. <http://www.orbi-tech.de/shop/Kunststoff-Schweissdraht/PLA/PLA-Soft/Premium-PLA-weich-3-mm-natur:::321.html>. Version: 17.11.2016

- [OT16c] ORBI-TECH: *Poro-Lay - Orbi-Tech*. [http://www.orbi-tech.de/shop/3D-Filamente/Poro-Lay:::72\\_125.html](http://www.orbi-tech.de/shop/3D-Filamente/Poro-Lay:::72_125.html). Version: 18.11.2016
- [OT16d] ORBI-TECH: *Reflect-O-Lay - Orbi-Tech*. [http://www.orbi-tech.de/shop/3D-Filamente/Reflect-O-Lay:::72\\_128.html](http://www.orbi-tech.de/shop/3D-Filamente/Reflect-O-Lay:::72_128.html). Version: 18.11.2016
- [Pfl10] PFLÜGER, M.: *Fahrzeugakustik*. Wien : Springer, 2010. – ISBN 9783211767405
- [RJDL16] RANKOUHI, B. ; JAVADPOUR, S. ; DELFANIAN, F. ; LETCHER, T.: Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. In: *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16 (2016), Nr. 3, S. 467–481. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>. – DOI 10.1007/s11668-016-0113-2. – ISSN 1547-7029
- [Sai16] SAINSMART: *SainSmart Red Copper Metal 1.75mm Filament for 3D Printing*. <https://www.sainsmart.com/3d-printing/wood-filament.html>. Version: 18.11.2016
- [Sli16] SLIC3R: *Slic3r Manual - Infill Patterns and Density*. <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>. Version: 07.12.2016
- [Str16a] STRATASYS: *Wir sind Marktführer im Bereich des 3D-Drucks | Stratasys*. <http://www.stratasys.com/de/corporate>. Version: 07.12.2016
- [Str16b] STRATASYS: *ASA is Your Go-To FDM Thermoplastic for Prototyping*. <http://www.stratasys.com/materials/fdm/asa>. Version: 18.11.2016
- [Str16c] STRATASYS: *Nylon 12-Material für FDM-Druck | Stratasys*. <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm/nylon>. Version: 18.11.2016
- [Str16d] STRATASYS: *PC-Thermoplast, FDM-Materialien für Fortus 3D-Produktionssysteme | Stratasys*. <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm/pc>. Version: 18.11.2016
- [Str16e] STRATASYS: *PPSF/PPSU, Fortus 3D-Produktionssystem für Polyphenylsulfon | Stratasys*. <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm/ppsf-ppsu>. Version: 18.11.2016

- [Str16f] STRATASYS: *ULTEM 1010-Material* | Stratasys. <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm/ultem-1010>. Version: 18.11.2016
- [Str16g] STRATASYS: *ULTEM 9085 Resin for Fortus Production Series 3D Printers*. <http://www.stratasys.com/de/materialien/fdm/ultem-9085>. Version: 18.11.2016
- [Str17] STRATASYS: *FDM Thermoplastics*. <http://www.stratasys.com/materials/fdm>. Version: 22.05.2017
- [SvH10] SIEBERTZ, K. ; VAN BEBBER, D. ; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin : Springer, 2010. – ISBN 9783642054938
- [tau16] TAULMAN3D: *PCTPE Features*. <http://taulman3d.com/pctpe-features.html>. Version: 18.11.2016
- [Ult16a] ULTIMAKER: *Ultimaker Original+* | Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-original>. Version: 06.12.2016
- [Ult16b] ULTIMAKER: *Ultimaker Resources* | Ultimaker. <https://ultimaker.com/en/resources>. Version: 08.12.2016
- [VDI14] VDI-FACHBEREICH PRODUKTIONSTECHNIK UND FERTIGUNGSVERFAHREN: *VDI-Richtlinie 3405 Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Berlin : Beuth, 2014
- [VDI17] VDI-FACHBEREICH INFORMATIONSTECHNIK: *VDI-Richtlinie 5620 Reverse Engineering von Geometriedaten*. Berlin : Beuth, 2017
- [Vio16] VIOPROTO: *Der nächste Schritt in Richtung Zukunft – Metalle aus dem 3D-Drucker*. <https://vioproto.de/blog/3d-druck-metall/>. Version: 18.11.2016
- [Vol16] VOLAPRINT: *Rohstoffe - volaprint*. <http://volaprint.de/rohstoffe.html>. Version: 18.11.2016
- [Wen09] WENDEL, B.: *Prozessuntersuchung des "Fused Deposition Modeling"*. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg, Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2009

- [Woh17] WOHLERS, T.: *Wohlers report 2017: 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colorado : WOHLERS ASSOCIATES, 2017. – ISBN 9780991333233
- [WP15] WITTBRODT, B. ; PEARCE, J. M.: The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. In: *Additive Manufacturing* 8 (2015), S. 110–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>. – DOI 10.1016/j.addma.2015.09.006. – ISSN 22148604
- [Zel12] ZELLER, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8657-6>. – ISBN 978-3-8348-8657-6