

# Diplomarbeit

## Entwicklung einer CAX-Prozesskette für die additive Fertigung von Bauteilen aus Metall

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing Detlef Gerhard**

(Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

Forschungsbereich: Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Markus Pasterk**

E1126906 (066 482)

Müllnergasse 22/9

1090 Wien

Wien, im Juni 2018

---

Markus Pasterk

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2018

---

Markus Pasterk

## Danksagung

Ich möchte diese Möglichkeit nutzen um mich bei einigen Personen zu bedanken.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, ohne deren bedingungslose Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit, vieles nicht möglich gewesen wäre. Außerdem hätte ich ohne meinen Vater Helmuth, welcher mir schon in der Jugend sein technisches Geschick und Verständnis weitervermittelt hat, wahrscheinlich kein technisches Studium angestrebt. Meiner Mutter Andrea, will ich darüber hinaus noch für die zeitintensive Korrektur dieser Arbeit in sprachlicher Hinsicht danken.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich meiner Freundin Christina, für Ihr großes Verständnis im Verlaufe des oftmals sehr zeitaufwendigen Studiums, aussprechen.

In Bezug auf diese Abschlussarbeit möchte ich mich bei Herrn Prof. Gerhard für die Betreuung und die großen Freiheiten bei der Themenbearbeitung bedanken. Außerdem möchte ich Herrn Schutz für die Unterstützung im Zusammenhang mit der SLM-Anlage in der Pilotfabrik danken.

Zu guter Letzt gebührt mein Dank meinen Studienkolleginnen und Studienkollegen. Ohne die gute Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung wäre ein Studienabschluss nur schwer möglich gewesen.

## Kurzfassung

Die additive Fertigung und dabei im Speziellen die additive Fertigung von Endprodukten und Werkzeugen (rapid manufacturing), gilt als eine der Schlüsseltechnologien im Zusammenhang mit Industrie 4.0. Sie kann ihre Stärken vor allem dort ausspielen, wo konventionelle Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. So bieten additive Verfahren durch die werkzeuglose Fertigung enorme Potentiale in der Gestaltungsfreiheit und Individualisierbarkeit der Produkte, sowie in der wirtschaftlichen Produktion von geringen Stückzahlen.

Ziel dieser Arbeit ist es, im Zuge der Anschaffung einer selektiven Laserschmelz-Maschine in der Pilotfabrik der TU Wien, den Produktentstehungsprozess und dabei vor allem die CAx-Prozesskette zu beleuchten. Bei der additiven Fertigung ist die Art der Herstellung und die damit zusammenhängenden Gestaltungsrichtlinien und Gestaltungsfreiheiten wesentlich für die Produktgestaltung bzw. Konstruktionssystematik. Aus diesem Grund erfolgen im zweiten Kapitel der Arbeit umfangreiche Erläuterungen zu den Grundlagen der additiven Fertigungsverfahren mit dem Focus auf selektivem Laserschmelzen (SLM). Darauf aufbauend werden die Implikationen für den virtuellen Produktentwicklungsprozess beleuchtet. Im Konstruktionsprozess spielen vor allem Simulationslösungen zur Topologie-Optimierung und Generierung von inneren Strukturen eine wesentliche Rolle, welche den konventionellen Konstruktionsprozess erweitern und dem Potential der Gestaltungsfreiheit Rechnung tragen sollen. Die anschließenden Datenaufbereitungsmaßnahmen zur Fertigungsvorbereitung stellen ebenfalls ein Spezifikum der additiven Fertigung dar, bei dem die Konvertierung der 3D Dateien in Facetten-Geometrien eine entscheidende Rolle spielt. Aufgrund der diversen Landschaft an Datei-Formaten (Schnittstellen) und Softwarelösungen, welche an den einzelnen Produktentstehungsschritten beteiligt sein können, wurden im Zuge einer umfangreichen Software- und Schnittstellenanalyse die wesentlichen Entwicklungen am Softwaremarkt analysiert, kategorisiert, sowie anhand von Beispielen erläutert.

Als eines der entscheidenden Kriterien im Workflow wurde die Geometrierückführung von Topologie-Optimierungsergebnissen erkannt, weshalb sich die abschließende Case study, bei der ein Flaschenöffner konstruiert und gefertigt wurde, vor allem daran orientiert. Im Zuge dessen wurden mit den verfügbaren Softwarelösungen 3 Workflow-Varianten gestaltet und der Produktentstehungsprozess anhand des Flaschenöffners beispielhaft dargelegt.

## Abstract

Additive manufacturing in general and additive manufacturing of end products in particular, are considered to be one of the key technologies in connection with industrie 4.0. Its strengths are located in areas where conventional manufacturing technologies are limited. Because of the toolless manufacturing process, additive methods have enormous potential in areas of freeform shape customization, as well as in profitable production of small quantities.

The aim of this thesis is to examine the product development process in the course of the purchase of a selective laser melting machine in the TU Wien Pilotfabrik, focusing in particular on the CAx-process chain. Regarding additive manufacturing, the production type along with its modeling principles play a major role for the product design scheme. Therefore the first chapter deals with the principles of additive manufacturing focusing on selective Laser melting (SLM). Based on that, the implications for—virtual product development are examined. Within the design process, simulation solutions on topology optimization and generation of lattice structures are particularly crucial for the design freedom and hence, extend the possibilities of conventional design process.

The following data preparation for the production process highlights another special feature of the process chain, where the conversion of the 3D Geometry is essential. The diverse landscape of data formats and software solutions involved in this product development process are analyzed, categorized and discussed in an extensive software and data format-analyses.

The geometry reconstruction of topology optimization results was recognized as major criteria, which should be discussed in the context of the final case study, which deals with the construction and additive manufacturing of a bottle opener. For this reason three different workflows are built with the available software systems in order to exemplarily show the production development process of a bottle opener.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
1.1	Motivation .....	8
1.2	Zielsetzung .....	9
1.3	Vorgangsweise .....	9
2	Grundlagen generative Fertigungsverfahren .....	12
2.1	Einordnung und Begriffsdefinitionen .....	12
2.2	Besonderheiten additiver Verfahren .....	15
2.2.1	Verfahrenstypische Vorteile .....	15
2.2.2	Verfahrenstypische Nachteile .....	15
2.2.3	Allgemeine Randbedingungen additiver Verfahren .....	16
2.3	Verfahrensüberblick .....	17
2.3.1	Polymerisation-Stereolithographie .....	17
2.3.2	Extrusionsverfahren-Fused Layer Modeling (FLM) .....	19
2.3.3	3D Druck .....	20
2.3.4	Schicht-Laminat-Verfahren- Layer Lamine Manufacturing (LLM) .....	21
2.3.5	Beschichten/Schmelzen mit der Pulverdüse-Laserauftragsschweißen .....	22
2.4	Selektives Laser Schmelzen/Sintern im Pulverbett .....	23
2.4.1	Verfahrensprinzip .....	23
2.4.2	Selektives Lasersintern von Kunststoffen und Metallen .....	24
2.5	SLM-verfahrensspezifische Charakteristik und Konstruktionsempfehlungen 25	
2.5.1	Materialien und Gefüge .....	25
2.5.2	Stützkonstruktionen (Supports) .....	25
2.5.3	Bauteilorientierung und -positionierung .....	26
2.5.4	Oberflächenrauheit .....	28
2.5.5	Konstruktive Besonderheiten .....	28
2.6	SLM-Maschinenbestandteile und Prozessparameter .....	30
2.6.1	Prozesskammer und Bauteilplattform .....	30
2.6.2	Lasereinheit .....	31
2.6.3	Pulverauftragsystem .....	36
2.6.4	Pulverlagerungs- und Aufbereitungssystem .....	38

2.7	SLM-Werkstoffe .....	39
2.7.1	Grundlagen .....	39
2.7.2	Verfügbare Metallpulver .....	42
2.7.3	Werkstoffforschung .....	49
2.8	SLM-Entwicklungstrends .....	51
3	Produktentstehungsprozess der additiven Fertigung .....	55
3.1	Potentiale der additiven Fertigung .....	56
3.1.1	Konstruktive Freiheit .....	56
3.1.2	Produktion konventionell nicht herstellbarer Produkte .....	56
3.1.3	Variation von Massenprodukten .....	57
3.1.4	Personalisierung von Massenprodukten .....	57
3.1.5	Realisierung neuer Fertigungsstrategien .....	57
3.1.6	Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeitsbewertung .....	58
3.2	Prozesskette additive Fertigung .....	62
3.3	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess .....	64
3.3.1	Topologie Optimierungsprozess .....	66
3.3.2	Optimierung mittels innerer Strukturen .....	71
3.4	Datenaufbereitung für den 3D Druck .....	74
4	Software und Schnittstellen Analyse .....	78
4.1	Facetten Dateiformate .....	81
4.1.1	STL .....	81
4.1.2	AMF .....	86
4.1.3	3MF .....	92
4.1.4	VRML und Ply .....	97
4.2	CAD Formate/Schnittstellen .....	98
4.2.1	IGES (Internal Graphics Exchange Spezifikation) .....	98
4.2.2	STEP (Standard for the Exchange of Product model data) .....	99
4.3	Slicing Formate .....	99
4.4	Softwarelösungen .....	102
4.4.1	CAD Systeme .....	102
4.4.2	Softwarelösungen zur direkten Verarbeitung von Facettengeometrie .....	107
4.4.3	Simulationssoftware für FEA und Topologie-Optimierung .....	110

4.4.4	Software zur Datenaufbereitung für den 3D Druck .....	114
4.5	Erkenntnisse aus der Softwareanalyse und resultierende Workflows .....	126
4.5.1	Konstruktions- und Optimierungsprozess .....	126
4.5.2	Datenaufbereitung und Fertigungsvorbereitung .....	130
5	Case Study Flaschenöffner .....	133
5.1	Ausgangsmodell.....	133
5.2	Variante 1: Detailgetreue CAD Geometrierückführung.....	134
5.2.1	Schritt 1: Definition Design Space und FE-Modeling .....	135
5.2.2	Schritt 2: Topologie-Optimierung inkl. erster Analyse .....	136
5.2.3	Schritt 3: Rückführung mittels NURBS .....	143
5.2.4	Schritt 4: FE Validierung .....	144
5.2.5	Schritt 5 (Optional) Implementierung von Gitterstrukturen .....	145
5.3	Variante 2: Vereinfachte CAD Geometrierückführung.....	147
5.3.1	Schritt 1: Definition Non Design Space und FE Modellierung .....	147
5.3.2	Schritt 2: Topologie-Optimierung mit Formengenerator .....	148
5.3.3	Schritt 3: Geometrie-Rückführung .....	152
5.3.4	Schritt 4: FE Validierung .....	153
5.4	Variante 3: Direkte Verarbeitung der Facettengeometrie .....	154
5.4.1	Schritt 1: Geometrieanpassung .....	155
5.4.2	Schritt 2: FE-Validierung.....	157
5.4.3	Schritt 3: Shape Optimization .....	158
5.5	Datenaufbereitung für die additive Fertigung .....	160
5.5.1	Schritt 1: Facetten-Reparatur mit Materialise Magics .....	160
5.5.2	Schritt 2: Support- und Schichtgenerierung mit R Designer .....	161
5.6	Herstellungsprozess auf der DMG Mori Lasertec 30 SLM .....	162
6	Resümee und Ausblick.....	164
7	Literaturverzeichnis .....	167
8	Abbildungsverzeichnis.....	175
9	Formelverzeichnis .....	180
10	Tabellenverzeichnis .....	181
11	Abkürzungsverzeichnis .....	182



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Unter den Rahmenbedingungen von kürzer werdenden Produktlebenszyklen und dem Trend hin zu Individualisierung, werden hohe Anforderungen an die Adaptionfähigkeit der Produktionsmittel gestellt. Diese können von additiven Verfahren besonders gut erfüllt werden können (Klocke, 2015 S. 127). Darüber hinaus ergibt sich durch die steigenden Rohstoffpreise und den hohen Kostendruck die Notwendigkeit einer optimalen Materialnutzung. In vielen Industriebereichen, wie etwa die Automobil- oder der Luftfahrtbranche, stellen Leichtbau und die damit verbundenen Sekundäreffekte zur Massereduktion, sowie die Funktionsintegration einen wesentlichen Stellhebel zur Kostenreduktion dar. Die hohe geometrische Freiheit generativer Verfahren im Vergleich zu konventioneller Fertigung birgt diesbezüglich enorme Potentiale die es zu nutzen gilt (Schmidt, 2016, S 1,2).

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl an generativen Fertigungsverfahren entwickelt, welche vorrangig zur Produktion von Muster- und Prototypen eingesetzt wurden und unter dem Begriff „Rapid Prototyping“ zusammengefasst werden. Durch die Weiterentwicklung und Qualifizierung der Prozesse bei den additiven Verfahren mit metallischen Werkstoffen über die letzten Jahre, wurde es möglich, neben Prototypen auch Funktionsbauteile für Einzelteil oder Kleinserien herzustellen (Klocke, 2015 S. 128, 129). Dieser Trend zum sogenannten „Rapid Manufacturing“ dürfte sich auch in Zukunft fortsetzen, da für die additiven Fertigungsverfahren in den nächsten Jahren eine enorme Steigerung des Marktvolumens, verbunden mit einer starken Kostenreduktion prognostiziert wird. Die wesentliche Stoßrichtung in Bezug auf die zukünftige Kostenreduktion stellen hier die Materialkosten für das Metallpulver dar. Um diesen Kostenfaktor in den Griff zu bekommen, ist die Qualifizierung neuer Werkstoffe wesentlicher Bestandteil aktueller Forschung. Weitere Fortschritte sind auch im Bereich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Maschinen notwendig um den Nacharbeitungsaufwand zu reduzieren (Lachmayer and Lippert, 2017, S. 2).

Die Möglichkeiten der generativen Fertigungsverfahren auszunutzen und effizient in die Produktentwicklungskette zu integrieren, ist ebenfalls eine große Herausforderung. Dabei spielt vor allem das IT-Umfeld eine wesentliche Rolle. In der jüngeren Vergangenheit sind viele Softwarelösungen verschiedener Hersteller präsentiert worden, welche das Potential generativer Fertigung bestmöglich nutzen sollen. Die Zusammenführung bzw. Weiterentwicklung dieser Tools zu einem effizienten Software-Workflow, von der Konstruktion bis zum fertigen Produkt, inklusive Vernetzung der Maschinen birgt weitere Potentiale (Hilbert et al., 2016).

All den beschriebenen Anstrengungen und Entwicklungsrichtungen in Bezug auf generative Fertigung liegt die Motivation zugrunde einen Mehrwert gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren zu generieren. Abhängig von Zielsetzung und Forschungsgebiet werden aktuell in der Literatur Ansätze beschrieben diesen Mehrwert für konkrete Produkte zu evaluieren (Lachmayer and Lippert, 2017 S.5).

## **1.2 Zielsetzung**

Im Zuge der Anschaffung einer selektiven Laserschmelz-Maschine (SLM) in der Pilotfabrik Industrie 4.0 der TU Wien, soll als initiales Projekt ein Workflow für die Produktentstehung gestaltet werden. Dazu soll zuerst Grundlagen und der Stand der Technik der additiven Verfahren dargelegt und aktuelle Forschungsthemen beleuchtet werden. Außerdem sind aktuelle, in der Literatur beschriebene, Gestaltungsrichtlinien und Produktentwicklungskonzepte zu beschreiben und zu analysieren.

Anschließend sollen für die Gestaltung des Workflows aktuelle Softwarelösungen, welche die charakteristischen Vorteile der additiven Fertigung nutzen verwendet werden. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Softwareschnittstellen zwischen CAD und anderen, für die Produktentwicklung relevanten, CAx-Modulen, sowie zur Maschinensoftware zu legen, um den Workflow möglichst effizient zu gestalten. Neben der reinen Software-Seite sind auch nachgelagerte Prozesse während der Fertigung bzw. nach Herstellung des Produktes, wie etwa Prozessparameter an der Maschine von Interesse. Vor allem auf deren Implikationen auf die Konstruktion und Datenaufbereitung soll eingegangen werden.

Im Anschluss daran soll der gestaltet Workflow anhand eines Demonstrationsbauteils getestet werden. Das Demonstrationsbauteil sollte dabei vor allem die Vorteile dieses additiven Verfahrens gegenüber der konventionellen Fertigung in Bezug auf die Ausnutzung geometrische Freiheit, sowie die speziellen Konstruktionsempfehlungen berücksichtigen.

## **1.3 Vorgangsweise**

Der grundlegende Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1. dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert. Die Arbeit kann grundsätzlich in 4 Blöcke untergliedert werden. Da der Produktentwicklungsprozess und damit auch die CAx-Prozesskette im Fall der additiven Fertigung sehr stark von der Herstellungart geprägt ist, stellt der erste Block eine umfangreiche Grundlagenuntersuchung der generativen Verfahren dar. Diese wird im Kapitel 2 ausgeführt und beschäftigt sich neben den allgemeinen Gesichtspunkten in weiterer Folge vor allem mit den Besonderheiten des selektiven Laserschmelzens (SLM). Die im Zuge dessen untersuchten Themengebiete sind Abbildung 1 unter Kap. 2 zu entnehmen.

Nachdem ein grundlegendes Verständnis des Fertigungsverfahrens erreicht wurde, werden die Implikationen der additiven Fertigung auf den Produktentwicklungsprozess betrachtet. Ausgehend von den Potentialen der additiven Fertigung, werden Prozessketten analysiert und auf die Besonderheiten im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess sowie im Fertigungsvorbereitungsprozess näher eingegangen.

Im dritten Block sollen die im vorigen Kapitel dargestellten Prozesse und deren Umsetzung von der Software und Schnittstellenseite beleuchtet werden. Dazu wird zuerst das heterogene Feld der Datei Formate erläutert, mit besonderem Focus auf Facettengeometrie-Formate. Anschließend werden die am Markt erhältlichen bzw. im Zuge dieser Arbeit verwendeten Softwarelösungen auf ihre Implementierung in die Prozesskette untersucht. Die Erkenntnisse dieser Analysen sollen in weiterer Folge in Form von möglichen Workflow dargelegt werden.

Um die gesammelten Erkenntnisse auch praktisch zu erproben soll abschließend eine Case Study durchgeführt werden. Dabei soll ein Flaschenöffner als Demonstrationsteil die gesamte Prozesskette durchlaufen. Wie in Abbildung 1 zu sehen, werden dabei drei Konstruktionsvarianten angewendet.

Im abschließenden Resümee und Ausblick sollen die Erkenntnisse dieser Arbeit dargelegt werden und im Speziellen auf die Lehren aus der Case Study eingegangen werden.

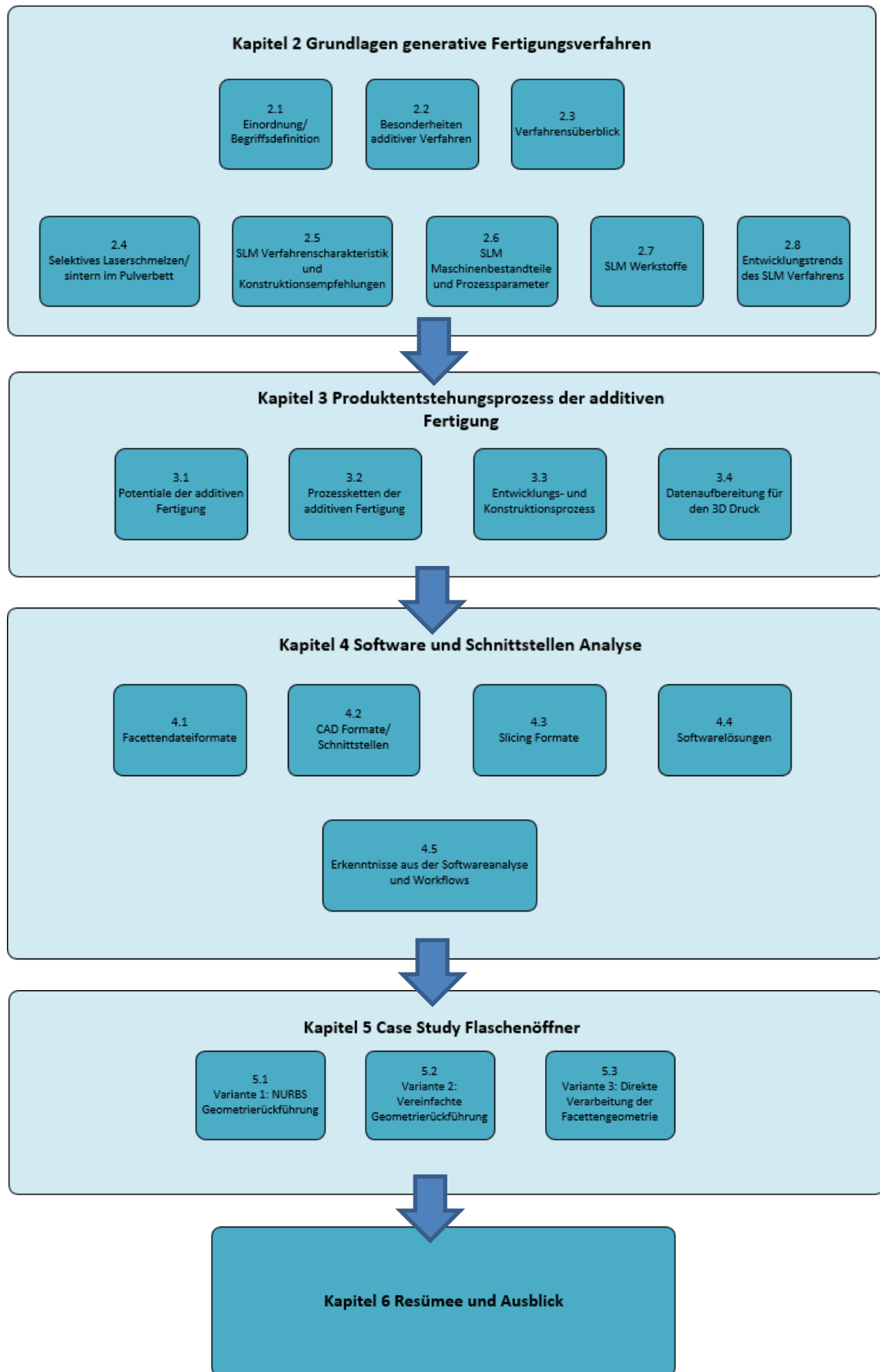


Abbildung 1: Vorgangsweise der Arbeit

## 2 Grundlagen generative Fertigungsverfahren

### 2.1 Einordnung und Begriffsdefinitionen

Der medial geprägte Begriff 3D Druck ist in den letzten Jahren in aller Munde und bezeichnet meist die gesamte Technologie der generativen Fertigungsverfahren. Ausgehend vom 2D Druck für Dokumente, wird die Herstellung von dreidimensionalen Elementen zur leichteren Verständlichkeit als 3D Druck bezeichnet. Um die genaue Verortung der generativen Verfahren zu verdeutlichen können Fertigungsverfahren, wie im angelsächsischen Raum üblich, vereinfacht allgemein wie folgt unterteilt werden (Gebhardt, 2013, S.1-2).

Subtraktive Verfahren: Die gewünschte Geometrie wird dabei durch gezielten Materialabtrag erzeugt. Beispiele dafür sind etwa Drehen oder Fräsen.

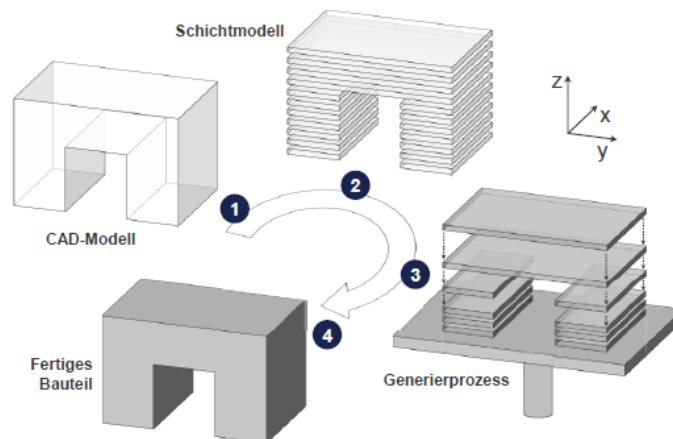
Formative Verfahren: Ein Halbzeug, mit einem definierten Volumen, wird dabei, unter Volumskonstanz, in die gewünschte Form gebracht. Schmieden und Tiefziehen gehören dieser Verfahrensgruppe an.

Additive Verfahren: Diese Verfahren beruhen auf dem sogenannten Schichtaufbauprinzip. Nach diesem können alle Körper gedanklich in Scheiben geschnitten werden und durch Aneinanderreihung dieser einzelnen Schichten aufgebaut werden. Generative Verfahren automatisieren diesen Prozess. Die Schichterzeugung sowie das Zusammenfügen laufen automatisch und computergesteuert ab. Generative und additive Verfahren werden meist als Synonym verwendet, bei genauer Betrachtung gilt dies jedoch nur für die Entstehung der Geometrien. Generative Verfahren grenzen sich darüber hinaus vor allem dadurch ab, dass sich simultan zu Geometrieerstellung auch die Werkstoffeigenschaften ändern. In der Praxis wird diese Unterscheidung jedoch vernachlässigt (Gebhardt, 2013, S.1-2).

Unabhängig von der Art des generativen Verfahrens folgen alle dem grundsätzlich selben Prinzip. Der Aufbau des Bauteils erfolgt in Z-Richtung durch die Aneinanderreihung von, in der X-Y Ebene definierten Schnitten unter Angabe der gewünschten Schichtdicke. Dieses zerlegen des 3D Bauteils in zweidimensionale Schichten erlaubt einerseits die direkte Verarbeitung der 3D CAD Datei und andererseits können beliebig komplexe Körper, ohne den Einsatz von produktspezifischen Formen und Werkzeugen, erzeugt werden. Neben 3D CAD Daten können auch direkt Schichtdaten, etwa aus der MRT<sup>1</sup> verarbeitet werden. In Abbildung 2 sind die 4 Hauptschritte von generativen Verfahren zu sehen (Fritz and Schulze, 2012, S. 106-107).

---

<sup>1</sup> Magnet Resonanz Tomographie



**Abbildung 2: Hauptphasen generativer Fertigungsverfahren (Schmidt, 2016, S. 20)**

Durch die schnelle Entwicklung im Bereich der generativen Verfahren kommt es in der Praxis oft zu inkonsistenten Begriffsverwendungen. Vor allem im Zuge neuer Entwicklungen werden oft auch eigene Verfahrensbezeichnungen kreiert. Durch die hohe Entwicklungsdynamik ist dieses Problem zwar nicht aufzulösen, jedoch wird etwa in der VDI Richtlinie 3405 versucht Begrifflichkeiten zu definieren (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 1ff).

Eine grobe Einteilung der generativen Verfahren kann zum Beispiel nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials vorgenommen werden (Gebhardt, 2013, S.47).

Flüssige Werkstoffe: Verfestigung der flüssigen oder teigigen Ausgangsmaterialien (Stereolithographie, Polymerdruck)

Feste Werkstoffe:

- An- bzw. Aufschmelzen von Pulvern oder Granulaten (Sinter- und Schmelzverfahren).
- An- oder Aufschmelzen und anschließendes Verfestigen von festen Materialien (Extrusionsverfahren)
- Verkleben von Granulaten oder Pulver durch Binder (3D Printing)
- Ausschneiden aus Folien, Bändern oder Platten und anschließendes Verkleben (Schicht-Laminat Verfahren)

Gasförmige Werkstoffe: Physikalisches Abscheiden aus Aerosolen oder chemisches Abscheiden aus der Gasphase (Schmidt, 2016, S. 21).

Darüber hinaus ist eine Gliederung nach der Art der Anwendung möglich. Generative Verfahren können demzufolge in zwei Anwendungsbereiche eingeteilt werden, siehe Abbildung 3 (Gebhardt, 2013, S.6ff).

Rapid Prototyping: Dabei handelt es sich um Verfahren zur Herstellung von Prototypen und Modellen ohne Endproduktcharakter. Es werden einige wenige Eigenschaften des späteren Produktes abgebildet, der Rest wird nur sehr abstrakt generiert. Das Ziel dabei ist, möglichst früh im Produktentwicklungsprozess bestimmte Produkteigenschaften abzusichern. Je nachdem ob es sich um ein Modell handelt, welches hauptsächlich zur 3D Visualisierung verwendet wird oder ob das Modell einzelne Funktionen des späteren Produktes aufweist und zur Funktionsabsicherung dient, unterscheidet man zwischen Konzeptmodell (auch Solid Image oder Mock up) oder Funktionsprototyp (Functional Prototyp) (Gebhardt, 2013, S.6ff).

Rapid Manufacturing: Im Allgemeinen werden damit Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit Endproduktcharakter bezeichnet. Handelt es sich um positive Bauteile im Ausmaß von Einzelstücken oder Kleinserien, dann spricht man von Direct Manufacturing. Werden Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze, also Negative, hergestellt spricht man vom Direct Tooling (Gebhardt, 2013, S.6ff).

Direct Manufacturing beruht auch heute noch auf der gleichen Technologie und den gleichen Maschinen die beim Rapid Prototyping verwendet werden. Ob es in Zukunft immer mehr gelingt diese Technologie in die Endproduktserienfertigung zu bringen hängt davon ab, ob die mechanischen und technologischen Eigenschaften mit den vorhandenen Materialien und Verfahren mit einer ausreichenden Genauigkeit und zu einem wettbewerbsfähigen Preis realisiert werden können (Gebhardt, 2013, S.6ff).

Die direkte Herstellung von Werkzeugeinsätzen ist älter als die Herstellung von Endprodukten und so ist aus historischen Gründen die Kategorie Rapid Tooling in der Literatur weit verbreitet. Tatsächlich ist das Direct Tooling aber dem Rapid Manufacturing zuzuordnen. Zu unterscheiden ist jedoch die Kategorie des Prototype Tooling, welche das Erzeugen von Werkzeugen aus Modell und Prototypmaterialien, wie etwa Stereolithographiematerial beschreibt (Gebhardt, 2013, S.10-14).

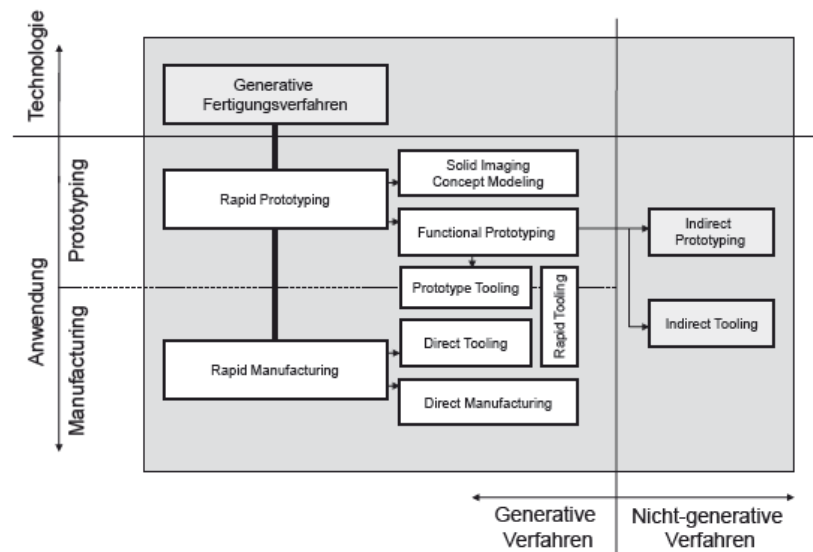


Bild 1.7 Struktur der Technologie der Generativen Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von ihren Anwendungen Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

Abbildung 3: Einteilung der generativen Verfahren nach der Anwendung (Gebhardt, 2013, S.8)

## 2.2 Besonderheiten additiver Verfahren

### 2.2.1 Verfahrenstypische Vorteile

Im Vergleich zu konventionellen Verfahren entfallen, durch die werkzeuglose Fertigung, Restriktionen in Bezug auf Hinterschnitte oder Werkzeugzugänglichkeit. Durch die große geometrische Gestaltungsfreiheit lassen sich komplexe Geometrien wie Freiformgeometrien (bionische Strukturen), topologisch optimierte Strukturen oder filigrane Strukturen (Waben-, Gitterstrukturen) erzeugen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Grad der Komplexität unabhängig von den Fertigungskosten ist und dass die Bauteileigenschaften durch Anpassen der Prozessparameter lokal gesteuert werden können. Aufgrund der hohen Gestaltungsfreiheit ist die Integration neuer Funktionen möglich und durch Integralbauweise können Montage- oder Fügevorgänge reduziert werden (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.5ff).

### 2.2.2 Verfahrenstypische Nachteile

Da es sich um ein schichtweises Aufschmelzen handelt, ähnlich eines Schweißprozesses, können Schrumpfungen, Verformungen oder Eigenspannungen die Folge der lokalen Temperaturunterschiede sein (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.5ff).

Die Oberflächengüte von additiv gefertigten Bauteilen wird durch den schichtweisen Aufbau beeinflusst. Es entsteht ein Treppenstufeneffekt der an Funktionsflächen, abhängig von der Anwendung, eine Nachbearbeitung notwendig macht. In diesem Fall muss an den betroffenen Flächen ein Aufmaß zur Nachbearbeitung vorgesehen

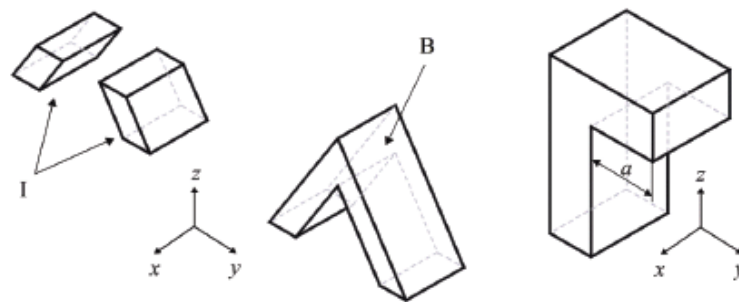


werden. Durch den schichtweisen Aufbau resultieren anisotrope Bauteileigenschaften, welche schon bei der Auslegung berücksichtigt werden sollten. Ein weiterer Nachteil ist, dass die für die additive Fertigung zur Verfügung stehende Werkstoffpalette im Vergleich zu konventionellen Verfahren noch relativ begrenzt ist (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.5ff).

### 2.2.3 Allgemeine Randbedingungen additiver Verfahren

Durch den Prozess des schichtweisen Aufbaus kann es bezüglich Anbindung der einzelnen Schichten zu kritischen Fällen kommen.

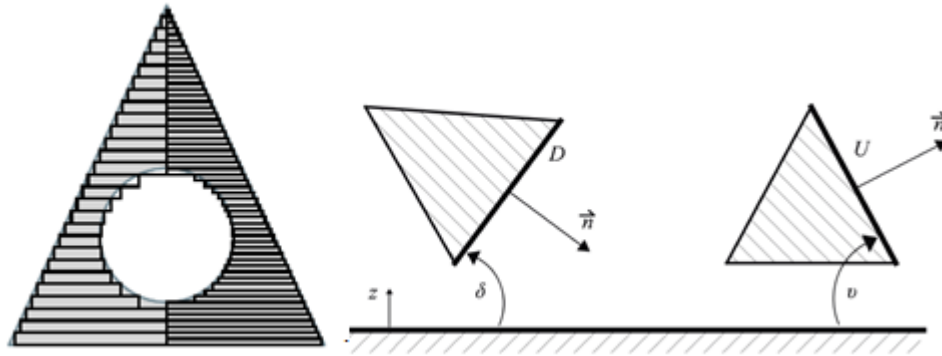
Es kann etwa zur Ausbildung von Inseln kommen, dabei handelt es sich um Bauteilsektionen, welche erst im späteren Verlauf des Bauprozesses zusammenwachsen, siehe Abbildung 4 (links). Es sollte in dem Zusammenhang bedacht werden, dass im gesamten stabile Bauteile während des Aufbauprozesses instabile Zustände einnehmen können (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.7ff).



**Abbildung 4: Insel (links), Überhang mit Überhanglänge a (rechts) (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.7)**

Darüber hinaus kann es bei einem Downskinwinkel (siehe Abb 4 rechts) von  $0^\circ$  zu Überhängen kommen, welche ab einer gewissen Auskragungslänge  $a$  abgestützt werden müssen, siehe Abbildung 4 (rechts). Ab welcher Überhanglänge ein Abstützen notwendig wird ist Verfahrensabhängig.

Weiters kommt es, wie schon zuvor kurz erwähnt, durch die den schichtweisen Aufbau zu einer Überführung der 3D Geometrie in eine 2.5D Abbildung, wodurch der Treppenstufeneffekt verursacht wird. Dieser führt zu einer geringfügigen Abweichung des realen Bauteils zum CAD-Modell, welcher maßgeblich von der Schichtdicke abhängig ist, dargestellt in Abbildung 5 (links) (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S. 7ff).



**Abbildung 5: Treppenstufeneffekt (links), Downskinwinkel  $\delta$  und Upskinwinkel  $v$  (rechts) (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S. 8)**

Generell ist zu sagen, dass bei additiven Verfahren typischerweise nicht die Genauigkeiten von konventionellen Fertigungsverfahren erreicht werden kann. Außerdem sind üblicherweise unterschiedliche Genauigkeiten je nach Bauteilorientierung möglich, was bei der Positionierung bedacht werden sollte (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S. 7ff).

## 2.3 Verfahrensüberblick

Im Folgenden werden die weltweit verfügbaren und industriell bedeutendsten Verfahrensfamilien der generativen Fertigung überblicksartig erläutert. Im Focus dieser Arbeit steht das selektive Laserstrahlschmelzverfahren (SLM) von Metallen, auf welches in weiterer Folge näher eingegangen wird.

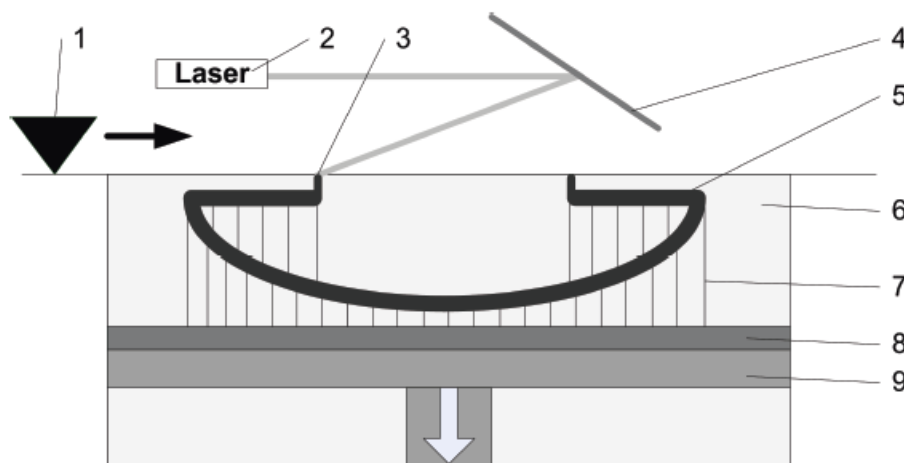
### 2.3.1 Polymerisation-Stereolithographie

Die Stereolithographie wurde 1988 kommerzialisiert und war das erste generative Verfahren im industriellen Einsatz (Klocke, 2015 S.135 zit. nach: Jacobs, 1992). Es beruht auf der selektiven Polymerisation von flüssigen oder pastösen Monomeren als Ausgangsstoff. Die klassische Variante ist die Laser-Stereolithographie, erst 10 Jahre später haben das Lampen-Maskenverfahren, das Polymerdruckverfahren und die Polymerisation von Pasten an Bedeutung gewonnen (Gebhardt, 2013, S. 105ff).

#### Laser-Stereolithographie

Die Maschine besteht aus einem Vorratsbehälter indem sich eine vertikal verschiebbliche Bauteilplattform befindet. Der Vorratsbehälter ist mit photosensitiven Monomeren gefüllt, welche mit Hilfe des Laser-Scanners punktwise verfestigt werden (Polymerisation). Der Laserstrahl wird dabei über Umlenkspiegel zu einer Scanneroptik geleitet, welche den Strahl über das Harzbad führt, wie in Abbildung 6 sichtbar. Das Prinzip der Anlage beruht darauf, dass durch belichten der Harzschicht eine Verbindung zwischen Bauteil und Plattform erreicht wird. Anschließend wird die

Plattform um einen gewissen Betrag abgesenkt und mit einem Wischsystem (Recoater) eine weitere Schicht Harz aufgetragen, welche wiederum nach den Schichtdaten der zweiten Schicht belichtet wird. Dieser Prozess wiederholt sich solange, bis das fertige Bauteil aus dem Harzbad entnommen werden kann. Wichtig bei diesem Prozess ist die Abstimmung der Laserparameter um eine Verzahnung zwischen den Einzelverfestigungen in einer Schicht und zwischen den Schichten zu gewährleisten. Ein weiteres Spezifikum ist das Schrumpfen des Bauteils durch die Polymerisation. Dem kann durch die Verwendung von Epoxidharz, der Verwendung einer Lampe statt dem Laser (siehe Digital Light Processing) oder speziellen Baustrategien entgegengewirkt werden (Gebhardt, 2013 S.105ff).



**Abbildung 6: Aufbau einer Laser-Stereolithographieanlage<sup>2</sup> (VDI 3405, 2014 S.8)**

Da die im Aufbau befindlichen Bauteile über eine eher geringe Festigkeit verfügen und daher leicht durch den Pulverauftragmechanismus, Eigenspannungen oder Eigengewicht verformt werden können, sind Stützkonstruktionen notwendig (Gebhardt, 2013 S.105ff).

### Digital Light Processing

Der Maschinenaufbau ist jenem der Laser Stereolithographie ähnlich, jedoch wird zur Belichtung statt dem Laser-Scanner System eine Lampe (Digital Light Processing Projektor) verwendet. Die Besonderheit dabei ist, dass die Lampe immer den ganzen Querschnitt auf einmal belichtet und daher die Bauzeit von der Komplexität unabhängig ist. Als Baumaterial kommen Acrylate zum Einsatz (Gebhardt, 2013 S. 115ff).

<sup>2</sup> 1-Beschichter  
2-Laser

3-Verfestigungszone  
4-X-Y Scanner

5-generiertes Bauteil  
6-flüssiges Harz

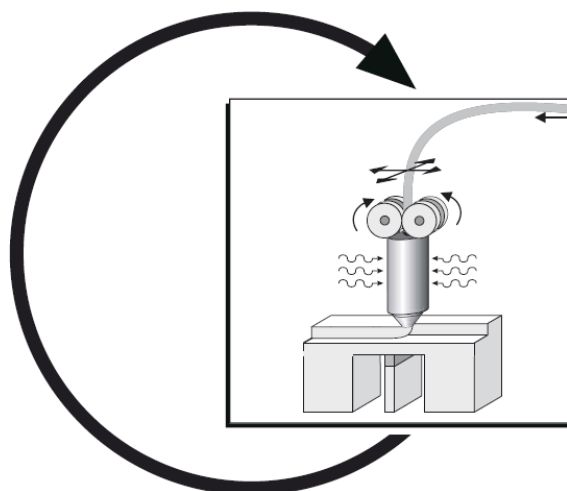
7-Stützkonstr.  
8,9-Bauplattform mit Hubtisch

### 2.3.2 Extrusionsverfahren-Fused Layer Modeling (FLM)

Dabei handelt es sich um eine Verfahrensfamilie, bei der erhitzte teigige Thermoplaste meist kontinuierlich in Strangform durch ein oder mehrere Düsen gepresst wird und anschließend auf der Bauteilplattform bzw. auf der vorigen Schicht abgelegt wird. Die Energie reicht dabei aus um die untere Schicht anzuschmelzen, um nach der Erstarrung in Folge von Wärmeleitung eine dauerhafte Verbindung zu erzeugen. Die Generierung von Konturen erfolgt durch Ablegen von gekrümmten Strängen, bei der Flächenerzeugung werden die Stränge eng nebeneinander abgelegt. Verfahren, welche das aufgeschmolzene Material diskontinuierlich, also in Tropfenform aufbringen oder das Bauteil beschießen, werden ebenfalls zu den Extrusionsverfahren gezählt. In der Literatur werden diese jedoch oft den Druckverfahren zugeordnet (Gebhardt, 2013 S.248ff).

Beide Verfahrensarten benötigen ebenfalls Stützstrukturen für überhängende Bauteilpartien. Es existieren Verfahrensvarianten bei denen eine zweite Düse das Supportmaterial einbringt, welches keine Bindung mit dem Bauteilmaterial eingeht und somit besonders leicht zu entfernen ist (Klocke, 2015 S 137ff).

Der wohl bekanntesten Vertreter der Extrusionsverfahren sind die FDM (Fused Deposition Modeling)-Anlagen vom Hersteller Stratasys. Dabei handelt es sich um ein kontinuierliches Verfahren mit einer beheizten Düse, mit der das drahtförmige, thermoplastische Ausgangsmaterial aufgeschmolzen wird, siehe Abbildung 7. Verwendete Werkstoffe sind Thermoplaste wie Polycarbonate und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) oder Hochleistungskunststoffe wie Polyphenylsulfonen (PPSF). Anwendungsbereich sind sowohl die Konzeptmodell- wie auch die Endprodukterzeugung und das Tooling über Abformverfahren (Gebhardt, 2013 S. 248ff).



0 Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren, Prinzip<sup>35</sup>

**Abbildung 7: Verfahrensprinzip Fused Deposition Modeling (Gebhardt, 2013 S 249)**

### 2.3.3 3D Druck

Der mediale Begriff des 3D Druck, welcher meist die gesamte additive Technologie bezeichnet, ist nicht mit der Verfahrensfamilie des 3D Druck zu verwechseln (Schmidt, 2016 S.13). 3D Druck beruht auf der Verfestigung eines pulverförmigen Ausgangsstoffes, welcher mit einem Binder lokal verfestigt wird. Die Maschinen verfügen dazu über 2 Kammern, welche mit beweglichen Böden ausgestattet sind.

Während des Aufbauprozesses wird die Bauraum-Kammer jeweils um eine Schichtdicke abgesenkt und die Pulvervorrats-Kammer gleichzeitig angehoben und die nächste Pulverschicht mit einem Wischsystem verteilt, siehe Abbildung 8. Mittels eines Druckkopfes wird nun eine Binderflüssigkeit eingespritzt und das Pulver dadurch lokal verfestigt. Darüber hinaus ist das Einfärben des Bindemittels bei speziellen Tintenstrahldruckköpfen möglich (Gebhardt, 2013 S. 265). Mit dem Binder wird sowohl die Kontur der aktuellen Schicht generiert sowie auch die Verbindung mit der vorherigen Schicht sichergestellt. Das nicht zum Aufbau verwendete Pulver verbleibt im Bauraum und stützt das Bauteil. Am Ende des Druckprozesses erhält man ein poröses Bauteil aus ca. 60% Ausgangswerkstoff und 10% Bindemittel, welches kaum mechanisch belastbar ist. Durch Nachbehandlungsschritte wie zeitgeregelte Sinterprozesse und anschließendes Infiltrieren mit Epoxid Harz oder niedrigschmelzende Metalllegierungen können die Poren geschlossen werden. Als Materialien kommen vorwiegend Polymerpulver zum Einsatz, aber auch Keramik und Metallpulver werden verwendet (Klocke, 2015 S.138).

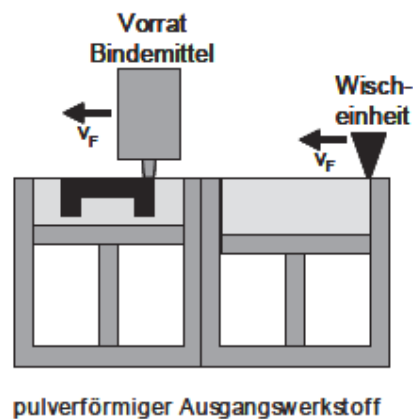


Abbildung 8: Prinzipskizze 3D Druck Verfahren (Klocke, 2015 S.138)

### 2.3.4 Schicht-Laminat-Verfahren- Layer Laminate Manufacturing (LLM)

Bei dieser Verfahrensfamilie werden vorgefertigte, mittels Messer, Laser oder Fräser, geschnittene Schichten gefügt und so zum fertigen Bauteil aufgestapelt. LLM stellt im strengen Sinne somit eine Kombination von Abtragenden und Aufbauenden Verfahren dar, siehe Abbildung 9. Wird Holz, Kunststoff und Papier als Werkstoff verwendet, erfolgt das Fügen entweder durch Kaschieren der Schichten mit Polyethylenklebstoff oder durch Verkleben der Lagen während des Schichtaufbaus. Bei Verwendung von Metallen werden die Konturen verschweißt und die Flächen mittels Diffusionsschweißen miteinander verbunden. Beim LLM Verfahren müssen nur die Konturen, nicht aber die Flächen der einzelnen Schichten abgefahen (ausgeschnitten) werden. Dadurch ergeben sich vor allem bei großflächigen Modellen, mit im Verhältnis dazu kleinen Umfängen, Vorteile gegenüber Laser-Scanner Verfahren. Filigrane Strukturen mit aufwendigen Konturen sind daher eher ungünstig. Wie in Abbildung 9 zu sehen, verbleiben die nicht zum Bauteil gehörenden Teile der Schichten im Bauraum und dienen dadurch als Stützung während des Aufbauprozesses. Zur leichteren Entnahme werden diese Bereiche anschließend in kleine Quadrate geschnitten (Gebhardt, 2013 S. 227ff).

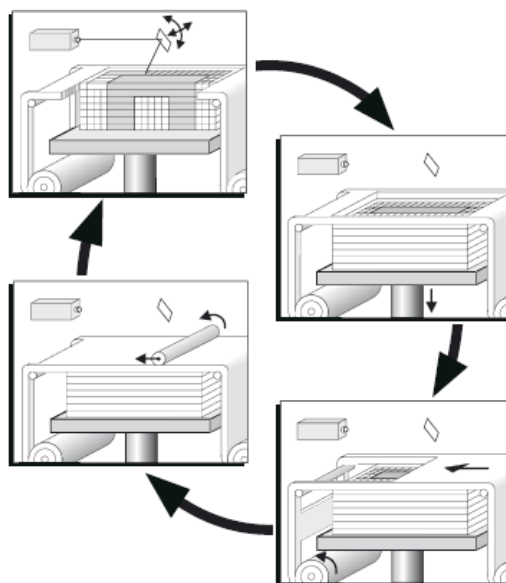


Abbildung 9: Prinzipskizze des LLM Verfahrens am Beispiel des Laminat Objects Manufacturing (LOM) (Gebhardt, 2013 S 229)

### 2.3.5 Beschichten/Schmelzen mit der Pulverdüse-Laserauftragsschweißen

Der Materialauftrag bei diesen Verfahren erfolgt über ein frei bewegliches Laser Düsensystem. Beim Schmelzen mit der Pulverdüse wird ein Pulverstrahl erzeugt und simultan vom Laser aufgeschmolzen. Die Erstarrung des Materials am Bauteil erfolgt durch Wärmeleitung. Beim Laserauftragsschweißen wird statt der Pulverdüse ein Draht zugeführt und aufgeschmolzen. Beide Verfahrensvarianten sind in Abbildung 10 zu sehen. Durch das teilweise Aufschmelzen der Substratplatte bzw. der unteren Bauteilschicht wird eine schmelzmetallurgische Verbindung geschaffen. Die Zufuhr des Werkstoffs zur Bearbeitungsstelle erfolgt mit Hilfe eines Inertgasstromes, wodurch Oxidation verhindert werden soll. Als Werkstoff kommen neben Metallen auch Keramiken zum Einsatz. Durch die dreidimensionale Beweglichkeit des Düsen-Lasersystems ist man beim Aufbau des Bauteils nicht an einzelne Schichten gebunden, sondern kann prinzipiell in beliebiger Reihenfolge aufbauen. Dadurch ergibt sich im Bereich der Reparatur ein großes Anwendungsfeld, indem auf beschädigte Bauteile aufgebaut wird (Gebhardt, 2013 S.216ff).

Es werden Bauteile mit sehr hoher Dichte (99,6% oder höher) und Festigkeit erzeugt, welche ein sehr dichtes feinkörniges Gefüge aufweisen (Gebhardt, 2013 S. 218). Um die gewünschte Oberflächenqualität zu erreichen, ist jedoch häufig eine mechanische Nachbearbeitung notwendig (Klocke, 2015 S.150).

Bei der Verwendung von Pulvern steht eine größere Auswahl an möglichen Legierungsvariationen zu Verfügung, jedoch ist ein höherer Maschinenaufwand, vor allem betreffend Arbeitssicherheit bei der Verarbeitung von Pulvern, gegeben (Klocke, 2015 S 151).

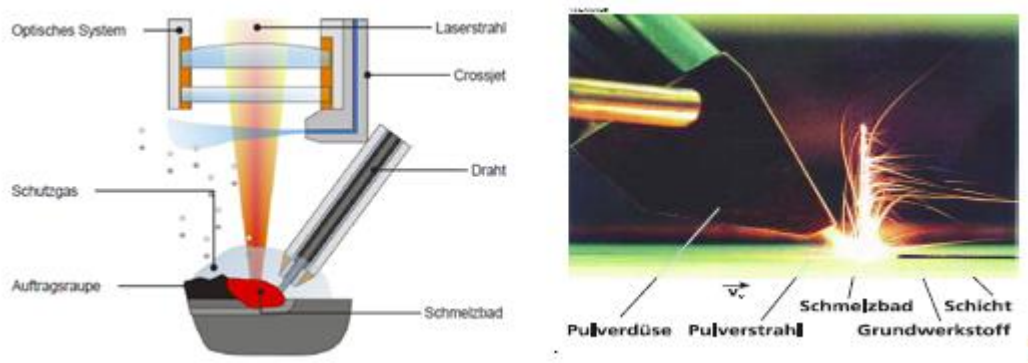


Abbildung 10: Laserauftragsschweißen (links), Pulver-Laser Verfahren (rechts) (Klocke, 2015 zit. nach: Fraunhofer ITP Aachen) (Gebhardt, 2013 zit. nach: Fraunhofer ITP Aachen)

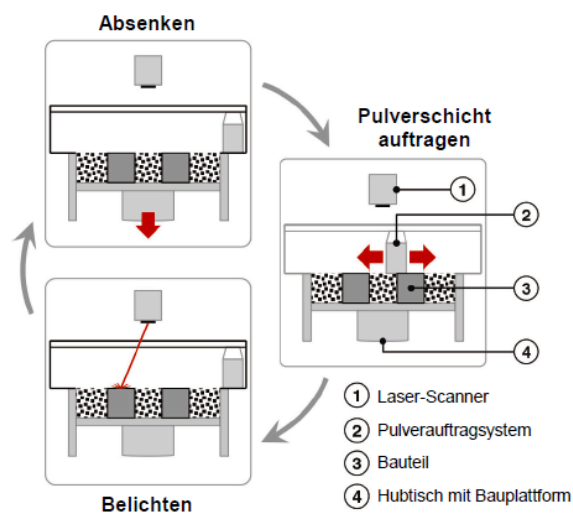


## 2.4 Selektives Laser Schmelzen/Sintern im Pulverbett

Da es sich beim selektiven Laserschmelzen (SLM) und selektiven Lasersintern (SLS) um den grundsätzlich gleichen Verfahrensablauf handelt, werden diese nach (Gebhardt, 2013 S. 156ff) in eine Verfahrensfamilie zusammengefasst.

### 2.4.1 Verfahrensprinzip

Das zugrunde liegende Verfahrensprinzip ist in Abbildung 11 dargestellt. Im Wesentlichen sind am Aufbauprozess selbst 3 Komponenten beteiligt. Eine Energiequelle (meist Laserstrahl, aber auch Bauform mit Elektronenstrahl möglich) zum An- oder Aufschmelzen des Pulvermaterials, eine durch ein Hubsystem vertikal verschieblich gelagerte Bauteilplattform und ein Pulverauftragsystem (Gebhardt, 2013 S. 156ff).



**Abbildung 11: Verfahrensprinzip des selektiven Lasersintern bzw. Laserschmelzen (Schmidt, 2016 S. 24)**

Die Bauteilplattform bildet den Boden der sogenannten Prozesskammer. Zu Beginn des Aufbauvorgangs wird die Plattform nach oben gefahren und die erste Pulverschicht, mit definierter Dicke, durch den „Wischer“ des Pulverauftragsystems aufgebracht. Anschließend belichtet der Laser die Oberfläche entsprechend der Schichtinformationen und schmilzt damit das Pulver an bzw. auf. Durch Abkühlung in Folge von Wärmeleitung kommt es zur Erstarrung. Dabei verbinden sich sowohl die Pulverpartikel der selber Schicht, wie auch die Bauplatte bzw. die vorige Schicht. Danach wird die Bauplattform um den Betrag einer Schichtdicke abgesenkt und eine weitere Pulverschicht aufgebracht. Diese Schrittabfolge wird solange wiederholt bis das gesamte Bauteil generiert ist. Nicht aufgeschmolzenes Pulver verbleibt während des Aufbauprozesses im Bauraum und dient als Stütze (Gebhardt, 2013 S. 156ff).



## 2.4.2 Selektives Lasersintern von Kunststoffen und Metallen

Der Begriff Sintern wird vor allem im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Kunststoffwerkstoffen benutzt, aber auch für Metalle, wenn es nicht zu einem vorständigen Aufschmelzen kommt (Klocke, 2015 S. 41).

### Lasersinter von Kunststoffen

Kunststoffe eignen sich generell sehr gut für den Sinterprozess, da sie eine niedrige Schmelztemperatur und geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen und sich dadurch der Sinterprozess leicht lokal begrenzen lässt (Gebhardt, 2013 S.158). Die Prozesskammer wird optimaler Weise möglichst knapp unter dem Schmelzpunkt des Materials vorgeheizt damit durch den Laser nur mehr eine geringe Energiemenge eingebracht werden muss. In Abhängigkeit vom verwendeten Material kommt es meist sowohl zum Bindemechanismus über die flüssige Phase als auch durch Diffusion wie beim reinen Sintern (Klocke, 2015 S 143ff).

Im Allgemeinen können alle Materialien verwendet werden, welche sich im weitesten Sinne thermoplastisch verhalten. Amorphe Kunststoffe wie Polystyrol oder Polycarbonat neigen nur zum Anschmelzen, wodurch die Pulverform größtenteils beibehalten wird, was zu rauerer Oberflächen führt. Dadurch sind Bauteildichten von 50-85% erreichbar, was entsprechend negative Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften hat. Kristalline Kunststoffe wie Polyamide, werden vollständig aufgeschmolzen und bilden glattere Oberflächen mit Dichten, welche an Spritzgussteile heranreichen. Kristalline Kunststoffe sind jedoch im wesentlichen größeren Ausmaß von Schrumpfung betroffen, was zum sogenannten Curl-Effekt führt. Damit wird die Neigung der Bauteile beschrieben, sich in Richtung der Wärmequelle aufzurollen (Gebhardt, 2013 S. 158ff).

Beim Lasersintern von Kunststoffen sind generell keine Stützstrukturen notwendig, das nicht geschmolzene Pulver übernimmt die Stützfunktion. Theoretisch sind thermoplastische Kunststoffe beliebig oft aufschmelzbar jedoch erfährt auch das, nur zur Stützung verwendete, Pulver eine thermische Schädigung. Als Richtwert gilt, dass dem bereits verwendete Pulver neues Pulver im Mischungsverhältnis von 0,5:1 oder 1:1 zugeführt werden sollte, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten (Gebhardt, 2013 S. 158ff).

### Lasersintern von Metallen

Man unterscheidet 2 Varianten des Lasersinterns von Metallen. Beim direkten Lasersintern besteht das Pulver aus einem hoch und einem niedrig schmelzenden Legierungselement. Durch den Sinterprozess wird das hochschmelzende Legierungselement stoffschlüssig ummantelt, wodurch eine Dichte größer als 99% erreicht wird (Klocke, 2015 s. 144ff).

Die zweite Variante ist das indirekte Lasersintern, bei dem das Metallpulver in polymerummantelter Form vorliegt. Durch den Sinterprozess wird die Beschichtung aufgeschmolzen und die Pulverpartikel kleben zusammen. Der Kunststoff wird anschließend aus dem porösen „Grünling“ ausgebrannt und das Metall sintert zusammen. Durch Infiltrieren mit einer niedrigschmelzenden Metalllegierung können die verbleibenden Poren geschlossen werden (Klocke, 2015 S. 145).

## **2.5 SLM-verfahrensspezifische Charakteristik und Konstruktionsempfehlungen**

Vom selektiven Laserschmelzen wird im Zusammenhang mit Metallen oder Keramiken gesprochen, wenn diese vollständig aufgeschmolzen werden. Es wird also im Vergleich zum selektiven Lasersintern ausschließlich mit der flüssigen Phase gearbeitet. Das Verfahrensprinzip entspricht jedoch weitestgehend dem in Kap. 2.4 vorgestellten (Klocke, 2015 S. 147). Da der Focus dieser Arbeit auf dem selektiven Laserschmelzen von Metallen liegt, beziehen sich alle ab nun folgenden Ausführungen allein auf dieses Fertigungsverfahren.

### **2.5.1 Materialien und Gefüge**

Wie schon erwähnt werden hauptsächlich metallische Legierungen verarbeitet. Werkstoffeigenschaften wie Schweißbarkeit, Wärmeleitfähigkeit oder Schmelzviskosität sind dabei für den Prozess maßgeblich. Im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren steht eine begrenzte Anzahl an Werkstoffen zur Verfügung. Die Forschung und Qualifizierung neuer Werkstoffe schreitet jedoch schnell voran. Ausführliche Informationen zu Werkstoffen sind in Kap. 2.7 zu finden (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 22ff).

### **2.5.2 Stützkonstruktionen (Supports)**

Das Bauteil benötigt eine sichere Anbindung an Bauplatte, diese wird meist durch Stützkonstruktionen geschaffen. Die Stützkonstruktion unterstützt dabei die Wärmeabfuhr, fixiert das Bauteil an der Bauteilplattform und hilft dabei eigenspannungsinduzierten Verzug zu reduzieren. Hinweise zur Anwendung von Stützkonstruktionen sind in Tabelle 1 zu finden (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 22ff).

**Tabelle 1: Stützkonstruktionen Beispiele (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 24)**

	links: Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte mit Stützkonstruktionen rechts: direkte Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte ohne Stützkonstruktionen / support structures connecting the part to the build platform right: part connected directly to the build platform without support structures
	links: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta < 45^{\circ a)}$ benötigen üblicherweise Stützkonstruktionen. rechts: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta > 45^{\circ a)}$ benötigen üblicherweise keine Stützkonstruktionen. Winkelabhängige Beeinträchtigungen der Oberflächenqualität können auftreten. / left: Faces with downskin angle $\delta < 45^{\circ a)}$ normally require support structures. right: Faces with downskin angle $\delta > 45^{\circ a)}$ do not normally require support structures. The surface quality may be adversely affected, depending on the angle.
	links: Bohrung mit enthaltener Stützstruktur rechts: Bohrung mit angepasster Form zur Vermeidung von Stützstrukturen nach [17] / left: hole with internal support structure right: shape of hole modified to avoid use of support structures as per [17]

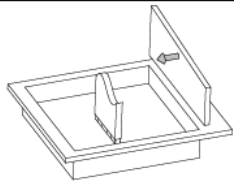
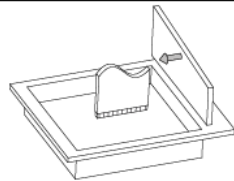
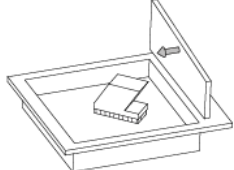
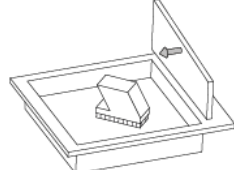
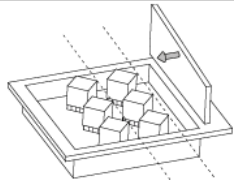
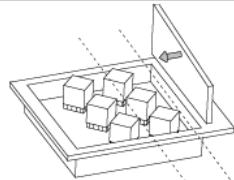
### 2.5.3 Bauteilorientierung und -positionierung

Die Anordnung der Bauteile im Bauraum hat einen großen Einfluss auf die Prozesskosten, die Prozessstabilität und die Bauteilqualität. Durch die Beschichtungsvorrichtung, welche das Pulvermaterial auf der Bauplattform verteilt (siehe Kap. 2.6.1), kann es zu Reibkräften am aufzubauenden Bauteil kommen. Um dem entgegen zu wirken und möglichst geringe Reibkräfte zu verursachen, ist die Beachtung folgender Empfehlungen sinnvoll (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 23).

- Längliche Bauteile sollten nicht parallel, sondern in Beschichtungsrichtung ausgerichtet werden.
- Kritische Geometrien sollten nicht gegen die Beschichtungsrichtung wachsen
- Werden mehrere Bauteile auf der Plattform platziert sollten diese in X-Richtung versetzt werden.

In Tabelle 2 sind Positiv- und Negativbeispiele zu sehen.

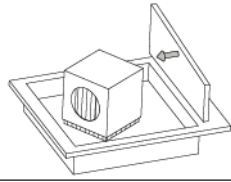
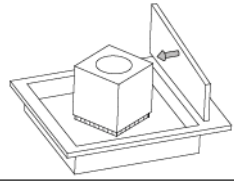
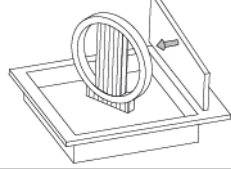
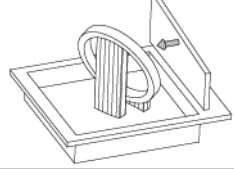
**Tabelle 2: Beispiele zur Bauteilorientierung (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 25)**

Beschreibung / Description	schlecht / poor	gut / good
längliche Geometrien / longitudinal geometries		
kritische Geometrien / critical geometries		
mehrere Bauteile / multiple parts		

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit unterscheidet man im Sinne einer effizienten Produktion zwei Stoßrichtungen. Wird eine geringe Anzahl an Bauteilen gefertigt, stellt die Bauhöhe den größten Einflussfaktor auf die Prozesskosten dar und ist daher gering zu halten. Bei der Produktion von großen Stückzahlen empfiehlt sich die Anzahl der Aufbauprozesse gering zu halten und somit die Bauplattform möglichst effizient auszunutzen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 25).

Die Orientierung der Bauteile im Bauraum hat darüber hinaus wesentlichen Einfluss auf die Anzahl und Größe der benötigten Stützkonstruktionen. Siehe dazu die Beispiele in Tabelle 3 (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 25).

**Tabelle 3: Einfluss der Orientierung auf die Stützstrukturen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 26)**

Beschreibung / Description	schlecht / poor	gut / good
Vermeidung von Stützkonstruktionen / avoiding support structures		
Vermeidung von Nachbearbeitungs-aufwand / avoiding post-processing effort		

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist der sogenannte Curl Effect, dabei handelt es sich um durch thermische Einflüsse hervorgerufenen Bauteilverzug. Um diesen gering zu halten, sollte das Aufschmelzen zu großer Flächen unterlassen werden. Das Bauteil sollte daher so positioniert werden, dass der Querschnitt jeder Schicht möglichst klein ist, siehe Abbildung 12 (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 25).

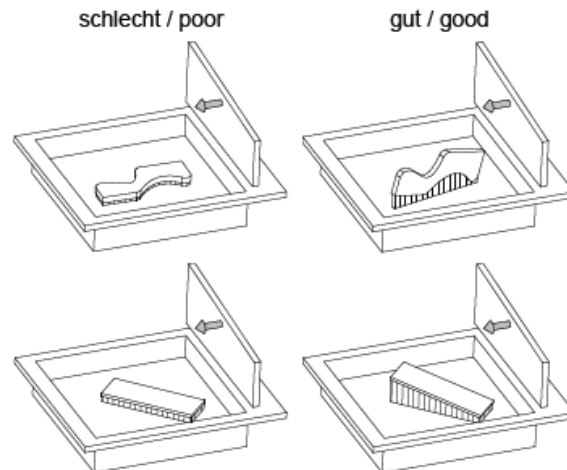


Abbildung 12: Curl Effekt Beispiele (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 26)

## 2.5.4 Oberflächenrauheit

Durch das Anhaften von Pulverpartikel kann die erreichbare Oberflächenrauheit negativ beeinflusst werden. In diesem Zusammenhang spielen vor allem die Upskin- und Downskin-Winkel eine Rolle, deren Einfluss ist in Abbildung 13 dargestellt (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 27).

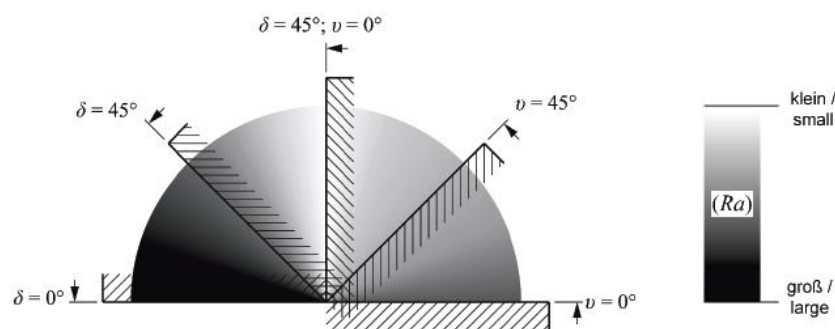


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Rauheit und Upskin ( $v$ )-bzw. Downskinwinkel( $\delta$ ) (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 27)

Bei unbehandelten Oberflächen können mittlere Rauheitswerte von etwa  $140\mu\text{m}$  erreicht werden. Sind bessere Werte erforderlich, müssen Nachbearbeitungsschritte erfolgen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 27).

## 2.5.5 Konstruktive Besonderheiten

Im Folgenden sind die verfahrensspezifischen Besonderheiten des SLM in Bezug auf typische Geometrieelemente dargestellt.

### Hohlräume

Diese können ohne größere Einschränkung gefertigt werden, jedoch ist zu bedenken, dass sich im Inneren unverarbeitetes Pulver befinden kann. Zur

Entfernung sind daher schon bei der Konstruktion entsprechende Öffnungen vorzusehen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 29).

### **Spalte**

Spalten in bzw. teilweise in Baurichtung: Es ist eine minimale Spaltbreite notwendig damit es nicht zur Verbindung der Oberflächen (Spaltschluss) kommen kann. Diese minimale Spaltbreite richtet sich vor allem nach den verwendeten Prozessparametern und dem Werkstoff. Es kann jedoch generell gesagt werden, dass die minimale Spaltbreite typischerweise größer als die Schmelzbadbreite sein sollte (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 29ff).

Spalten in einer Schichtebene (parallel zur Bauplatte): Spalten mit dieser Ausrichtung hängen in ihrem Minimalmaß vor allem von der Schichtdicke ab. Generell sollte das Spaltmaß jedoch ein Mehrfaches der Schichtdicke betragen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 29ff).

### **Wanddicken**

Das SLM Verfahren erlaubt minimale Wandstärken, welche mit der Schmelzbadbreite begrenzt sind. Um jedoch ausreichend robuste Wände zu generieren sind einige Einflussfaktoren zu bedenken. Die Orientierung der Wand zur Beschichtungsrichtung ist in diesem Zusammenhang ein wesentlicher Faktor. Außerdem spielen Abstützungen, Aspektverhältnis (Höhe zur Wanddicke) sowie der Werkstoff eine große Rolle. Im Allgemeinen ist für eine robuste Wand die mehrfache Schmelzbadbreite als Wandstärke notwendig (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S.30).

### **Bohrungen und Kanäle**

Achse quer zur Baurichtung: Bohrungen deren Achse quer zur Baurichtung liegt, müssen, wie auch die zuvor erläuterten Spalten, ein Mehrfaches der Schichtdicke aufweisen. Außerdem sollten die Downskin Flächen bei Überschreitung eines gewissen Durchmessers durch Stützstrukturen abgestützt werden (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 30).

Achse in Baurichtung: Die Größe der Bohrungen wird durch die zuvor erläuterten minimalen Spaltmaße begrenzt. Bei Bohrungen in Baurichtung sind kleinere Durchmesser und bessere Rundheitswerte erreichbar (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 30).

Kanäle: Die Fertigung von Kanälen ist nach dem gleichen Schema möglich und kann bei geeignetem Querschnitt ohne Größenbegrenzung und Stützstrukturen auskommen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 30).

## 2.6 SLM-Maschinenbestandteile und Prozessparameter

In diesem Kapitel soll auf den Maschinenaufbau und damit zusammenhängend auf die Prozessparameter eingegangen werden. Darüber hinaus wird auf einige Unterschiede zwischen den Anlagen verschiedener Hersteller eingegangen und die Konstruktion der, im Zuge dieser Arbeit verwendeten, DMG Mori Lasertec 30 SLM erläutert.

### 2.6.1 Prozesskammer und Bauteilplattform

Die Prozesskammer ist jener Teil der Maschine in welchem der Bauteilaufbau stattfindet. Um Oxidation der teilweise sehr reaktiven Materialien zu vermeiden befindet sich die Prozesskammer unter Schutzgas Atmosphäre. Meistens wird dazu Argon verwendet. Bei der DMG Mori Maschine herrscht darüber hinaus ein Überdruck von bis zu 30mbar in der Kammer um den Sauerstoffanteil niedrig zu halten (Restsauerstoffanteil von etwa 0.1%). Ein Überdruckventil öffnet sich, sollten die 30 mbar überstiegen werden.

Einige Hersteller werben mit einer Schutzgasströmung im Bauraum, um den Abtransport von Verunreinigungen wie Schweißspritzer oder Gasentwicklung durch den Aufschmelzvorgang zu ermöglichen. SLM Solutions GmbH wendet bei ihren Maschinen eine derartige Technik an, um das Aufsteigen entstehender Gase zu unterbinden. Durch eine bodennahe Absaugung wird verhindert, dass die Gase in die Laserbahn geraten und so den Laserstrahl stören ("SLM 500 SLM Solutions," n.d.).

Durch die genannten Maßnahmen sind der Größe der Prozesskammer und damit verbunden der maximalen Bauteilgröße Grenzen gesetzt. Mit der schnellen Entwicklung der SLM Maschinen in den letzten Jahren ging auch eine stetige Vergrößerung des Bauraums einher, von bis zu 500x280x365mm (SLM 500) Stand heute. Die DMG Mori Maschine verfügt über einen Bauraum von 300mm<sup>3</sup>. Da der verfügbare Bauraum immer komplett mit Pulver gefüllt wird, bieten einige Hersteller wie SLM Solutions die Möglichkeit eine Bauraumverkleinerung vorzunehmen, um bei der Produktion von kleineren Bauteilen nicht den gesamten Bauraum verwenden zu müssen ("SLM 500 SLM Solutions," n.d.).

Der Unterboden der Prozesskammer ist als Hubtisch ausgeführt und in Z-Richtung verschieblich gelagert. Auf diesem wird die wechselbare Substratplatte platziert, wo der Bauteilaufbau stattfindet. Die Substratplatte wird dabei aus dem gleichen Material wie das verwendete Metallpulver ausgeführt, da das Bauteil bzw. die Stützstruktur mit ihr verschmolzen wird.

Die Substratplatte kann nach Abschluss des Aufbauvorganges und Entfernung des, im Bauraum verbleibenden, Pulvers entnommen werden. Im Zuge der mechanischen Nachbearbeitung wird das Bauteil dann von der Substratplatte getrennt. Durch

diesen Vorgang bleiben oftmals Unebenheiten an der Oberfläche der Substratplatte zurück. Aus diesem Grund wird das Bauteil nicht direkt auf der Substratplatte aufgebaut, sondern zuerst eine Stützgeometrie (ca. 0,5cm) zur Nivellierung und Wärmeabfuhr generiert, auf der das eigentliche Bauteil aufgebaut wird. Diese Stützgeometrie macht auch das mechanische Entfernen des Bauteils leichter.

Einige Maschinen bieten die Möglichkeit die Substratplatten zu beheizen. Dadurch kann das Pulver auf bis zu 550°C vorgeheizt werden, was den Temperaturgradienten verringert und vor allem bei Titan oder Aluminium Verzug oder Rissbildung aufgrund von Eigenspannungen verringern kann (Schwab et al., 2017).

Bei Untersuchungen an Titanproben konnte gezeigt werden, dass durch eine beheizte Substratplatte der Abkühlvorgang insofern verändert werden kann, dass es durch halten auf 500°C zum Ausscheidungshärten kommt, wodurch die mechanischen Eigenschaften am fertigen Bauteil verbessert werden konnten (Schwab et al., 2017).

## **2.6.2 Lasereinheit**

### **Laserkomponenten**

Die Lasereinheit zur Schichtgenerierung besteht im Wesentlichen aus einem Laser mit Galvanoscanner als optische Komponente. Im Bereich der SLM Fertigung wird aufgrund seiner Robustheit, Wartungsfreundlichkeit und dem vergleichsweise kleinen Laserstrahldurchmesser bei gleichzeitig großer Auslenkung vorwiegend Faserlaser eingesetzt (Grupp, 2007). In der Lasertec 30 SLM von DMG Mori ist je nach Ausführung ein Faserlaser mit einer Leistung von 400-1000W verbaut, bei erreichbaren Schichtdicken zwischen 20 µm und 100 µm. ("DMG Mori AM ePaper," n.d.)

Das Prinzip des Galvano Scanner beruht auf zwei, um die Längsachse drehbar gelagerten Spiegeleinheiten (je einen für x- und y Richtung), welche den Laserstrahl so ablenken, dass jeder Punkt auf der Bauteilplattform erreichen werden kann, siehe Abbildung 14 (Gebhardt, 2013 S. 80ff).

Zur Steuerung des Fokusedurchmessers des Laserstrahls wird vor dem ersten Spiegel das sogenannte Teleskop angebracht. Dieses besteht aus einer konkaven Eingangslinse, welche den Strahl ausweitet und einer plankonvexen Ausgangslinse, aus welcher ein fokussiertes paralleles Strahlenbündel austritt. Durch den Abstand der beiden Linsen kann der Fokusedurchmesser eingestellt werden (Gebhardt, 2013 S. 80ff).

Durch die Anordnung der Spiegel ist die Projektion im Zentrum der Bauplattform scharf, weiter weg davon, etwa an den Ecken des Bauraums, stellt sich eine



zunehmende Unschärfe ein. Um dieses Problem zu beheben wird eine F-Theta- oder auch Planfeldlinse nach den Spiegeln positioniert, wodurch eine Fokussierung in allen Teilen der Bauebene möglich wird (Gebhardt, 2013 S. 80ff).

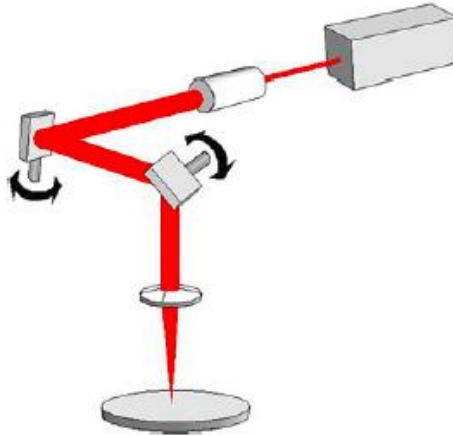


Abbildung 14: Aufbau Galvanoscanner (Gebhardt, 2013 S 81)

### Laserprozessparameter

Für das SLM Verfahren können insgesamt mehr als 100 Stell- und Störgrößen identifiziert werden, welche einen Einfluss auf den Aufbauprozess haben. Die dominierenden Parameter sind jedoch einige wenige und diese stehen alle im Zusammenhang mit der Lasereinheit. Dazu zählen die Laserleistung  $P_L$ , die Schichtdicke  $s$ , die Belichtungsgeschwindigkeit  $v_s$  und der Linienabstand  $h_s$  (Hatchabstand), wie in Abbildung 15 dargestellt (Klocke, 2015 S. 140).

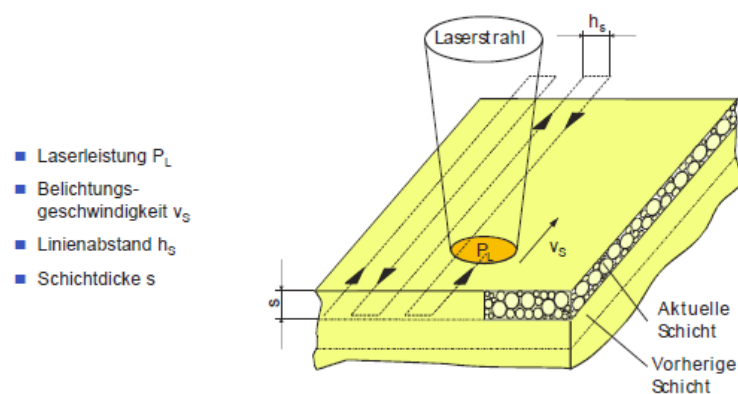


Abbildung 15: Laserparameter (Klocke, 2015 S. 140 zit. nach: Nöken, 1997)

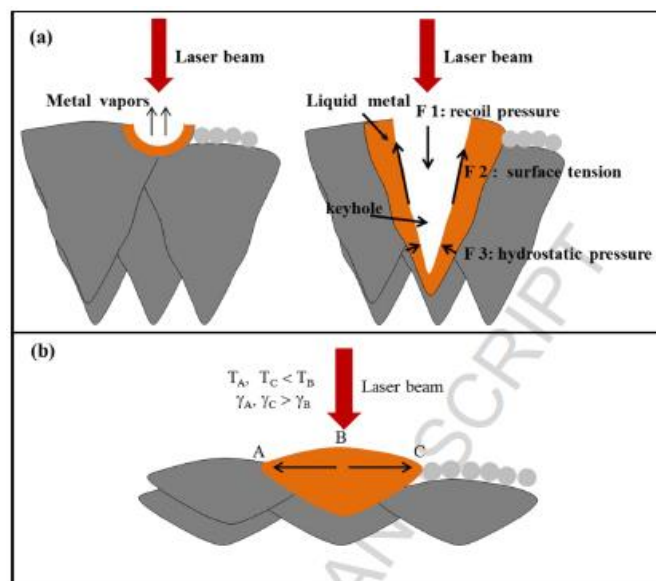
Die genannten Stellgrößen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Gefügestruktur, Porosität und mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Die Standardisierung von geeigneten Parameterkombinationen für verschiedene Werkstoffe stellt eine wesentliche Herausforderung dar (Pupo et al., 2013).

Um Bauteile mit vergleichbarer Qualität zu konventionellen Produktionsverfahren zu fertigen, sind relative Bauteildichten von über 99% notwendig. Dazu muss das

vollständige Aufschmelzen und Verschmelzen der Schweißbahnen und Schichten gewährleistet sein. Um dies zu erreichen ist eine gewisse Volumsenergiegedichte  $E_V$  notwendig, welche sich nach Formel (1) aus den erwähnten Parameter errechnet. (Wycisk, 2017 S.9 zit. nach Meiners,1999)

$$E_V \left[ \frac{J}{mm^3} \right] = \frac{P_L [W]}{s [mm] * h_S [mm] * v_S \left[ \frac{mm}{s} \right]} \quad (1)$$

Vom Schweißen kommend können sich je nach Energieeintrag zwei verschiedene Schweiß-Modi einstellen. Bei geringerer Volumsenergiegedichte stellt sich die Conduction Mode (Wärmeleitungsschweißen Abbildung 16(b)) ein, bei der die Energie durch Wärmeleitung übertragen wird. Es kommt zu einem guten Aufschmelzen des Materials und zur Bildung eines eher flachen Schmelzpool. Erhöht man den Energieeintrag über eine gewisse Schwelle, kommt es zum Verdampfen von Material bzw. zum Austritt in Form von Spritzern. Durch die Ausbildung dieser sogenannten Dampfkapillare entsteht ein sehr tiefes V-förmiges Schmelzbad, man spricht von der Keyhole-Mode (Tiefenschweißen Abbildung 16(a)) (Qi et al., 2017).

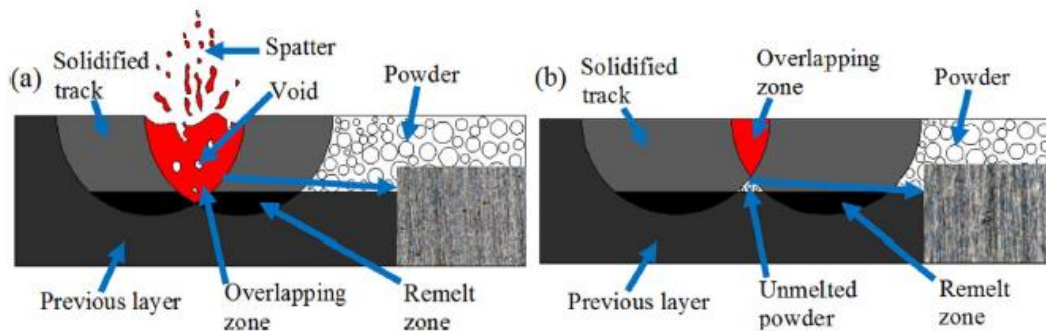


**Abbildung 16: Vergleich Tiefenschweißen (a) und Wärmeleitungsschweißen (b) (Qi et al., 2017)**

Zu geringe Volumsenergiegedichte, resultiert aus zu hohen Geschwindigkeiten, zu großen Linienabständen oder zu geringen Laserleistungen und kann zu einem unzureichenden Aufschmelzen des Pulvers führen. Die Bauteildichte und somit die mechanischen Eigenschaften werden dadurch negativ beeinflusst, siehe Abbildung 17.

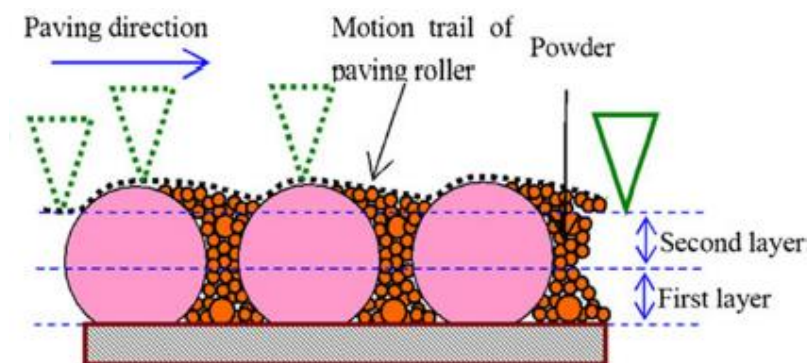
Andererseits kann sich bei zu hohem Energieeintrag aufgrund von Verdampfung im Keyhole Mode ein Zustand einstellen, bei dem nicht mehr genug Material vorhanden ist, um den entstandenen Schmelzpool auszufüllen. Das Resultat ist die Entstehung

von Poren im fertigen Bauteil. Zusätzlich können Spritzer zu Verunreinigungen und Einschlüssen im Bauteil führen. Beide Phänomene haben negative Auswirkungen auf die Bauteilqualität (Qi et al., 2017), (Bai et al., 2017).



**Abbildung 17: Schmelzcharakteristik in der Überlappungszone (Bai et al., 2017)**

An dieser Stelle soll vollständigshalber auch der sogenannte Balling Effekt erwähnt werden. Dabei handelt es sich um ein lokales Phänomen, bei dem es durch unzureichende Benetzung der vorigen Lage und Oberflächenspannung der Schmelze, zur Formung von kugelförmigen Clustern kommt. So kann etwa ein Oxid Film auf der unteren Lage die Benetzung erschweren und Balling begünstigen (Zhang and Attar, 2016). Die Ausbildung von rauen, welligen Oberflächen ist eine mögliche Folge, wie in Abbildung 18 dargestellt. In schwerwiegenderen Fällen kann sich dieser Balling Effekt über mehrere Schichten ziehen und zu großen perlenförmigen Gebilden sammeln, welche aus dem Pulverbett herausragen. In solchen Fällen kann es sogar zum Blockieren des Pulverauftragsystem kommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein geringer Sauerstofflevel (um 0.1%) sowie eine Kombination von hoher Laserleistung und geringer Belichtungsgeschwindigkeit das Auftreten von Balling reduzieren können (Li et al., 2012).



**Abbildung 18: Prinzipskizze "Balling Effekt" (Li et al., 2012).**

Ob und wann sich die erläuterten Phänomene und Modi einstellen und wie die optimalen Einstellungen für verschiedene Werkstoffe aussehen, ist größtenteils noch Forschungsgegenstand. Daher soll an dieser Stelle an die Literatur bzw. einschlägige Forschungspaper verwiesen werden. Es sollte jedoch bedacht werden, dass in der industriellen Praxis die Aufbaurate und damit zusammenhängend die

Produktivität, welche ebenfalls im Spannungsfeld dieser Parameter steht, eine große Rolle spielt (Wycisk, 2017).

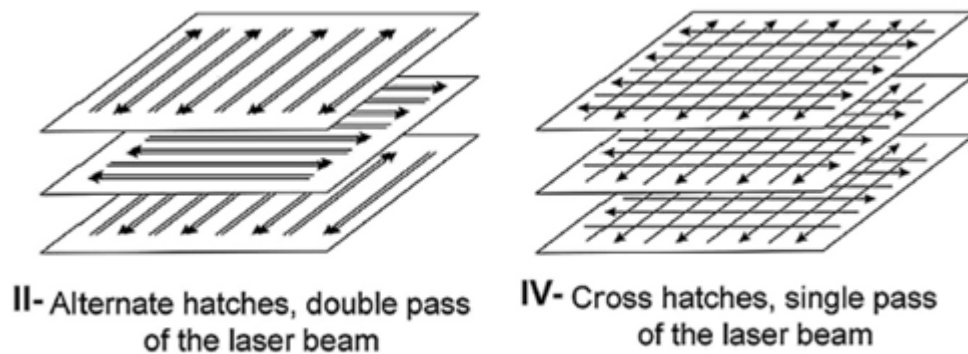
Neben den beschriebenen Laser-Stellgrößen in Zusammenhang mit der Volumsenergiedichte, ist bei der Schichtgenerierung auch die Belichtungsstrategie (Hatch), also das vom Laser abzufahrende Muster von Bedeutung.

Die meisten SLM Anlagen, wie auch die DMG Mori, erlauben eine Differenzierung zwischen Kontur-Hatch und Flächen-Hatch. Dadurch kann für die äußeren Konturen der Schicht eine geringere Geschwindigkeit und kleinerer Fokus gewählt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen. Bei Hatch der Innenflächen kann der Fokusbereich und die Geschwindigkeit erhöht werden um die Aufbaurate zu steigern. In einigen Maschinen werden aus diesem Grund zwei Lasereinheiten mit unterschiedlicher Leistung verbaut, um mehr Variabilität der Einstellungen zu ermöglichen. So kann etwa der Laser mit geringerer Leistung für die Außenkonturen verwendet werden, um eine geringere Geschwindigkeit bei gleichbleibendem Energieeintrag zu ermöglichen, nähere Infos zu Mehrlaser Systemen sind in Kap. 2.8 zu finden (Poprawe et al., 2015).

Die optimale Belichtungsstrategie der Innenflächen zu finden, ist eine komplexe Angelegenheit und Gegenstand aktueller Forschung. Der Einfluss auf die Bauteilqualität und Aufbaurate ist in diesem Zusammenhang erwiesen.

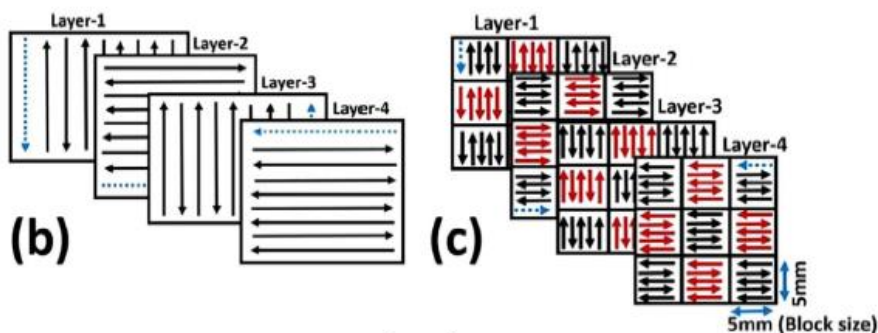
Ziel ist es vor allem Wärmeverteilung und damit Bauteilverzug zu verringern, sowie die Dichte der Bauteile zu beeinflussen. So konnte etwa (Ali et al., 2018) zeigen, dass bei alternierenden Strategien (90°) die veränderte Wärmeleitungsrichtung zwischen den Schichten geringere Restspannungswerte zur Folge hat, siehe auch Abbildung 19 (links).

Mit Cross Hatch- oder Double Pass Strategien wird durch ein sehr enges Netz an Laserbahnen versucht, Porositäten aufgrund von nicht aufgeschmolzenem Pulver zu vermeiden, siehe Abbildung 20 (AlMangour et al., 2017).



**Abbildung 19: double hatch(links) cross hatch (rechts) (AlMangour et al., 2017)**

(Ali et al., 2018) beschreibt auch die Möglichkeit von sogenannten Schachbrettmustern. (Abbildung 20 rechts) Dies könnte insbesondere bei der Verwendung von Mehrlasersystemen in Hinblick auf Produktivitätssteigerungen von Interesse sein. (Yap et al., 2015) beschreibt, dass durch Schachbrett-Hatch auch Verbesserungen in Bezug auf die Restspannungen möglich sind.



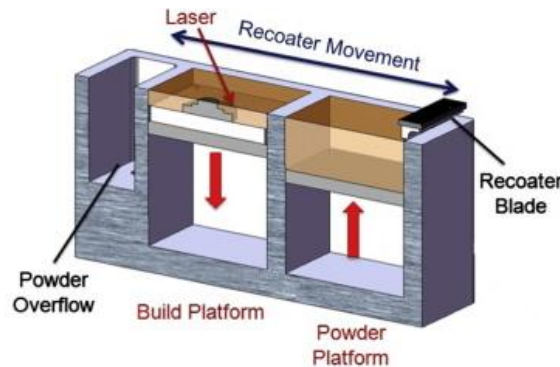
**Abbildung 20: alternating hatch (links) Schachbrett hatch (rechts) (Ali et al., 2018)**

Die meisten Anlagenhersteller bieten Voreinstellungen für die Hatching-Strategie an um die Bedienung zu erleichtern. Für weiterführende Informationen wird an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

### 2.6.3 Pulverauftragssystem

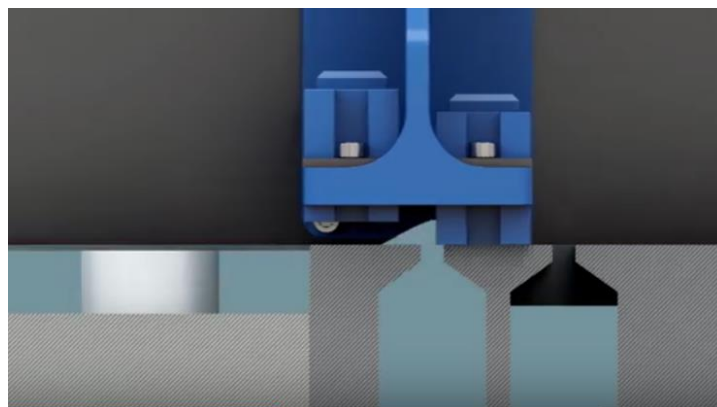
Nachdem eine Schicht fertig belichtet wurde und sich die Bauteilplattform um eine Schichtdicke absenkt, wird die nächste Pulverschicht mechanisch durch einen Recoater (Wischsystem) aufgebracht. Neben der optimalen Pulverbeschaffenheit und Fließfähigkeit ist dieser wesentlich für die Herstellung einer konstanten Schichtdicke verantwortlich. Die Funktionsweise dieses Pulverauftragssystems unterscheidet sich jedoch geringfügig zwischen den Anlagenherstellern bzw. Maschinengenerationen.

Die typische SLM Maschine, wie sie in der Literatur zumeist beschrieben ist, besteht aus einem 2 Kammern System, wie in Abbildung 21 zu sehen. Neben jenem für die Bauteilplattform existiert ein zweiter Hubtisch, der das Pulvermaterial in den Bauraum fördert, wo es durch die Gummilippe oder -rolle des Recoaters über die Bauteilplattform verteilt wird. Auf der anderen Seite der Plattform befindet sich eine Überlauföffnung in die das überschüssige Pulver fällt (Carter et al., 2014).



**Abbildung 21: typisches 2 Kammer SLM Verfahrensaufbau (Carter et al., 2014)**

Die DMG Mori Lasertec 30 SLM Anlage verwendet ein etwas verändertes System, wie in Abbildung 22 wird auf den zweiten Hubtisch verzichtet und die Förderung des Pulvers in den Bauraum erfolgt aus einer kleinen Öffnung in der Bodenplatte. Der Überlauf für überschüssiges Pulver befindet sich bei dieser Konstruktion auf der gleichen Seite der Plattform. Am Recoater befinden sich 2 Gummilippen, welche vertikal verschieblich sind. Im ersten Schritt wird die rechte Gummilippe zugestellt und das Pulver von links nach rechts über die Plattform verteilt. Anschließend tauschen die Gummilippen ihre Positionen und die linke Gummilippe fährt von links nach rechts über die Plattform um für eine zusätzliche Kompaktierung zu sorgen. Das restliche Pulver fällt anschließend in den Überlauf.



**Abbildung 22: Recoater DMG Mori Lasertec 30 SLM (LASERTEC 30 SLM, n.d.)**

Da dieses Hin- und Herfahren des Recoater die Aufbauzeit wesentlich erhöht, haben einige Hersteller Verfahren entwickelt mit einer Pulverbettquerung auszukommen. SLM Solutions verwendet bei der aktuellen Maschinengeneration etwa den



patentierten „bi-directional recoater“. Die Pulverbefüllung findet dabei von oben über den Recoater statt. Dadurch ist es möglich von jeder Seite Pulver aufzutragen. Der Recoater verfährt also zum Verteilen des Pulvers einmal über die Bauteilplattform und verbleibt dort. Ist die Schichtgenerierung abgeschlossen, wird die nächste Pulverschicht aufgetragen und der Recoater fährt wieder an seinen Ausgangspunkt. Mit Hilfe dieses System sollen durch die fehlende zweite Querung des Pulverbettes bis zu 50% Zeitersparnis erreicht werden können („SLM Solutions bi-directional recoating,” n.d.).

## 2.6.4 Pulverlagerungs- und Aufbereitungssystem

Die meisten aktuellen Maschinen arbeiten mit einem geschlossenen Pulverkreislauf. Im Folgenden sei kurz das Funktionsprinzip am Beispiel der DMG Mori Lasertec 30 SLM erläutert. (Abbildung 23)

Man unterscheidet zwischen Pulverzufuhr zum Fertigungsverfahren und Pulverrückführung des nicht aufgeschmolzenen Pulvers nach dem Aufbauprozess. Bei der Zufuhr wird das Material mit einer Schnecke aus dem Pulverhauptide Tank gefördert und durch einen Gasstrom (Argon) in einen Fliehkraftabscheider (Cyclone 1) geleitet, wo Gas und Pulver wieder getrennt werden. Das Gas wird in den Kreislauf zurückgeführt und das Pulver fällt durch ein Ultraschallsieb in den Puffertank, von wo es wiederum mit einer Schnecke in den Bauraum gefördert wird. Eine zweite, quer ausgerichtete, Schnecke verteilt das Pulver anschließend noch auf die entsprechende Breite der Plattform.

Bei der Rückführung erfolgt die Absaugung des im Bauraum verbliebenen Pulvermaterials mittels Handstaubsauger. Durch einen weiteren Fliehkraftabscheider (Cyclone 2) wird das, aus dem Bauraum gesaugte, Gas und Pulver wieder getrennt und das Pulver zur Wiederverwendung in den Hauptide Tank rückgeführt.

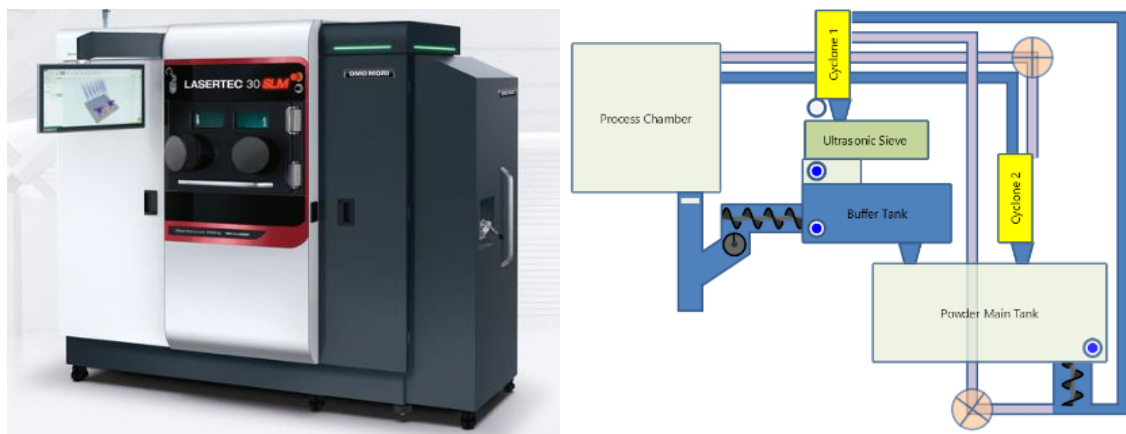


Abbildung 23: Pulverkreislauf der DMG Mori Lasertec 30 SLM

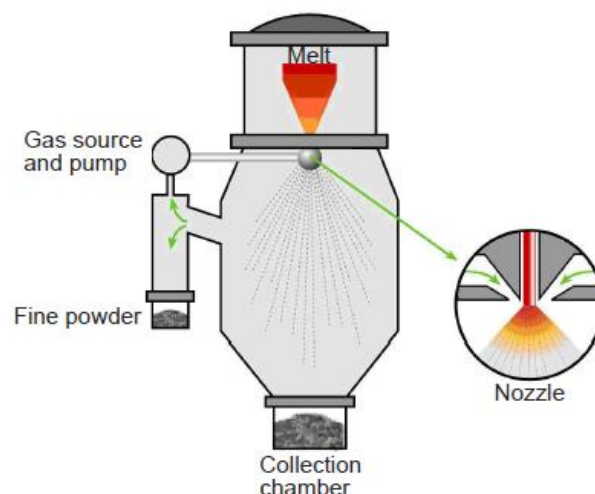
Diese Vorgangsweise der Absaugung ist nur aufgrund der völligen Dichtheit der Prozesskammer möglich. Andere Maschinen verlangen das Entnehmen der Substratplatte inklusive dem restlichen Pulver zum externen Sieben oder Absaugen zur Wiederverwendung in separaten Bearbeitungsstationen ( z.B. PSV von SLM solutions) ("SLM 500 SLM Solutions", n.d.). Geschlossenen Systeme wie bei der DMG Mori, wo keine Pulverpartikel austreten, sind jedoch auch arbeitsschutzrechtlich zu bevorzugen.

## 2.7 SLM-Werkstoffe

### 2.7.1 Grundlagen

Das selektive Laserschmelzen beruht auf der Verarbeitung von metallischem Pulver als Ausgangswerkstoff. Die Anforderungen an den Pulverwerkstoff sind vor allem eine gute Schweißbarkeit und Fließfähigkeit. Die Form der einzelnen Pulverpartikel spielt im Zusammenhang mit dem Fließverhalten eine große Rolle, sphärische Partikel haben sich dabei als besonders vorteilhaft herausgestellt (VDI 3405 Blatt 2, 2014 S. 7). Neben der Form sind auch die Partikelgröße sowie die Größenverteilung von besonderem Interesse, dabei spielt das Herstellungsverfahren eine große Rolle.

Um die benötigte hohe Qualität des Metallpulvers zu erreichen, werden für die Herstellung sogenannte Atomisierungsverfahren eingesetzt.



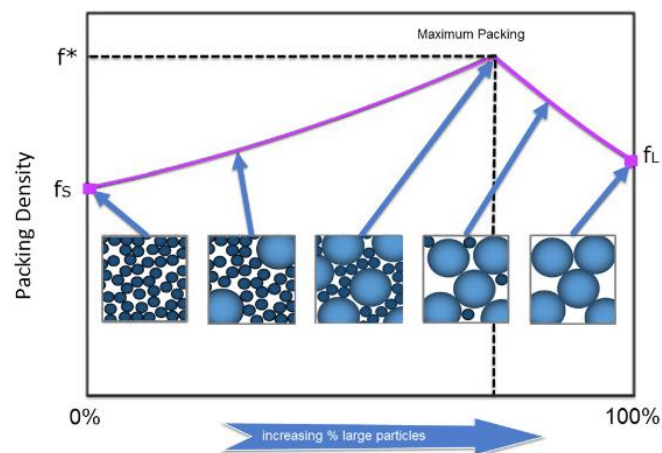
**Abbildung 24: Verfahrensprinzip der Gas Atomisierung ("LPW Technology Powder production," n.d.)**

Das Grundprinzip ist in Abbildung 24 am Beispiel der Gas-Atomisierung zu sehen und besteht darin, dass Metall in Barren oder Strangform aufgeschmolzen und in eine Prozesskammer geleitet wird. In dieser wird, je nach verwendeter



Atomisierungsmethode, das Flüssigmetall mittels Inert-Gasstrom aus der Hochdruckdüse (Gas Atomisierung), Wasserstrom (Wasser Atomisierung) oder Plasma-Brennern und Gas-Düsen (Plasma Atomisierung) zerstäub, abgekühlt und erstarrt anschließend. Das Resultat sind Metall-Pulverpartikel mit einer Verfahrenstypischen Größenverteilung und Pulverqualität. Aufgrund der besonders sphärischen Pulverpartikel eignen sich die Gas Atomisierung und die Plasma Atomisierung am besten für die Pulverherstellung für das SLM Verfahren. Es werden dabei Pulverpartikel mit Größen zwischen 0-200µm erzeugt. Aufgrund dieser Streuung ist eine Qualifizierung und Optimierung notwendig um bestimmte Korngrößenverteilungen zu erreichen (Dawes et al., 2015).

Feine Partikel mit Durchmessern zwischen 0.1µm und 5µm tendieren zu Anhäufungen, bei großen Partikeln (Durchmesser 90 µm -120 µm) wird die Packungsdichte der Schichten verringert. Eine Mischung aus großen und kleinen Partikeln ist somit für eine hohe Packungsdichte optimal, wie in Abbildung 25 dargestellt (Karapatis, 2002).



**Abbildung 25: Packungsdichte zu Volumsanteil großer Partikel ("Malvern instruments," n.d.)**

Experimente mit bi-modalen Pulvern haben gezeigt, dass bei einem Größenverhältnis von 1:7 zwischen großen und kleinen Partikeln, mit einem Anteil von 30% an feinen Partikeln, besonders gute Ergebnisse resultieren. Es kann im Vergleich zu anderen Pulvergrößenverteilungen eine bis zu 30% höhere Dichte erreicht werden ("Inside metal AM," n.d. zit. nach McGEARY, 1961).

Andere Untersuchungen mit verfügbaren Pulvern haben zur Definition von kritischen kumulierten Partikeldurchmessern D10, D50 und D90 geführt. Der Durchmesser D10 bedeutet in diesem Zusammenhang etwa, dass 10% der Pulverpartikel unter dem Wert von D10 liegen, analog dazu sind D50 und D90 definiert. Es konnte gezeigt werden das folgende 4 Kriterien erfüllt sein müssen, um eine maximale Schichtdichte von 60% zu erreichen (Karapatis, 2002).

- 1)  $D_{10} < \text{Schichtdicke}$
- 2)  $D_{90} < \text{Schichtdicke}$
- 3)  $D_{50} \geq 10 \times D_{10}$
- 4)  $D_{90} \leq 19 \times D_{10}$

Die Partikelgröße im Vergleich zu Schichtdicke ist dabei also maßgeblich. Auch in (VDI 3405 Blatt 2 S.6) wird etwa darauf hingewiesen, dass die größten Partikel, ein Drittel der Schichtdicke nicht übersteigen sollten. Üblicherweise ist für den SLM Prozess eine Partikelgröße  $D_{50}$  zwischen 15 und  $45\mu\text{m}$  erforderlich (Dawes et al., 2015).

Wie in (VDI 3405 Blatt 2, 2014 S.6) beschrieben, stehen zur Messung der Korngrößenverteilung verschiedene Verfahren zur Verfügung, dazu zählen die Trockensiebung nach DIN ISO 4497, das Laserbeugungsverfahren nach DIN EN 13320 oder die Sedimentationsanalyse nach DIN 66111. Die Partikelform kann mittels Licht- oder Rasterelektronenmikroskop festgestellt werden. Darüber hinaus ist die Beurteilung der Fließfähigkeit nach ASTM B 213-03 möglich (VDI 3405 Blatt 2, 2014 S.6).

### **Pulver Beschaffung**

Man unterscheidet grundsätzlich 3 Beschaffungswege, erstens die Beschaffung des Pulvers vom SLM Anlagenhersteller, zweitens von Drittanbietern und drittens direkt vom Pulverhersteller.

Ein Großteil des Pulververkaufs heute geschieht über die AM-Anlagenhersteller. So wird auch das verwendete Metallpulver direkt bei DMG Mori gekauft, obwohl es sich um ein Fabrikat der Firma LPW Technology handelt. Ein Grund dafür ist, dass die Pulver direkt für die Anlagen validiert sind und die Qualität somit gesichert ist, was das Risiko für den Verbraucher reduziert. Zusätzlich werden gemeinsam mit den validierten Pulvern die Prozessparameter für die Fertigung zur Verfügung gestellt, welche eine gleichbleibende Qualität der fertigen Bauteile garantieren sollen. Ähnliche Angebote wie die der Anlagenhersteller gibt es auch von Drittanbietern. Diese nehmen ebenfalls große Anstrengungen in Kauf, um validiertes Pulver für den additiven Fertigungsprozess herzustellen. Im Vergleich dazu ist die direkte Beschaffung beim Pulverhersteller im Moment noch eher untypisch. Dabei spielt die Tatsache eine Rolle, dass der Markt für Pulver, welche für AM verwendet werden, im Vergleich zum gesamten Metall-Pulvermarkt noch relativ klein ist und daher meist nicht zu den hohen Qualitätsanforderungen des AM produziert wird. Durch die erwartete Erhöhung des Absatzvolumens für AM Pulver in Zukunft, könnte sich dies jedoch ändern, was zu Kostenvorteilen bei der direkten Beschaffung beim Pulverhersteller führen würde (Dawes et al., 2015).

### **Pulver Wiederverwertung**

Neben der Produktion von neuem Pulver besteht die Möglichkeit, nicht aufgeschmolzenes, im Bauraum verbliebenes, Pulver wiederzuverwenden. Obwohl das Material nicht aufgeschmolzen wurde, kann es zu einer Verringerung der Qualität durch Änderung der physikalischen und chemischen Struktur durch Thermische-oder Strahlungseinflüsse in der Prozesskammer kommen. Auch durch mögliche anschließende Handhabungsprozesse kann es zu Verunreinigungen kommen (Dawes et al., 2015).

Um hohe Qualität sicher zu stellen, ist das Pulver vor jeden Bauprozess zu sieben. Trotz dieser Maßnahmen kann eine Änderung der Pulverqualität und damit des Prozessverhaltens nicht ausgeschlossen werden. (VDI 3405 Blatt 2, 2014 S. 10) Um gleichbleibende Qualität zu gewährleisten sollte für einen neuen Bauprozess neues Pulver zugeführt werden. Als Richtwert wird in der Literatur ein Mischungsverhältnis von 0,5:1 bzw. 1:1 zwischen altem und neuem Pulver angegeben (Gebhardt, 2013 S. 160).

### **2.7.2 Verfügbare Metallpulver**

Mit dem SLM Prozess werden vorwiegend Werkstoffe aus der Gruppe der Metalle und Metalllegierungen verarbeitet, es gibt jedoch auch Verfahrensvarianten zur Verarbeitung von Keramikpulvern, auf welche hier nicht näher eingegangen wird. Die Eignung der Materialien für den SLM Prozess hängt von einigen Werkstoffeigenschaften ab. Dazu zählen vor allem die Schweißbarkeit, jedoch spielen auch Schmelztemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Schmelzviskosität, Benetzungswinkel (Oberflächenspannung) eine Rolle. Generell ist zu sagen, dass im Vergleich zu konventionellen Verfahren (z.B. zerspanende Fertigungsverfahren) einige Metalllegierungen mittel SLM einfacher zu verarbeiten sind (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 22). Im Allgemein sind durch den Schichtaufbau und der damit zusammenhängenden Anisotropie, die mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung am schwächsten. Schon heute steht eine breite Palette an industriell verwendeten Werkstoffen zur Verfügung. In der folgenden Tabelle 4 sind die gebräuchlichsten Werkstoffe bzw. Legierungen angeführt. Die Qualifizierung neuer Werkstoffe und Legierungen ist aktuell ein großes Forschungsfeld, in Kap. 2.7.3 wird auf die neuesten Entwicklungen eingegangen.

**Tabelle 4: Werkstoffgruppen SLM (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S 23)**

Tabelle 3. Werkstoffgruppen / Table 3. Material classes

Nicht rostende Stähle / Stainless steels	Werkzeugstähle / Tool steels	Titanlegierungen / Titanium alloys	Aluminium- legierungen / Aluminium alloys	Hartmetalle / Hard metals	Nickelbasis- legierungen / Nickel-based alloys	Keramik / Ceramics	Kobaltlegierungen / Cobalt alloys
1.4404 (316L)	1.3343 (M2)	TiAl6V4	AlSi25	WoC/Co	IN625	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoCr
1.4332 (309L)	1.3344 (M3/2)	TiAl6Nb7	AlSi12		IN718	SiO <sub>2</sub>	
1.4410	1.2343 (H13)		AlSi10Mg		Hastelloy X		
1.4540	1.2344		AlMg3				
1.4542	1.3342						
	1.2709						

Im Folgenden wird auf die am weitesten verbreiteten Werkstoffgruppen eingegangen und im Zuge dessen auch die, für die DMG Mori Lasertec 30 SLM, qualifizierten Legierungen erläutert.

### Nichtrostende Stähle und Werkzeugstähle

Stähle zählen in der Literatur zu den am besten untersuchten Werkstoffen in Zusammenhang mit der SLM Prozess. Einer der größten Vorteile im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren ist dabei die große Flexibilität der erzeugbaren Porosität. Dadurch kann die hohe Festigkeit von Stahl genutzt werden, um die Dichte auszugleichen. Stähle zeichnen sich darüber hinaus durch eine hohe Duktilität und Biokompatibilität aus, wodurch sie sich für die Anwendung in der Medizin anbieten. Es konnte etwa gezeigt werden, dass 316L nichtrostender Stahl mit angepasstem Porositätsverlauf als Implantat Vorteile beim Gewebewachstum bietet (Yap et al., 2015).

Im industriellen Umfeld bieten sich durch die große geometrische Freiheit von SLM, gepaart mit der Hitzebeständigkeit, sowie dem vorteilhaften Korrosions- und Oxidationsverhalten, vor allem der Einsatz im Bereich von Wärmetauschern und Kühlkanälen an (Yap et al., 2015).

Der am weitesten verbreitete Stahl Werkstoff ist der nichtrostende Stahl 316L. Etwas später folgte die Qualifizierung von Werkzeugstählen, welche sich durch große Härte und feines Gefüge auszeichneten und das Anwendungsfeld der Werkzeugherstellung mittels SLM (direct tooling) eröffneten. In der Literatur ist beschrieben, dass vor allem Laserleistung und Belichtungsgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die resultierende Porosität haben. Es hat sich gezeigt, dass eine geringe Belichtungsgeschwindigkeit zu relativen Bauteildichten von bis zu 99,9% führt (Yap et al., 2015 zit. nach: Jardin et al, 2005).

Wie bei den meisten anderen Metallen konnten auch bei den, mittels SLM hergestellten, Stahlbauteile meist höhere Festigkeitswerte im Vergleich zur konventionellen Herstellung erreicht werden, siehe Tabelle 5. Grund dafür ist das lokal begrenzte Aufschmelzverhalten, gepaart mit der schnellen Erstarrung und dem daraus resultierenden einheitlichen Gefüge (Yap et al., 2015).

**Tabelle 5: max. Festigkeitswerte der Stahlwerkstoffe (eigene Abb. in Anlehnung an Yap et al., 2015)**

Material	Zugfestigkeit (MPa)	Streckgrenze (MPa)	Dehnung in %		Strangmaterial Zugfestigkeit(MPa)
Fe	411.5	305.3	-		225
Fe-Ni	600	-	-		-
Fe-Ni-Cr	1100	-	-		-
Fe-Ni-Cu-P	505	425	-		-
15-5 PH steel	1450	1297	12.53		1317
304 stainless steel	717	570	42.8		579
316L stainless steel	760	650	30		558
Maraging steel	1290	1214	13.3		1930

## Titanlegierungen

Titanlegierungen zählen zu den meist untersuchten Materialien im Zusammenhang mit SLM nach Stahl. Gründe dafür sind eine Reihe besonders vorteilhafter Materialeigenschaften wie etwa geringe Dichte ( $4,5\text{g/cm}^3$ ) bei gleichzeitig hoher spezifischer Festigkeit und Biokompatibilität (Lachmayer and Lippert, 2017, S. 11,12).

Einen großen Anwendungsbereich stellt daher die Medizin durch Prothesen und Implantate dar. Durch die hohe spezifische Festigkeit können lasttragende Implantate mit Leichtbaukonstruktionen verwirklicht werden. Ähnliche Dichte und E-Modul, wie der menschliche Knochen, sowie der hohen Biokompatibilität, unterstreichen diesen Anwendungsbereich. Im Bereich der Dentalimplantate trägt Titan durch die geringe Wärmeleitfähigkeit zu einem hohen Tragekomfort bei (Lachmayer and Lippert, 2017, S. 11,12).

Industrielle Anwendung finden Titanlegierungen hauptsächlich in der Luftfahrt sowie in geringerem Ausmaß in der Raumfahrt und der Automobilindustrie. Dabei spielt vor allem die Ausschöpfung von Leichtbaupotentialen eine wesentliche Rolle (Lachmayer and Lippert, 2017, S. 11,12).

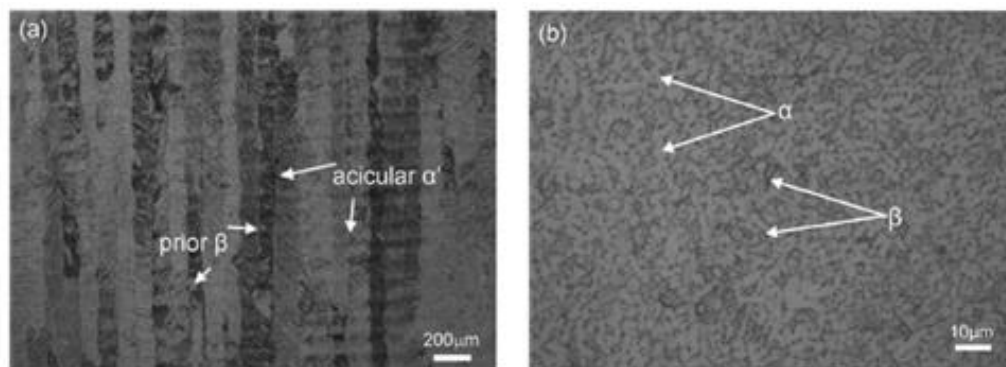
Die Verarbeitung von Titan stellt vor allem aufgrund der hohen Reaktivität mit Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff eine große Herausforderung dar. Diese Tatsache, gepaart mit dem hohen Schmelzpunkt führt zu Schwierigkeiten bei der konventionellen Herstellung. Durch die inerte Atmosphäre in der Prozesskammer und dem lokal begrenzt Aufschmelzen, mit schneller Abkühlung kann beim SLM Prozess die Oxidation reduziert werden. Darüber hinaus ist die spannende Bearbeitung besonders schwierig und kostenintensiv im Vergleich zu anderen

Metallen. Durch die Möglichkeiten komplexe Geometrien bei minimaler Nacharbeitung zu erzeugen, stellt SLM daher die ideale Plattform für die Fertigung von Titanbauteilen dar (Zhang and Attar, 2016).

Kommerziell verwendet werden vor allem 3 Gruppen von Titanlegierungen: pures Titan cpTi ( $\alpha$  Type), die Aluminium Legierung Ti-6Al-4V ( $\alpha+\beta$ -Type) und andere Legierungen wie etwa Ti-24Nb-4Zr-8Sn, welche zu den  $\beta$ -Type Legierungen zählen (Zhang and Attar, 2016).

Im Vergleich zur konventionellen Herstellung bilden sich im reinen Titan aufgrund der Abkühlungscharakteristik zusätzlich sogenannte  $\alpha'$  Phasen im Gefüge, dadurch sind höhere Festigkeitswerte erzielbar (Zhang and Attar, 2016).

Ti-6Al-4V wandelt während dem SLM Prozess die  $\alpha$  Phase aufgrund der Abkühlgeschwindigkeit in  $\alpha'$  um, was in einem  $\alpha'$  dominierten Gefüge mit einigen  $\beta$  Körnern resultiert. Dadurch sind ebenfalls höhere Festigkeiten im Vergleich zu konventioneller Herstellung, wo  $\alpha$  und  $\beta$  Phase im Gefüge gleich verteilt sind, erreichbar. Gefügevergleich siehe Abbildung 26. Die sich einstellende Microstruktur ist jedoch wesentlich von den Prozessparametern abhängig (Zhang and Attar, 2016).



**Abbildung 26: Gefüge Vergleich Ti-6Al-4V: SLM-Herstellung (a) konventionelle Herstellung (b) (Dai et al., 2016)**

Niedrigmodularer  $\beta$ -Phasen Titan wie 24Nb-4Zr-8Sn ist durch seinen ähnlichen E-Modul wie der menschliche Knochen vor allem für den Einsatz in der Medizin interessant und zeichnet sich durch das gute Verhältnis zwischen hoher Festigkeit bei geringem E-Modul aus. (Zhang and Attar, 2016)

In der folgenden Tabelle 6 sind die Werte der mechanischen Eigenschaften dieser 3 Titanlegierungs-Gruppen dargestellt.

**Tabelle 6: max. mechanische Parameter von Titanlegierungen (eigene Abb. in Anlehnung an Zhang and Attar, 2016)**

Material/Process	Vickers Härte (Hv)	E-Modul (GPa)	Streckgrenze (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Dehnung in %
<b>CP-Ti</b>					
SLM	261±13	106±3	555	757	19.5
Sheet forming	-	-	280	350	20
Full annealed	-	-	432	561	14.7
<b>Ti-6Al-4V</b>					
SLM	409	109	1110	1267	7.28
Casting	346	110	847	976	5.1
<b>Ti-24Nb-4Zr-8Sn</b>					
SLM	220 ± 6	53±1	563±38	665±18	13.8±4.1
Hot rolling	-	46	700	830	15
Hot forging	-	55	570	755	13

## Aluminiumlegierungen

Wegen ihrer geringen Dichte von 2,7g/cm<sup>3</sup>, guter Korrosionsbeständigkeit und exzellenten Schweißbarkeit, sind Aluminium und Aluminiumlegierungen gut für SLM geeignet und haben ein weites Anwendungsfeld. In der Industrie werden sie hauptsächlich für Leichtbauanwendungen eingesetzt. Komplexe, den Belastungspfaden des Bauteils angepasste Strukturen werden möglich und es können deutliche Gewichtseinsparungen erzielt werden. Für die Anwendung als Körperimplantate ist Aluminium wegen der unzureichenden Biokompatibilität nicht geeignet (Lachmayer and Lippert, 2017 S. 11ff).

Die Verarbeitung von Aluminiumlegierungen stellt sich aufgrund ihrer Eigenschaften als besonders herausfordernd dar. Aluminiumpulver zeichnen sich durch eine besonders hohe Wärmeleitfähigkeit und hohe Reflektionsfähigkeit im Bereich der SLM Laser-Wellenlänge aus, was eine hohe Laserleistung notwendig macht, um die schnelle Wärmedissipation auszugleichen. Die resultierenden hohen Abkühlraten führen zu großen Eigenspannungen, welche Bauteilverzug zur Folge haben können. Durch eine erwärmte Bauteilplattform bzw. anschließende Wärmebehandlung können die Eigenspannungen um bis zu 90% reduziert werden. Dem Problem des Verzugs kann mit entsprechenden Stützkonstruktionen begegnet werden. Die hohe Anfälligkeit gegenüber Oxidation stellt eine weitere Herausforderung dar, welche zu Porosität und Einschlüssen führen und damit die Bauteilqualität negativ beeinflussen kann (Aboulkhair et al., 2017).

Während des Aufbauprozesses stellt sich aufgrund der erwähnten Eigenschaften eher Keyhole Mode als Conductive Mode ein (siehe Kap. 2.6.2 ), dies führt zu einem tiefen, schmalen Schmelzbad, was einen geringeren Hatch-Abstand notwendig macht und zu einem längeren Fertigungsprozess führt (Aboulkhair et al., 2017).

Die hohen Abkühlraten (ca. 10<sup>5</sup> K/s) führen zu einer besonders feinen Mikrostruktur im Bauteil, was zu vorteilhaften mechanischen Eigenschaften im Vergleich konventionell produzierten Bauteilen führt. Generell kann im Kern des Schmelzpool



ein feineres Gefüge als an den Rändern beobachtet werden, die Kristallstruktur wird jedoch sehr stark durch die Prozessparameter und dabei vor allem von der Belichtungsstrategie beeinflusst (Aboulkhair et al., 2017).

Die Legierung AlSi10Mg ist bis dato am weitesten verbreitet und steht auch für die DMG Mori Lasertec 30 SLM zur Verfügung. In Tabelle 7 sind die mechanischen Eigenschaften dieser Legierung dargestellt. (VDI 3405 Blatt 2.1, 2014 S. 4). Bei dem in diesem Zusammenhang getesteten Probekörper handelt es sich um einen Zylindrischen Zug-Probekörper nach DIN 50125, welcher bei unterschiedlichen Aufbaurichtungen getestet wurden (VDI 3405 Blatt 2, 2014 S. 17).

**Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften AlSi10Mg (VDI 3405 Blatt 2.1, 2014 S. 2)**

	Laser-Strahlschmelzen									Stangenmaterial			
	unbehandelt			lösungsgeglüht <sup>a)</sup>			T6-Wärme- behandlung <sup>b)</sup>			Guss- zustand		T6-Wärme- behandlung	
	Polarwinkel <sup>c)</sup>												
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°				
<b>E-Modul</b> in GPa	68 ... 78	71 ... 76	67 ... 72	57 ... 73	60 ... 72	66 ... 73	69 ... 77	70 ... 80	71 ... 76	—		—	
<b>Dehngrenze <math>R_{p0,2}</math></b> in MPa	210 ... 272	213 ... 295	239 ... 292	126 ... 160	134 ... 156	132 ... 151	222 ... 260	226 ... 271	225 ... <b>262</b>	80 <sup>d)</sup>	90 <sup>e)</sup>	180 <sup>d)</sup>	220 <sup>e)</sup>
<b>Zugfestigkeit <math>R_m</math></b> in MPa	353 ... 482	370 ... 478	372 ... 473	221 ... 254	239 ... 260	236 ... 257	281 ... 309	289 ... 320	287 ... 311	150 <sup>d)</sup>	180 <sup>e)</sup>	220 <sup>d)</sup>	260 <sup>e)</sup>
<b>Bruchdehnung <math>A_5</math></b> in %	2 ... 5	4 ... 6	4 ... 7	11 ... 18	12 ... 18	10 ... 17	6 ... 10	5 ... 9	5 ... 10	2 <sup>d)</sup>	2,5 <sup>e)</sup>	1 <sup>d)</sup>	1 <sup>e)</sup>

<sup>a)</sup> Lösungsglühen: 6 h bei 525 °C

<sup>b)</sup> T6-Wärmebehandlung:

- Lösungsglühen: 6 h bei 525 °C
- Abschrecken in Wasser
- Warmauslagern: 7 h bei 165 °C

<sup>c)</sup> Polarwinkel nach VDI 3405 Blatt 2: 0°: stehend, 90°: liegend

<sup>d)</sup> untere Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften von Sandgusslegierungen für getrennt gegossene Probekörper für EN AC-Al Si10Mg(a) aus DIN EN 1706

<sup>e)</sup> untere Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften von Kokillengusslegierungen für getrennt gegossene Probekörper für EN AC-Al Si10Mg(a) aus DIN EN 1706

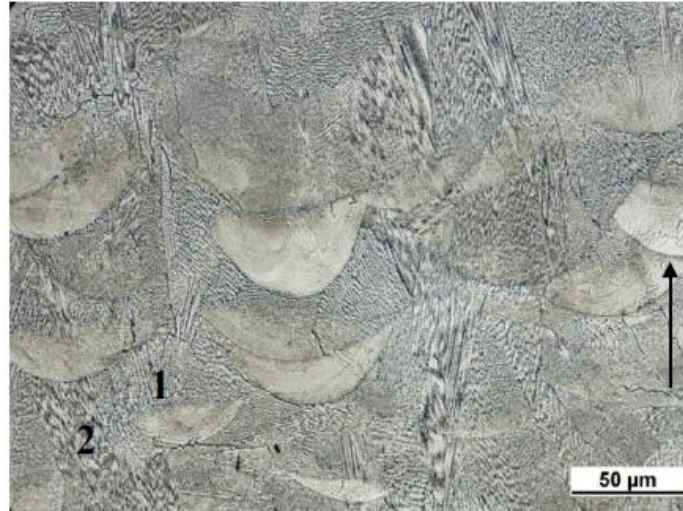
## Nickelbasislegierungen

Nickelbasislegierungen sind aufgrund ihrer Materialeigenschaften besonders für Hochtemperaturanwendungen bis zu 700°C (bei hohem Nickelgehalt auch darüber (Renhof, 2007) geeignet. Dabei zeichnen sie vor allem die hohen Festigkeitswerte in diesem Temperaturbereich aus. Zu den am meisten untersuchten Legierungsvarianten zählen Inconel 718, Inconel 625, Hastelloy X und Nimonic 263. Anwendungsgebiet sind vor allem Gasturbinenschaufeln und Flugzeugtriebwerke, was neben den genannten Eigenschaften, durch die gute Korrosionsbeständigkeit und Verschleißigenschaften begünstigt wird (Yap et al., 2015).

Nickelbasislegierungen sind besonders unter dem Namen Inconel bekannt. Bei Inconel 718 etwa handelt es sich um eine Ni-Fe-Cr Legierung, wobei Chrom für die hohe Korrosionsbeständigkeit verantwortlich ist. Inconel 718 enthält darüber hinaus einige zusätzliche Legierungselemente wie Molybdän zur Erhöhung des E-Moduls,



sowie Aluminium, Niob und Titan, welche für die Bildung der Phasen  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})$ ) und  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) verantwortlich sind. Diese Phasen werden durch Ausscheidungshärtungsvorgänge beim Abkühlprozess bzw. bei nachfolgenden Wärmebehandlungen gebildet (Amato et al., 2012).



**Abbildung 27: Gefüge Inconel 718 (Amato et al., 2012)**

In Abbildung 27 ist das durch SLM hergestellte Inconel 718 Gefüge dargestellt. Man erkennt die typische gerichtete Charakteristik eines SLM gefertigten Bauteils. Im Schnitt rechtwinklig zur Aufbaurichtung erkennt man den Schmelzpool mit einer sehr feinen Struktur sowie die säulenartige Körnung, welche parallel zur Aufbaurichtung ausgerichtet ist. Das Gefüge besteht aus einer Ni-Fe Matrix mit eingebetteten  $\gamma''$  Ausscheidungen, welche einen großen Anteil an den guten Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen haben. Durch nachfolgende Wärmebehandlungen kann die Ausscheidung von  $\gamma''$  weiter vorangetrieben und die mechanischen Eigenschaften optimiert werden (Amato et al., 2012).

In Tabelle 8 sind die mechanischen Eigenschaften von Inconel 718 dargestellt (VDI 3405 Blatt 2.2, 2014 S. 17). Bei dem getesteten Probekörper handelt es sich um einen zylindrischen Zug-Probekörper nach DIN 50125, welcher bei unterschiedlichen Aufbaurichtungen getestet wurde (VDI 3405 Blatt 2.2, 2014 S17). Auch hier ist, ähnlich wie bei Titanlegierungen, zu erkennen, dass mittels SLM-Herstellung höhere Zugfestigkeiten erreicht werden können.

Tabelle 8: Mechanische Kennwerte Inconel 718 (VDI 3405 Blatt 2.2, 2014 S.5)

	Laser-Strahlschmelzen									Stangenmaterial, ausscheidungsgehärtet <sup>c)</sup>
	unbehandelt <sup>a)</sup>			lösungsgeglüht <sup>a, b)</sup>			lösungsgeglüht und warmausgelagert (ausgehärtet) <sup>a, c)</sup>			
	Polarwinkel <sup>d)</sup>									
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	
E-Modul in GPa	128	200	154	142	204	150	149	211	157	–
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
	192	232	212	208	257	205	211	242	207	
Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa	583	704	671	566	593	549	924	1164	1024	1030
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
	790	820	945	922	681	697	1180	1278	1215	
Zugfestigkeit $R_m$ in MPa	929	969	983	896	932	912	1352	1334	1393	1230
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
	1089	1160	1308	993	1042	1080	1426	1507	1545	
Bruchdehnung $A_5$ in %	20,2	25,0	22,2	31,9	32,2	32,2	6,6	10,2	13,0	12
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
	32,7	30,3	31,6	42,2	38,0	38,6	17,5	19,4	18,1	

<sup>a)</sup> Probenkörper werden im abgetrennten, unbearbeiteten Zustand wärmebehandelt.

<sup>b)</sup> Lösungsglühen: 1 h bei 980 °C, Luftkühlung

<sup>c)</sup> Lösungsglühen und Warmauslagern (vgl. SAE AMS 5662M):

- Lösungsglühen: 1 h bei 980 °C, Luftkühlung
- 1. Warmauslagern: 8 h bei 720 °C, Ofenabkühlung auf 620 °C
- 2. Warmauslagern: 10 h bei 620 °C, Luftkühlung

<sup>d)</sup> Polarwinkel nach VDI 3405 Blatt 2: 0°: stehend, 90°: liegend

<sup>e)</sup> untere Grenzwerte der mechanischen Eigenschaften von der Nickellegierung Werkstoffnummer 2.4668 im ausscheidungsgehärteten Zustand aus DIN EN 10302

## 2.7.3 Werkstoffforschung

Die Qualifizierung neuer Werkstoffgruppen für den industriellen Einsatz mit SLM ist aktuell ein großes Forschungsfeld. In dem Zusammenhang stehen besonders Nickel-Titan-Legierungen mit ihren Formgedächtniseigenschaften und Magnesiumlegierungen mit hohem Leichtbaupotential im Focus. Im Folgenden sollen die Eigenschaften und Anwendungspotentiale kurz umrissen werden.

### Nickel-Titan-Legierungen

Nickel-Titan-Legierungen weisen eine hohe Elastizität und Biokompatibilität auf. Außerdem zählen sie zu den Formgedächtnislegierungen. Dies bedeutet, dass durch eine Phasenumwandlung die sogenannte Superelastizität und der Einwegeffekt zum Tragen kommen. Bei Einwegeffekt kommt es zu wärmeinduzierter Phasenumwandlung des Werkstoffs. Dies ermöglicht beträchtliche Formänderungen, die etwa in der Aktor-Technik vorteilhaft angewendet werden können. Das große Problem, welches heutzutage noch besteht ist, dass für Stellbewegungen von Aktoren die Elemente Nickel und Titan in nahezu äquiatomarer Zusammensetzung vorliegen müssen. Der hohe Energieeintrag des Lasers bewirkt eine Verdampfung des Nickels bzw. Oxidation des Titans, was zu einer Veränderung des Verhältnisses von Nickel und Titan während der Laserbearbeitung führt. Bei einer Änderung des

Atomverhältnisses um 0.1% kann sich die Phasenumwandlungstemperatur um 10K verändern, daran erkennt man wie diffizil der Herstellungsprozess ist (Lachmayer and Lippert, 2017 zit. nach Mansouri Tehrani et al., 2015).

Nickel-Titan Legierungen sind für spannende Bearbeitung aufgrund ihrer Duktilität schlecht geeignet. Die Laserbearbeitung bzw. Bearbeitung mittels SLM Verfahren ist jedoch problemlos möglich. Im Laser Zentrum Hannover konnte Nickel-Titan Pulver mit einer Partikelgröße  $<45\mu\text{m}$  erfolgreich verarbeitet werden (Lachmayer and Lippert, 2017 zit. nach Hagemann et al., 2015).

### **Magnesium und Magnesiumlegierungen**

Magnesium und Magnesiumlegierungen sind ebenfalls Werkstoff für die Anwendung im Leichtbau, durch ihre geringe Dichte und hohe Festigkeit. Darüber hinaus besteht eine hohe Biokompatibilität und ist im Körper abbaubar, dies verspricht weitere Anwendungsfelder in der Medizin wie etwa bioresorbierbare Implantate.

Ein Grund warum sich der Werkstoff trotz der Vorteile bis dato noch nicht in der Industrie etablieren konnte, ist die hohe Reaktivität, welche durch die vergrößerte Oberfläche der Pulverform noch vergrößert wird. Die Handhabung ist aus sicherheitstechnischer Sicht schwierig um Funkenbildung zu verhindern. Die Verarbeitung von geringen Pulvermengen ist daher empfehlenswert. In Forschungszentren wurden SLM Maschinen mit Adaptionen, wie Überdruckkammern, kleinerem Bauraum und andere Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet, um diesem Sicherheitsaspekt Rechnung zu tragen (Lachmayer and Lippert, 2017 zit. nach Gieseke et al., 2016).

Ein weiteres Problem ist die geringe Verdampfungstemperatur von Magnesium, die bei  $1093^{\circ}\text{C}$  liegt. Ist die Laserleistung zu hoch, kommt es daher zum Verdampfen statt zum Aufschmelzen und es bilden sich Poren, wodurch die mechanischen Eigenschaften des Bauteils in weiterer Folge verschlechtert werden. Auf diesen Effekt wurde im Zusammenhang mit Conduction- und Keyhole Mode beim Schmelzvorgang in Kapitel 2.6.2 genauer eingegangen. Eine weitere Herausforderung im Zusammenhang mit dem Schmelzvorgang ist die geringe Viskosität der Schmelze wodurch Schwierigkeiten beim Benetzen der bestehenden Schicht mit Schmelze entstehen (Lachmayer and Lippert, 2017 zit. nach Schmid et al., 2016 und "SLM mit optimierter Prozesstechnik und neuen Materialien," n.d.).

Bei der Verarbeitung konnten massive Prozessemissionen festgestellt werden, welche zu Ablagerungen und Ausbildung einer besonders schnellen und stabilen Oxidschicht führt, wodurch der Aufschmelzvorgang behindert wird. Es sind hohe Energieeinträge der Laser notwendig, um die Oxidschicht aufzubrechen. Außerdem wurde in Forschungsprojekten während der Belichtungszeit durch den Laser ein Schutzgasstrom über die Bauteiloberfläche geleitet, um die Prozessemissionen zu

einer Absaugung zu führen. Es konnten dabei Dichten von >90% erreicht, und die Verarbeitbarkeit von Magnesium und Magnesiumlegierungen demonstriert werden.

Tests mit der Legierung WE43, welche neben Magnesium, Yttrium und seltene Erden enthält, zeigten dass die Legierungselemente das Potential besitzen die Bildung von Magnesiumoxid während der Verarbeitung zu verringern. Im Jahr 2015 wurden Versuche mit dem ersten Magnesiumpulver zur industriellen Verwendung durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Legierung aus Magnesium, Yttrium und Neodym. Es konnten Bauteildichten von > 99%, eine Zugfestigkeit von 312MPa, eine Streckgrenze von 194MPa bei einer maximalen Dehnung von 14% erreicht werden. Die Verarbeitbarkeit für industrielle Zwecke gilt damit als erwiesen. Auf die schon zuvor beschriebenen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Pulverlagerung ist jedoch zu achten (Lachmayer and Lippert, 2017 zit. nach Gieseke et al., 2016).

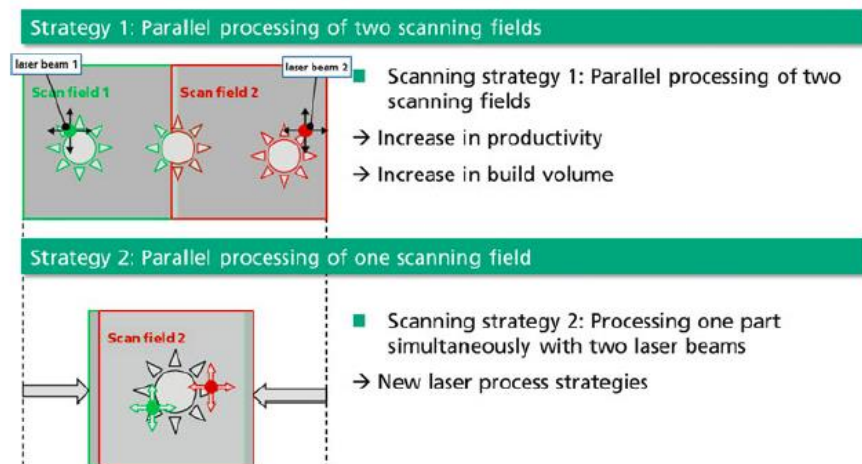
## 2.8 SLM-Entwicklungstrends

Die Technologie des selektiven Laserschmelzens wies in den letzten Jahren eine hohe Entwicklungsgeschwindigkeit auf, im Wesentlichen konzentrieren sich die Verfahrensentwicklungen in den 3 Bereichen, Produktivitätssteigerung im Fertigungsprozess, Automatisierung der Prozesskette sowie Optimierung hinsichtlich Qualität Preisstabilität (Schmidt, 2016 S 29).

Die Produktivität im Aufbauprozess einer Standard SLM-Maschine kann im Wesentlichen durch die Erhöhung der Laserleistung, Belichtungsgeschwindigkeit, größeren Laserstrahl-Durchmesser und Erhöhung der Schichtdicke verbessert werden.

Auf der Ebene Maschinenkonzept gibt es eine Reihe zusätzlicher Möglichkeiten und Ansätze die Produktivität zu steigern. Eine Möglichkeit dabei ist es, den Bauraum zu vergrößern, um mehr Bauteile im Bauraum unterzubringen. Die SLM Maschine X-Line 1000R von Concept Laser hat einen relativ großen Bauraum von 630x400x500. Das Besondere ist jedoch, dass die Maschine zwei rotierbare Prozesskammern besitzt. Dadurch wird es möglich, während einem laufenden Aufbauprozess in der ersten Kammer, die zweite Kammer vorzubereiten, um somit die Produktivität zu steigern (Klocke, 2015 S. 166ff zit. nach Concept Laser 2014). Ein weiteres neuartiges Maschinenkonzept kommt von der Firma SLM Solutions mit der SLM500HL, welche über einen großen 500x280x335 Bauraum verfügt. Dabei kann der Bauraum zur Vorbereitung des Aufbauprozesses aus der Maschine herausgenommen werden. Darüber hinaus kann sie mit bis zu vier Lasereinheiten ausgestattet werden. Es wird damit einerseits möglich den Bauraum in Bereiche zu teilen, welche parallel von jeweils einem Laser bearbeitet werden (Strategie 1) oder

andererseits jeden Bauteil gleichzeitig mit mehreren Lasereinheiten zu bearbeiten (Strategie 2). Bei Strategie 2 ist es darüber hinaus möglich, einen der Laser dazu zu verwenden das Material vorzuwärmen und anschließend durch den 2. Laser aufzuschmelzen, wodurch eine höhere Bauteilqualität erreicht werden kann (Klocke, 2015 S. 166ff zit. nach SLM Solution 2014). Die Strategie der Produktivitätssteigerung durch die Verwendung mehrerer Lasereinheiten nennt man Parallelization und ist Abbildung 28 am Beispiel von 2 Lasereinheiten dargestellt. Es kann dadurch eine Verdoppelung der Aufbaurrate erreicht werden.



**Abbildung 28: SLM mit zwei Laser/Scanner-Einheiten (Parallelization) (Poprawe et al., 2015)**

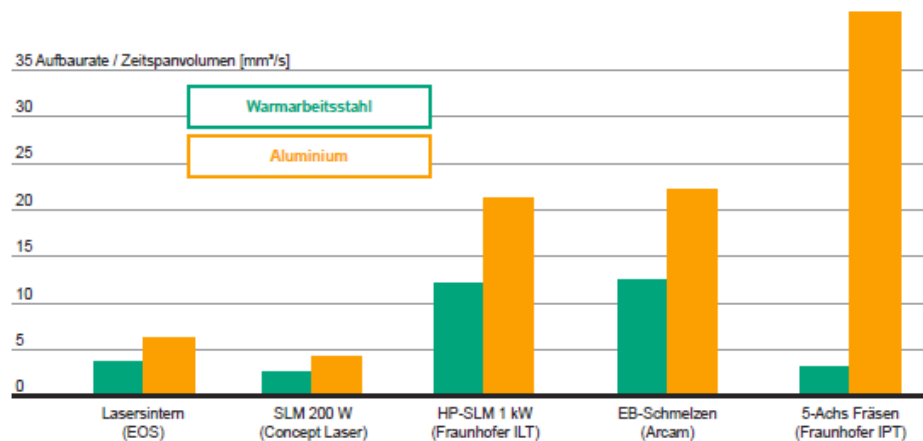
Neben der Parallelization-Strategie kann bei der Maschine von SLM Solution auch die sogenannte Skin-Core Strategie verwendet werden. Dabei wird die äußere Randschicht (Skin) mit einer geringeren Laserleistung bis zu 400W und kleinerem Strahldurchmesser von etwa 700µm bearbeitet, um eine bessere Oberflächengüte zu erreichen. Im Inneren (Core) kann die Laserleistung auf bis zu 1KW, bei größerem Strahldurchmesser, erhöht werden. Dadurch kann die Aufbaugeschwindigkeit des Bauteils erhöht werden (Poprawe et al., 2015).

In Bezug auf den Bauraum ist das Größenlimit vor allem durch die Kosten und dem Risiko, welche mit der Schaffung einer inerten Atmosphäre in Zusammenhang stehen, gegeben. Eine Möglichkeit um größere Bauteile zu produzieren, ist die Herstellung von Verbindungen der Einzelteile nach dem SLM Prozess mittels Schweißtechniken. Es ist dazu jedoch nicht jede Schweißtechnik geeignet, da ein neuerliches Aufschmelzen sowie eine Gefügeveränderung der sehr feinen Makrostruktur zu schlechten mechanischen Eigenschaften führen würde. Forschungen haben gezeigt, dass sich besonders Festkörperschweißmethoden wie Reibschweißen oder Rührreibschweißen eignen, da diese Verbindungen schaffen, ohne den Schmelzpunkt der zu verschweißenden Teile zu erreichen (Prashanth et al., 2017).

## Vergleich und Synergiepotentiale von SLM zu konventionellen Fertigungsverfahren

Trotz der enormen Entwicklung der generativen Verfahren in den letzten Jahren sind diese mit einigen schon besprochenen Nachteilen im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren behaftet. Vor allem im Zusammenhang mit der Aufbaurrate und damit verbundener Produktivität, sowie auch bei einigen Kostenfaktoren sind generative Verfahren im Hintertreffen. Wie schon erwähnt geben die guten Prognosen für die zukünftige Entwicklung des Marktvolumens, welche auf weitere Qualifizierung und Kostensenkung der Verfahren basieren, Hoffnung, dass einige der Probleme in Zukunft gelöst werden können.

Aus heutiger Sicht ist jedoch im Produktivitätsvergleich der enorme Vorteil von Zerspanungsprozessen (Subtraktive Verfahren) für viele Werkstoffe erkennbar. Wie in Abbildung 29 dargestellt, ist der Vorteil in Bezug auf die Aufbaurrate vor allem bei Aluminium eklatant. In Bezug auf Formgenauigkeit und Rauheitstiefen sind Subtraktive Verfahren ebenfalls wesentlich im Vorteil.

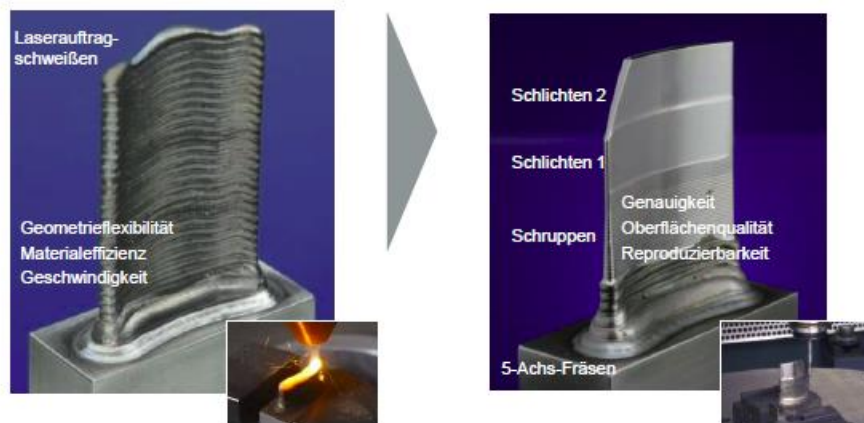


**Abbildung 29: Vergleich Aufbaurrate SLM vs. Fräsen (Klocke, 2015 S. 166 zit. nach IPT, Aachen, Fraunhofer ILT, Aachen, Promotionsvortrag Dr. Arntz, Aachen, 2013)**

Um eine optimale Produktivität in der Bauteilherstellung zu erreichen empfiehlt sich daher aus heutiger Sicht eine Kombination von generativen und zerspannenden Verfahren im Herstellungsprozess um die Stärken des jeweiligen Prozesses bestmöglich zu nutzen.

Ein Beispiel für eine solche Kombination ist der von Fraunhofer IPT entwickelte Controlled Metal Built up (CMB) Prozess. Dabei handelt es sich um die Kombination aus Laserauftragsschweißen und Fräsen. Nach dem Aufbau jeder Schicht wird die Kontur sowie die Fläche nachgefräst um die Oberflächenqualität zu verbessern und durch die Erstarrung induzierten Bauteilverzug zu entfernen. Die Anlage ist ebenfalls für Reparaturen geeignet, indem der schadhafte Bereich abgefräst und durch

Auftragsschweißen erneuert wird. Es ist sogar möglich den Reparaturprozess vollständig zu automatisieren (Additive Repair). Dazu wird das beschädigte Bauteil vermessen und die notwendige Reparatur durch Laserauftragsschweißen durchgeführt. Anschließend folgt eine weitere optische Vermessung der Ist-Kontur mit darauffolgender Bearbeitung mit dem Fräser um die Endkontur zu erreichen. In Abbildung 30 ist die Herstellung am Beispiel einer Turbinenschaufel zu sehen (Klocke, 2015 S. 167).



**Abbildung 30: Automatisierte Reparatur mit Auftragsschweißen (Klocke, 2015 S. 167 IPT, Aachen, Fraunhofer ILT, Aachen, Promotionsvortrag Dr. Arntz, Aachen, 2013)**

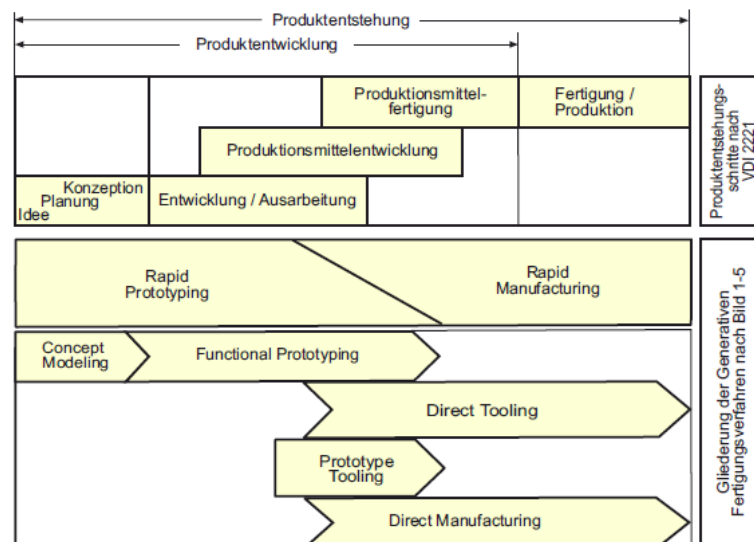
Neue Maschinen wie die Lasertec 4300 3D hybrid von DMG Mori erweitern die Kombination aus additiver und subtraktiver Fertigung noch, indem neben Laserauftragsschweißen mittels Pulverdüse sowohl eine Dreh- wie auch Fräsbearbeitung auf einer Einspannung möglich ist (LASERTEC 65 3D hybrid, n.d.).



### 3 Produktentstehungsprozess der additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren sind in mehrfacher Hinsicht in der Lage den Prozess von der ersten Produktidee bis zur Markteinführung des fertigen Produktes entscheidend mitzugestalten. Um diese Zeitspanne, in der keine Einnahmen generiert werden, möglichst kurz zu halten, können additive Fertigungsverfahren, unter anderem durch die werkzeuglose Fertigung dazu beitragen, den Produktentstehungsprozess in verschiedenen Phasen zu beschleunigen und zu verbessern (Gebhardt, 2013 S. 15ff).

Durch die unterschiedlichen Anwendungsgebiete können additive Verfahren, wie in Abbildung 31 dargestellt, in den verschiedenen Produktentstehungsschritten vorteilhaft angewendet werden. So ist das Rapid Prototyping, also die Herstellung von Prototypen und Modellen, in den frühen Phasen der Produktentwicklung angesiedelt, um die Entwicklungszeiten zu verkürzen. Werden additive Verfahren in der Fertigungs- und Produktionsphase zur Herstellung von Endprodukten (direkt manufacturing) oder Werkzeugen (direct tooling) eingesetzt, spricht man von Rapid manufacturing. Siehe dazu auch die Begriffserklärungen in Kapitel 2.1 (Gebhardt, 2013 S. 15ff).



**Abbildung 31: Einteilung der additiven Verfahren nach Produktentstehungsschritt (Gebhardt, 2013 S. 15)**

Durch Qualifizierungsmaßnahmen der verschiedenen Verfahren über die letzten Jahre, hängt die Tatsache, ob es sich um einen Prototyp oder um ein Endprodukt handelt, weniger von der eingesetzten Maschine, sondern vielmehr von den zugrundeliegenden Prozessen ab. Im Unterschied zum Rapid Prototyping ist beim direct manufacturing der Konstrukteur der Prozessverantwortliche und muss für eine additive manufacturing gerechte Konstruktion sorgen. Darunter versteht man neben



der eigentlichen Konstruktion, die Auswahl des Materials, der Bauparameter, der Lage im Bauraum, etc. Um darüber hinaus die, im Folgenden näher erläuterten, besonderen Potentiale additiver Fertigungsverfahren ausnutzen zu können, wird eine angepasste Konstruktionssystematik zunehmend wichtiger (Gebhardt, 2013 S 15ff).

### **3.1 Potentiale der additiven Fertigung**

Neben den allgemeinen Gesichtspunkten soll hier vor allem auf die Potentiale additiv gefertigter Endprodukte (Direct Manufacturing) eingegangen werden.

#### **3.1.1 Konstruktive Freiheit**

Konstruktion und Fertigung können nicht getrennt voneinander betrachtet werden und beeinflussen sich wechselseitig. So sind die Grenzen in Bezug auf die Konstruktion meist im Fertigungsverfahren als limitierender Faktor begründet bzw. umgekehrt.

Durch den Wegfall der fertigungstechnischen Limitierungen sind der gestalterischen Freiheit kaum Grenzen gesetzt und Entformungsschrägen, Hinterschnitte oder Trennebenen spielen keine Rolle mehr. Des Weiteren können interne Hohlräume ohne Probleme realisiert werden.

Ein weiterer Weg die konstruktiven Freiheiten auszunutzen, ist die Komplexität der generativ fertigen Bauteile zu erhöhen und somit die Anzahl der Einzelteile zu reduzieren, sowie den Montageaufwand zu verringern. Dieser Ansatz der Funktionsintegration resultiert meist in Produkten, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren kaum herstellbar sind.

Die Implementierung von neuartigen Konstruktionselementen, wie innere Gitter -oder Fachwerksstrukturen in unterschiedlichster Ausprägung werden möglich und können in Bezug auf die Bauteileigenschaften eine wichtige Rolle spielen (siehe dazu auch Kap.3.3.2) (Gebhardt, 2013 S. 425ff).

#### **3.1.2 Produktion konventionell nicht herstellbarer Produkte**

In dem Zusammenhang geht es vor allem um Bauteile im Mikro-Bereich, bei dem die konventionelle Fertigung an ihre Grenzen stößt. Im Bereich der Meso-Bauteilen (zwischen Mikro und Makro), mit Abmessungen zwischen 10µm und 100 µm spielen generative Verfahren schon heute eine Rolle. Anwendungen sind etwa Systeme für chemische Untersuchungen oder Mikroelektromechanische Systeme (Gebhardt, 2013 S 128ff).

### **3.1.3 Variation von Massenprodukten**

Darunter versteht man die Anpassung von Produkten an Kundengruppen oder Teilmärkten, welche meist nur in kleinen Chargen oder Einzelteilen gefertigt werden. Bei konventionellen werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren muss die Stückzahl groß genug sein um den Aufwand zu rechtfertigen, im Gegensatz dazu kann mit der additiven Fertigung in kleinen Chargen bis hin zu Stückzahl eins ohne wirtschaftlichen Nachteil gefertigt werden. Anpassungen von Produkten an Normen oder Gesetze anderer Märkte sind somit ohne höheren Kostenaufwand möglich, was vor allem für mittelständische Unternehmen geringere Exportbarrieren bedeutet (Gebhardt, 2013 S 429).

### **3.1.4 Personalisierung von Massenprodukten**

Die individuelle Anpassung von Produkten an die Kundenbedürfnisse wird auch als Customization bezeichnet.

Die erste von zwei Möglichkeiten stellt dabei die passive- oder Hersteller-Personalisierung dar. Die Produktverantwortung liegt dabei ausschließlich beim Hersteller, der Kunde bringt nur seine Vorstellungen (z.B. aus Variantenkatalogen) oder biometrische Messdaten ein. Großer Anwendungsbereich ist zum Beispiel die Medizintechnik mit Implantaten oder Zahnspangen.

Die zweite Möglichkeit stellt die aktive- oder Kunden-Personalisierung dar. Dabei wird der Kunde selbst zum Produktgestalter z.B. zum CAD Konstrukteur. Der Kunde kann sein Bauteil anschließend meist über Internetportale zum Hersteller senden, welcher verschiedene Kundenaufträge in einem additiven Bauprozess zusammengefasst erzeugt (Gebhardt, 2013 S 430ff).

### **3.1.5 Realisierung neuer Fertigungsstrategien**

Im Vergleich zu heutigen werkzeuggebundenen Verfahren inklusive Fertigungsorganisation mit Lagerhaltung und Logistik, kann die additive Fertigung wesentlich flexibler und dezentraler gestaltet werden. Die Produkte können dezentral auf der ganzen Welt gefertigt werden, was etwa für die Ersatzteilversorgung große Vorteile bringt. Die unterschiedlichsten Ersatzteile können damit auf Datenbanken geladen und „on demand“ additiv hergestellt werden. Damit entfallen jegliche Vorratsproduktion und der weltweite Versand.

Ein weiteres bedeutendes Potential ist die Verwendung generativer Verfahren als Reparatur- bzw. Instandsetzungsmaßnahme. Beim sogenannten additive Repair (siehe auch Kap. 0) wird direkt auf dem beschädigten Bauteil aufgebaut. Bauteile können so statt ihrer Zerstörung und anschließende Wiederverwertung, im Sinne des

Recycling, durch Upcycling wieder funktionstüchtig gemacht werden (Gebhardt, 2013 S 435ff).

### 3.1.6 Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Für die Entscheidung additive Verfahren zu nutzen, spielen in der Praxis die wirtschaftlichen Implikationen der betrachteten Potentiale eine Hauptrolle. Zur Wirtschaftlichkeitsbewertung können die erläuterten Potentiale auf drei Bereiche gegliedert werden, in denen ein Mehrwert generiert werden kann, siehe Abbildung 32.

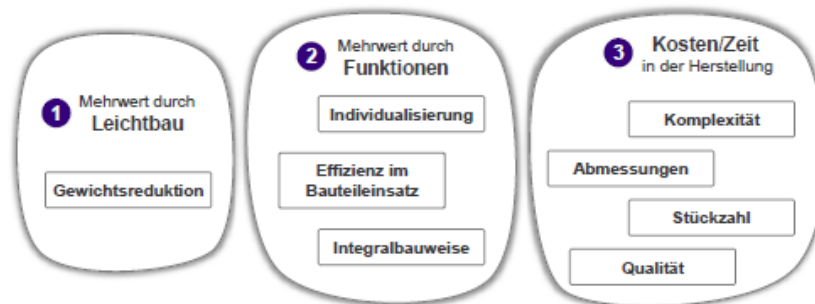


Abbildung 32: Kategorien der Wirtschaftlichkeitsbewertung (Schmidt, 2016 S. 85)

Am Beispiel der Luftfahrt Branche sollen nun die wichtigsten Aspekte dieser Kategorien näher betrachtet werden (Schmidt, 2016 S. 85).

#### Leichtbau

Durch Nutzung der großen konstruktiven Gestaltungsfreiheiten lassen sich mit generativen Verfahren enorme Massereduktionen, im Vergleich zur konventionellen Herstellung erreichen, die sich monetär niederschlagen. Um diese Potentiale zu heben, ist es jedoch notwendig zusätzliche Optimierungswerkzeuge im Produktentwicklungsprozess einzusetzen. (siehe dazu Kap. 3.3) Zur Abschätzung des Mehrwertes wurden Versuche an Sekundärbauteilen aus der Luftfahrt vorgenommen. Durch die optimale Dimensionierung der Bauteile und Auswahl effizienter Materialien konnten Masseeinsparungen von bis zu 80% realisiert werden.

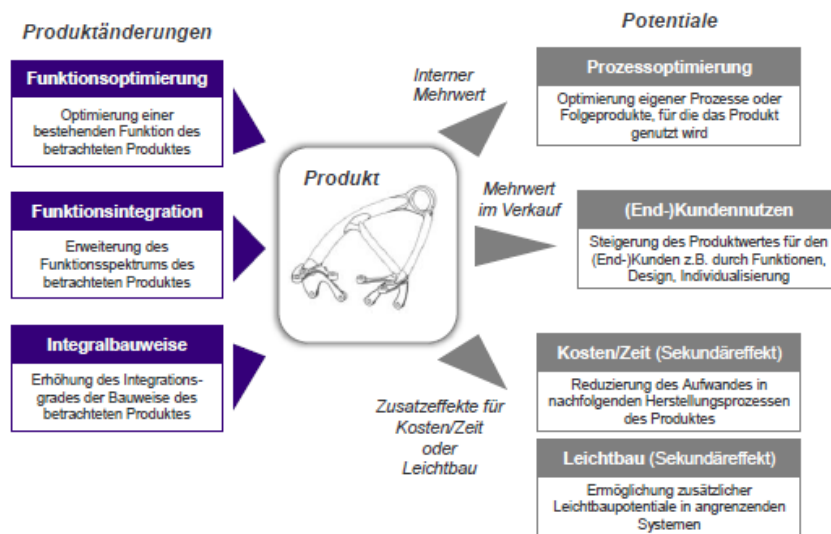
Betrachtet man den finanziellen Impact der Massereduktion, kann man zwei Wirkungsbereiche identifizieren. Einerseits bewirkt der geringere Materialbedarf Vorteile im Bereich der Herstellungskosten und Herstellungszeit, andererseits kann durch die geringere Masse ein finanzieller Mehrwert in der späteren Nutzungsphase des Produkts generiert werden. Vor allem in der Luftfahrt ist jedes Kilogramm Masseersparnis mit einem geringeren Treibstoffverbrauch oder einer höheren Nutzlast verbunden. Bei Produktentscheidungen von Luftfahrt OEMs<sup>3</sup> wird heute mit

<sup>3</sup> Original Equipment Manufacturer

Mehrwerten von 1000€/kg kalkuliert (Bulgurlu, 2014). Betrachtet man rein die Treibstoffeinsparungen, kann, je nach Ölpreisentwicklung über den Lebenszyklus, mit noch höheren Ersparnissen gerechnet werden (Schmidt, 2016, S. 166, 167).

## Funktionen

Die Funktionspotentiale können, wie in Abbildung 33 dargestellt, im Wesentlichen in 4 Änderungs-Kategorien gegliedert werden. Es ist jedoch zu betonen, dass die rein quantitative Darlegung der Potentiale aufgrund der Vielschichtigkeit wesentlich schwerer ist und sehr stark vom Anwendungsfall und der Peripherie abhängt.



**Abbildung 33: Funktionspotentiale (Schmidt, 2016 S.131)**

Funktionsoptimierung: Es findet lediglich eine Optimierung der bestehenden Funktionen statt, etwa im Bereich der Temperierung (z.B. Kühlkanäle), Haptik und Design oder Strömungsmechanik etc. Generell geht es darum, das Produkt im Sinne der Kunden- oder Prozessanforderungen zu überarbeiten. Auch das Thema der Individualisierung (Customization) spielt dabei eine Rolle (Schmidt, 2016 S. 131-134).

Funktionsintegration: Darunter versteht man die Erweiterung des Funktionsspektrums, entweder durch Integration von Funktionen angrenzender Systeme oder ganz neuer Funktionen (z.B. Sensorik) (Schmidt, 2016 S. 131-134).

Integrale Bauweise: Dadurch wird die interne Produktgestaltung geändert, indem die Anzahl der Einzelkomponenten verringert wird, die Funktionen und Abmessungen des Produkts jedoch erhalten bleiben (Schmidt, 2016 S. 131-134).

Aus diesen Produktänderungsansätzen, welche durch additive Fertigung ermöglicht werden, können nun Potentiale abgeleitet werden, die einen finanziellen Mehrwert darstellen (Schmidt, 2016 S. 131-134).

Prozessoptimierung: Darunter sind alle Auswirkungen des optimierten Produkts zu verstehen, welche einen Mehrwert für die internen Prozesse bedeutet. So kann etwa die Beschleunigung von Prozessen oder Qualitätsverbesserung erreicht werden (Schmidt, 2016 S. 131-134).

(End-) Kundennutzen: Der Mehrwert für den Kunden lässt sich am etwa durch eine höher verkaufte Stückzahl oder einen höheren vom Kunden akzeptierten Verkaufspreis ableiten (Schmidt, 2016 S. 131-134).

Zusatzeffekte: Neben den erwähnten können Zusatzeffekte entstehen, wie etwa die Zeit- und Kostenersparnis bei der Vereinfachung im Montageprozess oder zusätzlichen Mehrwert im Bereich Leichtbau. Darüber hinaus ist der Einfluss des optimierten Bauteils auf angrenzende Systeme nicht zu unterschätzen. So können etwa durch integrale Bauweise Druckverluste verringert werden und damit in weiterer Folge der Systemdruck abgesenkt werden, wodurch sich neue konstruktive Möglichkeiten (Optimierungspotentiale) im Bereich der angrenzenden Komponenten ergeben können (Schmidt, 2016 S. 131-134).

#### Anwendungsbeispiele:

Am Fuel Connector, einem mehrteiligen Treibstoffsystem des Airbus A380, konnten durch integrale, additive Fertigung 14 Bauteile in 1 zusammengeführt werden. Darüber hinaus konnten die notwendigen internen Prozesse optimiert werden und die Anzahl der Fertigungsschritte von 18 auf 5 reduziert werden, was eine Einsparung von 30% des Gesamtprozesses bedeutet. Durch den Wegfall von Verbindungsteilen könnten weitere Leichtbaupotentiale gehoben werden (Schmidt S 191 zit. nach Grutzmann Wischeropp).

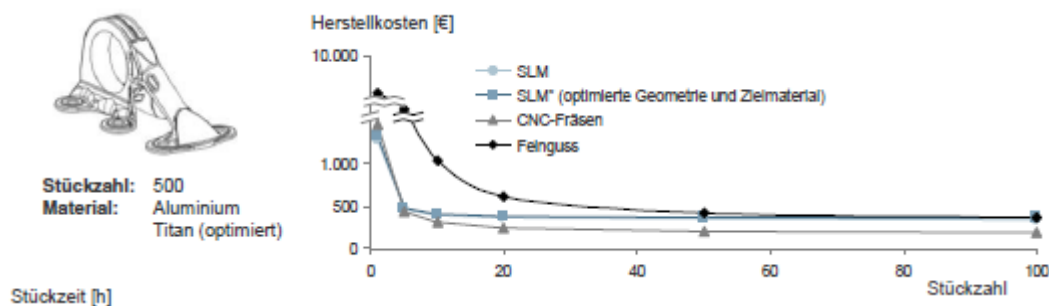
Ein weiteres Beispiel ist das integrierte Design der GE Fuel Nozzle, einer Einspritzdüse für die Triebwerke, wo durch integrale Bauweise und Optimierung der Kühlstrukturen die Lebensdauer um 500% gesteigert werden konnte. Der daraus resultierende Mehrwert für den Kunden schlägt sich vor allem im reduzierten Wartungsaufwand nieder (Schmidt, 2016 S. 191 zit. nach "3D Printing Creates New Parts for Aircraft Engines," 2017).

#### **Kosten/Zeit**

Der Kosten- und Zeitaspekt von additiven Verfahren wird hier im Zuge eines Vergleiches zwischen CNC Fräsen, Feinguss und SLM beispielhaft an einer Reihe von Sekundärbauteilen aus der Luftfahrt diskutiert.

Erste Kostenabschätzungen zeigen, dass das konventionelle CNC Fräsverfahren, aufgrund der hohen Abtragraten und geringen Material- und Verschleißkosten, bei den meisten Bauteilen einen Kostenvorteil gegenüber additiven Verfahren haben. Feinguss ist jedoch dagegen vergleichsweise teuer, vor allem, wenn filigrane

Bauteile in geringen Stückzahlen gefertigt werden sollen. Dies hängt hauptsächlich mit den aufwendigen manuellen Arbeitsschritten, den Werkzeugkosten und der Modellerstellung zusammen. Vorteile des Feingusses kommen erst bei größeren Bauteilen mit sehr großem Zerspanungsvolumen und schwer zu zerspanenden Werkstoffen wie Titan zum Tragen. Additive Verfahren sind dagegen bei großvolumigen Bauteilen mit höheren Herstellkosten verbunden. Es zeigt sich jedoch, dass leichtbauoptimierte Bauteile durch ihre reduzierte Masse und Volumen positive Auswirkungen auf Pulverkosten und Generierzeit haben. So können je nach Bauteil bis zu 30% der Kosten gegenüber nicht optimierten Bauteilen eingespart werden. Damit fallen die Kosten der additiven Fertigung in vielen Bereichen sogar unter jenen von konventionellen Verfahren. Durch diese Tatsache wird die Wichtigkeit Leichtbaupotentiale zu berücksichtigen verdeutlicht.



**Abbildung 34: Entwicklung der Herstellkosten bei verschiedenen Stückzahlen (Schmidt, 2016 S. 201)**

Bei der Stückkostenbetrachtung an einem Beispielbauteil, siehe Abbildung 34, sind additive Verfahren normalerweise durch ihre geringen Kosten in der Anlaufphase im Vorteil. Vor allem bei der Stückzahl eins, dies setzt jedoch eine volle Bauteilplattform und damit eine gemischte Fertigung voraus (hier nicht berücksichtigt). Auch bei den konventionellen Verfahren sinken die Stückkosten, wenn die Einmalkosten auf eine größere Anzahl von Bauteilen umgelegt werden. Bei der CNC-Fräse tritt dies schon bei unter 20 Stk. ein, im Gegensatz dazu ist durch die hohen Werkzeug- und Formenkosten bei Feinguss eine höhere Stückzahl notwendig.

Betrachtet man die Hauptkostentreiber genauer, kann man diese beim SLM Verfahren eindeutig mit den Materialkosten und den Maschinenkosten identifizieren. In den Prognosen bis 2025 wird jedoch mit einer Kostenreduktion in diesen Bereichen von 20% gerechnet. Beim CNC-Fräsen sind direkte Materialkosten durch die großvolumigen Rohteile und indirekte Materialkosten durch Werkzeugverschleiß, sowie die Personalkosten zur Fertigungsvorbereitung und Rüstung maßgeblich. Kostenschwerpunkt beim Feinguss ist wiederum die kostenintensive vorgelagerte Werkzeugherstellung.

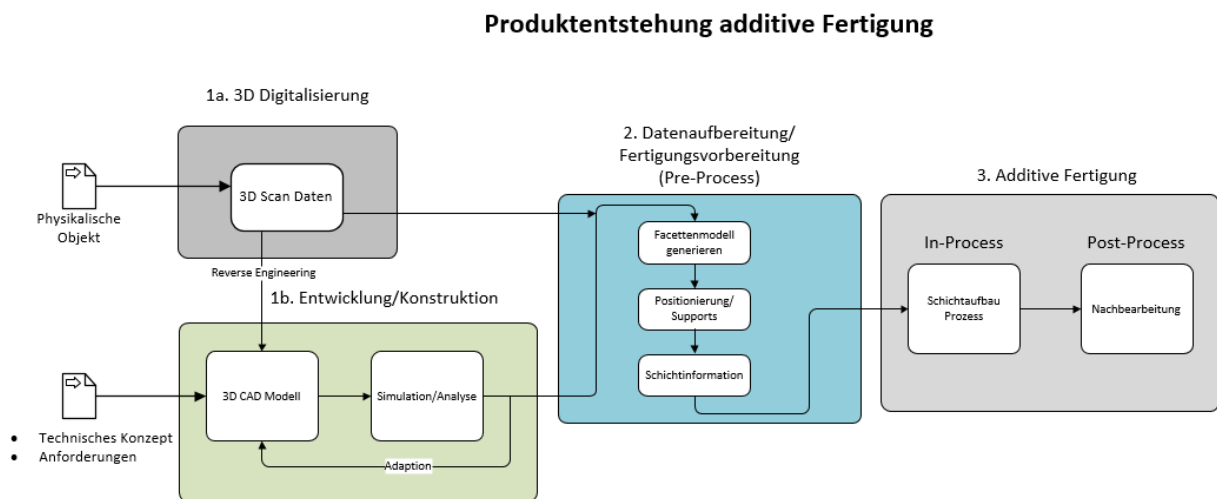
In Bezug auf die Produktionszeiten ist die CNC-Fräse durch die kurzen Durchlaufzeiten im Vorteil, gefolgt von der SLM Anlage. Es ist jedoch zu betonen,

dass durch die Integration von filigranen Strukturen die Produktionszeiten konventioneller Verfahren im Vergleich zu additiven Verfahren nach oben schnellen.

Die Time To Market ist für einige Anwendungen auch ein essentielles Entscheidungskriterium. Hier stellt sich zuerst die Frage, ob man die Entwicklung und Qualifizierungsphase in die Betrachtung mit einschließt oder nicht. Trotz der eventuellen Verwendung von zusätzlichen Optimierungslösungen im Zuge der Produktentwicklung kann konstatiert werden, dass sich der Entwicklungsaufwand für die verschiedenen Verfahren nicht wesentlich unterscheiden und daher nicht in die Betrachtung einfließt. In Zusammenhang mit der Time To Market können durch den Einsatz von SLM deutliche Vorteile generiert werden. Die Vorbereitung ist dabei im Vergleich zur aufwendigen Programmierung der Schnittbahnen bei der CNC-Fräse und der zeitintensiven Herstellung der Modellform beim Feinguss besonders einfach. Mit dem SLM Verfahren kann eine Time To Market von unter einer Woche erreicht werden (Schmidt, 2016 S. 200ff).

### 3.2 Prozesskette additive Fertigung

Die Produktentstehung im Zuge der generativen Fertigung von Endprodukten unterscheidet sich in einigen Punkten von konventionellen Prozessketten. Wie in Abbildung 35 zu sehen, lassen sich im Wesentlichen in drei Blöcke unterscheiden.



**Abbildung 35: Prozesskette Produktentstehung AM**

Die Grundlage stellen vollständige 3D Datensätze dar, welche durch 3D Digitalisierung von physischen Objekten (Abbildung 35, 1a) oder, wie am häufigsten, direkt durch 3D CAD-Modellierung (Abbildung 35, 1b) erstellt werden. Bei 3D Scan Daten handelt es sich entweder um Messdaten in Form von Punktwolken oder Schichtinformation, etwa aus dem CT (Computer Tomographie) im Bereich der Medizin. Wie in Abbildung 35, 1a dargestellt können diese Daten entweder direkt für

den AM Prozess aufbereitet werden oder in Sinne des Reverse Engineering in ein 3D CAD Modell rückgeführt werden. Genauere Informationen dazu folgen in Kap. 4. In den meisten Fällen werden im, unter Abbildung 35, 1b dargestellten, Konstruktionsprozess 3D CAD Modell des Bauteils erzeugt. In dieser Produktentwicklungs- und Konstruktionsphase spielen zusätzliche Optimierungswerkzeuge eine große Rolle um die unter Kap. 3.1. erläuterten Potentiale additiver Verfahren ausnutzen zu können. Inwiefern sich der Workflow dadurch verändert wird in Kap. 3.3 erläutert (VDI 3405 , 2014 S. 25ff).

Die Phase 2 der Fertigungsverfahren wird als Datenaufbereitungsphase bezeichnet. Im Zuge dessen werden die 3D Daten der fertigen Bauteile in Facettengeometrie (Kap. 4.1) konvertiert, auf der Bauplatzform positioniert und Stützstrukturen angebracht. Abschließend erfolgt das Slicing, durch welches die Schichtinformationen erzeugt und die Fertigungsparameter festgelegt werden.

Nach der Übertragung dieser an die Fertigungsanlage kann die 3. Phase der Bauteilherstellung beginnen. Der folgende Aufbauprozess wird als In-Process bezeichnet, im Post-Process können anschließend optionale Nachbearbeitungsschritte stattfinden, um die Oberflächenqualität zu erhöhen (VDI 3405, 2014 S. 25ff).

In den weiteren Ausführungen sind im Besonderen die Phasen 1 und 2, also der eigentlichen Produktentwicklung und Konstruktion sowie der Produktionsvorbereitung von Interesse, da diese Schritte komplett virtuell durch Unterstützung mit entsprechenden IT-Werkzeugen vollzogen werden. Zuerst werden die einzelnen Prozessschritte näher erläutert und auf neue Entwicklungen, vor allem in Bezug auf die Produktentwicklungsmethodik eingegangen. Im Kapitel 4 (Software -und Schnittstellen Analyse) wird anschließend erläutert, welche Softwarelösungen die einzelnen Prozessschritte abdecken können, welche Datenformate übergeben werden und welche Workflows dadurch entstehen (Poprawe et al., 2015).



### 3.3 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

Um die zuvor erläuterten, großen Potentiale additiver Verfahren nutzen zu können spielt die Entwicklung einer geeigneten Konstruktionssystematik im Zuge der Produktentwicklung eine wesentliche Rolle (Gebhardt, 2013 S 424).

Die Phase der Produktentwicklung umfasst dabei alle erforderlichen Tätigkeiten zur Informationserstellung, für die Herstellung und Nutzung des Produkts. Dazu zählen im Wesentlichen Planungs- und Konzeptionstätigkeiten, um die Anforderungen an das Produkt abzubilden, sowie die anschließende konstruktive Ausarbeitung der Details. Die Produktentwicklung passiert heutzutage zum Großteil am Rechner, wo mit Hilfe von IT-Werkzeugen eine möglichst vollständige Beschreibung des realen Produkts, mit all seinen Eigenschaften erreicht wird (MIVP, 2016). Im Zusammenhang mit additiver Fertigung kann man von einer durchgängigen virtuellen Produktentwicklungskette sprechen, da das Produkt direkt auf Basis des 3D Modells verarbeitet und produziert wird.

Zu den am weitest verbreiteten IT-Werkzeugen im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung zählen einerseits CAD-Softwarelösungen zur dreidimensionalen Darstellung und andererseits Simulations-Software, um die Funktion zu überprüfen. Das Ziel ist es, durch den Einsatz dieser IT-Werkzeuge die Anzahl der Änderungen während der Produktentwicklung zu reduzieren bzw. Änderungsnotwendigkeiten schon in frühen Phasen zu erkennen. In diesem Zusammenhang hat sich der Begriff Frontloading etabliert. Darunter ist der Einsatz von IT-Werkzeugen in sehr frühen Phasen der Entwicklung zu verstehen, da dort die Kostenfestlegung erst zu einem geringen Prozentsatz vollzogen ist und die Möglichkeit der Kostenreduktion besonders hoch ist, siehe Abbildung 36 (MIVP, 2016).

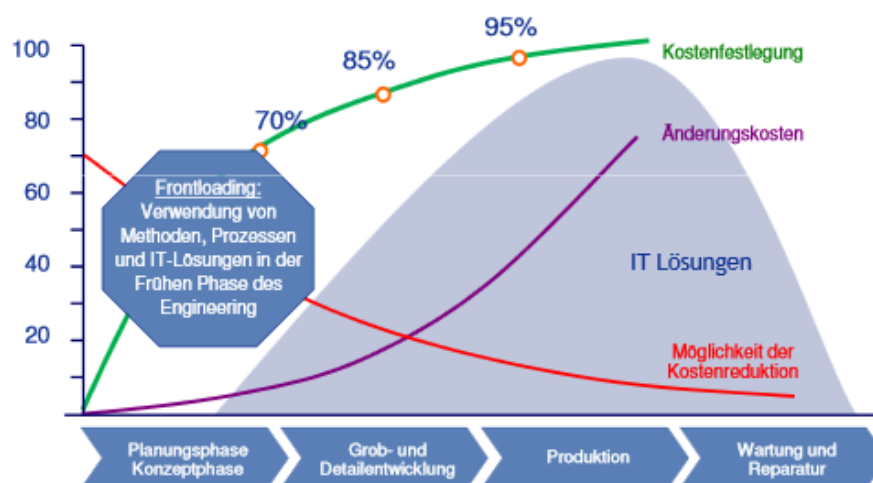
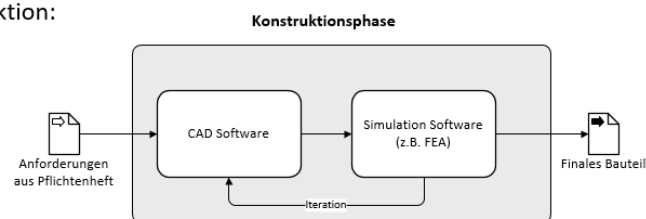


Abbildung 36: Kostenentwicklung Frontloading (Eigner, 2010)

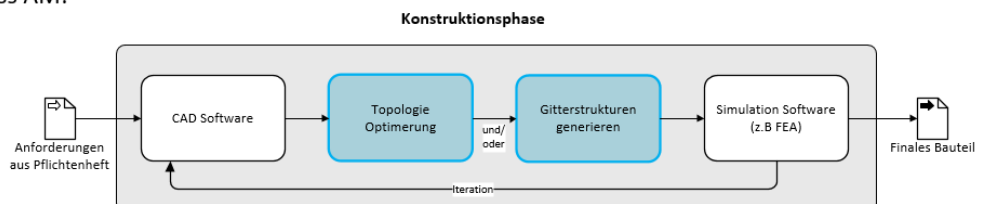
Ein weiteres Schlagwort in Bezug auf die virtuelle Produktentwicklung, ist das sogenannte Simulation Driven Design. Darunter versteht man den Einsatz Simulationslösungen schon während dem Konstruktions- bzw. Designprozess und nicht erst als Überprüfungswerkzeug für das Enddesign. Es sollen also schon frühzeitig verschiedene Konzepte überprüft werden um anschließend das richtige für Entwurf und Konstruktion zu wählen. Um dies zu verwirklichen ist es notwendig bedienungsfreundliche Softwarelösungen bereitzustellen, welche von Konstrukteuren ohne das Expertenwissen von Berechnungsingenieuren, schnell und effizient, angewendet werden können. Ein weit verbreiteter Ansatz in diese Richtung sind In-CAD Simulationslösungen, bei denen meist FE-Belastungsanalysen in CAD Programme implementiert sind, wodurch ein schnelles Überprüfen der Konstruktion während des Designprozesses möglich ist (Wall et al., 2007).

Auch im Bereich der additiven Fertigung bildet eine geeignete CAD Software die Basis der Produktentwicklung, jedoch ist für eine optimale Gestaltung auch Simulations- und Analyse-Software notwendig. Die Produktentwicklung kann in diesem Zusammenhang als iterativer Prozess gesehen werden. In Abbildung 37. sind die Schritte eines konventionellen Modellierungsprozesses dargestellt. Die Betitelung konventionell bedeutet dabei, dass nur klassische Softwarelösungen verwendet werden, welche nicht speziell auf die Konstruktion von generativ gefertigten Bauteilen ausgerichtet sind. Zu den verwendeten Programmen zählen einerseits klassische CAD Konstruktions-Software und andererseits Simulations-Software zur Validierung der Ergebnisse, wie etwa FE-Analyse oder CFD (Computational Fluid Dynamics) Programme (Langefeld et al., 2016).

Konventionelle Konstruktion:



Konstruktionprozess AM:



**Abbildung 37: Konstruktionsprozess additive Fertigung (eigene Abb. in Anlehnung an Langefeld et al., 2016)**

Der konventionelle Workflow stellt sich also wie folgt dar: Entlang der Anforderungen und Randbedingungen wird ein 3D Modell erstellt. Anschließend wird dieser Designentwurf z.B. mittels Finite Elemente-Software einer Belastungsanalyse

unterzogen. Werden im Zuge der Analyse Spannungsspitzen oder Bauteilversagen festgestellt, müssen Designanpassungen in der CAD Software vorgenommen werden. Danach folgt ein weiterer FE Analyse-Schritt. Diese Iterationsschleife wird solange durchgeführt bis das finale, beanspruchungsgerechte Design gefunden ist.

Durch das rasante Wachstum im Bereich der generativen Fertigung in den letzten Jahren, haben es sich auch die Software-Hersteller zur Aufgabe gemacht, den Workflow in diesem Bereich zu verbessern. Der Focus liegt dabei auf der konstruktiven Freiheit und in dem Zusammenhang vor allem auf der Nutzung der großen Leichtbaupotentiale additiv gefertigter Produkte, sowie in der Schaffung möglichst durchgängiger Softwarelösungen. Entlang dieser Zielrichtungen haben sich in den letzten Jahren zwei Methoden als fixer Bestandteil des Designprozesses etabliert, welche den beschriebenen konventionellen Workflow erweitern. Dabei handelt es sich einerseits um die Topologie-Optimierung und andererseits um die Modellierung von Gitterstrukturen, wie in Abbildung 37 zu sehen (Walzl and Buchmayr, 2017). Die Bezeichnung Erweitern ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht ganz korrekt, da die Einbettung dieser Optimierungswerkzeuge die gesamte Prozesskette verändert. Welche Möglichkeiten diese Werkzeuge bieten und wie die entstehenden Workflows aussehen, wird im Folgenden näher erläutert.

### 3.3.1 Topologie Optimierungsprozess

#### Theoretische Grundlagen

Die Topologie-Optimierung stellt im Zusammenhang mit additiver Fertigung ein wesentliches Strukturoptimierungswerkzeug dar. Mit ihrer Hilfe ist es möglich die Frage zu beantworten, wie die Strukturelemente unter den gegebenen Randbedingungen im zur Verfügung stehenden Bauraum möglichst effizient platziert werden können. Die folgenden Grundlagenerläuterungen finden auf Basis von (Schmidt, 2016 zit. nach: Bendsoe and Sigmund, 2004, Kranzl, 2010, Prill, 2013) statt.

Man kann die Topologie-Optimierung grundsätzlich nach der Art der zugrundeliegenden Konzepte in 2 Gruppen einteilen. Einerseits die empirische Topologie-Optimierung bei der empirische Iterationsvorschriften zur Lösungsfindung verwendet werden, dazu zählen etwa adaptive biologische Wachstumsregeln.

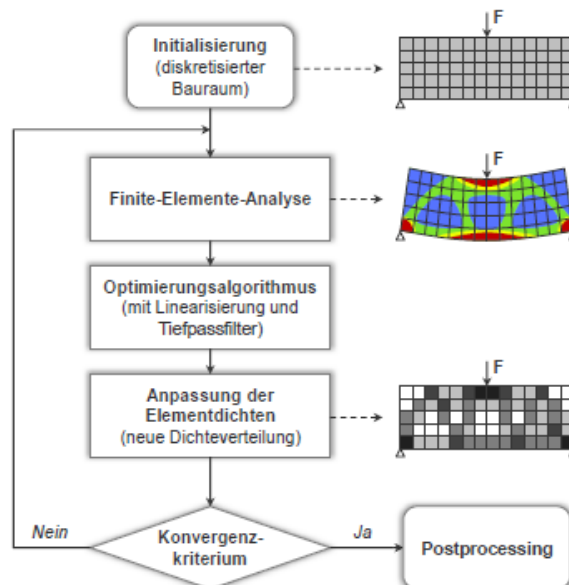
Die 2. Gruppe ist die mathematischen Topologie-Optimierung, welche in den meisten aktuellen Softwarelösungen in Form des SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) Verfahrens implementiert ist. Auf Grund des breiten Anwendungsfeldes der Optimierungs-Software bleiben die folgenden Ausführungen auf diese Methode beschränkt. Basis für die Topologie-Optimierung ist immer eine Finite Elemente

Analyse des Bauraums bzw. Ausgangsmodells. Dazu ist im ersten Schritt eine Diskretisierung des Modells durch Finite Elemente notwendig. Durch eine anschließende Finite Elemente Analyse, basierend auf den vorgegebenen Randbedingungen wird eine Spannungsverteilung generiert, welche als Grundlage für den Optimierungsalgorithmus dient. Beim SIMP Ansatz, Formel (2) wird nun jedem Element eine sogenannte Designvariable zugeordnet. Diese besteht aus der Dichte des massiven Elements, abhängig vom gewählten Material  $\rho_{i,0}$  und der dem Element zugewiesenen Dichte  $\rho_i$ . Die Designvariable stellt also die normierte Dichte dar und befindet sich folglich im Bereich zwischen Null und eins.

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i,0}} \quad 0 < x_i \leq 1 \quad (2)$$

Die Verbindung zwischen Designvariable und den Steifigkeitseigenschaften der Elemente wird nun durch die Verknüpfung zum E-Modul geschaffen. Dies wird durch die Formel (3) beschrieben, in der  $E_{i,0}$  das E Modul des Ausgangsmaterials beschreibt und  $E_i$  das reduzierte E Modul darstellt (Schmidt, 2016).

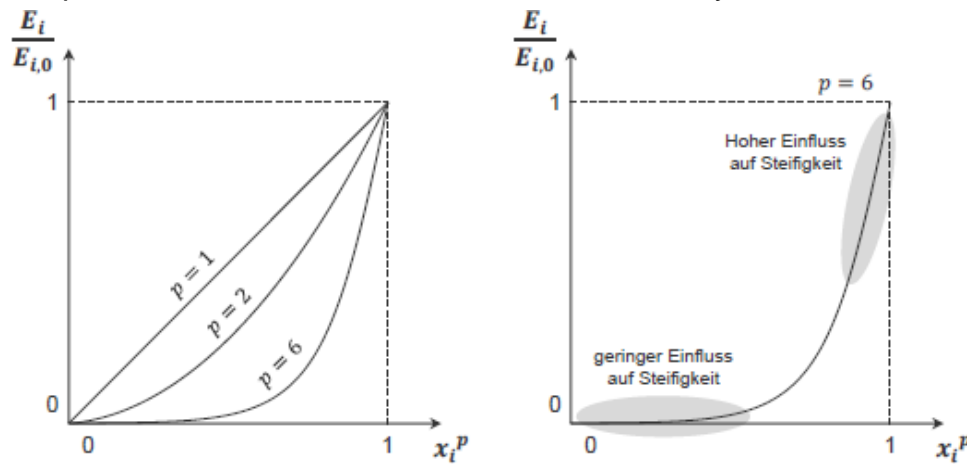
$$\frac{E_i}{E_{i,0}} = x_i^p \quad p > 1 \quad (3)$$



**Abbildung 38: Optimierungsprozess SIMP-Verfahren (Bendsoe and Sigmund, 2004, S. 14)**

Bei SIMP handelt es sich um ein iteratives Verfahren wie in Abbildung 38 zu sehen. Es wird jedem Element, basierend auf der Spannungsverteilung und der daraus folgenden lokalen Beanspruchung, ein normierter Dichtewert zugewiesen. Über den Zusammenhang in Formel (3) wird nun der E Modul des Elementes angepasst und mittels Finite Elemente Analyse ein weiterer Iterationszyklus gestartet. Durch die Reduzierung des E Moduls im vorigen Schritt resultiert ein weiches Materialverhalten und es wird dem Element eine geringere strukturelle Bedeutung

zugemessen, geringere Lastaufnahme und folglich ein geringerer Dichtewert zugewiesen. Nach jedem Iterationsschritt wird die Zielfunktion auf Konvergenz überprüft. Gebräuchliche Zielfunktionen sind in diesem Zusammenhang etwa konkrete Masseziele. Wie (Günther, 2014) beschreibt, können in aktuellen Softwarelösungen wie Altair Hyperworks darüber hinaus Restriktionen wie zum Beispiel minimale Wandstärken oder Symmetrien hinterlegt werden.



**Abbildung 39: Einfluss des Strafexponenten p (Schmidt, 2016 S. 45)**

Der Exponent  $p$  in Formel (3) wird auch als Strafexponent bezeichnet und kann den Zusammenhang zwischen normierten E Modul und Designvariable stark beeinflussen. Man erkennt aus Abbildung 39, dass bei steigendem Exponent  $p$  die Designvariable im niedrigen Wertebereich kaum Änderungen des E Moduls bewirkt, im Gegensatz dazu haben Änderungen im hohen Wertebereich großen Einfluss auf die Steifigkeit. Der Algorithmus tendiert folglich in Wertebereichen nahe 1, in Richtung 1.

In diesem Zusammenhang lässt sich sagen, dass der Exponent  $p$  die Schärfe des entstehenden Designvorschlages steuert. Damit ist gemeint, dass Zwischenwerte wie etwa 0,5 mit steigendem  $p$  vermieden werden und sich ein klares 0-1 Schema entwickelt. Es entsteht also ein Optimierungsergebnis, dass aus Hohlräumen und Vollmaterial besteht und somit die Interpretation und Umsetzung für den Designer erleichtert.

Ein Beispiel für ein Ergebnis einer Topologie-Optimierung ist in Abbildung 40 dargestellt. Es bilden sich Strukturen entlang der Lastpfade im Bauteil aus, welche der optimalen Struktur entsprechen und daher oft sehr komplexe bionische Formen abbilden. Es liegt nun an einer geeigneten CAD Software die Ergebnisse aus der Topologie-Optimierung möglichst exakt anzunähern und in ein 3D Modell umzusetzen (Hilbert et al., 2016).

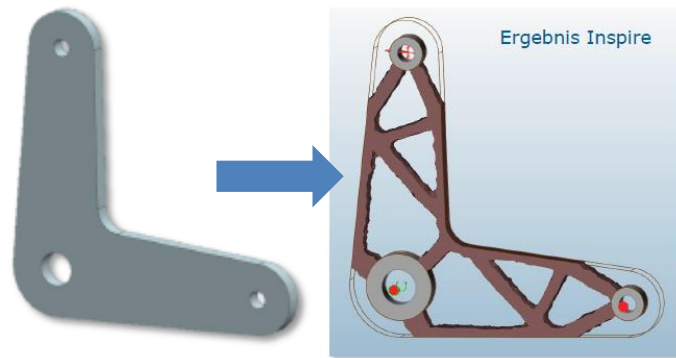


Abbildung 40: Topologie Optimierungsergebnis (Hilbert et al., 2016)

### Topologie-Optimierungsprozess

Auf Grundlage des eben erläuterten SIMP Optimierungsverfahrens können nun mit entsprechenden Softwarelösungen (Infos in Kap.4.4.3) die Konstruktionsabläufe angepasst werden. In Abbildung 41 ist die entstehende Konstruktionsschematik Schritt für Schritt dargestellt und wird im Folgenden in Anlehnung an (Langefeld et al., 2016) näher erläutert.

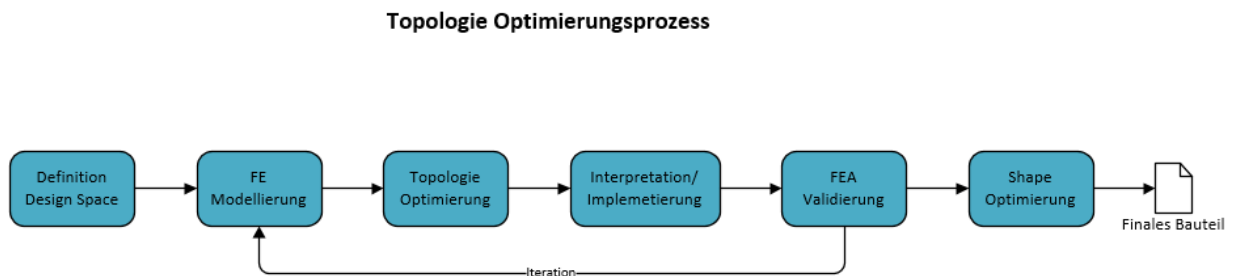
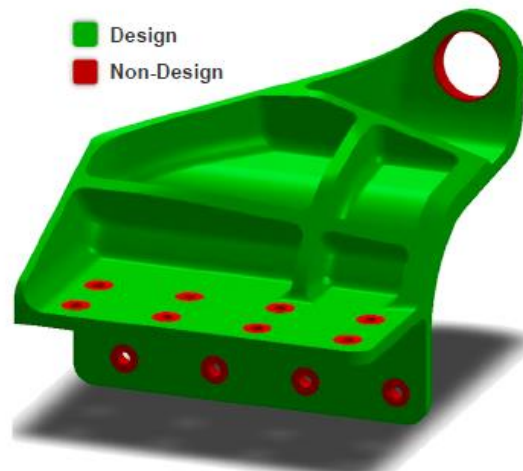


Abbildung 41: Topologie Optimierungsprozess (eigene Abb. in Anlehnung an Langefeld et al., 2016)

#### Definition Design Space:

Als Ausgangspunkt für die Topologie-Optimierung wird entweder ein bereits existierendes 3D Modell, welches optimiert werden soll, oder ein rudimentärer Entwurf verwendet. Bei einem rudimentären Entwurf handelt es sich im Wesentlichen um ein simples Modell, welches den zu Verfügung stehenden Bauraum widerspiegeln soll. An diesen Ausgangsgeometrien werden nun Design und Non-Design Bereiche definiert. Non-Design Bereiche sind Bereiche, welche von der Optimierung ausgeschlossen sind und Ihre Gestalt nicht verändern sollen. Beispiele dafür sind etwa. Funktionsflächen wie Anbindungsstellen, Lagerpunkte oder Krafteinleitungspunkte. Designbereiche sind daher folglich alle Bereiche des Modells, wo eine unbeschränkte Optimierung entlang der Lastpfade durchgeführt werden soll. Die Differenzierung der Bereiche ist vom Konstrukteur selbst vorzunehmen, siehe Abbildung 42.



**Abbildung 42: Design und Non-Design Bereiche am Bauteil (Schmidt, 2016, S 99)**

#### FE Modelling Design Bereiche:

Bevor die Optimierung durchgeführt werden kann, muss eine FE Modellierung des Lastfalls, inklusive aller notwendigen Belastungen und Randbedingungen sowie der Werkstoffeigenschaften vorgenommen werden.

#### Topologie-Optimierung:

Nachdem alle Vorbereitungen getroffen wurden, kann in diesem Schritt die Topologie Optimierung durchgeführt werden. Dazu müssen nur noch die Optimierungsziele und Restriktionen definiert werden. Dabei sind bei den meisten Softwarelösungen sowohl konkrete Masseziele als auch Steifigkeit-Maximierung wählbar, als Restriktionen sind etwa Symmetrieebenen oder minimale Wandstärken möglich. Um ein besseres Verständnis für die Belastungen im Bauteil zu erhalten sind mehrere Optimierungsdurchläufe mit unterschiedlichen Zielsetzungen sinnvoll.

#### Interpretation und Implementierung:

Die Ergebnisse der Topologie-Optimierung sind meist sehr filigrane bionisch anmutende Formen, welche die Lastpfade im Bauteil widerspiegeln. Die Herausforderung besteht nun darin, das auf Facettengeometrie basierte Optimierungsergebnis in ein CAD Modell rückzuführen oder direkt zu Verarbeiten. Die Art und Weise der Rückführung beeinflusst den Workflow stark und unterscheidet sich wesentlich je nach gewählter Software. Für nähere Informationen dazu siehe Kap.4.4.1.

FEA Validierung:

Nachdem das Optimierungsergebnis möglichst gut am 3D Modell nachgebildet wurde, folgt das Aufsetzen eine Finite Elemente Analyse des Modells. Je nach Ergebnis der Belastungsanalyse kann ein weiterer Topologie-Optimierungszyklus folgen.

Shape Optimierung:

Ist das Ergebnis der FE-Analyse grundsätzlich zufriedenstellend und kein Optimierungszyklus mehr notwendig, folgt der sogenannte Shape Optimierungsschritt. Dabei wird versucht, etwaige durch die FE-Analyse festgestellte Spannungsspitzen zu eliminieren, indem man kleine Designanpassungen vornimmt.

Optimiertes finales Design:

Resultat des gesamten Prozesses ist das finale Design als 3D Modell, welches nun für den Druck vorbereitet werden kann. (Langefeld et al., 2016)

### 3.3.2 Optimierung mittels innerer Strukturen

#### Theoretische Grundlagen

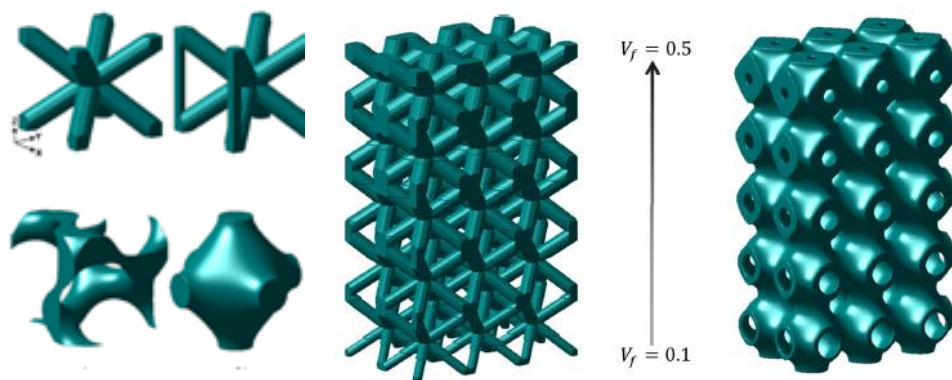
Die Implementierung von Gitterstrukturen in Bauteilen stellt neben bzw. in Kombination mit der Topologie-Optimierung eine weitere Möglichkeit dar, um Funktions- bzw. Leichtbaupotentiale zu heben. Im medizinischen Bereich verspricht man sich etwa große Potentiale für poröse Kochen- und Dentalimplantaten, um den Heilungsprozess zu beschleunigen. Aber auch bei anderen technischen Anwendungen wie der Luft und Raumfahrt erhofft man sich zusätzliche Möglichkeiten zur Massereduktion. An der Qualifizierung von additiv gefertigten Gitterstrukturen für Strukturbauteile wird im Moment intensiv geforscht (Panesar et al., 2018).

Die Grundidee bei der Generierung von Gitterstrukturen basiert auf dem in Kap. 3.3.1 vorgestellten SIMP Ansatz zur Topologie-Optimierung, bei dem versucht wird, durch Erhöhung des Strafexponenten  $p$  ein Optimierungsergebnis zu erzeugen, welches zu einer normierten Dichteverteilung von 0 oder 1 führt, was Hohlraum oder Vollmaterial bedeutet (Panesar et al., 2018).

Durch die Möglichkeit zur Fertigung von filigranen Gitterstrukturen variabler Dichte mittels additiver Verfahren, kann dieser Ansatz erweitert werden. So bieten die Zwischenwerte (greyscale values), also mittlere Dichtezuordnungen, welche im Zuge der Topologie-Optimierung möglichst verhindert wurden, nun die Möglichkeit zur Implementierung von Gitterstrukturen, die diesen Dichte-Zwischenwert entsprechen. Wählt man zum Beispiel einen niedrigen Exponenten  $p=1$  würde man dadurch neben

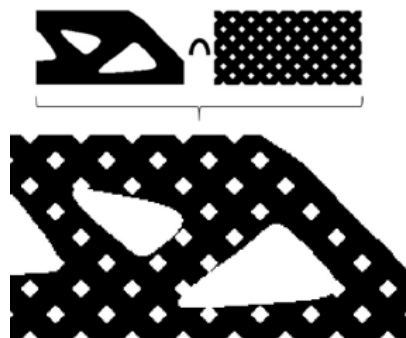


Vollmaterial und Hohlräumen auch Gitterbereiche mit mittlerer Dichte als Ergebnis erhalten. In den unterschiedlichen Softwarelösungen, welche sich in diesem Anwendungsfeld in den letzten Jahren entwickelt haben, sind unterschiedliche Zelltypen integriert, einige Beispiele sind in Abbildung 43 (links) dargestellt. Eine solche Zelle stellt dabei ein Element im Finite Elemente-Netz dar und wird periodisch auf alle Bereiche, in denen eine Gitterstruktur generiert werden soll, fortgesetzt. Man unterscheidet dabei zwischen Verstreubungen, ähnlich zu Fachwerken und auf flächenbasierte Einheitszellen. Je nach Dichtezuordnung ist es möglich, die Einheitszelle entsprechend innerhalb eines gewissen Bereiches anzupassen. In Abbildung 43 (rechts) ist ein Volumenanteil des Gitters zwischen 0.1 und 0.5 dargestellt (Panesar et al., 2018).



**Abbildung 43: Zellentypen (links), Anpassung des Zellenvolumens (rechts) (Panesar et al., 2018)**

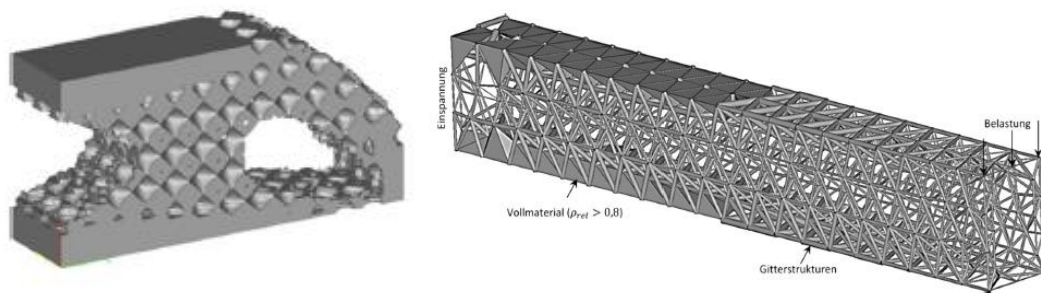
Es gibt nun verschiedene Ansätze Gitterstrukturen in das 3D Modell zu integrieren. Der erste Ansatz basiert auf der Überlagerung des 0-1 SIMP Topologie-Optimierung Ergebnisses mit der Optimierungsrestriktion einer konstanten, normierten Gitterdichte kleiner als 1 im gesamten Vollmaterial-Bereich. Das Ergebnis ist in Abbildung 44 dargestellt und zeigt ein Topologie-Optimiertes Bauteil, welches aus 100% Gitterstruktur mit angepasster aber konstanter Dichte besteht (Panesar et al., 2018).



**Abbildung 44: Überlagerung des Bauteils mit konstanter Gitterstruktur (Panesar et al., 2018)**

Die zweite Möglichkeit trägt den Zwischenwerten der SIMP Methode bei kleinen Exponenten  $p$  Rechnung und liefert somit ein Ergebnis, welches sowohl aus

Vollmaterial, Hohlräumen und Gitterstruktur besteht. Heutige Software geht dabei so weit, dass die Gitterstrukturen in ihrer Dichte innerhalb eines Bauteils variieren können, siehe Abbildung 45. Dazu müssen jedoch obere und untere Grenzen für die Gittererstellung festgelegt werden. So kann zum Beispiel festgesetzt werden, dass zwischen normierten Dichtewerten von 0,2 und 0,8 Gitterstrukturen mit entsprechender Dichte erzeugt werden. Unter 0,2 wird ein Hohlraum generiert, über 0,8 Vollmaterial. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von belastungsorientierten Gitterstrukturen. Bekannte Softwarelösungen die diese Form der Gittergenerierung implementiert haben sind zum Beispiel NX, Netfabb (Within) oder Solidthinking Inspire (Walzl and Buchmayr, 2017).



**Abbildung 45: Belastungsorientierte Gitterstruktur (Walzl and Buchmayr, 2017)**

Die Dritte Variante der Gittergenerierung ist unabhängig von der Topologieoptimierung zu sehen und beruht darauf, ein fertiges 3D Modell teilweise oder zur Gänze durch Gitterstrukturen zu ersetzen. Handelt es sich um ein Strukturbauteil, muss in diesem Fall nachträglich eine FE Analyse durchgeführt werden, um Belastungen zu überprüfen, Softwarelösungen wie das in Kap. 4.4.2 beschriebene Materialise 3-matic bieten derartige Möglichkeiten ("Materialise 3-matic," n.d.).

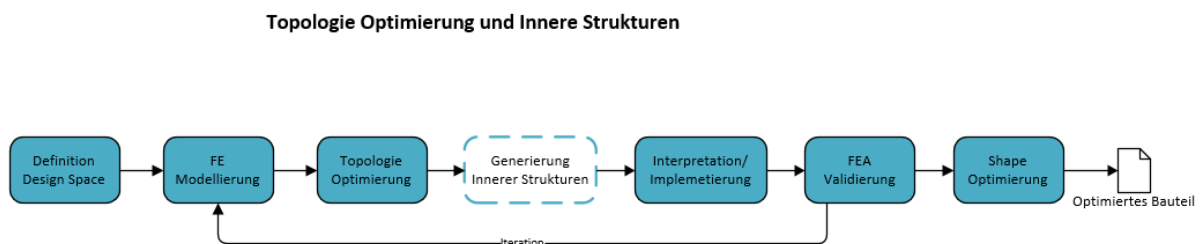
Die Festigkeitseigenschaften von Gitterstrukturen zu charakterisieren ist aktuelles Forschungsgebiet. Einige Studien deuten darauf hin, dass flächenbasierte Einheitszellen durch ihre größere Verbindungsfläche zu höheren mechanischen Eigenschaften führen. Es ist daher anzunehmen, dass die verschiedenen Festigkeitseigenschaften vor allem von der Form der gewählten Gitterzelle abhängig sind und daher der Zelltyp entsprechen dem Belastungsfall zu wählen ist, wie (Lachmayer and Lippert, 2017 S. 24ff) beschreibt. Die Qualifizierung von Gitterstrukturen ist ebenfalls aktuelles Forschungsfeld um in Zukunft auch Strukturbauteilen in Sparten wie der Luft und Raumfahrt zu Verfügung zu stehen.

Weitere Fragen stellen sich im Zusammenhang mit der Fertigbarkeit solcher Strukturen. Beim SLM Verfahrens etwa sind gewisse Restriktionen einzuhalten, siehe dazu auch (VDI 3405 Blatt 3, 2014). Es sind dabei etwa Grenzen der minimalen Zellgröße und Strebendicke einzuhalten. Des Weiteren muss bei der Gittermodellierung innerer, geschlossener Bereiche auf die Möglichkeit der

Pulverentfernung geachtet werden. In solchen Fällen sind meist Löcher in der Außenhaut (Shell Oberfläche) notwendig. Es sollte bedacht werden, dass durch nachträgliche Bearbeitung geschaffenen Löcher, Spannungsspitzen entstehen können (Lachmayer and Lippert, 2017 S.41).

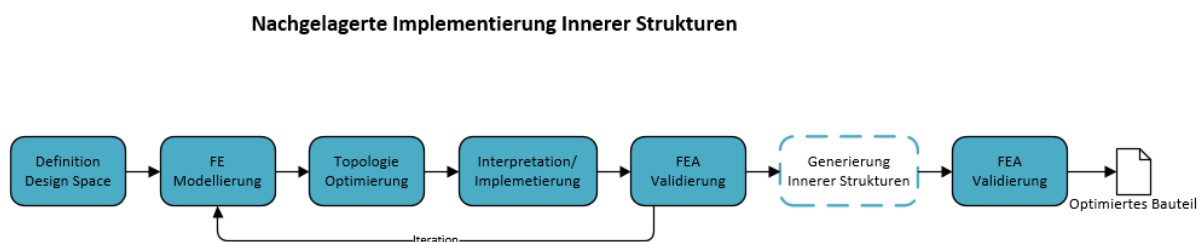
### Gitterstrukturen Workflow

Wie die bisherigen Erläuterungen zu Gitterstrukturen gezeigt haben, können Gitterstrukturen, welche auf Grundlage des SIMP Ansatzes generiert werden, durch ihr Naheverhältnis zur Topologie Optimierung, direkt in den Topologie Optimierungs-Workflow integriert werden, wie in Abbildung 46 dargestellt (Langefeld et al., 2016).



**Abbildung 46: Topologie Optimierung inkl. Innere Strukturen**

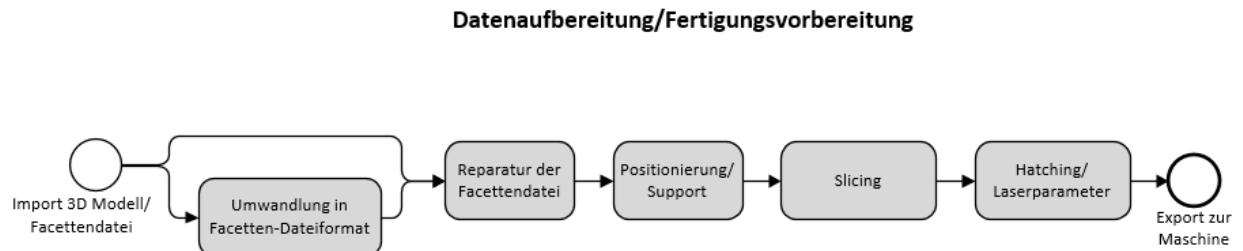
Bei der nachgelagerten Implementierung werden die Gitterstrukturen nach Abschluss des Topologie Optimierungsprozesses erzeugt, siehe Abbildung 47. Dabei handelt es sich um einen manuellen Prozess bei dem Bereiche ausgewählt werden, in denen Gitterstrukturen generiert werden sollen. Im Anschluss kann das Ergebnis optional mittels FE Analyse überprüft werden („Materialise 3-matic,” n.d.).



**Abbildung 47: Nachgelagerte Implementierung Innerer Strukturen**

## 3.4 Datenaufbereitung für den 3D Druck

Steht das finale CAD-Bauteil zur Verfügung, wird im Zuge der Datenvorbereitung das fertige 3D Modell spezifisch für das gewählte additive Fertigungsverfahren angepasst und vorbereitet. In Abbildung 48 sind die wesentlichen, dazu notwendigen Schritte dargestellt.



**Abbildung 48: Prozessschritte Datenaufbereitung**

### Umwandlung CAD in Facettenbasiertes Modell

Nachdem die finale CAD Modellierung (alternativ: direkte Generierung der Facettendatei aus Messdaten) feststeht, muss das exakte Model mit der sogenannten Triangulation zur weiteren Verarbeitung in ein facettenbasiertes Model umgewandelt werden. Dabei wird die Oberfläche durch Dreiecke angenähert. Dies ist notwendig, da die heutzutage verfügbaren Softwarelösungen und SLM Anlagen auf dieser Modellierung beruhen. Es stehen einige dreiecksbasierte Dateiformate zur Verfügung, welche sich in der Güte der Annäherung bzw. im Aufbau etwas unterscheiden. Darauf wird im Kapitel 4 näher eingegangen (Klocke, 2015 S.158).

### Reparatur der Facettendatei

Nach der Umwandlung in ein Facetten Format ist es empfehlenswert die Datei auf Fehler zu überprüfen und gegebenenfalls zu reparieren. Zur Generierung der Facettendatei stehen in den verschiedenen Programmen Algorithmen mit unterschiedlicher Qualität zur Verfügung. Mögliche Fehler sind zum Beispiel überlappende Dreiecke oder fehlerhafte Flächennormalen, weitere Fehler werden in Kap. 4.1 erläutert. Mit geeigneter Software können solche Fehler erkannt und manuell oder automatisch repariert werden. Wird dieser Schritt unterlassen, läuft man Gefahr in den weiteren Verarbeitungsschritten, wie etwa bei der Schichtgenerierung (Slicing) fehlerhafte Dateien zu erzeugen bzw. fehlerhafte Bauteile zu fertigen.

### Positionierung und Stützkonstruktion (Support)

Ist ein fehlerfreies Bauteil vorhanden, kann mit dem positionieren und der Generierung der Stützstrukturen fortgefahren werden. Dabei wird das Bauteil im virtuellen Bauraum entsprechend platziert und ausgerichtet. Das Spannungsfeld in diesem Zusammenhang stellen die Minimierung der benötigten Stützstrukturen, die Begrenzung der Bauhöhe und die erreichbare Oberflächengüte dar. Flächen und Überhänge unter einem gewissen Winkel in Bezug zur Horizontalen sollten gestützt werden, um Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit zu gewährleisten. Ziel dabei ist, das Bauteil so zu platzieren, dass die Anzahl und Flächen der Stützstrukturen minimal sind. Dabei ist zu beachten, dass das Bauteil nicht direkt auf der Bauteilplattform, sondern auf den sogenannten Main Support aufgebaut wird, also

mindestens eine Stützstruktur enthält. Dieser „Main Support“ dient hauptsächlich dazu, eine bessere Entfernung des Bauteils von der Plattform zu gewährleisten und andererseits dazu die Wärmeabfuhr zu verbessern (Yang et al., 2017).

Da es sich bei der additiven Fertigung um einen Schichtaufbau handelt und die Bauhöhe somit einem großen Einfluss auf die Fertigungsdauer hat, ist eine möglichst flache Positionierung zu wählen. Das dritte Kriterium stellt die erreichbare Oberflächengüte dar, welche in- bzw. normal zur Aufbaurichtung variiert und daher bei der Positionierung von Funktionsflächen und Bohrung berücksichtigt werden sollte. Wird die Bauplattform mit mehreren Bauteilen gefüllt, zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit wünschenswert, muss auch die kollektive Ausrichtung beachtet werden (VDI 3405 Blatt 3, 2014). Genauere Hinweise und Erläuterungen zur Positionierung und Stützung sind im Kap.4.4.4 zu finden.

### Slicing und Hatching

Damit die Datei von der AM Maschine verarbeitet werden kann, muss das Facettenmodell beim sogenannten Slicing in die aufzubauenden Schichten geschnitten werden. Schichtdicken liegen meist im Bereich zwischen 25µm und 100µm. Die Schichtdicke sollte im Idealfall so gewählt werden, dass durch den Laserenergieinput ein Aufschmelzen des gesamten Pulvermaterial der aktuellen Schicht sowie ein teilweises Aufschmelzen der vorigen Schicht möglich ist, um eine optimale Verbindung zu gewährleisten.

Das Ergebnis des Slicing-Prozesses ist die Darstellung jeder Schicht als Polygonzug der äußeren Kontur des Bauteils. Im folgenden Hatching oder Filling wird nun die Information generiert, welchen Pfad der Laser abfahren soll, um die Flächen innerhalb des Polygonzugs zu erzeugen. In diesem Zusammenhang ist vor allem der Laserfocusdurchmesser, der Abstand zwischen den Laserpfaden und die daraus resultierende Überlappung der einzelnen Pfade, wichtig, um ein dichtes Bauteil zu erzeugen. Eine Vielzahl an Hatching Strategien sind möglich, siehe dazu auch Kap. 2.6.2, wo einige vorgestellt werden. Als Input für die Maschine sind noch einige Laserparameter notwendig, aus denen die Laserenergiedichte resultiert, siehe dazu auch Kap. 2.6.2.

Slicing Hatching und Laserparameter stehen in engem Zusammenhang und beeinflussen maßgeblich die Qualität des fertigen Bauteils. Eine generelle Definition dieser Parameter ist nicht möglich und stark von der Maschine, Material, etc. abhängig. Die Forschungsaktivität zur Standardisierung in diesem Bereich ist sehr hoch. In den meisten Fällen ist man auf Vorgabewerte von Maschinenherstellern oder eigene Versuchsaktivität angewiesen.

Die fertig generierte Schicht-Datei wird anschließend auf die Software der Fertigungsmaschine geladen, wo sie verarbeitet und in Maschinencode (G-Code)

umgewandelt wird. Wichtig zu erwähnen ist, dass bei diesem Slice und Hatch Prozess verschiedene Software Pakete beteiligt sein können und Parameter und Sliceinformationen mit den individuellen Anforderungen der Maschine abgestimmt werden müssen, dies betrifft vor allem die Dateiformate. Viele Maschinenhersteller liefern daher eigene Softwarelösungen mit. Nähere Informationen dazu sind im Kapitel 4.3 zu finden (Allen, 2014).

## 4 Software und Schnittstellen Analyse

Im Zuge der Software Analyse sollen die im vorigen Kapitel erläuterten Prozesse der Produktentstehung aus Softwaresicht dargestellt und auf die übergebenen Dateiformate eingegangen werden.

Zur Fertigung mittels additiven Verfahren muss das Bauteil als vollständiges 3D Volumenmodell als digitaler Datensatz vorliegen. Im Großteil der Anwendungsfälle, vor allem im Maschinenbau, bildet die Konstruktion mittels 3D CAD Programmen die Ausgangsbasis. (Gebhardt, 2013 S. 26ff) Die erste wesentliche Schnittstelle stellt die Umwandlung der CAD Datei in ein Facetten-Dateiformat dar, um von speziellen AM Softwarelösungen der Anlagenhersteller (Frontend) oder von Drittanbietern verarbeitet werden zu können, siehe Abbildung 49. Dieser Vorgang wird auch als Triangulation bezeichnet, bei der die Oberfläche des Bauteils durch Dreiecksfacetten angenähert wird. Aufgrund des fehlenden Schnittstellenmoduls kann nicht jedes CAD Programm als Facetten Format exportieren. Es empfiehlt sich in diesem Fall mit neutralen Formaten, wie etwa STEP<sup>4</sup> oder IGES<sup>5</sup>, zu arbeiten und die Überführung in Facettenformat in externer Software durchzuführen (siehe auch Kap. 4.4.4). Auf Seiten der Facetten Formaten hat sich STL<sup>6</sup>, trotz einiger Nachteile als quasi Industriestandard etabliert. An diese Schnittstelle gehen einige Informationen der CAD Dateien verloren, da STL im Wesentlichen nur Geometrieinformationen enthält. (Yang et al, 2017) Um diesen Nachteil auszumerzen wurde in den letzten Jahren versucht mit neuen, hochentwickelteren Formaten wie AMF oder 3MF am Markt Fuß zu fassen, jedoch mit bisher mäßigem Erfolg. Nähere Infos zu CAD und Facetten Formaten finden sie in den folgenden Kapiteln 4.2 und 4.1.

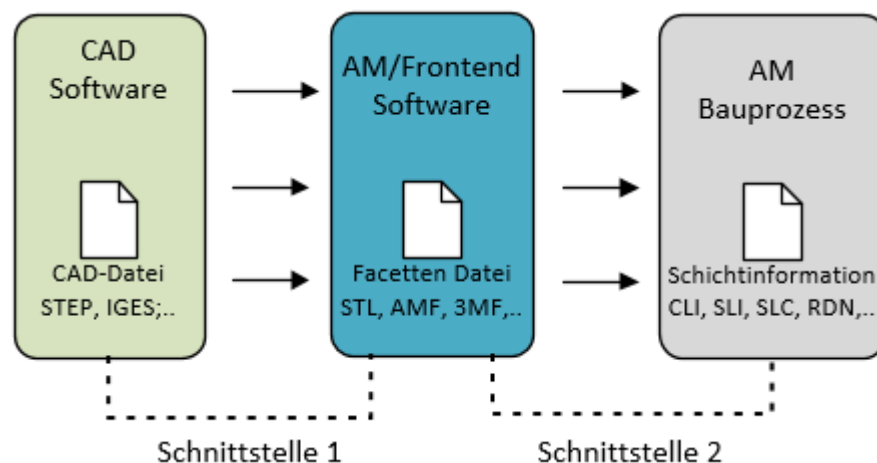


Abbildung 49: Schnittstellen der AM Produktentstehung

<sup>4</sup> Standard for Exchange of Product model data

<sup>5</sup> Internal Graphics Exchange Spezifikation

<sup>6</sup> Standard Triangulation Language

Die 2. Hauptschnittstelle befindet sich am Übergabepunkt der Daten an die Maschine. Dabei handelt es sich um die Schichtdaten jeder einzelnen Schicht mit zugehöriger Z-Koordinate, inklusive material-, verfahrens- bzw. anlagespezifischer Daten des Fertigungsvorgangs. Die Daten werden im Zuge des Slicing und Hatching generiert, dies geschieht entweder durch mitgelieferte Software von Anlagenhersteller durch Softwarelösungen von Drittanbietern oder direkt auf der Maschine. Da es sich um die Schnittstelle zur Maschine handelt, arbeiten die meisten Hersteller mit eigenen Datei-Formaten, in Kap. 4.1 werden die gängigsten Schicht-Formate vorgestellt.

Wird der vorgelagerte Entwicklungs- und Konstruktionsprozess zur Generierung des fertigen 3D CAD Bauteils mitberücksichtigt, ergeben sich zusätzliche Schnittstellen wo verschiedene Dateiformate übergeben werden. Vor allem, wenn man die im vorigen Kap 3.3 erläuterten Prozesse mit Topologie-Optimierung bzw. Implementierung innerer Strukturen genauer betrachtet, ergeben sich je nach Anzahl der verwendeten Softwarelösungen einige Übergabepunkte. Dabei spielt vor allem wieder die Dateiübergabe zwischen CAD Software (3D CAD-Daten) und Simulationsprogrammen (Facetten-Formaten) z.B. FEA<sup>7</sup> eine Rolle. In Kap. 4.5.2 sind diese Prozesse und Schnittstellen für einige gängige Softwarelösungen dargestellt.

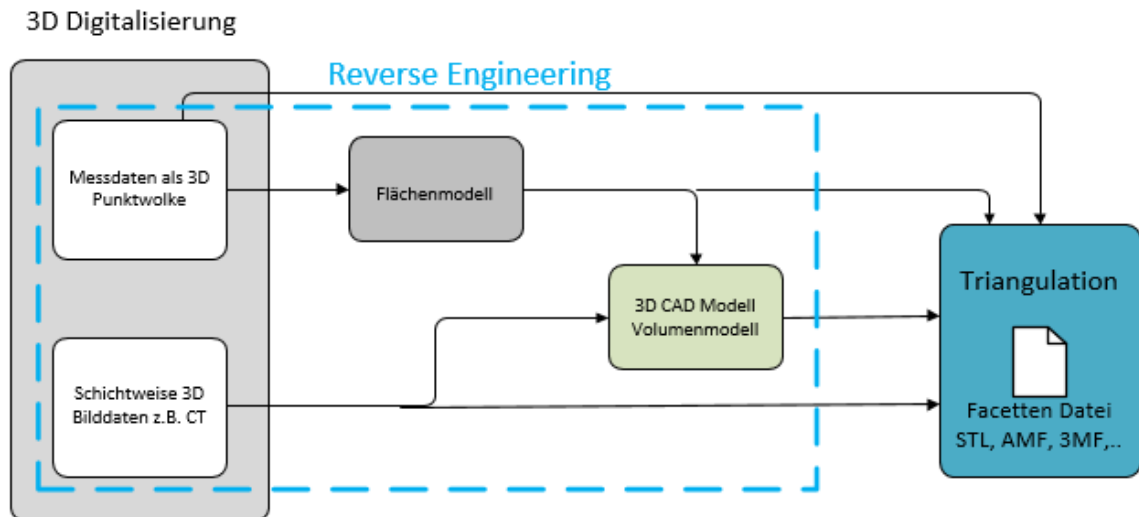
Da es sich, vor allem im Bereich Maschinenbau, nicht um den Hauptanwendungsfall handelt, sei an dieser Stelle nur kurz auf die Verarbeitung von Messdaten eingegangen. Dabei steht kein 3D CAD Modell als Resultat des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses zur Verfügung, sondern es dienen Messdaten von physischen Modellen als Grundlage (Abbildung 50). Es handelt sich dabei entweder um Messdaten in Form von Punktwolken, welche in der Regel aus Messungen mit Koordinatenmessmaschinen entstehen, oder um schichtweiser 3D Messdaten CT<sup>8</sup>-Scannern. Neben der Anwendung in der Medizin werden letztere auch zunehmend in der Technik, etwa zur zerstörungsfreien Prüfung oder zur geometrischen Erfassung beschädigter Bauteile (additive Repair), im Falle von fehlenden Fertigungsunterlagen, angewendet (Gebhardt, 2013 S. 34).

---

<sup>7</sup> Finite Elemente Analyse

<sup>8</sup> Computer Tomographie





**Abbildung 50:3D Digitalisierung (VDI)**

In beiden Fällen ist die Überführung in einem 3D Datenmodell notwendig, im Maschinenbau wird diese Art der Geometrierückführung Reverse Engineering bezeichnet. Die Gewinnung von Flächendaten und in weiterer Folge 3D CAD Volumenkörper aus Messdaten ist eine sehr komplexe Prozedur bei der spezielle Softwarelösungen zum Einsatz kommen. Die Notwendigkeit dieser aufwendigen Vorgangsweise besteht daher nur, wenn mit den gewonnenen 3D CAD Modellen weiter konstruiert werden soll. Für nähere Informationen zum Reverse Engineering soll an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen werden (Gebhardt, 2013 S. 34).

Als Alternative dazu können die Messdaten auch direkt in ein neutrales Facettenformat z.B. STL überführt werden und so direkt zur generativen Fertigung verwendet werden. Die Bearbeitungsmöglichkeiten sind dadurch jedoch begrenzt und man ist diesbezüglich auf Spezialsoftware wie z.B. Materialise 3-matic angewiesen (VDI 3405, 2014 S. 25ff).

Da die Darstellung des 3D Modells als Facetten-Datei die Grundlage für den additiven Fertigungsprozess darstellt, wird auf dieser im Folgenden ein Hauptaugenmerk liegen. Darüber hinaus werden am Produktentstehungsprozess beteiligte Formate dargestellt. Anschließend wird im Kapitel 4.4 Softwarelösungen ein Überblick über die Möglichkeiten verschiedener am Markt erhältlichen Programme gegeben und auf deren Sequenzierung im Zuge der Produktentwicklung eingegangen.

## 4.1 Facetten Dateiformate

### 4.1.1 STL

STL Dateien sind Facettenmodelle und stellen Approximationen der exakten CAD Modelle dar. STL steht für Standard Triangulation Language und stellt das älteste und am weitesten verbreitete Datei Format im Zusammenhang mit additiver Fertigung dar. Es kann damit bis heute als Industriestandard bezeichnet werden (Gebhardt, 2013 S. 35ff).

Dabei ist anzumerken, dass SLT nicht für Anwendung der additiven Fertigung entwickelt wurde, sondern schon lange davor im Bereich der Visualisierung und Darstellung von CAD Gittermodellen Verwendung gefunden hat. Die frühzeitige Formulierung der STL Schnittstelle, welche sowohl von Maschinenhersteller wie auch Softwarehersteller verwendet wird, hat zur Anwenderfreundlichkeit der additiven Fertigungsanlagen, vor allem in Bezug auf die Generierung von Stützstrukturen beigetragen (Gebhardt, 2013 S. 35ff).

Durch STL wird die Oberfläche eines 3D Modells durch Dreiecke beschrieben, man spricht von der sogenannten Triangulation. Dabei enthält der STL Datensatz die Koordinaten der drei Eckpunkte und den Flächennormalvektor (positive Richtung nach außenweisend) jedes Dreiecks, siehe Abbildung 51.

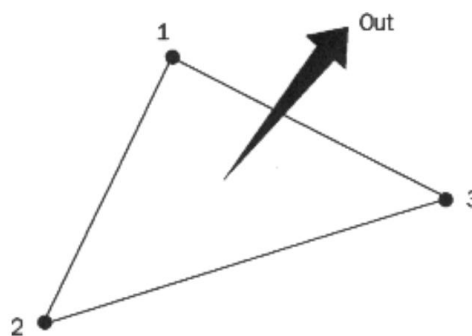


Abbildung 51: Dreiecksdefinition STL Format (Chakravorty, 2017)

Es gibt zwei Formen der Speicherung von STL-Dateien, ASCII oder binär. Das ASCII Format zeichnet sich vor allem durch seine Lesbarkeit und Verständlichkeit für den Anwender aus. Dies bietet besonders für die manuelle Bearbeitung und zum Ausbessern von Fehlern Vorteile. Der grundsätzliche Aufbau einer ASCII STL Datei ist in Abbildung 52 dargestellt. Der Datensatz beginnt mit der Zeile „solid“ und dem Dateinamen und endet mit dem Begriff „endsolid“ und dem Dateinamen. Zwischen diesen Attributen liegen die Informationen über die einzelnen Dreiecke. Die Definition jedes Dreiecks startet mit „facet“, danach folgt die Definition der Koordinaten der Normalen mittels „normal“ und den drei Koordinaten Richtungen  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  sowie der Koordinaten der drei Eckpunkte „vertex“. Die Koordinaten der Normalen und der

Eckpunkte werden dabei als Gleitkommazahlen (float) dargestellt. Die Formulierung ist sehr simpel gehalten und kann sehr leicht in jedem Texteditor aufgerufen und modifiziert werden (Schledermann, n.d.).

```
solid <name>

facet normal nx ny nz
  outer loop
    vertex v1x v1y v1z
    vertex v2x v2y v2z
    vertex v3x v3y v3z
  endloop
endfacet

endsolid <name>
```

**Abbildung 52. Grundaufbau ASCII STL Datei (Chakravorty, 2017)**

Da in ASCII exportierte STL Dateien bei einer hohen Anzahl von Dreiecken beachtliche Größen erreichen können, existiert die zweite Möglichkeit STL im binären Datenformat abzuspeichern. Dadurch kann eine wesentliche Reduktion der Dateigröße um über 30% erreicht werden. (Chua et al., 2017) Für eine manuelle Manipulation des Codes ist die binäre Darstellung jedoch ungeeignet. In Abbildung 53 ist der Aufbau einer binären STL Datei dargestellt. Die Datei beginnt mit einem 80 Zeichen langen Header, welcher jedoch von den meisten STL-file-Readern ignoriert wird, mit einigen Ausnahmen, auf die später eingegangen wird. Es folgt die Anzahl der Dreiecke, beschrieben durch einen 4byte unsigned Integer (UINT). Danach folgen 12 Werte für die Koordinaten der Eckpunkte und des Normalvektors, dargestellt als 32 Bit Gleitkommazahl (float). Es ist zu beachten, dass nach der Definition jedes Dreiecks eine 2 Byte Sequenz, bezeichnet als „attribute byte count“, folgt. Dieser Wert wird in den meisten Fällen auf null gesetzt und dient als Platzhalter zwischen den einzelnen Dreiecken. In manchen Softwarepaketen wird dieser Wert jedoch benutzt um Zusatzinformationen zu speichern, wie etwa Farbdaten in Magics. Die binäre Datei endet einfach nach der Definition des letzten Dreiecks ohne weitere Zeilen.

```
UINT8[80] - Header  
UINT32 - Number of triangles
```

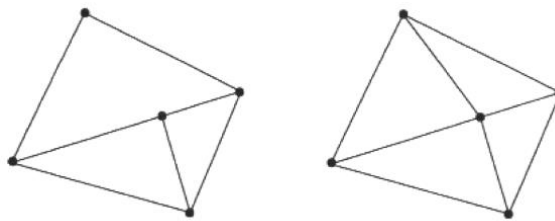
```
foreach triangle  
REAL32[3] - Normal vector  
REAL32[3] - Vertex 1  
REAL32[3] - Vertex 2  
REAL32[3] - Vertex 3  
UINT16 - Attribute byte count  
end
```

**Abbildung 53: Grundaufbau binäre STL Datei (Chakravorty, 2017)**

Damit die STL Datei mittels geeigneter Software richtig dargestellt wird, gilt es einige Regeln bei der Informationsspeicherung zu beachten (Chakravorty, 2017).

#### Vertex rule:

Diese Regel besagt, dass sich zwei aneinanderlegende Dreiecke zwei Eckpunkte und somit eine Seite teilen müssen. Außerdem darf ein Dreieck keinen (vierten) Eckpunkt von einem anderen Dreieck auf einer Seite haben, siehe Abbildung 54. (Schledermann, n.d.)



**Abbildung 54: Vertex Rule (Schledermann, n.d.)**

#### Orientation rule:

Welche Richtung in das 3D Objekt zeigt und welche hinaus muss auf zwei Arten festgelegt werden. Einerseits durch den Normalenvektor, welcher nach der Rechten-Hand-Regel nach außen zeigen soll und andererseits durch die Listung der Eckpunkte gegen den Uhrzeigersinn, wenn das 3D Objekt von außerhalb betrachtet wird. Diese Redundanz hilft dabei Fehler in der Datei mittels geeigneter Software zu erkennen und zu beseitigt (Chakravorty, 2017).

#### Positive octant rule:

Diese Regel besagt, dass alle Koordinaten im positiven Quadranten des Koordinatensystems liegen müssen. Der Hintergrund dabei ist, dass negative Zahlen einen zusätzlichen Bit benötigen, um das negative Vorzeichen zu speichern (signed floating point number). Dies würde zu größeren Dateien führen, was durch die Regel verhindert wird (Chakravorty, 2017).

Triangle sorting rule:

Es handelt sich dabei um eine optionale Regel, bei der die Dreiecke nach ihrer Z-Koordinate aufsteigend (ASC) sortiert werden um im Folgenden Slicing Process diesen Schritt nicht mehr durchführen zu müssen und so Zeit zu sparen (Chakravorty, 2017).

Fehlertypen:

Werden die oben genannten Regeln nicht beachtet, sind Fehler wie Berandungsfehler (Lücken), Überlappungen (Doppelte Dreieckspatch) und Fehlorientierungen die Folge (Gebhardt, 2017 S. 35ff).

Lücke oder doppelte Dreieckspatches kommen durch ungenaue Berandung von aneinander angrenzenden Patches vor. Eine ungleiche Auflösungsdichte von aneinander angrenzenden Kanten kann etwa zu solchen Fehlern führen. Diese sogenannten Naked edges sind bei anderen Fertigungsverfahren nicht weiter schlimm, durch die hohe Genauigkeit und den kleinen Strahldurchmesser des Lasers bei der additiven Fertigung kann es zu Einschränkungen in der Fertigbarkeit führen (Gebhardt, 2017 S. 35ff).

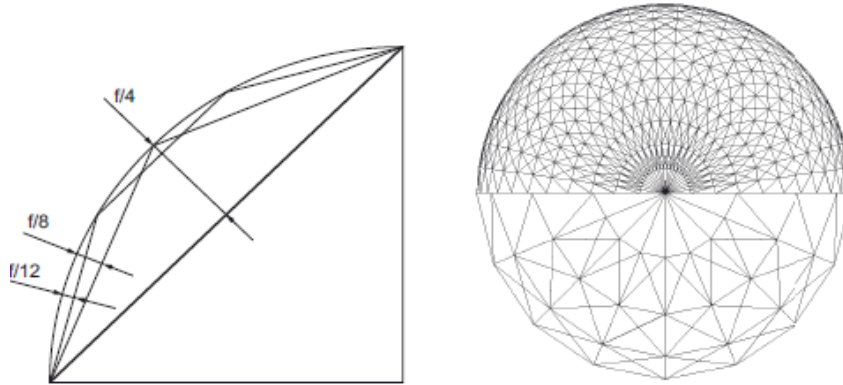
Ist die Normalen Orientierung nicht konsistent, kommt es durch die falsche Orientierung der Flächen in der Regel zu Problemen bei der Erzeugung der Maschinendatensätze beim Slicing (Gebhardt, 2017 S. 35ff).

Fehler wie Lücken oder Fehlorientierungen können meist durch geeignete Softwaremodule zur Datenaufbereitung repariert werden. Dies geschieht wahlweise automatisch oder manuell etwa mit Hilfe von Materialise Magics (Gebhardt, 2017 S. 35ff).

**Vereinfachung des STL Formats**

Die Beschreibung der mathematisch exakten Kontur des CAD Modells durch Dreiecke beinhaltet immer eine gewisse Ungenauigkeit und stellt daher eine Annäherung dar. Der Umsetzungsfehler wird als sogenannter Sekantenfehler bezeichnet. In Abbildung 55 ist die Annäherung eines Kreises mit einer unterschiedlichen Anzahl von Dreiecken dargestellt. Man erkennt, dass die Güte der Annäherung von der Anzahl der Dreiecksfacetten abhängt. Prinzipiell ist eine möglichst genaue Beschreibung der Kontur wünschenswert, jedoch ist dies mit einem enormen Anstieg der Datenmenge verbunden. Am Beispiel des Kreises wurde das Anwachsen der Dateigröße um den Faktor 22 nachgewiesen. In vielen CAD Programmen kann die Genauigkeit des ausgegebenen STL Files durch Angabe der Sekantenhöhe gesteuert werden. Empfohlene Werte hierfür liegen zwischen 0.01mm und 0.001mm, um glatte Oberflächen zu erhalten. Außerdem kann mittels Winkeltoleranz der Winkel zwischen den Normalen angrenzender Dreiecke manipuliert werden, desto kleiner der Winkel, desto genauer wird die Annäherung.

Voreingestellte Winkelwerte befinden sich meist im Bereich von  $15^\circ$ . Darüber hinaus kann in einigen Softwarelösungen, wie etwa Materialise Magics oder Netfabb zusätzlich eine maximale Kantenlänge der Dreiecke vorgegeben werden (Gebhardt, 2017 S. 35ff).



**Abbildung 55: Einfluss des Sekantenfehlers in STL (Gebhardt, 2013 S.38)**

Die Kompatibilität über beinahe alle am Markt befindlichen CAD Programme, Datenaufbereitungssoftware und Maschinen sind ein wesentlicher Vorteil des STL Formats. Durch die Dreiecksbeschreibung der Oberfläche lassen sich die Bauteile auch ohne Rückführung in das für die Konstruktion verwendete CAD Programm beliebig skalieren. Außerdem ist das Schneiden des Bauteils im folgenden Schritt des „Slicens“ ohne Probleme möglich. Wie (Eragubi, 2013) beschreiben sind auch für den Fall, dass Dreiecke beim Slicing geschnitten werden, diese Schnittpunkte der Dreiecksseiten exakt definiert und damit die geschlossene Schnittkontur jeder Schnittebene abbildbar. Ein weiterer Vorteil im Vergleich zu konturorientierten Schnittstellen lassen sich durch die simple Formulierung mittels Dreiecke auch kleinere Fehler mit relativ geringem Aufwand ausbessern (Schledermann, n.d.).

Als große Nachteile von STL sind die redundante Syntax, sowie die enorme Datenmenge zu nennen, welche bei hoher Verfeinerung zustande kommt. Das bereits erläuterte binäre STL Format trägt dem Rechnung und ist ein Ansatz die Datenmenge zu begrenzen. Durch eine Komprimierung des binären Files kann darüber hinaus eine weitere Verringerung der Dateigröße um 40-60 Prozent erreicht werden. Weitere Fortschritte in diesem Bereich versucht man durch Implementierung spezieller Algorithmen. (Zha and Anand, 2015) hat etwa eine Methode beschrieben, bei der auf Basis der Minimierung des Sekantenfehlers lokal die Facettendichte erhöht bzw. verringert wird, um dadurch eine weitere Optimierung der Dateigröße zu erreichen (Schledermann, n.d.).

Ein weiterer großer Nachteil des STL Formates ist die Begrenztheit auf Geometrieinformationen. Informationen zu Farbe, Texturen, Material oder sonstigen Bauteileigenschaften sind nativ nicht enthalten. Das Problem das nativ Farbinformationen nicht unterstützt werden, konnte von einigen Softwareherstellern

gelöst werden. Zum einen ist dies das VisCam bzw. Solidview Softwarepaket und zum anderen Materialise Magics. Beide adaptieren dazu die nativen binären STL-Files. VisCam verwendet den Wert des „attribute byte count“ am Ende jedes Dreiecks um eine 15 Bit RGB<sup>9</sup> Farbinformation zu speichern. Magics wiederum verwendet den 80byte header um die Farbe des gesamten Bauteils zu definieren. Die Grundfarbe kann dann falls gewünscht für jedes Dreieck durch den „attribute byte count“ überschrieben werden (Schledermann, n.d.).

### 4.1.2 AMF

Aufgrund der Unzulänglichkeiten des STL Formates und anderer Formate, welche für die additive Fertigung verwendet werden, wurde in den letzten Jahren versucht ein Format am Markt zu etablieren, das den Anforderungen der additiven Fertigung gerecht wird. Das Additive Manufacturing Format kurz AMF, ist ein von ASTM F42 und ISO/TC261 speziell für diese Anforderungen entwickelte Datei Format und soll in Zukunft das STL Format ablösen. Der Grundgedanke dabei war ein offenes Format zu schaffen um möglichst weite Verbreitung am Markt zu erreichen. Die folgenden fünf Prinzipien aus (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017) waren den Entwicklern daher besonders wichtig.

Einfachheit: AMF soll mit einem einfachen Texteditor lesbar sein um Fehler schnell beheben zu können. Außerdem sollen gleiche Informationen nicht an mehreren Orten gespeichert werden. Dies soll die Redundanz des STL Formates, welche gleiche Eckpunkt Koordinaten von verschiedenen Dreiecken mehrfach abspeichert, verhindern.

Skalierbarkeit: Dateigröße und Verarbeitungszeit sind gut skalierbar. Dies soll für aktuelle und zukünftige Entwicklungen wie höhere Bauteilkomplexität bessere Auflösung und Genauigkeit vorbereiten. Sowie auch die Möglichkeit schaffen, komplexe periodische innere Strukturen zu implementieren.

Leistungsfähigkeit: Es wird mit AMF ermöglicht auch bei großen Objekten die Datenmenge angemessen zu halten um angemessene Laufzeiten der Schreib- und Leseprozesse zu ermöglichen (genauere Infos in ÖNORM EN ISO/ASTM 52915: 2017 08 01 Anhang).

Abwärtskompatibilität: STL Dateien können direkt, ohne Informationsverlust in AMF umgewandelt werden. Da AMF auch auf einer Facetten-Modellierung basiert können auch AMF Dateien leicht in STL umgewandelt werden, auch wenn Zusatzinformationen des AMF dabei verloren gehen. Durch den sehr ähnlichen

---

<sup>9</sup> RGB(Rot, Grün, Blau)-Farbraum

Aufbau aus Dreiecksfacetten bleiben die bestehenden Slicing-Algorithmen zur Weiterverarbeitung der Dateien nutzbar.

Zukunftsoffenheit: In einer sich schnell verändernden Branche ist AMF so gestaltet, dass durch Erweiterungen in Zukunft zusätzliche Funktionen möglich sind, jedoch die einfachen Geometriedaten auch noch für ältere Systeme nutzbar bleiben.

Die angeführten Prinzipien sollen dabei helfen die Unzulänglichkeiten von STL zu beseitigen, aber dabei gleichzeitig eine möglichst ähnliche Struktur aufweisen, um eine möglichst große Kompatibilität mit der vorhandenen Softwarestruktur zu gewährleisten. Damit soll die Hemmschwelle zum Formatwechsel niedrig gehalten werden. Um die Offenheit gegenüber allen Fertigungsverfahren und -techniken zu gewährleisten, hat man sich auch gezielt dazu entschieden, keine Fertigungsinformationen oder Slice-Daten zu implementieren (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017).

### **Aufbau**

Bei AMF handelt es sich ähnlich wie bei STL um eine durch Dreiecksfacetten angenäherte Oberfläche einer exakten 3D Geometrie. Im Unterschied zu STL werden jedoch Zusatzinformationen wie Materialdaten, Farbinformationen, etc. nativ unterstützt. Darüber hinaus macht es AMF möglich neben den planaren Dreiecksfacetten auch gekrümmte Dreiecke zu beschreiben und somit eine bessere Annäherung an die exakte Kontur zu schaffen.

Als Datenbasis dient das weit verbreitete XML (Extensible Markup Language) Format, welches die Tür zu einer großen Anzahl an Anwendungen zum Lesen und Manipulieren der AMF Daten öffnet. Im Gegensatz zu STL steht nur das ASCII Format zu Verfügung, damit soll die Lesbarkeit für den Programmierer gewährleistet werden. Falls notwendig kann die ASCII XML Datei im Anschluss komprimiert werden. Im Folgenden ist der Grundaufbau einer AMF Datei dargestellt, siehe Abbildung 56.



```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<amf units="mm">
  <object id="0">
    <mesh>
      <vertices>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>0</x>
            <y>1.32</y>
            <z>3.715</z>
          </coordinates>
        </vertex>
        <vertex>
          <coordinates>
            <x>0</x>
            <y>1.269</y>
            <z>2.45354</z>
          </coordinates>
        </vertex>
        ...
      </vertices>
      <volume>
        <triangle>
          <v1>0</v1>
          <v2>1</v2>
          <v3>3</v3>
        </triangle>
        <triangle>
          <v1>1</v1>
          <v2>0</v2>
          <v3>4</v3>
        </triangle>
        ...
      </volume>
    </mesh>
  </object>
</amf>

```

adddsa

**Abbildung 56: Minimaler Grundaufbau einer AMF Datei (lipson, n.d.)**

In Abbildung 56 ist die Mindestumsetzung einer AMF Datei zu sehen, welche nur Geometrieinformationen enthält und daher mit STL voll kompatibel ist. Ein AMF File enthält dabei mindestens ein Element `<Object>`, welches ein untergeordnetes Element `<mesh>` besitzt. Das `<mesh>` stellt das geometrische Dreiecksnetz dar und umfasst wiederum `<vertices>` und `<volume>`. Das Element `<vertices>` enthält dabei die einzelnen Eckpunkte inklusive zugehörigen Koordinaten, die Eckpunkte müssen durch ganzzahlige Indizes definiert werden. Im `<volume>` werden jedem untergeordneten Element `<triangle>` drei dieser in `<vertices>` definierten Eckpunkte durch deren zuvor definierten Indizes angegeben. Die Eckpunkte, müssen dabei nach der Rechten-Hand-Regel angeordnet sein, welche von außerhalb des Volumens betrachtet, der Richtung gegen den Uhrzeigersinn entspricht. Es ist darüber hinaus anzumerken, dass ein Objekt mehrere abgeschlossene Elemente `<volume>` enthalten kann. Diese Vorgangsweise, wo Eckpunkte und Dreiecke separat angegeben werden, unterscheidet sich somit etwas von der Definition in STL. Es wird damit jedoch die Redundanz der mehrfachen Eckpunktdefinition umgangen, was zu einem schlanken Datensatz beiträgt (Hiller and Lipson, 2009).

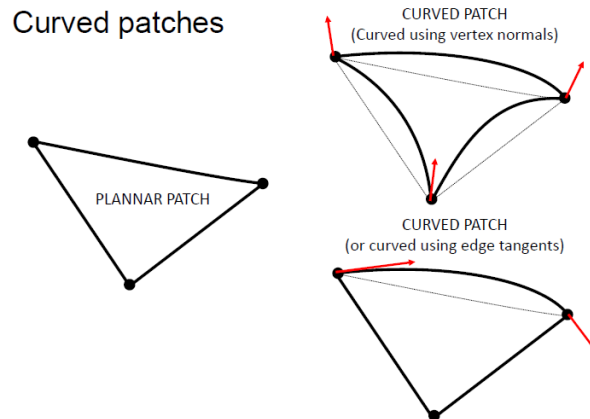


Abbildung 57: gebogene Dreiecke AMF Format (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017)

Neben der Standard-Variante wo die Dreieckspunkte durch Geraden verbunden werden, kann durch eine zusätzliche Definition der Flächennormalen am Eckpunkt `<normal>` (nach außen gerichtet) oder, falls die Krümmung an einem Eckpunkt nicht definiert ist, der Eckpunktstangente `<edge>` eine gebogenen Kante erstellt werden, siehe Abbildung 57. Der zugehörige Code ist in Abbildung 58 zu sehen.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<amf units="mm">
  <object id="0">
    <mesh>
      <vertices>
        <vertex>
          <coordinates>
            ...
          </coordinates>
          <normal>
            <nx>0</nx>
            <ny>0.707</ny>
            <nz>0.707</nz>
          </normal>
        </vertex>
        ...
      </vertices>
      <region materialid="0">
        <triangle>
          ...
        </triangle>
      </region>
    </mesh>
  </object>
</amf>

```

Only needed for curved surfaces →

```

<normal>
  <nx>0</nx>
  <ny>0.707</ny>
  <nz>0.707</nz>
</normal>

```

Only needed for curved edges (rare) →

```

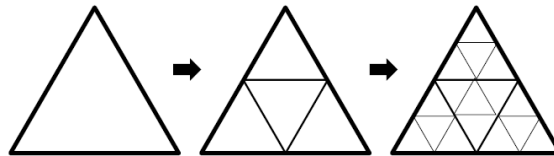
<edge>
  <v1>0</v1>
  <dx1>0.577</dx1>
  <dy1>0.577</dy1>
  <dz1>0.577</dz1>
  <v2>1</v2>
  <dx2>0.707</dx2>
  <dy2>0</dy2>
  <dz2>0.707</dz2>
</edge>

```

Abbildung 58: AMF Formulierung mit gebogenen Dreiecken (lipson, n.d.)

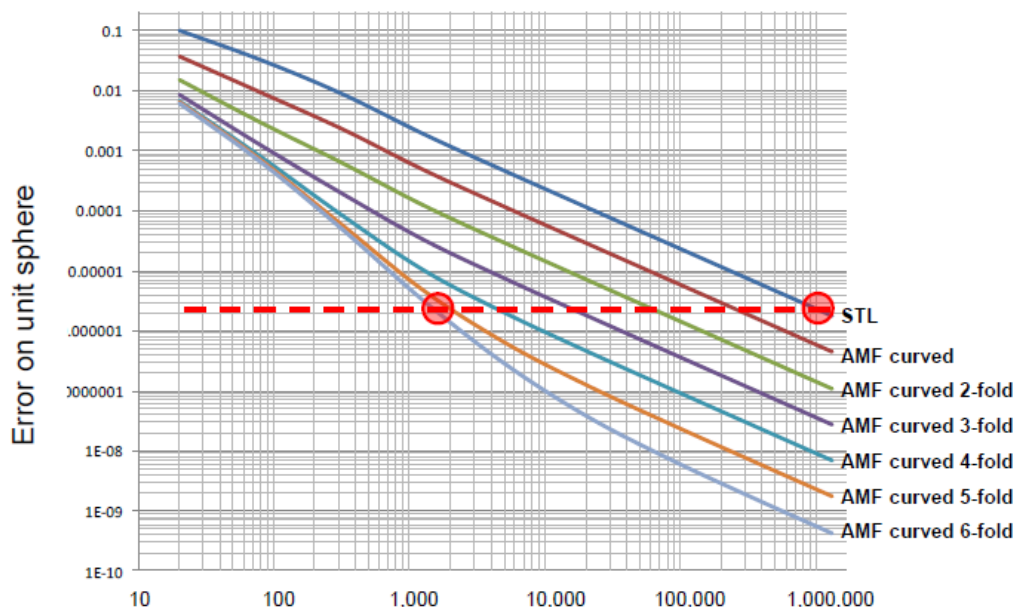
Durch diese gebogenen Dreiecke kann eine wesentlich bessere Annäherung an die exakte Geometrie erreicht werden. Während des Importvorganges zum Slicing werden die gebogenen Dreiecke aufgrund der Kompatibilität zu Maschinen und

Software rekursiv, temporär in mehrere planare Dreiecke umgewandelt, siehe Abbildung 59. Die Rekursion muss dabei genau 5 betragen, dies bedeutet, dass ein gebogenes Dreieck temporär in 1024 flache Dreiecke aufgespaltet wird. Die fertigende Software bestimmt daher automatisch die Anzahl der gebogenen Dreiecke, welche notwendig ist, um unter Berücksichtigung der Unterteilung in 5 Stufen von flachen Dreiecken, die erwünschte Toleranz zu erreichen (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017).



**Abbildung 59: Rekursion beim AMF Format (lipson, n.d.)**

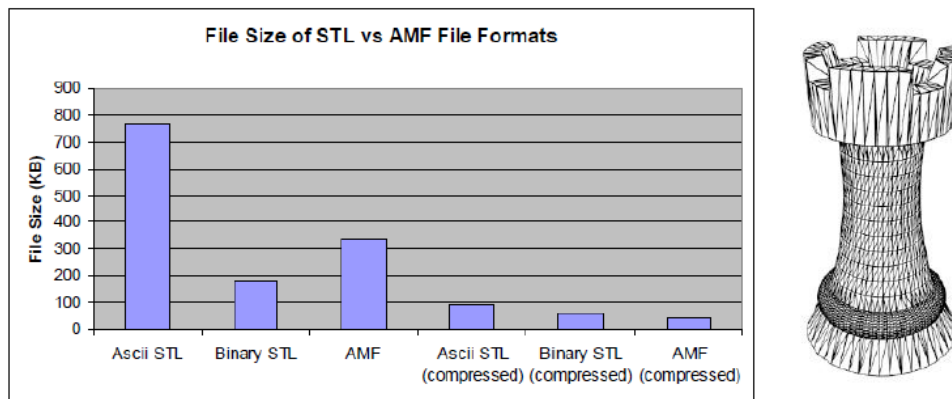
(lipson, n.d.) hat untersucht wie sich der Sekantenfehler in Prozent des Durchmessers einer Kugel bei verschiedenen Rekursionsstufen und im Vergleich zum STL entwickelt. In Abbildung 60 erkennt man, dass bei Verwendung von AMF 5-fach Rekursion um fast drei Zehnerpotenzen weniger Dreiecke notwendig sind, den gleichen Sekantenfehler zu erreichen. Weiters ist ersichtlich, dass bei gleicher Dreiecksanzahl ein um drei Zehnerpotenzen geringerer Fehler durch Verwendung von AMF entsteht.



**Abbildung 60: Fehlervergleich AMF vs. STL (lipson, n.d.)**

Wird eine Kugel mit 10cm Durchmesser bei einem erlaubten Sekantenfehler von 10 µm betrachtet, benötigt diese als STL 20480 Dreiecke in Form eines komprimierten binären STL was zu einer Größe von 500 Kbyte führt. Ein AMF-File benötigt für die

gleichen Genauigkeit 320 gebogene Dreiecke mit einer komprimierten Dateigröße von 10KByte. In Abbildung 61 ist ein weiterer Vergleich bezüglich Dateigröße zu sehen.



**Abbildung 61: Dateigrößenvergleich AMF vs. STL (lipson, n.d.)**

Optional können Elemente `<material>` definiert und mit der entsprechenden ID versehen einem `<volume>` zugeordnet werden. Elemente `<material>` können anschließend mit den untergeordneten Elementen `<colour>` oder `<metadata>` Materialeigenschaften und Erscheinungsfarbe zugewiesen werden. Das Element `<colour>` (enthält RGB-Werte) muss dabei jedoch nicht unbedingt ein Unterelement von `<material>` sein, sondern kann auch einem `<volume>`, `<triangle>` oder `<vertex>` direkt zugewiesen sein.

Darüber hinaus ist es möglich gradierte Bauteile zu definieren. Dies ist mit dem Element `<composite>` möglich, indem entweder konstante Werte angegeben werden, oder von  $x$ ,  $y$  und  $z$  abhängige Gleichungen (Mischverhältnisse) verwendet werden. Es ist ebenfalls eine komplexere koordinatenabhängige Mischung, welche zu periodischen oder nicht periodischen Unterstrukturen (Gitterstrukturen) führen kann möglich.

Weitere Möglichkeiten bieten die Unterstützung von 2D und 3D Texturen mittels `<texture>`, welche einem Dreieck mittels `<texmap>` zugeordnet werden kann.

Bei AMF können auch Positionierungsdaten gespeichert werden. Mittels `<constellation>` können mehrere Objekte zusammen angeordnet werden um die Packungseffizienz zu erhöhen, mit dem Unterelement `<instance>` wird die Verlagerung und Rotation des Objekts zur Ursprungsposition festgelegt. Für die exakten Konventionen sei auf die (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017) verwiesen (lipson, n.d.) (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017).

### Weiterentwicklungen AMF

Nach dem Erscheinen des AMF Formates im Jahr 2013, beschäftigten sich einige Forschungsarbeiten mit der Verbesserung der Algorithmen für die Implementierung

der gebogenen Dreiecke. AMF basiert dabei auf der mathematischen Formulierung der Hermite curves um gebogene Dreiecksseiten zu erzeugen. Bei Forschungen von (Yu et al., 2017) wurden jedoch Schwächen und Inkonsistenzen dieser Formulierung vor allem in Bezug auf die Eckpunktnormalen und -tagenten festgestellt. Sein Forschungsansatz beruht auf der Triangulation mit sogenannten Bezier-Patches, welche auf einer kontinuierlichen exakten Repräsentation in jedem Punkt beruhen und somit die Rekursion des Standard AMF überflüssig machen. Die Formulierung ist dabei komplett mit AMF kompatibel auf deren Input aufbauend. Daher ist es möglich den Ansatz direkt in das AMF Format als Erweiterung zu integrieren. Dies führt zwar bei ähnlichen Ressourcen wie bei der Standard AMF Formulierung zu besserer Annäherung an die exakte Kontur, jedoch ergeben sich Folgeprobleme beim Slicingprozess der gebogenen Bezier-Dreiecke. Horizontale Schnitte solcher Bezier-Patches machen die Entwicklung neuer Slice Algorithmen notwendig, welche weitere Forschung und in weiterer Folge Verbreitung in der Industrie bedürfen. Für nähere Informationen dieser Bezier-Patch Formulierung sei auf die Arbeit von (Yu et al., 2017) verwiesen.

Da das Slicen mit Bezier-Patches nicht analytisch, sondern nur numerisch durchgeführt werden kann, was zu zusätzlichen Fehlern führt, wurde weiters eine Formulierung mittels sogenannter Steiner Patches entwickelt. Steiner patches sind deshalb interessant, weil numerische stabile Slice Algorithmen entwickelt werden können, wie etwa jene von (Paul and Anand, 2015). Diese Entwicklungen sind jedoch als eigenes File Format zu sehen und nicht mit der AMF Formulierung kompatibel. (Paul and Anand, 2015) haben gezeigt, dass durch die Verwendung von Steiner-Patches der Sekantenfehler im Vergleich zu STL um 60-70 Prozent reduziert werden konnte und im Vergleich zu AMF bei gleicher Genauigkeit die Anzahl der Facetten reduziert werden konnte. Für genauere Informationen zu mathematischen Formulierung und weiterer Detailergebnisse siehe die Arbeit (Paul and Anand, 2015).

### 4.1.3 3MF

AMF hat sich auch nach mehreren Jahren am Markt noch nicht durchgesetzt und konnte STL nicht verdrängen. Nach dem Erscheinen von AMF kam Bewegung in die Anstrengungen, neue und einheitliche Formate zu entwickeln, auch AMF konnte die Anforderungen der Industrie für zukünftige durchgängigere Workflows nicht erfüllen. Ein Konsortium aus führenden Herstellern aus dem Bereich additive Manufacturing entschloss sich, unter der Federführung von Microsoft, zur Entwicklung eines neuen Dateiformates unter der Bezeichnung 3MF, welches die Anforderungen der Industrie erfüllen soll. Zuletzt konnten sogar ASTM, die Entwickler von AMF, für das Konsortium gewonnen werden (Chua et al., 2017).

Microsoft Vision ist es, eine durchgängige Prozesskette zu schaffen, wie in Abbildung 62 dargestellt. Dabei soll ein maschinenabhängiger Printdriver das Slicing und Filling übernehmen und alle vorgelagerten Prozesse maschinenunabhängig funktionieren. Die angedachte Vorgangsweise ähnelt dabei sehr stark dem 2D Druck. Durch die Formulierung des 3MF Formates soll die Implementierung dieses Prozesses unterstützt werden und die vielen Formatumwandlungsschritte und Aneinanderreihung von Softwarelösungen gegengesteuert werden (Allen, n.d.).

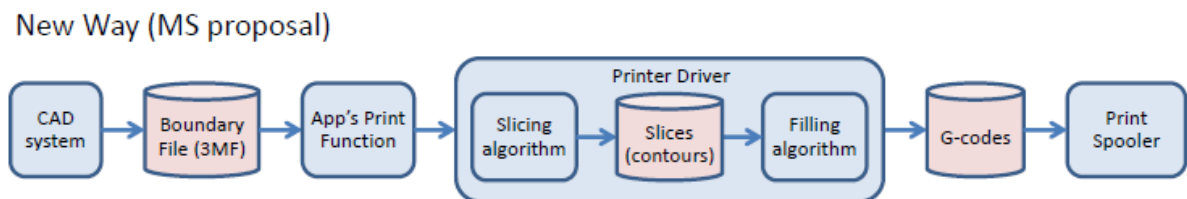


Abbildung 62: Angestrebte Prozesskette 3MF-Format (Allen, n.d.)

### Aufbau 3MF

3MF ist ebenfalls ein auf Facettenbeschreibung der Oberfläche basierendes und in XML formuliertes Format, welches laut ("3mf Specification," n.d.) nach folgenden Grundprinzipien konzipiert wurde.

**Komplettheit:** Beinhaltet alle notwendigen Informationen über Model, Material und Eigenschaften in einem Archiv.

**Lesbarkeit:** Leicht lesbar durch Verwendung von weit verbreiteten Strukturen wie OPC<sup>10</sup>, ZIP<sup>11</sup> und XML<sup>12</sup>.

**Einfach:** Kurze und klare Spezifikationen um die Entwicklung zu vereinfachen und zu beschleunigen.

**Extensible:** Durch die Nutzung von XML werden sowohl private oder öffentliche Erweiterungen möglich.

**Eindeutig:** Klaren Sprachen- und Konformitätstest stellen die Konsistenz des Files zwischen digitalen und physischen Komponenten sicher.

**Unabhängigkeit:** Die Verwendung und die Implementierung von 3MF wird immer unabhängig von Gebühren, Patenten und Lizenzen bleiben.

3MF verwendet die OPC (open packaging convention) als container technology. Dabei können mehrere XML Dateien im ZIP Archiv getrennt voneinander abgespeichert werden, was zu kleineren Dateigrößen führt. Gleichzeitig können aber Relationen zwischen den Dateien bestehen.

<sup>10</sup> Open Packaging Convention

<sup>11</sup> Komprimierte Datei

<sup>12</sup> Extensible Markup Language

Der wesentliche Bestandteil des Packages ist das 3D Model, welches unter dem Element <model> die Beschreibung von einem oder mehreren 3D Objekten enthält, siehe Abbildung 63.

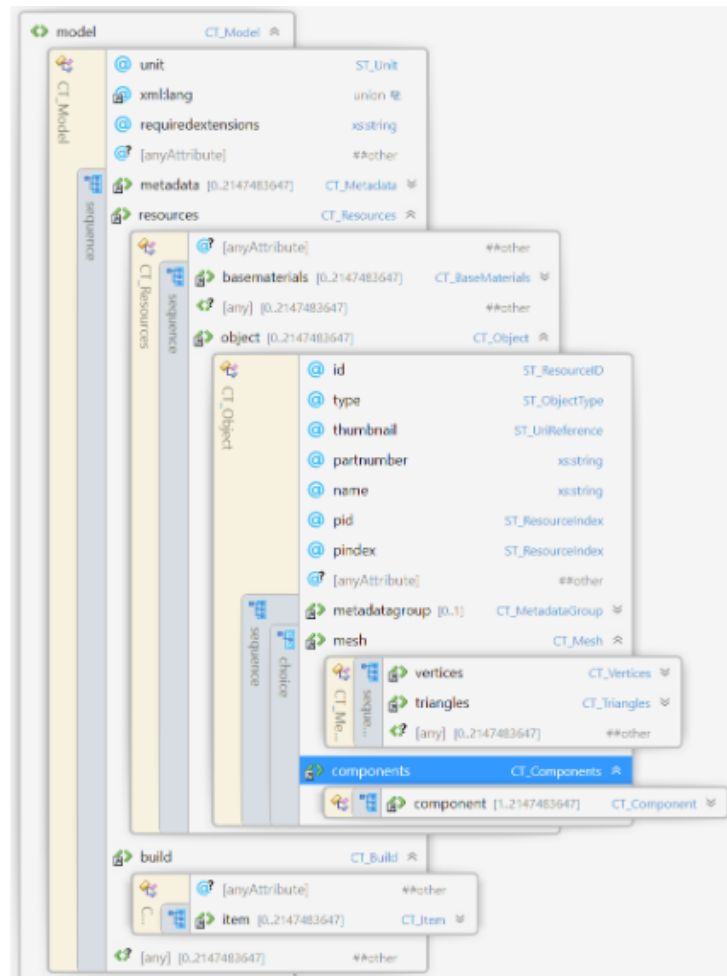
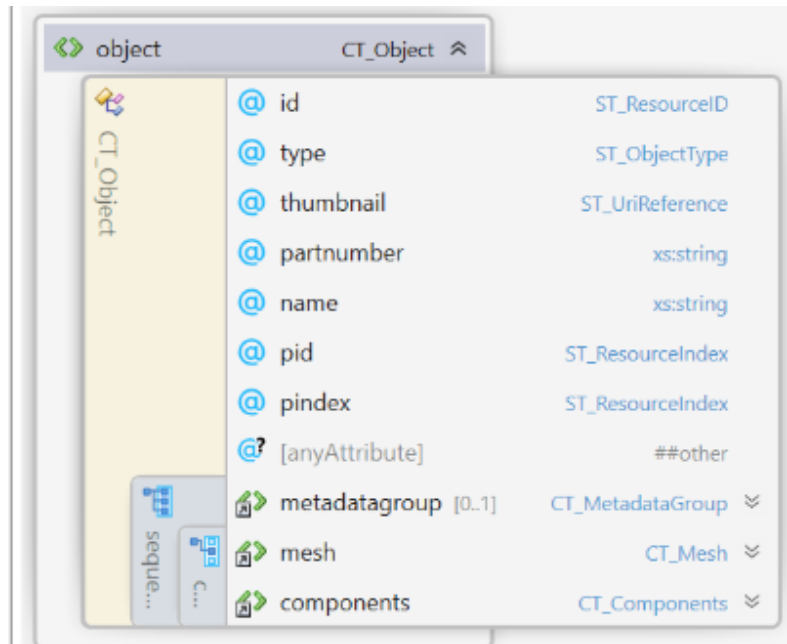


Abbildung 63: 3MF-Format Model-Beschreibung ("3mf Specification," n.d.)

Ein Element <model> besteht aus den 2 Hauptbestandteilen <resources> und <build>. <resources> beinhaltet dabei die komplette Definition des 3D Objekts, wie etwa material definition als <basematerial> bzw. ein oder mehrere <object> Elemente, welche die herstellbaren 3D Elemente beschreiben. Um ein <object> druckbar zu machen, muss es jedoch in ein <item> Element, Unterelment von <build> referenziert sein. Die Definition von <objekt> als resouce dient hauptsächlich dazu, mehrere Objekte mittels <component> zusammenzufassen und so eine Modularisierung im Sinne von kleineren Dateigrößen zu verwirklichen ("3mf Specification," n.d.) .



**Abbildung 64: Object Element des 3MF-Formats ("3mf Specification," n.d.)**

Das <object> beinhaltet nun die eigentliche Definition des 3D Körpers mit <mesh>, siehe Abbildung 64. In <mesh> werden einerseits mit <vertices> die Eckpunkte definiert und mit einer ID versehen und andererseits unter <triangle> die Dreiecke mit jeweils 3 Eckpunkten beschrieben. Wobei die Eckpunkte gegen den Uhrzeigersinn geordnet sind, damit die Flächennormalen nach außen zeigen. Die unter <basematerial> gespeicherten Materialien <base> können sowohl einem <object> wie auch einem <triangle> zugewiesen werden ("3mf Specification," n.d.).

Das Element <component> stellt einen Container dar, um andere <objects> unter Anwendung einer Matrix Transformation <transform> zum aktuellen Objekt hinzufügen zu können. Um ein Beispiel zu nennen, kann etwa zu einem Objekt Autokarosserie vier Mal das Objekt Reifen hinzugefügt werden und diese Reifen durch eine Matrix-Transformation an die richtige Stelle in Bezug auf die Karosserie gebracht werden. Auf diese Weise wird erreicht, dass man auch sehr komplexe Bauteile kompakt abspeichern kann ("3mf Specification," n.d.).

Auf dieser Grundspezifikation von 3MF aufbauend wurden in den letzten Jahren einige Erweiterungen entwickelt.

Materials and Properties extension: Dadurch wurde das <resources> Element um einige <non-object> Elemente erweitert. Dazu zählen das Containerelement <colorgroup>, welcher Elemente <color> enthält, die aus RGB Definition bestehen und auf andere Elemente im Objekt referenziert werden können.

Mit Hilfe des neuen Elementes <tex2dgroup> können Texturen wie etwa Bilder auf Objekte z.B. Dreiecke referenziert werden.



Das Element `<compositematerial>` macht es möglich Materialmischungen aus unter `<basematerial>` definierten Materialien zu beschreiben. Mit dem Unterelement `<composite>` wird das Mischungsverhältnis der einzelnen Bestandteile beschrieben ("3mf Specification," n.d.).

Production extension: Mit dieser Erweiterung wird es möglich, Model File separat von Root Model (Grundmodell) abzuspeichern und dem `<build>` Element im Root Model trotzdem den Zugriff auf dieses separate File zu ermöglichen. Damit soll vor allem bei der Produktion von großen Stückzahlen Vereinfachungen geschaffen werden, indem Druckaufträge zerteilt und in verschiedenen XML Files, innerhalb des Packages, gespeichert werden können. Dadurch ergibt sich auch der Vorteil, dass diese Aufspaltung der Daten ressourcenschonender ist, im Vergleich zur Verarbeitung von einzelnen XMLs, die mehr als 500MB an Größe erreichen können (Scott, 2016).

Slice extension: Diese Erweiterung ermöglicht es neben dem 3D mesh auch eine 2D Schichtrepräsentation der Geometrie zu erzeugen und diese innerhalb des Packages zu speichern und zu verknüpfen. Dazu wird ein neues `<resouce>` Element `<slicestack>` eingeführt, indem mittels Unterelement `<slice>` die Schichtdarstellung mittels Punktverbindungen als `<segment>` oder geschlossenem Polygonzug `<polygon>` gespeichert werden. Da die Slicedatei relativ groß werden kann, ist es möglich, die Datei in mehrere XML Files aufzuspalten und diese mit `<sliceref>` zu referenzieren ("3mf Specification," n.d.).

Beam lattice extension: Da Gitterstrukturen mittel Mesh Repräsentation sehr aufwendig sind, werden in dieser Erweiterung feine Gitterstrukturen mittels `<beam lattice>` Elementen dargestellt (Abbildung 65 oben). Diese sind auf Kreisquerschnitte begrenzt, um den Spagat zwischen Komplexität und Funktion zu schaffen. Grundlage dazu bildet `<beamlattice>` als Unterelement des `<mesh>`. Die Elemente `<beam>` stellen nun die einzelnen Gitterstreben dar, welche durch 2 Eckpunkte definiert sind. Außerdem ist ein Anfangs- und Endradius einstellbar, sowie der sogenannte cap mode der erzeugten Mantelfläche, siehe Abbildung 65 (unten). Neben `<beam>` enthält das Element `<beamset>` Infos darüber, wie die `<beam>` Elemente gruppiert und organisiert sind. Für die exakte Syntax sein der 3MF Spezifikationen auf 3mf.com verweisen ("3mf Specification," n.d.).

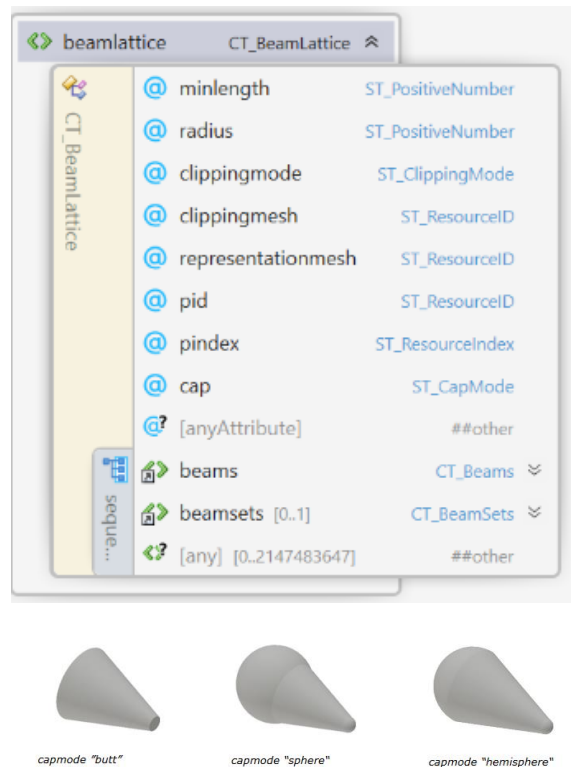


Abbildung 65: Aufbau beamlattice-Element (oben), cap-mode (unten) ("3mf Specification," n.d.)

#### 4.1.4 VRML und Ply

Neben den erwähnten Dateiformaten existieren noch eine Reihe von anderen Facetten Formaten, welche von den meisten Softwarelösungen unterstützt werden, jedoch im Vergleich eine geringere Rolle im Bereich AM spielen.

Zu den bedeutendsten Vertretern in diesem Zusammenhang zählen Ply (polygon file format) und VRML (Virtual reality Modeling language). Bei diesen beiden Formaten handelt es sich um plattformunabhängige 3D Bildformate, welche ursprünglich für die Darstellung von Avataren etwa in Computerspielen entwickelt wurden. (VDI 3405, 2014) Sie zeichnen sich vor allem im Bereich der Farbdarstellung und der Hinterlegung weiterer Informationen zusätzlich zur Geometrie aus und stellen daher für viele Anwendungen die bessere Alternative zu STL dar (Gebhardt, 2013 S.43).

Der Aufbau der beiden Formate ähnelt sich sehr stark, er basiert einerseits auf einer Vertices-list (Eckpunktliste) mit den entsprechenden Koordinaten und einer Face-list (Flächenliste), welche die Eckpunkte der entsprechenden Fläche zuweist. Die Geometrie wird dadurch redundanzfrei abgespeichert. Des Weiteren können Zusatzeigenschaften wie Transparenz, Kanten, Zellen oder Materialien auf Vertex- oder Face-Ebene übergeben werden (Danjou and Koehler, 2008). VRML beschreibt 3D Objekte und Szenarien dabei in objektorientierter Weise, ähnlich zu einer Programmiersprache. Die Grundelemente stellen die sogenannten Knotentypen dar.

Gestaltknoten, zur Darstellung von geometrischen Grundkörpern, Eigenschaftsknoten, für Farbe, Textur (Material), Licht- und Kameraknoten für perspektivische Aspekte. Mittels Gruppenknoten ist eine hierarchische Anordnung möglich (VDI 3405, 2014).

Beide Formate können als lesbare ASCII Datei erzeugt werden, wobei eine komprimierte binäre Darstellung nur für Ply existiert. VRML wird mit dem Dateikürzel .wrl bzw. bei verpackten Dateien als .wrz abgespeichert (VDI 3405, 2014 S. 27ff). Bei hoher Objektanzahl können VRML Dateien daher enorme Größen annehmen.

Nachteil des ply Formates ist, dass pro Datei nur ein Objekt abgespeichert werden kann, und das sich anschließende Postprocessing als komplex darstellt, weil die Datei komplett überarbeitet werden muss und nicht abschnittsweise angepasst werden kann (Heiko and Wirth, n.d.).

Vor allem VRML wird jedoch von vielen Seiten das Potential zugesprochen, STL als Standardschnittstelle abzulösen (Gebhardt, 2013 S. 43ff).

## **4.2 CAD Formate/Schnittstellen**

Mit der Vielfalt an CAD-Softwaresystemen geht auch eine große Anzahl an Dateiformaten einher, da beinahe jeder Hersteller sein eigenes Dateiformat verwendet. Da diese untereinander nur bedingt kompatibel sind, existieren neutrale Schnittstellenformate, welche den Austausch zwischen verschiedenen CAD Systemen oder, wie in der Praxis relevanter, mit externer Simulationssoftware bzw. Datenaufbereitungsprogrammen für additive Manufacturing ermöglichen. Fehlt etwa ein direktes Schnittstellenmodul in der CAD Software kann der Austausch über ein neutrales Format zu einer anderen Softwarelösung erfolgen, um die Konvertierung in eine Facettendatei zu ermöglichen. Auch für Anpassungen vor der Fertigung eignen sich derartige neurale Schnittstellen wesentlich besser als Facetten Formate, welche nur mit speziellen Softwarelösungen (z.B. 3 matic) und in begrenztem Ausmaß bearbeitbar sind (Gebhardt, 2013 S. 28). Die wichtigsten neutralen Schnittstellen werden im Folgenden erläutert.

### **4.2.1 IGES (Internal Graphics Exchange Spezifikation)**

Seit den 80er Jahren stellt IGES eine Standardschnittstelle für den Austausch von CAD Daten dar. IGES wurde hauptsächlich für die Übergabe von Geometrieinformationen erzeugt und bietet die Möglichkeit sowohl 2D Zeichnungsmodelle, 3D Flächenmodelle (Bezier- bzw. NURBS Fläche) wie auch Volumsprimitive und eine Reihe von anderen Geometrieelementen darzustellen. (VDI 3405, 2014 S. 24ff) Ab der Version 5.3 können darüber hinaus auch nicht-

geometrische Informationen wie Texte, Bemaßungen, Toleranzen, etc. übergeben werden. Es handelt sich dabei um eine mathematisch exakte Darstellung der Geometrie, eine Unterstützung von Facettendarstellung fehlt. Im Zusammenhang mit der additiven Fertigung bedeutet dies, dass nur sehr wenige Hersteller und Anlagen, wie etwa die Stratasys 3D Serie, eine direkte Verarbeitung von IGES in Ihrer Maschinensoftware ermöglichen. (Chua et al., 2017) Weitere Nachteile sind die redundante Informationsspeicherung und die sehr langsame Verarbeitung von großen Datenmengen. (Danjou and Koehler, 2008) Die aktuelle IGES Version 6. stellt auch die letzte Version dar, die Entwicklung wird im Rahmen von STEP weitergeführt (VDI 3405, 2014).

#### **4.2.2 STEP (Standard for the Exchange of Product model data)**

STEP ist ein von ISO unter ISO 10303 entwickeltes CAD Format, welches weit über die Beschreibung von Geometriedaten (mit Zusätzen), wie bei IGES hinausgeht. Vielmehr dient es zur Beschreibung und Austausch von Informationen, welche den gesamten Produktlebenszyklus betreffen. STEP hat heute über 40 verschiedene Teile, unter anderem zur Übertragung von Produktdaten wie Farben, Schrift und Layout, oder Informationen zu Fertigungsmethoden und Werkzeugen, Materialdaten, Versionsnummer etc. (Chua et al., 2017) Die Entwicklung schreitet jedoch stetig voran und wird in Form von Applikationsprotokollen zur Verfügung gestellt. (Danjou and Koehler, 2008) Das am weitest verbreitete Applikationsprotokoll ist AP 203, die neuste Entwicklung aus dem Jahr 2014 ist AP 242, welches unter anderem erstmals Triangulation ermöglicht. Neben dem Aspekt, dass STEP eine Vielzahl an Informationen enthält, welche für den AM Prozess nicht notwendig sind, stellen sich bei der direkten Verarbeitung von STEP Dateien bis heute ähnliche Probleme wie bei IGES. Auch wenn es Bestrebungen in diese Richtung gibt, würden neue Algorithmen, Interpreter sowie Applikationsprotokolle für die direkte additive Fertigung benötigt werden (Chua et al., 2017).

### **4.3 Slicing Formate**

Wie schon an anderer Stelle erwähnt, basieren alle heutigen Anlagen und Softwaresysteme im Zusammenhang mit additiver Fertigung auf der Überführung in ein Facetten Dateiformat, welches anschließend beim „Slicing“ in ein Schichtdatenformat konvertiert wird und mit zusätzlichen Fertigungsinformationen von der Maschine verarbeitet werden kann. Das Slicing von Facettengeometrien wie STL stellt sich durch ihre einfache Dreiecksbeschreibung als besonders vorteilhaft dar. So kann an jeder beliebigen Z Koordinate problemlos geschnitten werden,

wodurch ein sogenannter Konturzug (Polylinie) mit der entsprechenden Höhenkoordinate entsteht (Gebhardt, 2013 S 40ff).

Grundsätzlich bieten auch viele CAD Systeme die Schnittstelle an, um direkt am mathematisch exakten Bauteil eine Schichtgenerierung durchzuführen. Warum sich diese Vorgangsweise bis dato nicht etablieren konnte, ist dem Grund geschuldet, dass im Gegensatz zu STL eine Skalierung, Positionierung oder sonstige Optimierung der Schichtdaten nicht mehr möglich ist, da kein Bezug zur Höhenkoordinate vorhanden ist (Gebhardt, 2013).

### CLI (Common Layer Interface)

Bei CLI handelt es sich um eine anlagenneutrale Schnittstelle zur Übergabe von Schichtdaten. Die Beschreibung erfolgt im ASCII Format, wie in Abbildung 66 dargestellt.

:	:
\$\$UNIT/0,01000	: Angabe aller Werte in 1/100 mm
:	:
\$\$LAYER/100	: Z-Höhe der Schicht 1,00 mm
\$\$POLY LINE/1 1,5,1000,1000,11000,1000,11000, 11000,1000,1 1000,1000,1000	Außenkontur (Gegenuhrzeigersinn)
\$\$POLY LINE/1,2,5,3500,3500,3500,8500,8500,850 0,8500,3500,3500,3500	Innenkontur (Uhrzeigersinn)
:	:

**Abbildung 66: Formulierung CLI Format (Gebhardt, 2013 S 41).**

Jede Schicht enthält eine Höhenkoordinate und eine Polyline mit X- und Y-Koordinaten der Konturpunkte gegen den Uhrzeigersinn für die Außenkontur und im Uhrzeigersinn für die Innenkontur. Dabei muss der Anfangs- und Endpunkt immer ident sein, um eine geschlossene Kontur zu erzeugen. Es können dabei beliebig viele Konturen existieren, zwingend notwendig ist jedoch eine Außenkontur. Trotz der anlagenneutralen Formulierung wird CLI von den wenigsten Anlagen unterstützt, was die Konvertierung in ein anlagenspezifisches Format notwendig macht (Gebhardt, 2013 S 40ff).

### Anlagenspezifische Schichtformate

Beinahe alle Hersteller verwenden eigene Schichtinformationsformate, welche neben den bei CLI erläuterten geometrischen Grunddaten weitere fertigungsspezifische und anlagenspezifische Zusatzinformationen enthalten. Die genaue Syntax dieser Formate ist jedoch meist nicht bekannt. Die Konvertierung in diese Formate ist für den additiven Fertigungsprozess zwingend notwendig und wird entweder durch die Frontend Softwarelösung des Anlagenherstellers oder durch die vorgelagerte AM Software eines Drittanbieters, falls diese die Möglichkeit bietet, durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Schichtformate der bekanntesten Anlagenhersteller aufgelistet (Gebhardt, 2013 S 40ff).

**Tabelle 9: Übersicht Slice-Formate verschiedener Hersteller ("Netfabb-File-Formats," 2017)**

Slice format	Description	Import	Export	Used by the following AM machines
SLI	Slice Layer Interface	✓	✓	EOS
CLI	Common Layer Interface	✓	✓	EOS
SLC	SLC	✓	✓	3D Systems, Arcam
SSL	Stratasys Layer	✓	✓	Stratasys
ABF	Arcam Build File		✓	Arcam
SLM	SLM Build File	✓	✓	SLM Solutions
MTT	SLM Build File	✓		Renishaw
CLS	Concept Laser Slice	✓	✓	Concept
USF	Universal Slice File	✓	✓	
CLF	Common Layer File	✓	✓	Arcam

### Slicing Formate der DMG MORI Lasertec SLM 30

Systemintern, also zwischen Frontendsoftware (R Designer) und Maschinensoftware (R Operator) wird das .RDN Format verwendet. Die .RDN Datei wird dabei ausschließlich durch die Frontend Software erzeugt und enthält neben den Schichtinformationen auch das Hatching und alle für die Fertigung notwendigen Laserparameter. Werden mehrere Bauteile im Bauraum positioniert, generiert die Frontendsoftware mehrere .RDN Dateien, welche an die Maschinensoftware übergeben werden. Zusätzlich dazu wird in diesem Fall noch eine .fas Text Datei erzeugt, welche die Positionskoordinaten der einzelnen Bauteile im Bauraum enthält.

Für den Fall, dass eine Schichtdatei aus einer Drittsoftware direkt in die Frontend Software geladen werden soll, ist dies nur im .F+S Format möglich, welches unter anderem von Materialise Magics unterstützt wird. Wie schon zuvor erwähnt, ist bei dieser Vorgangsweise jedoch eine Manipulation in der Frontend Software nicht mehr möglich.

## 4.4 Softwarelösungen

Nachdem die einzelnen Schritte der virtuellen Produktentwicklung im Zusammenhang mit der additiven Fertigung in Kap. 3 definiert wurden, soll nun die am Markt verfügbare Software analysiert und klassifiziert werden, um anschließend effiziente Workflows zu schaffen. Da die meisten Softwarelösungen auf bestimmten Schritten des Produktentwicklungsprozesses spezialisiert sind, liegt die Herausforderung vor allem darin, die geeignete sequenzielle Anordnung der Softwaremodule zu definieren.

In Bezug auf die additive Fertigung können im Wesentlichen 3 Softwaregruppen identifiziert werden, welche an der Produktentstehung beteiligt sind, siehe Abbildung 67.

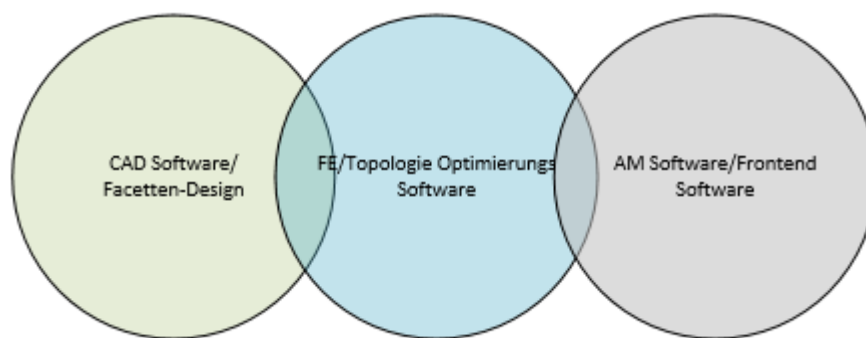


Abbildung 67: Softwaretypen im PEP

Es ist jedoch zu bemerken, dass diese Kategorisierung durch Entwicklungen wie Simulation Driven Design immer mehr verschwimmt und für diese Softwareanalyse nur als Ausgangspunkt dient. Im Folgenden wird die aktuelle Entwicklung näher betrachtet und die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Programme vorgestellt.

### 4.4.1 CAD Systeme

Unabhängig von den unterschiedlichen Modellierungsprinzipien der CAD Software, welche in weiterer Folge erläutert werden, stellt die dreidimensionale Modellierung die Basis der Produktentwicklung dar. Dies gilt besonders für die additive Fertigung, da die Generierung der Schichtinformationen direkt vom 3D Modell erfolgt.

#### Parametrische CAD Software

Dabei handelt es sich um klassische, lange am Markt etablierte CAD-Softwarelösungen. Diese werden auch oft feature basierte oder history basierte Systeme genannt. Bedeutende Vertreter sind etwa Autodesk Inventor, Siemens NX oder Dassault Systems Catia. Die Geometrie solcher Systeme basiert auf variablen und geometrischen Beziehungen innerhalb des Modells. Die Manipulation des Modells erfolgt schrittweise und entlang von Bauteilmerkmalen wie z.B. Features. Durch die im Laufe der Konstruktion geschaffenen Abhängigkeiten werden solche

CAD Systeme auch historisch basierte Systeme genannt. Die Anpassung einzelner Features und Variablen ist bei dieser Art des Konstruierens besonders einfach und ist besonders zur Ableitung verschiedener Modellvarianten oder Produktfamilien vorteilhaft. Nachteile dieser Systeme ist jedoch, die Beschränktheit in den Manipulationsmöglichkeiten am Volumenkörper. Diese sind bei den meisten Softwarelösungen auf einfache Operationen wie etwa Rotation oder Extrusion limitiert. Komplexe Features wie Freiformflächen oder bionische Formen sind somit nur sehr schwer und mit großem Aufwand möglich (Schmidt, 2016 S.46).

Zur Ausnutzung der Potentiale der additiven Fertigung sind diese Beschränkungen oft suboptimal und daher werden parametrische CAD Lösungen meist lediglich als Werkzeug zur Konstruktion von simplen Modellen verwendet, welche anschließend als Basis für die folgende Topologie-Optimierungen dienen. Darüber hinaus werden natürlich auch bereits bestehende parametrisch konstruierte Bauteile als Input für die Topologie-Optimierung verwendet (Langefeld et al., 2016).

### **Direkt Modeling Tools bzw. NURBS CAD Software**

Um diese Einschränkungen zu umgehen haben sich direkt Modellierungslösungen etabliert. Dabei handelt es sich um Systeme, bei denen Geometrien direkt, ohne vorheriges definieren von Features oder Abhängigkeiten, erstellt werden. Bei den meisten Softwarevarianten dieser Art kommen sogenannte NURBS-Flächen oder PolyNURBS als Basis für die Modellierung zum Einsatz. Die Abkürzung NURBS steht dabei für non rational B Spline, darunter versteht man mathematisch definierte Flächen, welche durch ein Netz aus Kontrollpunkten beschrieben werden. Diese Kontrollpunkte können nun beinahe beliebig manipuliert werden, wodurch eine besonders große Gestaltungsfreiheit realisiert werden kann. Oft wird diese Art der Modellierung mit jener von Plastilin oder Knetmasse verglichen. Anwendung finden solche CAD Systeme vor allem im Industrial-Design oder auch im Automobil- und Schiffsbau, um komplexe Freiformflächen mathematisch korrekt zu beschreiben (Ault and Phillips, n.d.).

Die geometrische Freiheit stellt dabei eine Parallele zur generativen Fertigung dar, weshalb sich NURBS basierte Systeme besonders für die Umsetzung geometrischer Konzepte aus der Topologie-Optimierung eignen. Vertreter dieser Gattung sind etwa Solidthinking Evolve oder NX Shape.

### **Anwendungsbeispiele**

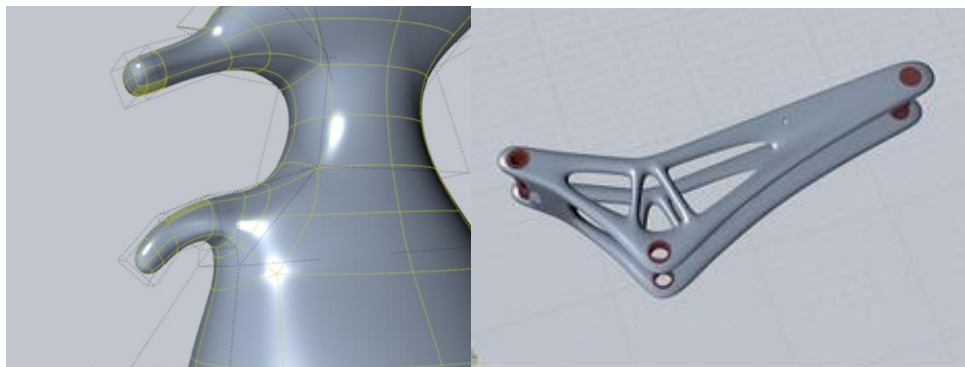
Die meisten CAD Softwarehersteller haben sowohl klassische, parametrische CAD Systeme, sowie auch NURBS basierte Systeme im Angebot. Wobei erstere bevorzugt Ingenieure ansprechen sollen und zweitere eher auf die Benutzung von Designern ausgerichtet sind. Die meisten Hersteller versuchen jedoch, die zwei Modellierungsvarianten zu verbinden und so finden sich in einem Großteil der



verfügbaren parametrischen CAD Software Möglichkeiten zur Modellierung von Direkt Modelling bzw. NURBS. Je nach Hersteller unterscheidet sich jedoch der Grad der Einbindung, von rudimentären Möglichkeiten bis hin zu hochentwickelten Varianten.

Durch die Verbreitung der additiven Fertigungsverfahren von Metallbauteilen in der Industrie, wird die NURBS basierte Modellierung nun auch für die Konstruktion von Strukturbauteilen interessant. Die Anwendung bleibt also nicht länger auf Industriel-Design begrenzt, sondern wird vermehrt von Ingenieuren zur beinahe restriktionsfreien Nachbildung von Optimierungsergebnissen verwendet.

Diesem neuen Anwendungsfeld versuchen die Softwarehersteller Rechnung zu tragen, was dazu geführt hat, dass in den letzten Jahren einige Lösungen am Markt erschienen sind, welche die CAD Konstruktion mit Freiformmodellierung und Topologie-Optimierung verknüpfen. Vertreten sind etwa die Solidthinking Software Suite mit Evolve. Topologie optimierte Formen aus der Optimierungssoftware Solidthinking Inspire können so direkt zu Evolve übertragen werden, wo sie als Schablone dienen und mittels PolyNURBS nachmodelliert werden können, siehe Abbildung 68.



**Abbildung 68: Modellierung mit Evolve („Hybrid Modelling,” n.d.), („Modeling PolyNURBS n.d.)**

Andere Hersteller verfolgen im Sinne des Simulation Driven Engineering den Ansatz der sogenannter In-CAD Lösungen, bei welchen Simulationssoftware direkt in die CAD Umgebung eingebettet ist. Dies ist jedoch nicht neu und wird seit Jahren durch In-CAD FE-Analysen angeboten. Beispielhaft ist hier etwa Nastran In-CAD von Autodesk zu nennen. Die direkte Implementierung von Topologie-Optimierungsalgorithmen ist jedoch relativ neu und hat sich erst durch die Verbreitung der additiven Verfahren als sinnvoll erwiesen. Ein Beispiel für diesen Trend ist die Implementierung des sogenannten Formengenerators in Autodesk Inventor ab der Version 2016. Dieser bietet die Möglichkeit, direkt auf die, mittels Inventor erstellte Geometrie eine Topologie-Optimierung anzusetzen. Im Folgenden werden die Vorgangsweise und Möglichkeiten vorgestellt.

Um die Topologie-Optimierung mit Inventor durchführen zu können wird die CAD Modellierungsumgebung verlassen und der Formengenerator geöffnet. Die Übertragung erfolgt jedoch intern ohne Schnittstelle.

### **Inventor Formengenerator Workflow**

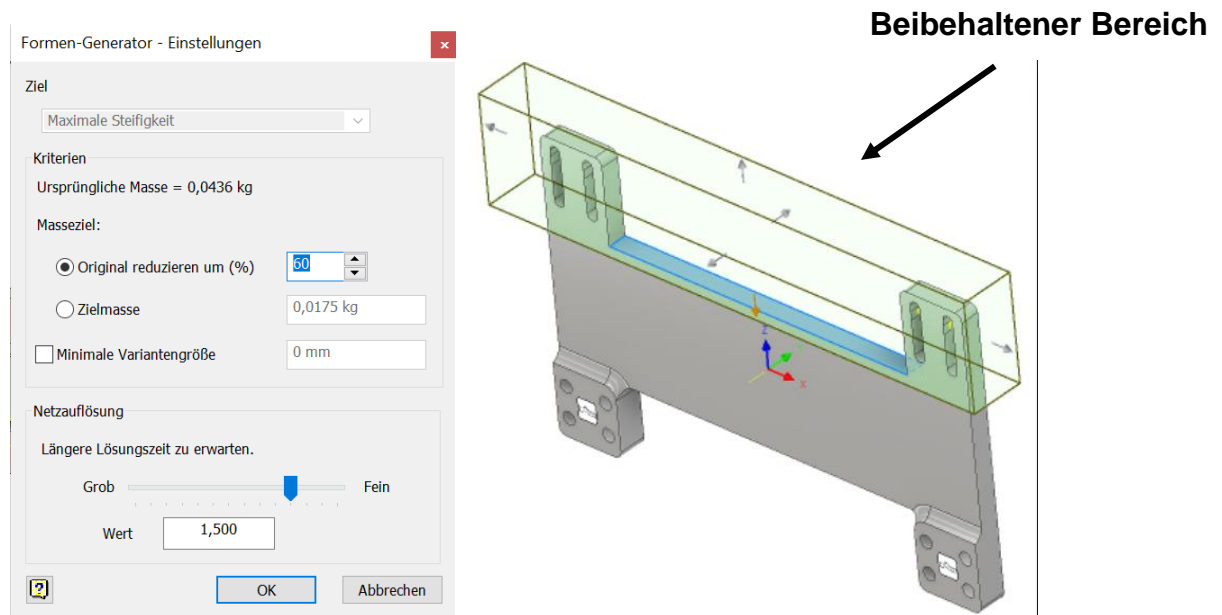
Materialdefinition: Es steht eine Materialbibliothek zur Verfügung, optional kann jedoch ein eigenes Material mittels direkter Eingabe der Materialkennwerte erstellt werden.

Lastfall: Die Lagerungs- bzw. Einspannungsbedingungen werden unter Inventor als Abhängigkeiten bezeichnet und können als festgelegt (Fixierung aller Freiheitsgrade) oder als Verankerung (Rotation möglich) bzw. reibungslos eingestellt werden. Bei den Lasten stehen Kräfte, Drücke, Drehmomente wie auch Lagerlasten zur Auswahl.

Beizubehaltende Bereiche: Bei Inventor Formengenerator stellt das gesamte Bauteil den Designbereich dar und es können gewünschte Bereiche als beizubehaltende Bereiche definiert (Non-Designbereiche) werden. Zur Definition dieser können entweder Quader -oder Zylinderkörper verwendet werden, welche die gewünschten Bereiche umschließen und manuell angepasst werden können, siehe Abbildung 69 (rechts).

Symmetrieebene definieren: Als weitere Restriktion kann man Symmetrieebenen am Bauteil definieren, welche bei der Optimierung berücksichtigt werden sollen.

Formengenerator Einstellungen: Als Optimierungsziel ist die Maximierung der Steifigkeit fixiert, daneben können Masseziel, minimale Strukturdicke (Variantengröße) und die Genauigkeit (Netzauflösung) definiert werden, siehe Abbildung 69 (links). Die Einstellmöglichkeiten sind im Vergleich zu anderen, hier noch behandelten, Softwarelösungen eher gering. Es wird vor allem auf eine einfache Bedienung und schnelle Anwendung im Zuge des Konstruktionsprozesses Wert gelegt.



**Abbildung 69: Formengenerator Einstellungen (links), Beibehaltene Bereiche (rechts)**

Nach Abschluss der Optimierung wird die errechnete Form als Facettendatei dargestellt und kann in weiterer Folge entweder als STL Datei exportiert oder in die Konstruktionsumgebung von Inventor übertragen werden, wo sie als transparente Schablone das Ausgangsbauteil überlagert. Dies bietet die Möglichkeit, das Bauteil mit den üblichen Manipulationswerkzeugen von Inventor zu bearbeiten und die optimierte Form, so weit als möglich, nachzuempfinden. Nach der Bearbeitung (Geometrierückführung) kann das Bauteil in der In-CAD Belastungsanalyse einer FE-Analyse unterzogen werden, um die optimierte Bauteilform zu überprüfen.

Autodesk Inventor stellt damit ein gutes Beispiel für ein traditionelles parametrisches CAD System dar, welches durch die Implementierung von In-CAD Simulationen eine effiziente Prozesskette, auch im Sinne der additiven Fertigung, schafft. Ein besonderer Vorteil ist die Tatsache, dass dem, mit Inventor vertrauten, Konstrukteur die Designoptimierung der Bauteile besonders einfach ermöglicht wird und somit Leichtbaupotentiale geschöpft werden können, ohne aufwendige Einarbeitung in einem NURB basierten CAD System. Es sollte jedoch bedacht werden, dass im Vergleich zu spezialisierten Topologie-Optimierungs- bzw. FE-Analyse-Lösungen die Einstellmöglichkeiten begrenzt sind (siehe Inspire, Hypermesh). Durch die nur rudimentäre Möglichkeit der Freiformmodellierung, ist man außerdem im Wesentlichen auf Standardwerkzeuge (Extrusionen etc.) zur Geometrieerstellung angewiesen, wodurch Nachteile im Vergleich zur NURB-Modellierung entstehen. Weiters gilt es zu erwähnen, dass die Optimierungsergebnisse im Vergleich zu anderen Softwarelösungen eher simpel gehalten sind und der Algorithmus kaum bionische Strukturen erzeugt, sondern sich eher an Formen orientiert, welche mit den einfachen Manipulationsmöglichkeiten umsetzbar sind.

#### 4.4.2 Softwarelösungen zur direkten Verarbeitung von Facettengeometrie

Aus den bisherigen Erläuterungen geht hervor, dass die CAD Systeme für den Produktentstehungsprozess im Bereich der generativen Fertigung besonders in der Geometrierückführung, also im Nachmodellieren der Optimierungsergebnisse, eine große Rolle spielen. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, sich bei der Konstruktion an den Optimierungsergebnissen zu orientieren, aber falls gewünscht auch davon abzuweichen. Außerdem sind als Input für viele Belastungsanalysen CAD Datensätze notwendig. Da sich die Geometrierückführung jedoch, je nach Software, relativ zeitaufwendig gestalten kann, sind Softwarelösungen entwickelt worden, welche eine direkte Weiterverarbeitung der Ergebnisse aus der Topologie-Optimierung ermöglichen. Eine Möglichkeit stellen dabei separate Softwarelösungen dar, welche sich vor allem aus Anwendungsgebieten wie der Medizin entwickelt haben, um gescannte Facettendaten zu bearbeiten, zu verbessern und nun auch für Verbesserungen von Topologie-Optimierungsergebnisse verwendet werden können.

Die Funktionen derartiger Softwaretools zur Verarbeitung von topologie-optimierten Daten sollen nun beispielhaft am Programm 3-matic von Materialise vorgestellt werden.

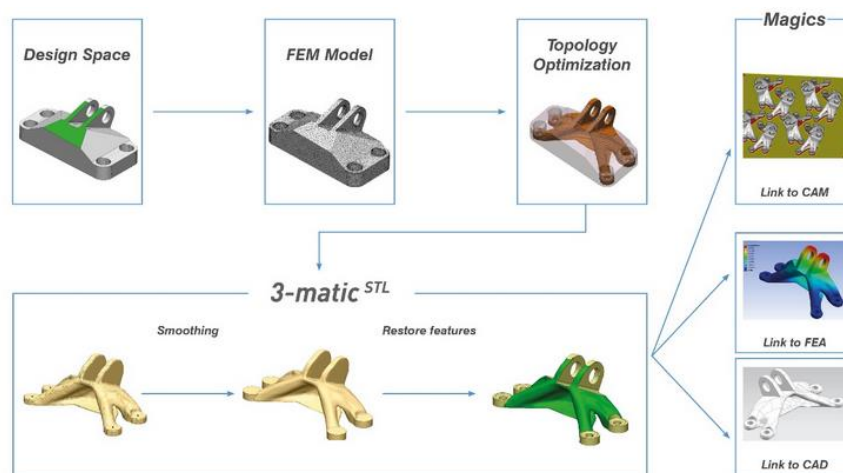


Abbildung 70: Workflow 3-matic ("Materialise 3-matic," n.d.)

Der Import der Facettendaten aus der Topologie-Optimierung erfolgt im STL Dateiformat.

Glätten: Damit können die Oberflächen der, eher grob vernetzten, Objekte aus der Topologie-Optimierung verbessert und optisch ansprechender gestaltet werden. Außerdem kann mit dem Werkzeug „lokal Glätten“ gezielter gearbeitet werden, etwa bei der Verrundung von Kanten.

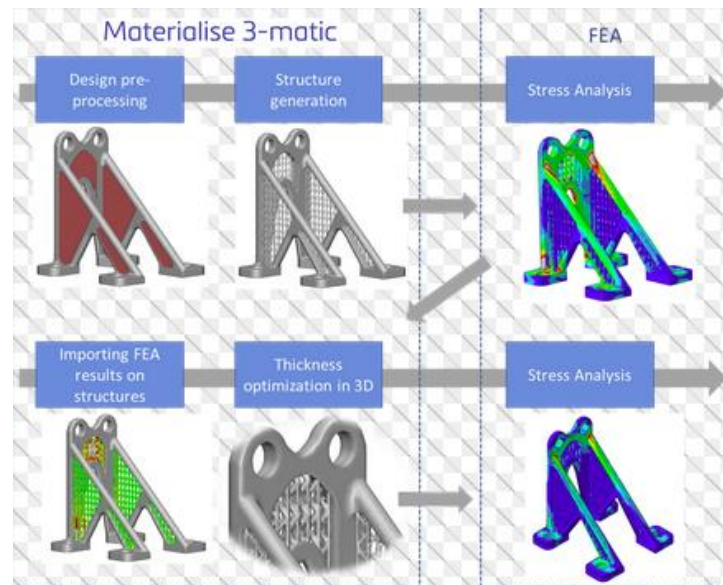
Geometrie anpassen: Ähnlich zu den Werkzeugen der parametrischen CAD Systeme, können mit 3-matic Skizzen erstellt und diese extrudiert werden. Boolesche Operationen erlauben außerdem das Kombinieren, Subtrahieren und Verschneiden von Bauteilen. Mit diesen Bearbeitungsmöglichkeiten können, wie in Kap.5.4.1 zu sehen, Abschnitte am Bauteil durch Extrusion „entlang eines Pfades“ adaptiert werden.

Volume Mesh: Um die Facettendatei ohne Umweg über die CAD-Geometrierückführung einer Belastungsanalyse unterziehen zu können, ist es mit 3-matic möglich, einzelne Flächen des Bauteils neu zu vernetzen und im Anschluss daran ein Volume Mesh zu erstellen. Dadurch wird das gesamte Bauteil aus 3D Elementen (Voxel) dargestellt. Diese Darstellung kann nun in alle gängigen FE-Analyse Systeme, wie Optistruct, Abaqus oder Ansys exportiert werden.

NURBS Geometrie generieren: 3-matic bietet die Möglichkeit die verbesserte Facettengeometrie automatisch mit NURBS Flächen zu ummanteln und diese Darstellung als STEP oder IGES zu exportieren. Dies ist vor allem für Scan-Daten interessant, wenn diese mit CAD weiterverarbeitet werden sollen. Da für die Verarbeitung von additiven Fertigungsanlagen Facetten Geometrien notwendig sind, spielt diese Möglichkeit nur eine untergeordnete Rolle, da Geometrierückführung in CAD Formate, im Sinne eines durchgängigen Workflows vermieden wird.

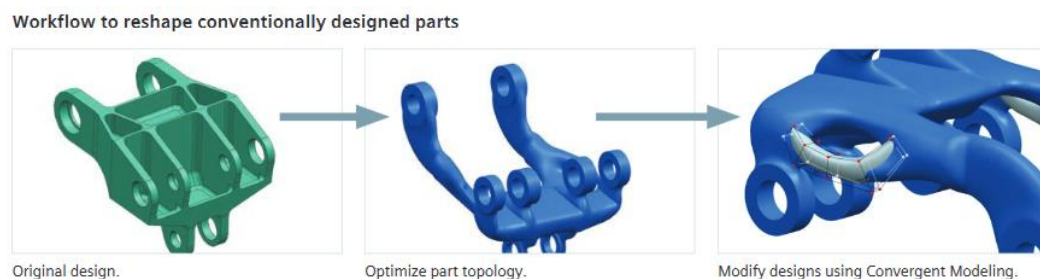
Lattice generieren: Mit 3-matic können ganze Bauteile oder Bereiche von Bauteilen durch Gitterstrukturen ersetzt werden. Zu diesem Zweck steht eine große Bibliothek an Einheitszellen zur Verfügung. Das Besondere in dem Zusammenhang ist jedoch, dass die Gitterstrukturen mit dem Bauteil gemeinsam in eine FEA Software exportierbar sind. Die Gitterstruktur wird zu diesem Zweck nicht als Volume mesh exportiert, sondern enthält lediglich die Geometrieinformationen und die Strebendicke um die Datenmenge zu begrenzen. Das Ergebnis aus der FE-Analyse kann anschließend wieder importiert werden. Durch die FEA werden die Strebendicke der Gitterstruktur individuell, je nach Belastung, angepasst und dieses Ergebnis kann nun automatisch auch in 3-matic angewendet werden, um eine belastungsorientierte Struktur zu generieren (Workflow siehe Abbildung 71).

Bauteil inklusive Gitterstruktur kann nun direkt in einen Build Processor (siehe Kap 4.5.2) exportiert und weiterverarbeitet werden, dazu ist es nicht notwendig die Gitterstruktur in STL umzuwandeln, wodurch enorme Datenmengen entstehen würden. Dies kann eine große Rolle spielen, da etwa die DMG Mori maximale Dateigrößen von 30 MB erlaubt. Alternativ steht jedoch auch die Möglichkeit zur Umwandlung der Gitterstruktur in STL zur Verfügung („Materialise 3-matic User Community,” n.d.).



**Abbildung 71: Prozesse bei der Implementierung von Gitterstrukturen mit 3-matic („Materialise 3-matic User Community,” n.d.)**

Neben den spezialisierten, separaten Softwarelösungen zur Facetten-Datei-Bearbeitung, ist am Beispiel von Siemens NX erkennbar, dass es vermehrt Bestrebungen gibt, Facettendateien-Bearbeitung direkt in CAD Pakete zu integrieren. So sollen durchgängige Softwareketten, ohne aufwendige Geometrierückführungen, möglich werden. Durch die Integration der Topologie-Optimierungs-Software von Frustum als In-CAD Modul und die enge Zusammenarbeit und Implementierung von Materialise Softwarelösungen kann NX eine durchgängige Softwarelösung anbieten. Der propagierte Workflow ist in der folgenden Abbildung 72 dargestellt.



**Abbildung 72: Workflow NX („Additive-Fertigung-mit-NX.pdf,” n.d.)**

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Anpassung von Facettengeometrien aus der Topologie-Optimierung. Durch das sogenannte Covergent-Modelling wird es möglich, dass CAD-Modellierung und Bearbeitung von Facettenkörpern verschmelzen. Wie in Abbildung 72 zu sehen, können NURBS Geometrien direkt in den Facettenkörper implementiert werden, um damit Designverbesserungen vorzunehmen („Siemens introduces ‘end-to-end’ AM,” 2017). Dieser Ansatz könnte die zeitaufwendige Geometrierückführung revolutionieren, im Zuge dieser Arbeit standen diese Softwarelösungen jedoch nicht zur Verfügung, wodurch sich diese Erläuterungen hauptsächlich auf Siemens Publikationen im Internet stützen. Ob die anderen

Rückführungsmethoden dadurch ersetzt werden können, müssten Praxistests zeigen.

#### **4.4.3 Simulationssoftware für FEA und Topologie-Optimierung**

Simulationssoftwarelösungen stellen die 2. Gruppe an Programmen dar, welche am Produktentwicklungsprozess für die additive Fertigung beteiligt sind. Dabei spielen vor allem die Strukturoptimierungs-Algorithmen, sowie Software für FE-Belastungsanalysen eine vorrangige Rolle.

Die Topologie-Optimierung wird im Zuge der Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren immer wieder als eine Schlüsseltechnologie gesehen, um die große geometrische Freiheit optimal auszunutzen. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass Topologie-Optimierung in den meisten Finite Elemente Paketen, wie zum Beispiel Ansys oder Hyperworks, schon lange enthalten ist und nicht erst im Zuge der Verbreitung von additive Fertigung-Verfahren implementiert wurde. Das Naheverhältnis zwischen FEA und Topologie-Optimierung ist in den sehr ähnlichen Pre-Processing-Schritten begründet.

Die Basis stellt ein 3D Modell aus der CAD Software, meist als neutrales STEP oder IGES Format dar, welches im Zuge des Pre-Processings durch Finite Elemente (Voxel) diskretisiert wird. Für beide Analysearten ist ebenfalls die Definition des Lastfalls inklusive aller Randbedingungen, sowie der Materialparameter notwendig. Aufbauend auf diese, für die FEA notwendigen Grundlagen, sind für die Topologie-Optimierung noch Einstellungen zu treffen, wie in Kap 3.3.1 näher erläutert. Dazu zählen die Definition des Design-Bereichs, in dem die Optimierung durchgeführt werden soll und die Angabe von Restriktionen und Zielfunktionen, wie etwa eine gewisse Massereduktion, bei gleichzeitig maximaler Steifigkeit (bzw. die minimaler Nachgiebigkeit).

Wie schon im Zusammenhang mit CAD Softwarelösungen erwähnt, zeichnet sich in den letzten Jahren der Trend ab, Analyse-Software bereits in die frühen Phasen der Produktentwicklung einzubinden, um den Workflow effizienter zu gestalten. Die Implementierung von Simulationslösungen in die CAD Umgebung sind eine logische Folge dieser Entwicklung. Die Hersteller sind bestrebt, einem möglichst nahtlosen Wechsel der Anwendungen innerhalb des Softwarepaketes zu ermöglichen. Durch die einheitlich gestalteten Benutzeroberflächen und den Wegfall der aufwendigen Datei-Import- und Datei-Export-Vorgänge zwischen den Programmen soll der Workflow beschleunigt werden ("Engineering Design Platforms," n.d.).

Im Vergleich zu Simulationslösungen, welche in die CAD Umgebung implementiert sind, verfügen separate Softwarelösungen, wie zum Beispiel Hyperworks von Altair, jedoch über weitaus umfangreichere Möglichkeiten. Diese betreffen einerseits die



genauere Diskreditierung des Bauteils und die genaue Nachbildung des Lastfalles. Andererseits verfügen sie über eine größere Vielfalt an wählbaren Restriktionen und Zielfunktionen (Parametrisierung von Restriktionen z.B. Breiten oder Höhen) (Günther, 2014). Außerdem fehlt es vielen In-CAD Lösungen an nichtlinearen Simulationsoptionen, welche auch Plastifizieren berücksichtigen.

Der Nachteil dieser separaten Softwarelösungen im Designprozess ist eben genau diese Funktionsvielfalt, wodurch eine gewisse Komplexität entsteht. Sie werden daher hauptsächlich von Struktur-Ingenieuren mit der notwendigen Erfahrung und dem Grundlagenwissen verwendet. Durch die Komplexität, die in vielen Anwendungsfällen nicht notwendig ist, gestalten sich derartige Simulationsprozesse auch wesentlich zeitaufwendiger, was zur Verlangsamung der gesamten Entwicklung führt.

Außerdem entsteht durch die separaten Lösungen eine zusätzliche Programmschnittstelle. Die Übergabe der Bauteile als neutrale CAD-Formate machen oft Reparaturen der Konturen notwendig, um eine Vernetzung durchführen zu können. (MIVP, 2016) Hyperworks verfügt im Gegensatz zu den meisten anderen Simulationspaketen über die Möglichkeit STL Dateien, sowohl zu importieren als auch zu exportieren.

Trotz dieser Nachteile spielen separate Analyse-Lösungen weiterhin eine Rolle, vor allem wenn genauere Analysen oder Validierungen im Anschluss an den Designprozess notwendig sind ("Engineering Design Platforms," n.d.).

Im Zuge der Verbreitung der additiven Fertigungsverfahren haben sich Softwarelösungen wie Altair mit SolidThinking Inspire entwickelt die den aktuellen Anforderungen des Simulation Driven Design Rechnung trägt. Dabei handelt es sich zwar um ein separates Simulationstool, jedoch wurde besonders auf die einfache Bedienung und Verknüpfung der gesamten Simulationskette geachtet und kann daher mit klassischen separaten Simulationsprogrammen kaum verglichen werden. Der Workflow mit Inspire wird im Folgenden erklärt.

## **Inspire Workflow**

### Schritt 1: Import

Neben den neutralen Schnittstellen STEP und IGES, ist auch der Import der meisten gängigen CAD Formate möglich.

### Schritt 2: Design und Non Designbereiche definieren

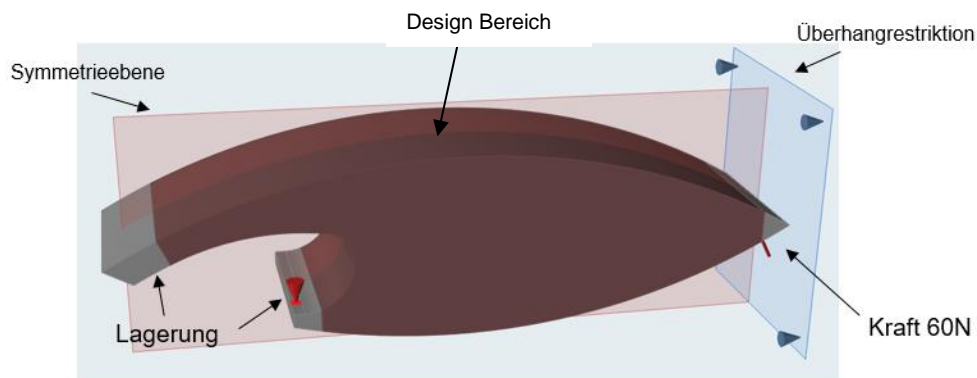
Inspire bietet die Möglichkeit Manipulationen am importierten CAD Bauteil durchzuführen. Es können etwa geometrische Vereinfachungen vorgenommen oder ganze Bereiche des Volumens abgetrennt werden. Die getrennten Volumsbereiche



können nun flexibel als Design- oder Non-Designbereich deklariert werden. Es ist zu beachten, dass unter Inspire empfohlen wird, nur Non-Designbereiche mit Lasten oder Einspannungen beaufschlagt werden können.

### Schritt 3: Setup (FE-Modellierung)

Im Zuge des Setups werden anschließend Kräfte, Drücke, Drehmomente oder Einspannungen angebracht, sowie der Werkstoff (Materialbibliothek bzw. Benutzereingabe) definiert. Im Bereich der Restriktionen könne Verschiebungsrestriktionen auf Flächen angewendet werden. Daneben können mittels Fertigungsrestriktionen einerseits Symmetrieebenen definiert werden und andererseits Auszugsrichtungen vorgegeben werden. Dabei geht es im Wesentlichen um die Definition von Trennebenen, welche das Entformen bei Guss-Prozessen erleichtern sollen. Für die additive Fertigung sind diese jedoch weniger interessant. Dafür bietet die Überhangsteuerung, durch die Definition von Aufbaurichtung und Überhangwinkel, die Möglichkeit auf die Optimierungsergebnisse einzuwirken, siehe Abbildung 73.



**Abbildung 73: Modellierung Inspire**

### Schritt 4: Topologie-Optimierung

Bei der Zieldefinition kann man zwischen Steifigkeitsmaximierung und Masseminimierung wählen. Bei ersterem, kann ein Masseziel festgelegt werden, bei Masseminimierung muss ein minimaler Sicherheitsfaktor (im Bezug zur Streckgrenze des Materials) definiert werden, siehe dazu Abbildung 74. Vernetzung des Bauteils kann in Inspire nicht individuell gesteuert werden, es ist lediglich eine Auswahl zwischen „schnell“ oder „genauer“ möglich.

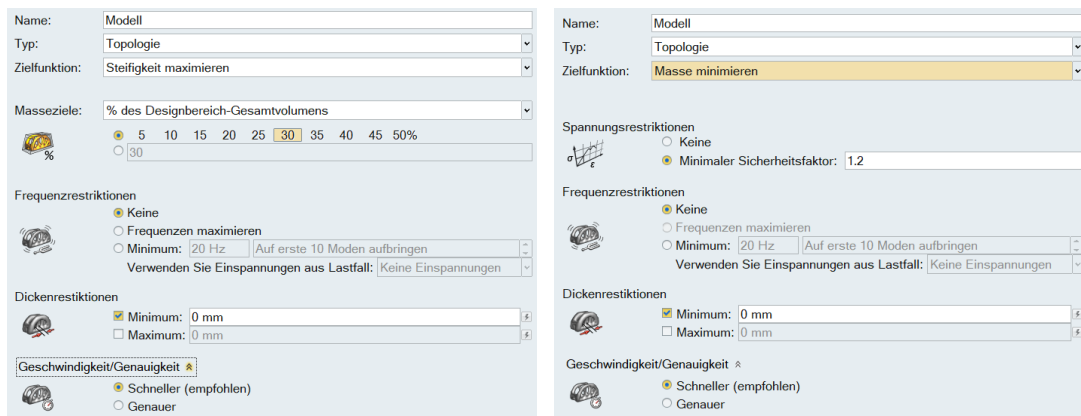


Abbildung 74: Optimierungseinstellungen Inspire

### Schritt 5: Analyse

Besonders einzigartig ist die direkte FE-Analysemöglichkeit am Facettenkörper der optimierten Form, um einen ersten Eindruck zur Festigkeit zu erhalten. Da im Normalfall mehrere Optimierungsläufe durchgeführt werden, bietet die Vergleichsoption in Inspire eine vorteilhafte Lösung, um verschiedene Optimierungsläufe nach definierten Kriterien in Form von Balkendiagrammen zu vergleichen und die Entscheidungsfindung so zu unterstützen, siehe dazu die Case Study unter Kap. 5.

### Schritt 6: Geometrierückführung mit Polynurbs

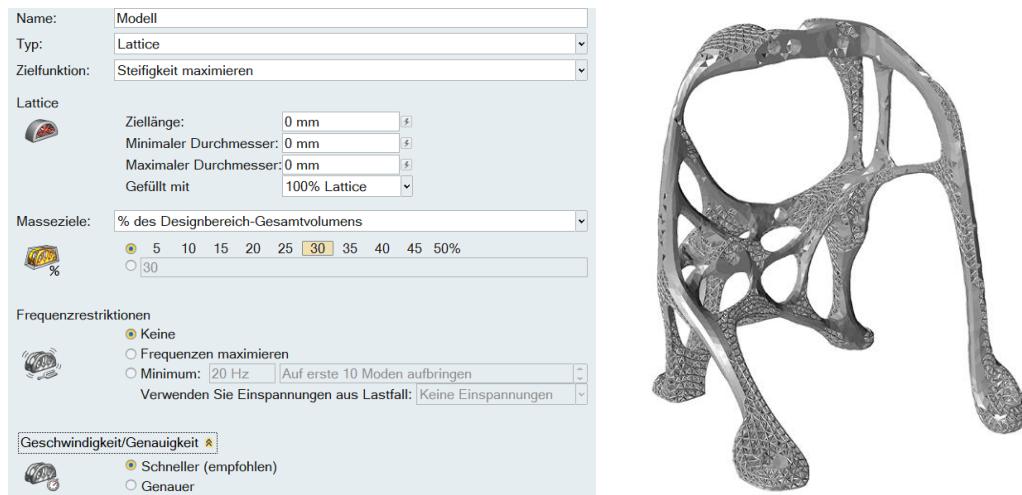
Neben der Exportmöglichkeit zu Solithinking Evolve zur NURBS-Modellierung, wie schon erwähnt, besteht ab der Inspire Version 2017 auch die direkte PolyNURBS Generierung in Inspire zu Verfügung. Damit ist es möglich, die optimierte Form direkt mit NURBS zu umwickeln, wodurch eine enorme Zeitersparnis bei der Geometrierückführung verbunden ist.

### Schritt 5: Analyse

Die fertige NURBS CAD Geometrie kann anschließend direkt einer FE-Analyse zur Validierung unterzogen werden (Hilbert et al., 2016).

### Lattice (Optional)

Optional kann an den Topologie-Optimierungsprozess direkt, anschließend oder stattdessen eine Lattice-Optimierung zur Generierung von Gitterstrukturen durchgeführt werden. Die Einstellungen unterscheiden sich etwas zur Topologie-Optimierung, etwa durch Definition von Länge und Durchmesser der Gitterstrukturen, siehe Abbildung 75. Als Zielfunktionen sind wiederum Massenminimierung oder Steifigkeitsmaximierung wählbar. Darüber hinaus kann angegeben werden, wieviel Prozent des Volumens durch Gitterstruktur ersetzt werden sollen.



**Abbildung 75: Einstellmöglichkeiten und Ergebnis Lattice-Optimierung Inspire (solidThinking Inspire 2018, n.d.)**

Es wird dadurch möglich den ganzen Körper oder nur einzelne Bereiche des Körpers durch belastungsorientierte Gitterstrukturen zu ersetzen, siehe Abbildung 75. Dies bedeutet, dass der Optimierungsalgorithmus je nach Belastung die Strebendicke der Gitterelemente anpasst. Da die Gitterstruktur auf der Facettendatei basiert, kann keine Geometrierückführung in CAD mehr stattfinden. Es bleibt also nur die direkte Exportmöglichkeit als STL.

#### 4.4.4 Software zur Datenaufbereitung für den 3D Druck

Um die fertigen 3D Modell für den additiven Fertigungsprozess vorzubereiten, sind die im Kap. 3.4 beschriebenen Schritte notwendig. Bei der dazu verwendeten Software handelt es sich um spezielle, für die additive Fertigung entwickelte Softwarepakete, welche entweder direkt vom Maschinenhersteller oder von Drittanbietern zur Verfügung gestellt werden. Software von Drittherstellern wird im Allgemeinen als AM Softwarelösung bezeichnet, während Programme von Anlagenherstellern aufgrund der direkten Schnittstelle zur Maschine meist als Frontend-Software bezeichnet wird (Gebhardt, 2013). Im Folgenden sollen die Funktionen und Unterschiede an der weit verbreiteten AM Softwarelösung Materialise Magics und der Frontendsoftware R Designer bzw. R Operator des Anlagenherstellers DMG MORI erläutert werden.

### **AM Software am Beispiel Materialise Magics**

Da der gesamte Prozess der Datenvorbereitung auf der Darstellung des Bauteils im Facettenformat passiert, stellt sich zuerst die Frage der Konvertierung von CAD Dateien in ein Facettenformat. Die Konvertierung in die beschriebenen Facettendateiformate ist entweder direkt beim Exportieren aus der CAD Software oder beim Importieren in eine Softwarelösung zur Datenaufbereitung möglich.

Beim CAD Export stehen meist mehrere facettenbasierte Formate zur Auswahl. Es gilt jedoch zu beachten, dass die verschiedenen CAD Programme unterschiedliche Konvertierungs-Algorithmen implementiert haben und daher die Qualität des Outputs zwischen den Softwarelösungen schwankt. In diesem Zusammenhang ist die Studie von (Hällgren et al., 2016) interessant, der die Genauigkeit der Tessellations-Algorithmen zur Konvertierung in STL verschiedener CAD Software und im Vergleich zu Datenaufbereitungslösungen untersucht und hat dabei wesentliche Unterschiede festgestellt. Unter der Vorgabe einer maximalen Rundheitstoleranz von 0.3mm wurden verschiedenen Softwarelösungen verglichen. Zu den untersuchten Softwarelösungen zählten NX Ideas, NX 9, Catia V5, PTC Creo 3, Solid Works 2015, Solid Edge ST3 und Materialise Magics. Es stellte sich heraus, dass sich durch die vorgegebenen Einstellungen der Programme große Unterschiede in der Genauigkeit ergeben. NX Ideas, Creo 3 und Solid Works konnten mit den vorgegebenen Einstellungen nicht die gewünschte Genauigkeit erreichen. Zur Anpassung der Tessellations-Genauigkeit sind in den unterschiedlichen Programmen verschiedene Einstellungen möglich. Alleine aufgrund dieser Tatsache sind die abweichenden Ergebnisse zu erklären. Es wurde festgestellt, dass die Kantenlänge der Dreiecke einen großen Einfluss auf die Feinheit der Darstellung, vor allem von runden Konturen hat. Jedoch ist man nur mit Magics und Creo 3 in der Lage die maximale Kantenlänge der Dreiecke zu kontrollieren. Magics zeigte in diesem Zusammenhang die kürzesten Kantenlängen mit der regelmäßigsten Vernetzung, ähnlich einem FE Netz. Solidworks erzeugt auch bei höchsten Genauigkeitseinstellungen wesentlich längere Dreieckskanten, was zu sichtbaren Facettenflächen am produzierten Bauteil führt.

In Bezug auf die Dateigröße ist zu bemerken, dass nicht alle Softwarelösungen die Möglichkeit bieten in binäre STL zu konvertieren, die führt zu größeren Dateien. Abschließend ist zu sagen, dass die Tessellations-Algorithmen von Datenaufbereitungssoftware wie Magics meist hochentwickelter sind und daher gegenüber CAD Algorithmen vorgezogen werden sollten.

Die zweite Möglichkeit stellt das Importieren der exakten CAD Datei in eine Aufbereitungssoftwarelösung wie Materialise Magics oder Netfabb dar. Da jede CAD Software eigene Dateiformate nutzt und nicht alle von den Aufbereitungsprogrammen unterstützt werden, ist es sinnvoll als neutrales STEP Formate zu importieren. Wird ein Bauteil importiert, öffnet sich ein Infofenster in den

Einstellungen, wo Genauigkeit und Dreieckskantenlänge für den Konvertierungsvorgang festgelegt werden können.

Unabhängig von der Art und Weise der Facettengenerierung folgen weitere Schritte der Datenaufbereitung. Die Folgenden Erläuterungen basieren auf der eigenen Konstruktionserfahrung bzw. aus dem (magics user manual, n.d.).

### Werkzeuge

Nach dem Einlesen des Facettenfiles können im Reiter „Werkzeuge“ noch Manipulationen am Bauteil durchgeführt werden. Es besteht zum Beispiel die Möglichkeit Löcher im Körper zu generieren oder Hohlkörper mit oder ohne inneren Kern zu erstellen. Mit der Option „Schneiden“ ist es darüber hinaus möglich, dass eingelesene Bauteile in mehrere Körper zu trennen, welche anschließend separat bearbeitet und mittels Boolescher Operationen in Beziehung gesetzt werden können. Eine besondere Funktion bietet das Strukturen-Modul. Damit kann, dass komplette Bauteil oder Teile davon durch Gitterstrukturen zu ersetzt werden. Neben den klassischen Wabenstrukturen steht dazu eine Vielzahl an Gitterformen zu Verfügung. Es besteht die Möglichkeit, den gesamten ausgewählten Bauteil als Gitter zu generieren oder dieses Gitter lediglich im Inneren mit einer Hülle (Shell) zu erzeugen. Die implementierten Werkzeuge und Manipulationsmöglichkeiten sind jedoch nicht mit jenen von Materialise 3-matic vergleichbar sind. Auch der Export und die Anpassung der Gitterstrukturen, wie in Kap. 4.4.2 dargestellt, ist nicht möglich.

Die in Magics verfügbaren Werkzeuge stellen dadurch eine nur bedingt brauchbare Möglichkeit dar, Manipulationen direkt am Facettenkörper durchzuführen. Software wie 3-matic oder NX Convergent Modeling sind dafür zu bevorzugen. Die Verwendung der Werkzeuge in Magics ist daher als optional zu betrachten.

### Reparatur

Um beim Slicen oder Hatchen bzw. spätestens beim Fertigen des Bauteils keine Probleme zu bekommen, empfiehlt es sich mittels Reparaturtool die Facettenoberfläche auf Fehler zu überprüfen. Zu diesem Zweck steht in Magics ein Reparaturassistent zur Verfügung, mit dessen Diagnosetool Fehler, wie zum Beispiel invertierte Normalen, überlappende oder kollidierende Dreiecke, Löcher oder offene Konturen ermittelt werden können. Besonders wichtig ist es darauf zu achten, dass nur eine Shell (Hülle) am Bauteil vorhanden ist. Wird das Bauteil zuvor etwa in mehrere Teile zerschnitten um eine Gitterstrukturen einzufügen, müssen die Bauteile im Anschluss wieder kombiniert werden, da sonst mehrere Shells vorhanden sind und es beim Generieren der Schichtdatei zu Problemen kommen kann.

Die Reparatur kann nun entweder manuell oder automatisch durchgeführt werden. Prinzipiell leistet das automatische Reparaturtool gute Arbeit, kommt jedoch in

manchen Fällen an die Grenzen. Dann ist es sinnvoll mit den manuellen Werkzeugen zu operieren. Diese machen es möglich, einzelne Dreiecke zu bearbeiten. Zeigt das Diagnose Tool keinen Fehler mehr an, ist die Reparatur beendet. Neben diesen Reparaturen ist es auch Möglich die Netzverfeinerung des gesamten Bauteils oder lokal im Nachhinein zu verändern, wenn die ursprüngliche Qualität nicht ausreichend war.

Es ist zu bemerken, dass die Anzahl der Fehler stark davon abhängt, wie die Facettenkonvertierung erfolgt ist. Im dem Zusammenhang liefern CAD Systeme wiederum schlechte Ergebnisse als Datenaufbereitungssoftware wie Magics. Neben bereits beschriebenen Vorteilen, ist die Verwendung dieser AM Softwarepakete zur Konvertierung auch im Sinne einer schnellen Reparaturtätigkeit zu bevorzugen.

#### Positionieren und Support in Magics:

Wie schon in Kapitel 3.4 erläutert, ist die Positionierung des Bauteils auf der Bauplattform und die Anzahl und Ausprägung der notwendigen Stützstrukturen voneinander abhängig. Magics bietet diesbezüglich einige hilfreiche Funktionen um die optimale Bauteilorientierung zu finden, diese sind im Reiter „Position“ zu finden. Die Basis-Tools umfassen Standardfunktionen wie Drehen, Verschieben oder Skalieren, um die Position manuell anzupassen. Größere Unterstützung bietet die automatische Platzierungsfunktion. Im Infofenster können Bauteilabstand, Abstand vom Plattformrand oder X- und Y-Ausdehnung eingestellt werden. Damit ist eine schnelle Platzierung nach definierten Kriterien möglich. Weiters steht mit dem Orientierungsoptimieren eine Lösung zur Verfügung, mit der die aktuelle Position nach Gewichtung verschiedener Kriterien (siehe Abbildung 76) analysiert und optimiert werden kann. In den erweiterten Einstellungen kann außerdem der Winkel, ab dem Flächen gestützt werden sollen, definiert oder aus den Maschineneinstellungen übernommen werden.

Ein weiteres, sehr ähnliches Optimierungswerkzeug stellt der Orientierungsvergleich dar. Hier können ebenfalls die zuvor erwähnten Optimierungskriterien inklusive Gewichtung herangezogen werden. Im Unterschied zur einfachen Optimierung können mehrere Datensätze mit unterschiedlichen Optimierungskriterien definiert werden, welche verglichen werden können, siehe Abbildung 76. Es wird eine Vorschau des positionierten Bauteils inklusive Stützstrukturen dargestellt und die berechneten Werte der ausgewählten Kriterien angezeigt. Es können somit mehrere Varianten nebeneinander dargestellt und die genauen Werte verglichen werden.

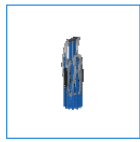

	Supportoberfläche	Z-Höhe
		
✗ Z-Höhe	58,779 mm	14,662 mm
✗ Supportoberfläche	85,074 mm <sup>2</sup>	878,180 mm <sup>2</sup>
✗ XY-Projektion	192,249 mm <sup>2</sup>	694,061 mm <sup>2</sup>
✗ Bounding-Box	13153,035 mm <sup>3</sup>	13153,035 mm <sup>3</sup>
✗ Höhe Schwerpunkt	34,080 mm	12,268 mm
✗ Supportvolumen	2272,850 mm <sup>3</sup>	9412,445 mm <sup>3</sup>
✗ Anzahl Supportflächen	115	80

Abbildung 76: Orientierungsvergleich Magics (Magics)

Mit diesen Hilfsmitteln wird die Positionierung für den Anwender erheblich vereinfacht. Vor allem ungeübten Personen ist es damit möglich die Fertigungsvorbereitung durchzuführen. Inwieweit man diese Werkzeuge als erfahrener Anwender nutzt ist jedoch fraglich.

Die Positionierung hat einen großen Einfluss auf die Supportgenerierung in Bezug auf die zu unterstützenden Flächen. Umgekehrt haben die Supporteinstellungen, wie etwa der Oberflächenwinkel, ab dem eine Unterstützung notwendig ist, Einfluss auf die Orientierung des Bauteils. Die Supporteinstellungen sind in den Maschineneigenschaften zu finden und können als Profile mit dem gewählten Maschineprofil bzw. Werkstoffprofil verknüpft und abgespeichert werden. Aufbau und Art der Supportstruktur sind dadurch exakt einstellbar, wichtige Support-Formen und Einstellungsmöglichkeiten werden im Folgenden kurz erläutert.

### Generell

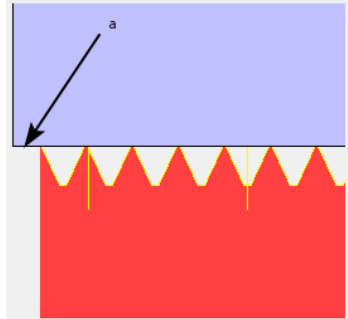
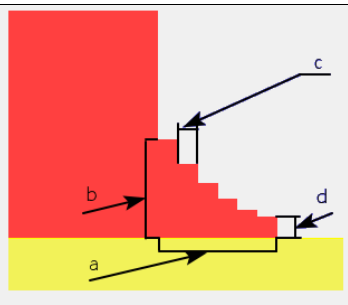
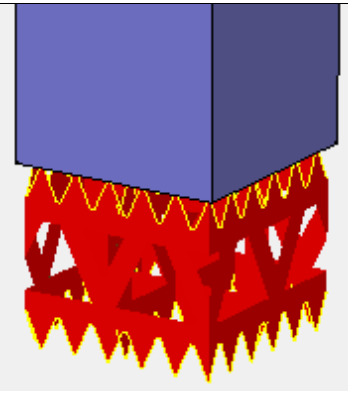
Tabelle 10: Support Konfiguration Generell Magics

<b>Supportformat:</b>	Separate STL Datei der Supportstruktur oder Zusammenführung mit Bauteil
<b>Oberflächenauswahl:</b>	Definition des Winkels ab dem Flächen abgestützt werden sollen. Bei der DMG Mori Anlage sind 45° eingestellt.
<b>Supporttypen</b>	Volumen Supports wie z.B. Kegel oder Baumstrukturen und nicht solide Supports wie Punkte, Linien, Blocksupports oder Gussetsupports, welchen eine Wandstärke zugewiesen werden kann..

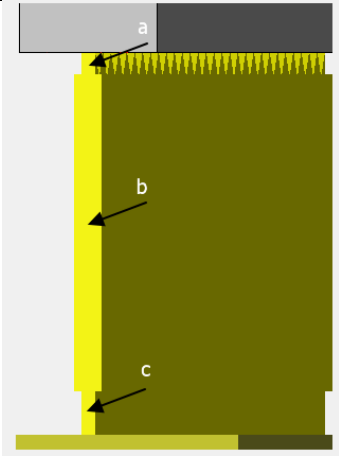
Allgemein:

Umfassen allgemeine Einstellungen, welche für alle Supportvarianten gelten. Die wichtigsten sind in Tabelle 11 dargestellt.

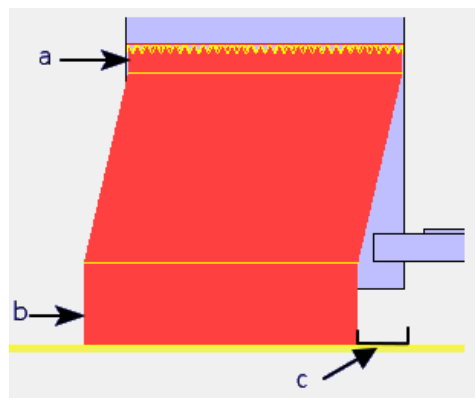
**Tabelle 11: Supportkonfiguration Allgemein Magics**

<b>XY Offset:</b>	Nicht die gesamte Fläche wird unterstützt, sondern am Beginn und am Ende der Fläche wird ein gewisser Offset eingehalten	 <p><b>Abbildung 77: Supports X-Y Offset in Magics</b></p>
<b>Verbreiterter Support:</b>	Verbreiterung des Supports stufenweise auf der Bauteilplattform. Dies bietet Vorteile bei der Wärmeabfuhr.	 <p><b>Abbildung 78: verbreiterte Supports in Magics</b></p>
<b>Zähne auf Plattform:</b>	Bietet die Möglichkeit Zähne auch zwischen Support und Bauteilplattform zur einfacheren Supportentfernung, zu generieren.	 <p><b>Abbildung 79: Zähne auf Plattform in Magics</b></p>



<b>Wandstärke</b>	Wandstärke-Einstellung für nicht solide Supports. Wird keine Einstellung getroffen, entspricht die Wandstärke nicht solider Supporte einer Schmelzbadbreite. Durch diese Einstellung kann Speicherplatz im Vergleich zu Volumensupports gespart werden.	 <p><b>Abbildung 80:</b> Wandstärkenanpassung in Magics</p>
-------------------	---	--

Unter „Erweiterte Einstellungen“ sind Zusatzfunktionen wie abgewinkelten Supports zu finden, siehe Abbildung 81.

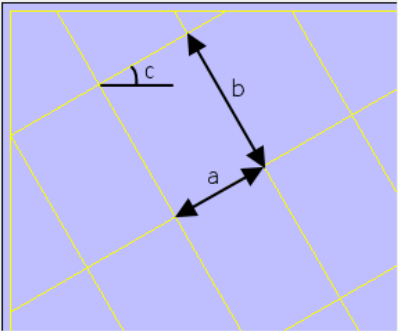
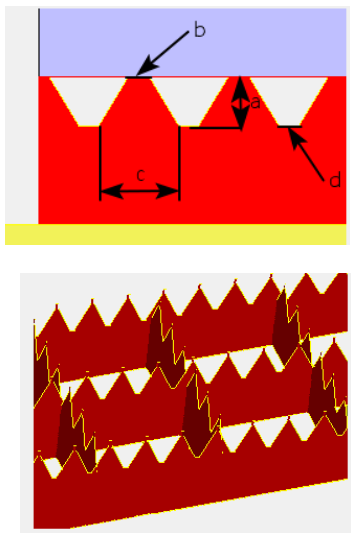
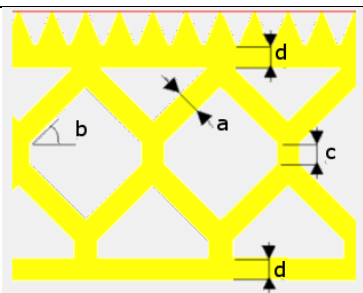


**Abbildung 81: Abgewinkelte Supports Magics (Magics)**

Neben diesen Allgemeinen Einstellungen sind für jeden Supporttyp individuelle Einstellungsmöglichkeiten möglich. Im Maschinenprofil der DMG Mori Lasertec 30 SLM werden die für SLM weit verbreiteten Blocksupports verwendet, anhand dieser werden einige individuelle Supporttypen erläutert.

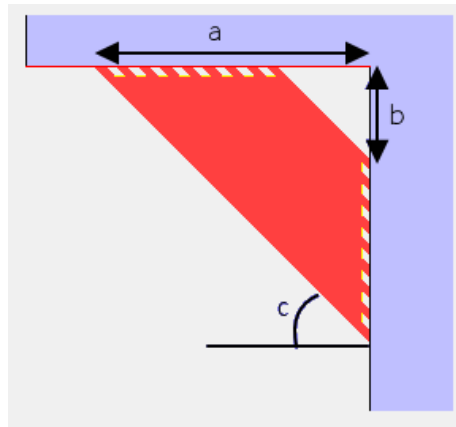
Block-Supports

Tabelle 12: Blocksupports Magics

<b>Hatching:</b>	Blocksupports bestehen aus einem Gitter von Supportflächen, welches man Hatch nennt, siehe Abbildung 83. Die Seitenlängen der Rechtecks-Kanten werden mit dem X bzw. Y Hatch beschrieben und sind im verwendeten Profil mit 1.3mm bzw. 1.5mm fixiert.	 <p><b>Abbildung 82: Hatching in Magics</b></p>
<b>Hatching Zähne</b>	Der Kontakt der Supportwände zum Bauteil bzw. zur Bauplattform wird durch Zähne hergestellt, um das Entfernen des Supports nach der Fertigung zu erleichtern. Größe, Kantenlänge etc. der einzelnen Zähne kann genau festgelegt werden. Zusätzlich kann eine Zahnbruchstelle definiert werden, um das Entfernen noch einfacher zu gestalten.	 <p><b>Abbildung 83: Hatching der Zähne in Magics</b></p>
<b>Perforation:</b>	Die Wand zwischen den Zähnen wird standardmäßig aus Vollmaterial generiert. Um Material einzusparen kann diese perforiert werden. Dazu stehen einige Muster zu Verfügung, welche durch Längenparameter wieder entsprechend angepasst werden können. Neben dem Hatch (inneren Gitter) kann eine Außenkontur um den Hatch gelegt werden.	 <p><b>Abbildung 84: Perforierte Supports in Magics</b></p>

### Gussetsupport

Eine besondere Support Art stellen die Gussetsupports dar. Diese verbinden Überhangflächen nicht mit der Bauteilplattform, sondern stützen Überhänge am Bauteil selbst ab, wie in Abbildung 85 sehen.



**Abbildung 85: Gussetsupport Magics (Magics)**

Auch diese bieten genaue Einstellmöglichkeiten wie Winkel oder Ausmaß des Gussets. Ähnlich wie bei Blöcken kann auch die geometrische Form der Zähne bestimmt werden. Diese Art des Supports kommt zum Beispiel dann zum Einsatz, wenn Überhänge in großer Höhe (Ausdehnung Z Achse) vorhanden sind, um Material und Aufbauzeit zu sparen. Es kann voreingestellt werden, ab welcher Z Koordinate Gussets verwendet werden sollen.

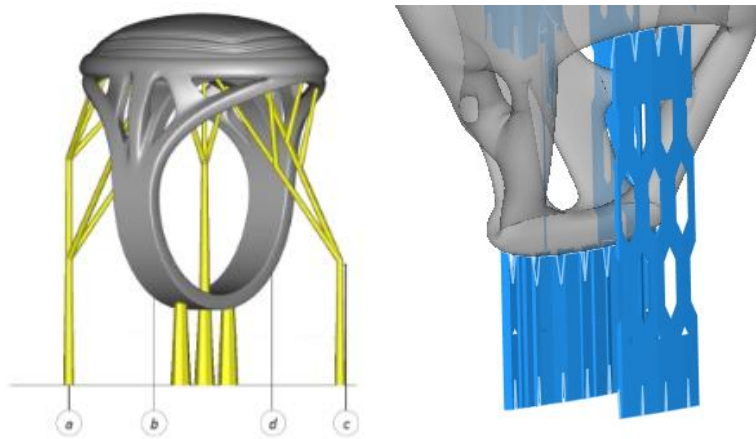
Für genauere Informationen sei an das User-Manuell bzw. Online-Tutorial von Materialise Magics verwiesen.

### Supporterzeugung

Sind alle Einstellungen getroffen, kann im Reiter Supporterzeugung mit der Stützstrukturenerzeugung fortgesetzt werden. Für die Supportgenerierung steht das SG (Supportgenerierungs-) Modul zur Verfügung. Benutzt man den Button „Supporterzeugung“, öffnet sich das SG Modul und es werden automatisch generierte Stützstrukturen angezeigt. Verwendet man stattdessen den „Manuellen Support“ steigt man ohne automatische Generierung in das SG Modul ein. Um einen ersten Eindruck darüber zu erhalten, welche Flächen Unterstützung benötigen, kann eine „Vorschau der Supportoberfläche“ erstellt werden. Dabei werden alle Flächen unter dem eingestellten Winkel farblich markiert. Falls gewünscht können darüber hinaus auch explizit supportfreie Bereiche markiert werden, welche bei der automatischen Generierung berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu anderen Programmen, welche zur automatischen Supportgenerierung genutzt werden können, wie etwa R Designer vom Maschinenhersteller DMG Mori, bietet Magics durch das SG Modul einen wesentliche größeren Funktionsumfang. Neben der simplen, aber effektiven automatischen Generierung, können die Supports im SG Modul manuell nachbearbeitet werden. So können Supports einzeln manuell an der Bauteiloberfläche platziert werden, die Genauigkeit geht dabei bis auf Dreieck bzw. Eckpunktebene.

Eine Besonderheit stellen die sogenannten Baum-Supports dar, siehe Abbildung 86. Durch die geringe Anzahl von Kontaktpunkten an der Bauteilplattform sind diese optimal zu entfernen, es können jedoch Probleme mit der Wärmeabfuhr bei Metallwerkstoffen auftreten und in Folge dessen Bauteilverzug. Um die Anwendbarkeit zu prüfen stehen Zusatzmodule von Magics (SG+ Modul), welche für die Verarbeitung von metallischer Werkstoffe ausgelegt sind zur Verfügung.



**Abbildung 86: Baum Supports (links), Blocksupport (rechts) in Magics (Magics) ("Metal Tree Support Module," n.d.)**

Magics bietet anschließend die Möglichkeit neben dem positionierten Bauteil auch die Stützstrukturen zu exportieren. Diese können jedoch nur als STL exportiert werden. Die beiden Dateien können anschließend in die Herstellersoftware importiert werden, wo die Schichtgenerierung und das Hatching stattfinden. Ob diese Variante bevorzugt wird, hängt vor allem davon ab, welche Möglichkeiten die Herstellersoftware in Bezug auf die Supportgenerierung bietet. Grundsätzlich sind die Optimierungsalgorithmen von Magics hochentwickelter und die Einstellmöglichkeiten umfangreicher. Baumstrukturen sind etwa nicht mit allen Softwaretools generierbar. Auch die punktgenaue Platzierung einzelner Strukturen ist ein weiterer Vorteil von Magics (magics user manual, n.d.).

Es besteht auch die Möglichkeit Dateien in Magics zu Slicen und diese Schichtdateien separat für Bauteil und Slice zu exportieren. Dabei wird eine Reihe von Formaten verschiedener Hersteller unterstützt. Es werden als Export 4 Dateien

generiert, jeweils eine STL und Slice Datei für Bauteil und Supportstruktur, welche in der Herstellersoftware gehatched werden können. Zu den unterstützten Slice-Formaten zählen neben der neutralen Schnittstelle CLI auch F+S, SLC und SLI.

Dabei stellt sich jedoch ebenfalls die Frage der Sinnhaftigkeit einer solchen Vorgangsweise, da das Hatching und die Fertigungsparameterdefinition sowieso extern durchgeführt werden und so kein Mehrwert im Slicing mit Materialise festzustellen ist.

Neben diesen Varianten, bei denen Magic mehr oder weniger Schritte der Datenaufbereitung durchführt, versucht Materialise den Weg der engeren Kooperation mit den Maschinenherstellern zu gehen, um die Lücke zur Maschine zu schließen. Das wird durch die Implementierung von sogenannten Build Prozessoren in Magics bewerkstelligt. Dabei handelt es sich um ein Zusatzmodul, welches vom Hersteller bereitgestellt wird und damit die Herstellersoftware in Magics implementiert. Materialise arbeitet diesbezüglich mit den meisten großen Maschinenherstellern zusammen, womit der Umweg über eine externe Software überflüssig wird und die Dateisätze aus den Build-Prozessoren direkt auf der Maschine verarbeitet werden können.

Mit diesen Build Prozessoren soll der Druckprozess wesentlich vereinfacht werden und die Maschinenkommunikation standardisiert werden. Materialise stellt dabei die Softwareplattform zur Verfügung und die Maschinenhersteller bringen ihr prozessspezifisches Wissen ein. Im Build-Prozessmanager kann der Anwender, ähnlich wie von 2D Druckern Printdrivern gewohnt, den Build-Prozessor für den gewünschten Drucker laden. Materialise bietet Build-Prozessoren für Maschinen von Acram, EOS, Renishaw, SLM, HP und Concept Laser an. In Abbildung 87 ist der Prozessablauf am Beispiel von EOS Maschinen dargestellt. Magics übernimmt in diesem Workflow die Vorbereitungsschritte und der EOS Build Processor ist für Slicing, Hatching und Parameter-Konfiguration zuständig, also jene Prozesse wo spezifischer Input und Erfahrung von Maschinenhersteller gefragt ist. Weitere Funktionen sind die Speicherung von Baujobkonfigurationen pro Bauteil oder Plattform und eine präzise Bauzeitberechnung, um die Produktionsplanung zu verbessern. Außerdem kommen verbesserte Slicingalgorithmen zum Einsatz, welche durch Multicore-Unterstützung und Auslagerung der Datenverarbeitung an dezidierte Server innerhalb der Netzwerkumgebung, Zeitersparnis bringen sollen ("Build Prozessoren," n.d.).



**Abbildung 87: Einbindung der Build Processor ("Build Prozessoren," n.d.)**

Diese Vorgangsweise stellt somit für die unterstützten Maschinen eine optimal durchgängige Softwarelösung von der CAD Datei bis zur Maschine dar ("Build Prozessoren," n.d.).

### Frontend Software am Beispiel R Design

Die im Zuge dieser Arbeit verwendete Maschine von DMG Mori bietet jedoch keinen derartigen Building Prozessor und man ist somit auf den erläuterten fragmentierten Softwareworkflow angewiesen, wo Magics nur für einen Teil des Aufbereitungsprozesses verwendet wird. Von Seiten des Herstellers Realizer werden mit dem R Designer und dem R Operator zwei Softwarelösungen angeboten. Der R Designer ist dabei für die Datenaufbereitung verantwortlich. Als Input wird eine STL oder 3MF benötigt, anschließend ist eine Positionierung und automatische Support-Generierung (abhängig vom eingestellten Oberflächenwinkel) möglich, wobei die Möglichkeiten diesbezüglich im Vergleich zu Magics begrenzt sind. Unterschieden werden lediglich Stützstrukturen zwischen Bauteil und Bauteilplattform (Mainsupports) sowie Abstützungen am Bauteil selbst (Fill supports). Der R Designer stellt Bauteil und Support getrennt dar, daher können diese auch in Magic generiert werden und anschließend eingefügt werden.

Das Slicing erfolgt in R Designer unter Vorgabe eines Schichtdickenparameters. Es wird ebenfalls jeweils eine Schicht-Datei von Bauteil und Support erstellt, was wiederum den Importvorgang einer Magics F+S Schichtdatei ermöglicht.

Anschließend ist eine Hatching Strategie zu wählen. Es kann zwischen Outer-boundary, Inner-boundary sowie Flächenhatch unterschieden und der Laserfocus dementsprechend verändert werden. Für die Außenkonturen wird ein genauerer Focus verwendet und für die Flächen eine größere Streuung um ein ausreichendes Verschmelzen der einzelnen Schmelzbahnen zu gewährleisten. Die Laserparameter,

Schichtdicken sowie Hatchstrategien und Parameter können frei gewählt werden oder als Parameterprofil direkt eingelesen werden. Dies wird empfohlen, um bewährte werkstoffspezifische Parameter abzuspeichern und wieder zu verwenden. Außerdem ist es in R Designer möglich Fertigungszeiten zu berechnen. Mit der Funktion „Hatch optimieren“ können die Wege des Lasers automatisch optimiert werden, was zu einer wesentlichen Verringerung der Fertigungszeit führt. All diese Informationen werden in einem .RDN File, gespeichert und in weiterer Folge an die Maschinensoftware R Operator übergeben.

Der R Operator wird vom Touchscreen der Maschine gesteuert und fungiert als Schnittstelle zum Fertigungsprozess (Maschinensoftware). Er wird zur Kontrolle des Fertigungsprozesses und zum Monitoring verwendet.

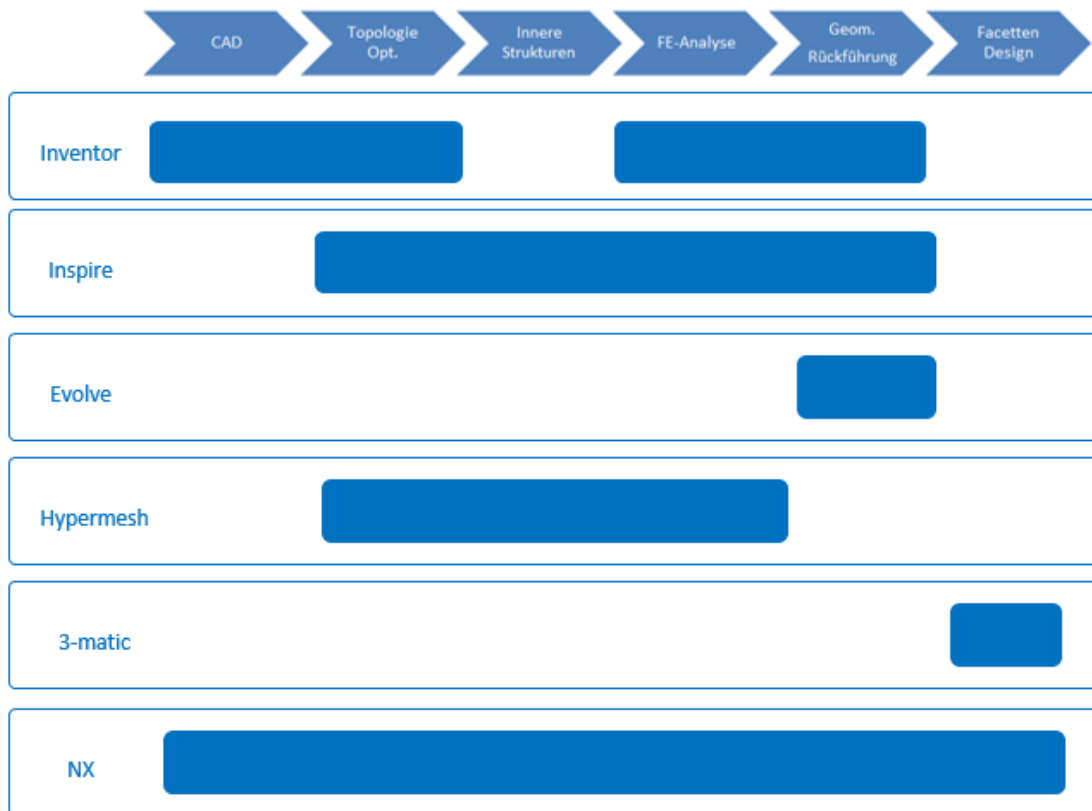
## **4.5 Erkenntnisse aus der Softwareanalyse und resultierende Workflows**

Anhand der Softwareanalyse lässt sich erkennen, dass man, wie schon in den Produktentstehungs-Workflows in Kap. 3.2 zu sehen, auch softwareseitig grob 2 Prozessketten getrennt betrachten kann. Einerseits die Entwicklungs- bzw. Optimierung-Prozesse des Bauteils und andererseits die Datenaufbereitungsprozesse zur Vorbereitung auf den additiven Fertigungsprozess.

### **4.5.1 Konstruktions- und Optimierungsprozess**

Im Zuge der Produktentwicklung mit Hilfe der Topologie-Optimierung werden neben CAD Konstruktionsprogrammen zur geometrischen Umsetzung und spezielle Programme zur direkten Verarbeitung der Topologie-Optimierungsergebnisse, Simulationssoftware wie FEA und Topologie-Optimierungslösungen verwendet.

Da der Trend in Richtung des Simulation Driven Design geht, werden vermehrt Komplettlösungen forciert, anstatt spezialisierte Softwarepakete aneinander zu reihen. In Abbildung 88. sind die untersuchten Softwarepakete und ihre Anwendungsgebiete dargestellt. Man erkennt schnell einige Tendenzen.



**Abbildung 88: Softwarevergleich in Bezug auf die Prozessabbildung**

So ist sichtbar, dass die meisten separaten FE-Programme auch über Topologie-Optimierungsalgorithmen verfügen. Dies resultiert, wie schon in den vorigen Kap. 4.4.3 beschrieben, aus der Tatsache, dass die grundlegende Modellierung sehr ähnlich ist.

Des Weiteren ist ganz klar der anhaltende Trend erkennbar, Simulationslösungen schon in der Designphase zu implementieren (Frontloading bzw. Simulation Driven Design). Im Zuge der Verbreitung der additiven Fertigung wurde das Potential, Topologie-Optimierungsalgorithmen schon während des Designprozesses einzusetzen erkannt und vermehrt neben den FE-Belastungsanalysen implementiert.

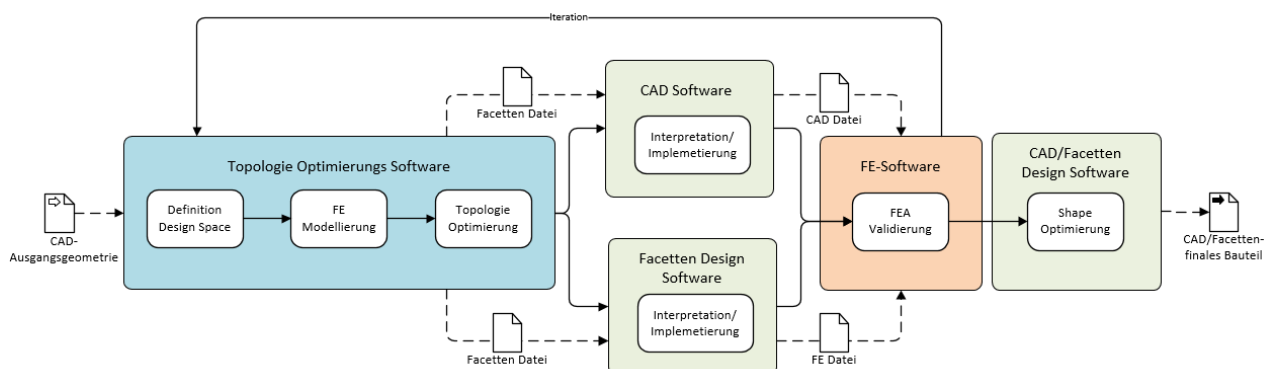
Neben der Durchgängigkeit der Softwarelösungen im Optimierungsprozess, ist in der Geometrierückführung ein weiterer Knackpunkt zu sehen. Die Rückführung der Facettengeometrie aus der Topologie-Optimierung in ein funktional und optisch ansprechendes Bauteil stellt den Konstrukteur vor eine Herausforderung, vor allem, wenn man davon ausgeht, dass mehrere Optimierungszyklen notwendig sind. An der Alleinstellung des Rückführungsprozesses in Abbildung 88 nach den Simulationslösungen erkennt man die Problematik des Eingliederns in den Workflow. Entweder man implementiert die Rückführung in das Simulationspaket um die Ergebnisse in CAD Modelle umzusetzen (wie im Beispiel Inspire), oder man schafft eine durchgängige Prozesskette auf Basis der CAD Software durch Einbindung von In-CAD-Simulationsmodulen, wie im Beispiel Inventor. Die 3. Möglichkeit stellt das



Exportieren der Optimierungsergebnisse als Facettendatei in ein ausgewähltes CAD Programm dar, um die Geometrie mehr oder weniger nachzuzeichnen. Die Exportmöglichkeit wird von den meisten Topologie-Optimierungsprogrammen angeboten. Durch diese Vorgangsweise wird jedoch eine Softwareschnittstelle geschaffen, was ist für die Effizienz des Workflows suboptimal ist.

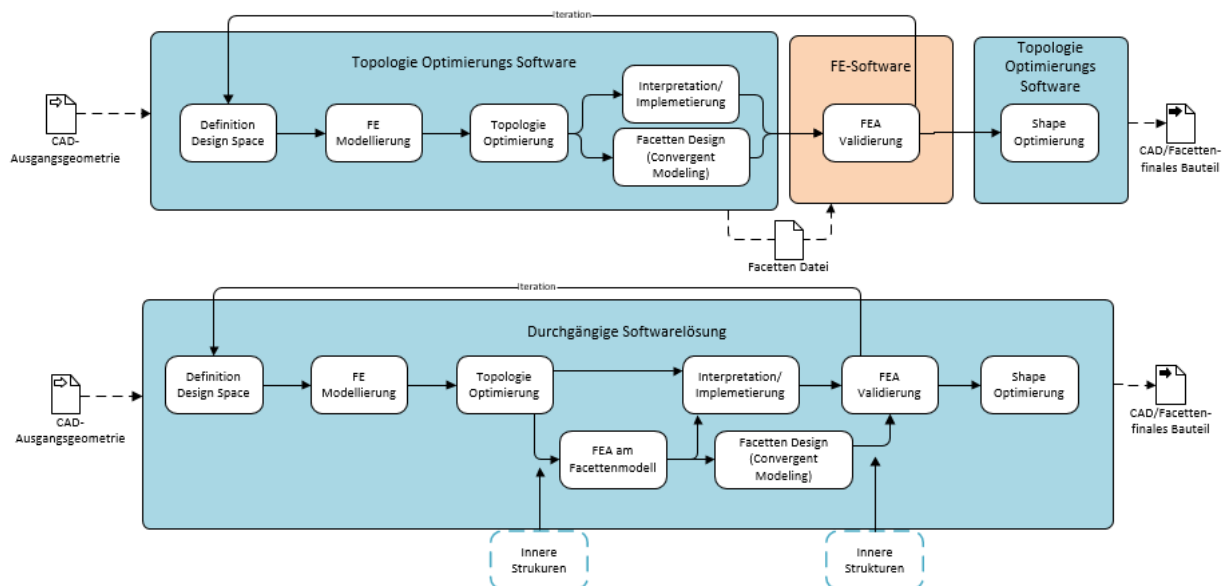
Neben der Rückführung in CAD Datei Formate spielt auch die direkte Verarbeitung der Optimierungsergebnisse eine immer größere Rolle, da der aufwendige Rückführungsprozess entfällt. Ob diese Möglichkeit in Betracht gezogen wird, hängt vom Anwendungsfall und der Qualität der Optimierungsergebnisse ab. Wie in Abbildung 88 zu sehen, bietet Siemens NX eine durchgängige Lösung in diesem Bereich an, Materialise 3-matic stellt eine separate Anwendung dar, die einen Exportvorgang notwendig macht.

Der Workflow mit dem geringsten Integrationsgrad wird in Abbildung 89 dargestellt, es sind dabei 3 verschiedene Softwarepakete an der Produktentwicklung beteiligt. Die CAD Datei wird im Topologie-Optimierungs-Softwarepaket verarbeitet und die optimierte Form als Facetten Datei übergeben. Es folgt nun entweder die Rückführung mit einem CAD Programm oder die Anpassung und Verbesserung direkt an der Facettendatei in einem geeigneten Softwarepaket (z.B. Materialise 3-matic). Das Ergebnis kann nun mittels externer FE Software überprüft werden. Dazu wird entweder die CAD Datei oder das Volumen mesh des Facettenmodells als FE-Dateiformat der verwendeten FE Analyse Software (z.B. Optistruct .fem-Format) übergeben. Nach der Belastungsanalyse können eventuell weitere Anpassungen in Zuge der Shape Optimierung notwendig sein. Hat eine Rückführung ins CAD Format stattgefunden, steht das finale Bauteil als CAD Datei zur Verfügung. Wurden durchgängig Facetten Dateien verwendet, wird auch das finale Bauteil in diesem Format ausgegeben.



**Abbildung 89: Workflow aus separaten Softwarelösungen**

Im Vergleich dazu sind, in Anlehnung an die in der Softwareanalyse erläuterten durchgängigeren Lösungen, in Abbildung 90 (unten) Workflows mit hohem Integrationsgrad dargestellt. Man erkennt sofort die geringere Anzahl an Programmschnittstellen. Softwarelösungen wie NX, Inspire, oder Inventor bieten einen durchgängigen Topologie-Optimierungsprozess, da alle benötigten Simulations- und CAD-Systeme integriert sind. Unterschiede ergeben sich nur dahingehend, ob eine Rückführung in CAD Format stattfindet oder durchgängig mit der Facettendatei gearbeitet wird, wie in NX möglich. Vollständigkeitshalber, wird im Workflow in Abbildung 90 (oben) noch die Möglichkeit dargestellt, auch bei sehr durchgängigen Lösungen mit integriertem FE Analyse Tool, externe FE Software Pakete mit umfangreicherer Funktionalität einzubeziehen, falls der Anwendungsfall dies notwendig macht.



**Abbildung 90: Durchgängige Workflows mit externer FEA (oben) bzw. integrierter FEA (unten)**

Neben den gerade dargestellten Unterschieden in der Durchgängigkeit der Workflows, spielt das schon zuvor angesprochene Thema der Geometrierückführung bzw. Direktverarbeitung von topologie-optimierten Daten eine entscheidende Rolle und hat große Auswirkungen auf die konstruktive Ausarbeitung des Endprodukts. Durch den vermehrten Einsatz von Direct Modeling Werkzeugen, wie etwa das Polynurbs Tool in Inspire und Evolve, ist es möglich, die bionisch anmutenden Lastpfade der Optimierungsdaten optimal und zeitsparend zu umhüllen. Dem gegenüber steht klassische parametrische CAD-Konstruktion, welche bei weitem nicht diese Gestaltungsfreiheit bietet. Daneben stellt der Ansatz, auf eine zeitaufwendige CAD Rückführung gänzlich zu verzichten und ausschließlich mit Facettengeometrie zu arbeiten, eine verlockende Alternative dar, welche in zukünftigen Lösungen eine große Rolle spielen dürfte, wie man den neusten Entwicklungen von NX sieht.

Ein weiterer Grund ist, dass die Generierung von inneren Strukturen in den untersuchten Softwarelösungen ausschließlich im Stadium des Bauteils als Facettendarstellung möglich ist und eine Rückführung in CAD in diesem Fall ausgeschlossen ist. Wie in Abbildung 90 (unten) zu sehen, wird die Möglichkeit der Erzeugung von inneren Strukturen unabhängig von der Durchgängigkeit der Softwarelösung entweder direkt im Anschluss an die Topologie-Optimierung geboten oder ist in einem Design-Paket für Facettengeometrie (z.B. Materialise 3-matic) implementiert. Aufgrund dieser entscheidenden Rolle der Rückführungswerkzeuge widmet sich die nachfolgende Case Study in Kap. 5, neben der genaueren Betrachtung der Topologie-Optimierungslösungen, vor allem den unterschiedlichen Möglichkeiten beim Thema Geometrierückführung.

#### 4.5.2 Datenaufbereitung und Fertigungsvorbereitung

An den Erläuterungen aus der Softwareanalyse am Beispiel von Magics und R Designer erkennt man schnell die generelle Problematik in Bezug auf die Schnittstelle zwischen Software und Maschine. Einerseits verfügen AM Softwarelösungen wie Magics oder Netfabb über wesentlich umfangreichere Werkzeuge und Möglichkeiten. Die Anbindung an die Maschinensoftware gestaltet sich jedoch schwierig. Da die Maschinenhersteller meist eigene Schichtinformations-Formate verwenden, muss zumindest für Slicing, Hatching und Maschinenparameterimplementierung auf die herstellereigene Software zurückgegriffen werden. Inwieweit Frontendsoftware alternativ dazu auch die davor liegenden Schritte übernehmen kann, hängt von der Funktionalität der verschiedenen Softwarelösungen ab. Allgemein lässt sich, wie in Abbildung 91 dargestellt, sagen, dass einerseits der direkte Weg der Facettendatei aus der CAD Software in die Frontendsoftware und anschließend als Schichtdatei auf die Maschine möglich ist. Andererseits ist durch die Zusammenarbeit der Maschinenhersteller mit den Drittsoftwareanbietern, wie zum Beispiel mit der Implementierung der Build Processors bei Magics, zu erkennen, dass die Anlagenhersteller bemüht sind mit den Softwareherstellern im Sinne eines möglichst durchgängigen Workflows zu kooperieren.

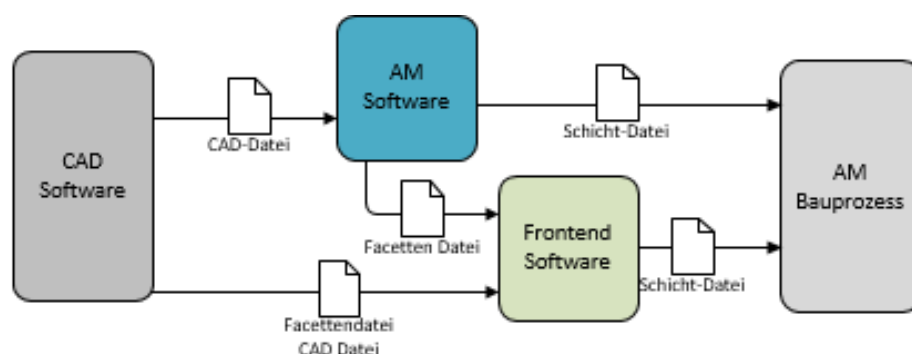
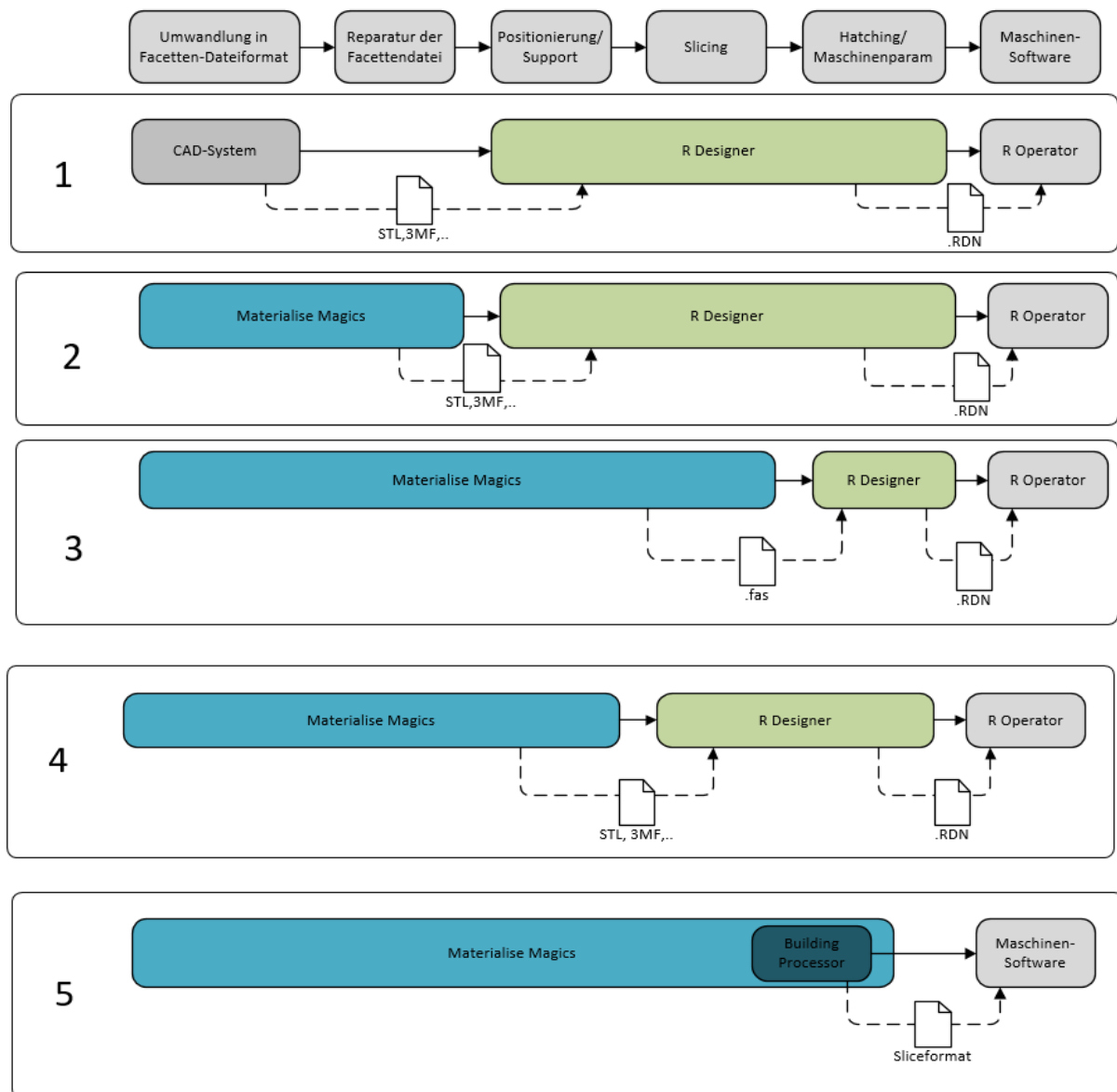


Abbildung 91: Allgemeiner Workflow der Fertigungsvorbereitung

In Abbildung 92 sind resultierende Workflows am Beispiel von Magics, R Designer und R Operator dargestellt.



**Abbildung 92: Workflows zur Datenaufbereitung bzw. Fertigstellungsvorbereitung**

Da es sich beim R Designer um eine relativ umfangreiche Front End Software handelt, besteht die Möglichkeit, alle Schritte bis zur Generierung des Schichtformates .RDN durchzuführen. Die initial benötigte Facetten Datei in STL oder 3MF Format kann entweder direkt aus der CAD Software stammen, wie in Abbildung 92 (1), oder wie empfohlen, in Materialise Magics oder ähnlichen Softwarelösungen konvertiert und anschließend repariert werden (Abbildung 92(2). Alternativ kann die AM Software Magics sowohl die Schritte des Positionierens des Bauteils im Bauraum, als auch die Generierung der Stützstrukturen übernehmen und die schon im Zuge der Softwareanalyse erläuterten Funktionen vorteilhaft einbringen. Wie in Abbildung 92 (4). dargestellt, können Bauteil und Supportstruktur anschließend als STL oder 3MF Datei in R Designer exportiert werden, wo das

Hatching und die Maschinenparameter ergänzt werden. Dabei wird jeweils eine Facetten-Datei für Bauteil und Support übergeben. Ob es Sinn macht, wie in Abbildung 92 (3), auch das Slicing in Magics durchzuführen, hängt davon, ob das herstellereigene Schichtformat unterstützt wird. Im Fall von Magics und der DMG MORI 30 SLM wird das verwendete Format .F+S unterstützt und kann daher exportiert werden. Es sollte jedoch bedacht werden, dass beim Export der Schichtdaten zu R Designer keine Positionsänderung mehr möglich ist.

Ist die Frontendlösung in die AM Software integriert, wie im Beispiel von Build Processoren in Magics, wird ein durchgängiger Workflow geschaffen, wie in Abbildung 92 (5) dargestellt. Es können so die Vorteile beider Softwarelösungen ausgenutzt werden. In diesem Zusammenhang ist man jedoch darauf angewiesen, dass eine Kooperation zwischen Anlagenhersteller und Softwarehersteller stattfindet, was im Fall der DMG MORI 30 SLM bis dato nicht der Fall ist.

Für die nachfolgende Case study wird aufgrund des großen Funktionsumfanges der Front-End Software R Designer, Magics lediglich zur Konvertierung zu STL und zur Reparatur der Datei verwendet, dies entspricht Workflow 2 aus Abbildung 92.

## 5 Case Study Flaschenöffner

Um die beschriebenen Softwaretools und Workflows zu testen und anschließend beurteilen zu können, soll eine Case Study durchgeführt werden. Als Demonstrationsteil soll ein Flaschenöffner modelliert und anschließend auf der DMG Mori Lasertec 30 SLM gefertigt werden.

Zu diesem Zweck wurden 3 Modellierungsvarianten gewählt, welche sich im Wesentlichen an der Art der Geometrierückführung von Simulations- und Optimierungsergebnissen unterscheiden. Bei den verwendeten Softwarelösungen handelt es sich um kostenlose Studentenlizenzen bzw. um lizenzierte Software der TU Wien.

Es ist zu betonen, dass nicht alle Programme, welche in Kap. 4 erwähnt wurden, als Studentenversion verfügbar sind. Dies trifft leider vor allem auf die neuesten und hochentwickeltsten Lösungen zu. Diese konnten daher leider nicht getestet werden. Außerdem sind die meisten kostenlosen Studentenversionen mit Limitierungen bezüglich Funktionsumfangs behaftet, welche teilweise auch Einfluss auf den Workflow haben. In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Modellierungsvarianten im Detail erläutert.

### 5.1 Ausgangsmodell

Als Ausgangsbasis für den generativen Produktentwicklungsprozess dienen, wie schon in Kap. 3.2 erwähnt, entweder Scan-Daten in der Form von Facettenmodellen oder klassische CAD-Modelle von schon vorhandenen Bauteilen, welche adaptiert oder optimiert werden sollen. Für ein optimales Ergebnis ist eine größtmögliche Simplifizierung des Ausgangsmodells wünschenswert, sodass im Wesentlichen nur der Bauraum bzw. der Designbereich abgebildet ist.

Als Ausgangsmodell wurde daher ein sehr abstraktes Modell eines Flaschenöffners konstruiert, welches nur die Hauptabmessungen und die Funktionsflächen darstellt, siehe Abbildung 93.

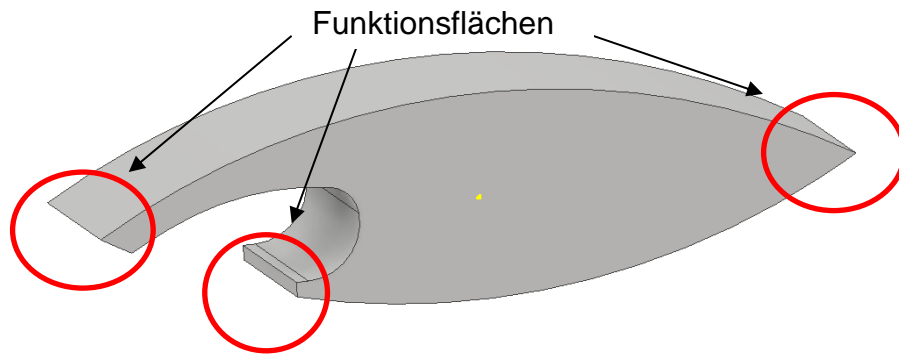


Abbildung 93: Ausgangsmodell

Die Beachtung der Funktionsflächen ist besonders wichtig, da diese üblicherweise von der Optimierung ausgenommen sind und daher schon zu Beginn nahe an der endgültigen Form sein sollten. Im Fall des Flaschenöffners können drei Funktionsflächen identifiziert werden, wie in Abbildung 93 dargestellt. Dabei handelt es sich um die beiden Angriffspunkte an der Flasche bzw. den Kraftangriffspunkt am hinteren Ende des Flaschenöffners. Ausgehend von dieser Basiskonfiguration unterscheiden sich nun im Folgenden die drei Modellierungsvarianten.

## 5.2 Variante 1: Detailgetreue CAD Geometrierückführung

Für die erste Workflow-Variante wird, ausgehend von der Ausgangsgeometrie, die gesamte Prozesskette der Konstruktion mit Hilfe von Solidthinking Inspire gebildet. Der resultierende Workflow, inklusive aller Datenschnittstellen ist in Abbildung 94 zu sehen.

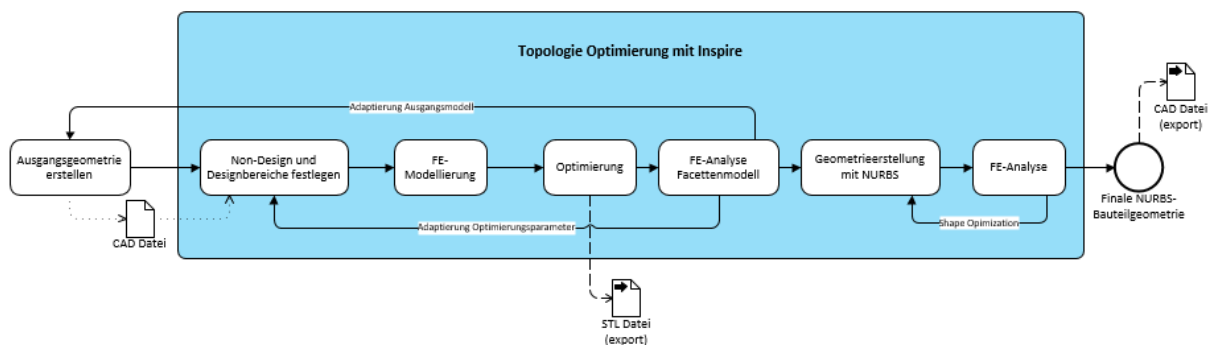


Abbildung 94: Prozess der Geometrierückführung mit Polynurbs in Inspire

## 5.2.1 Schritt 1: Definition Design Space und FE-Modeling

### 1. Designbereich, Non-Designbereich definieren:

Zuerst müssen die Non-Designbereiche abgetrennt werden, sodass das Bauteil, wie in Abbildung 95 zu sehen, aus vier separaten Volumina besteht. Der mittlere Teil wird als Designbereich definiert.

### 2. Werkstoff Definition

Als Werkstoff wird Stahl AISI 316L verwendet. Die Streckgrenze wird von Inspire mit  $205 \frac{N}{mm^2}$  angegeben. Dies ist im Vergleich zu den teilweise höheren Werten von SLM Bauteilen in der Literatur eine sehr konservative Schätzung. Die verwendeten Werte aus Inspire sind in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Materialkennwerte Stahl AISI 316 aus Inspire

E-Modul	Poissonzahl	Dichte	Streckgrenze
200*10 <sup>3</sup> MPa	0.29	8*10 <sup>3</sup> g/mm <sup>3</sup>	205 MPa

### 3. Definition der Lasten und Randbedingungen

In einem einfachen Versuch wurde mit Hilfe einer Kofferwaage, welche am hinteren Ende eines handelsüblichen Flaschenöffners angebracht wurde, ein Öffnungsvorgang durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass eine Kraft von etwa 50N benötigt wird, um den Kronkorken zu entfernen. Für die Optimierung wurde mit 60N, also 20% mehr kalkuliert. Die Kraft wird im hinteren Bereich angebracht, um den größtmöglichen Hebel zu simulieren. Die beiden Angriffsflächen am Kronkorken werden vereinfacht als Lagerung modelliert. Üblicherweise werden mehrere Optimierungsdurchläufe mit leicht veränderten Randbedingungen durchgeführt, um ihren Einfluss auf das Optimierungsergebnis zu untersuchen.

### 4. Fertigungsrestriktionen

Als Fertigungsrestriktion wird eine Symmetrieebene im Längsschnitt des Flaschenöffners festgelegt. Außerdem wird eine Überhangsrestriktion definiert. Dabei wird eine Aufbaurichtung von hinten nach vorne bzw. ein Überhangwinkel von 45° angenommen, siehe Abbildung 95.



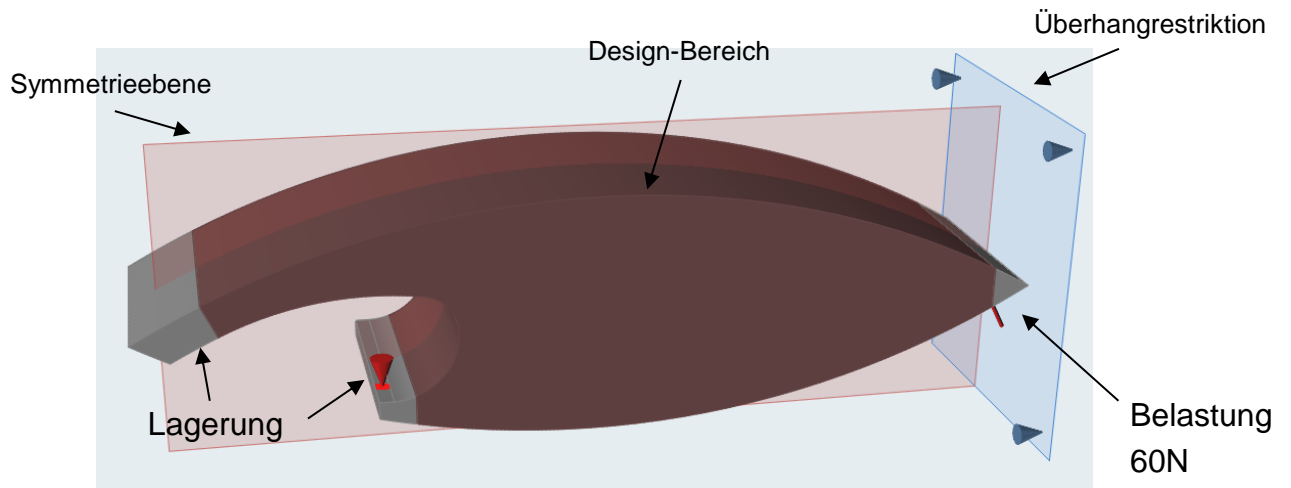


Abbildung 95: Optimierungsmodell Inspire

### 5.2.2 Schritt 2: Topologie-Optimierung inkl. erster Analyse

Üblicherweise werden mehrere Optimierungsdurchläufe mit leicht veränderten Optimierungszielen, Randbedingungen oder Lastfällen durchgeführt. Dadurch soll der Designer ein Gefühl für die Lastpfade im Bauteil bekommen und verschiedene Designvorschläge erhalten. Ein besonderer Vorteil von Inspire ist die Möglichkeit, direkt nach der Optimierung eine Belastungsanalyse durchführen zu können um erste Abschätzungen zu treffen.

Tabelle 14: Optimierungslauf 1 Inspire

#### Optimierungslauf 1:

**Zielfunkt.:** max. Steifigkeit  
**Masseziel:** 50% des Designbereichs  
**Dickenrestriktion:** 2mm

#### Ergebnis:

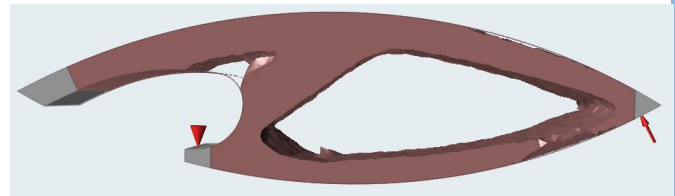


Abbildung 96: Inspire Opt. 1: Seitenansicht

#### Analyse:

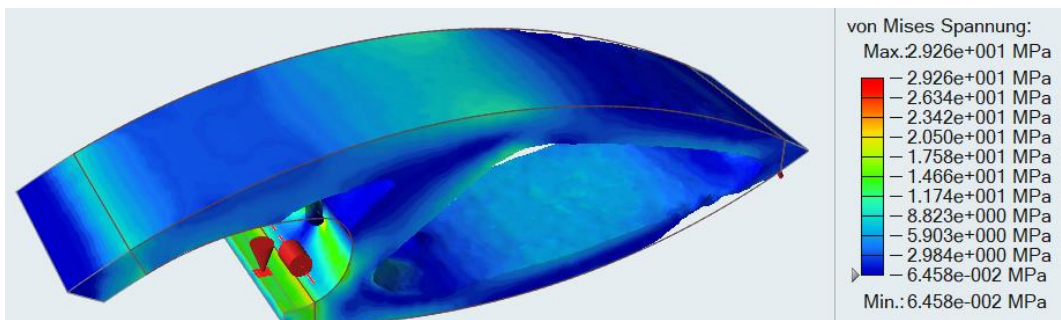


Abbildung 97: Inspire Opt. 1: Analyse

Tabelle 15: Optimierungslauf 2 Inspire

## Optimierungslauf 2

**Zielfunkt.:** max. Steifigkeit  
**Masseziel:** 40% des Designbereichs  
**Dickenrestriktion:** 2mm

### Ergebnis:

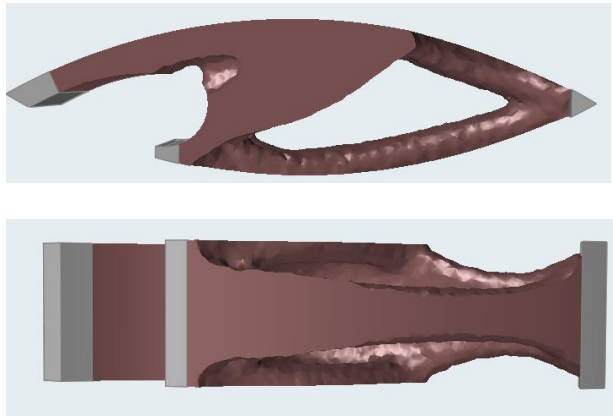


Abbildung 98: Inspire Opt 2: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten)

### Analyse:

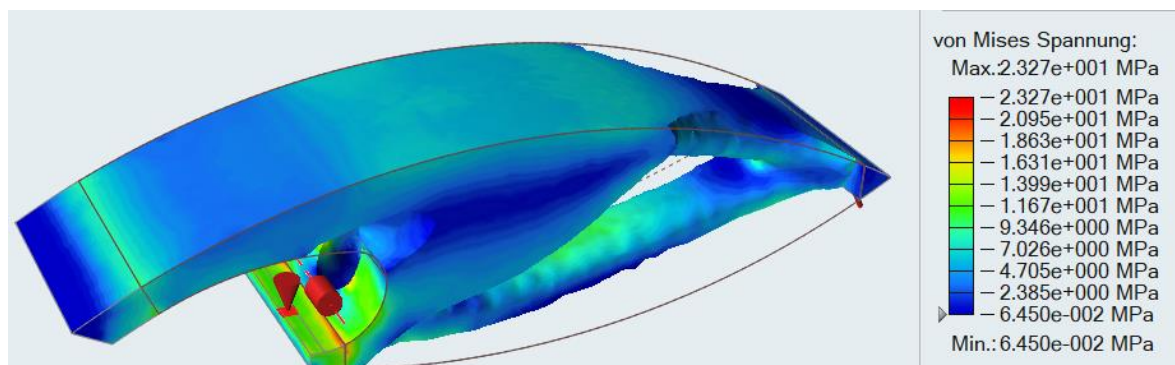


Abbildung 99: Inspire Opt. 2: Analyse

Tabelle 16: Optimierungslauf 3 Inspire

## Optimierungslauf 3:

**Zielfunkt.:** Masse minimieren  
**Spannungsrestriktion:** min.  
 Sicherheitsfaktor 1.5  
**Dickenrestriktion:** 1.5mm

### Ergebnis:

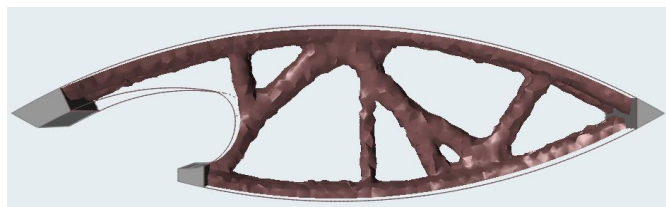


Abbildung 100: Inspire Opt. 3: Seitenansicht

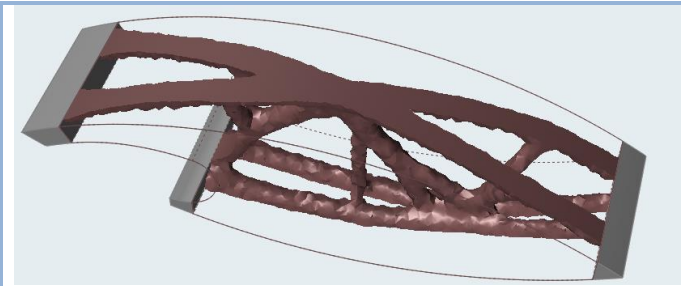


Abbildung 101: Inspire Opt. 3: Iso-Ansicht

Analyse:

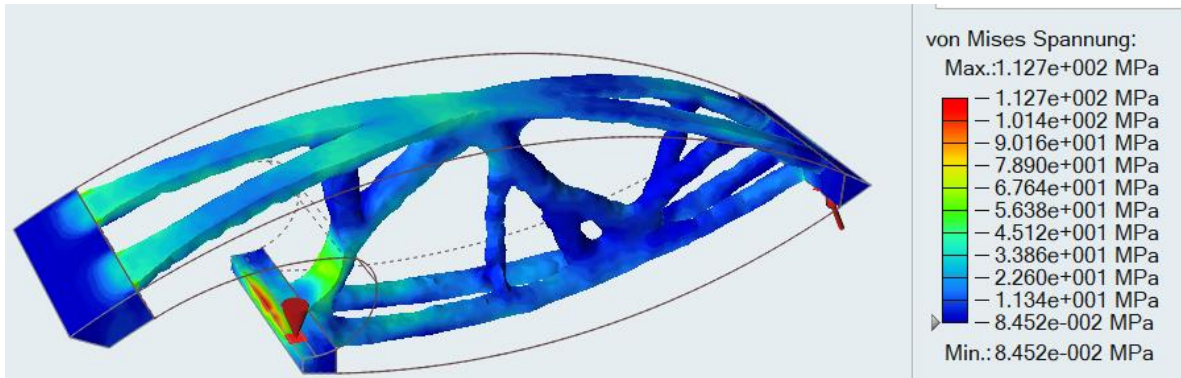


Abbildung 102: Inspire Opt. 3: Analyse

Erkenntnisse und Vergleich:

Anschließend können die Ergebnisse nach verschiedenen Kriterien verglichen werden. Durch diese Gegenüberstellung mittels Balkendiagramm wird der Konstrukteur dabei unterstützt, schnell die Vor- und Nachteile der Ergebnisse zu erkennen und eine Auswahl zu treffen. In Tabelle 17 sind die zuvor generierten Varianten gegenübergestellt.

Tabelle 17: Vergleich der Topologie Optimierungsergebnisse

Ausführen	Max. von Mises Spannung	Masse gesamt
Flaschenöffner ausgangs inventor Max. Steifigkeit Masse 50% (2)	2.926e+001 MPa	3.509e+001 g
Flaschenöffner ausgangs inventor__inArbeit Max. Steifigkeit Masse 40% (4)	2.327e+001 MPa	2.803e+001 g
Flaschenöffner ausgangs inventor__inArbeit Min. Masse SF 1.5 (10)	1.127e+002 MPa	8.184e+000 g

Durch die ersten Optimierungsversuche und Festigkeitsanalysen stellt man fest, dass vor allem im inneren Bereich des Bauteils Masse entfernt werden kann, ohne die Bauteilfestigkeit zu gefährden.

Optimierungslauf 1:

An dem Konturplot lassen sich die kritischen Bereiche des Bauteils identifizieren. Diese befinden sich vor allem am oberen Bogen sowie unteren Angriffspunkt des Kronkorkens, wo der Optimierungsalgorithmus Bereiche entfernt hat, wodurch jedoch

Spannungsspitzen entstehen. Da die entstehenden Spannungen jedoch weit unter der Streckgrenze des Materials liegen, sind diese für die Festigkeit des gesamten Bauteils nicht weiter problematisch. Beim Enddesign sollten aber derartige Spannungsspitzen vermieden werden.

#### Optimierungslauf 2:

Bei einer Massenreduktion um 60% erkennt man, dass diese vor allem durch Verschmälerung im Bereich der oberen und unteren Strebe erreicht wird. Schon im ersten Versuch der 50% Massereduktion erkennt man, dass dieser Bereich wenig Spannungen aufnehmen muss und daher Optimierungspotential bietet.

Im Konturplot kann man eine leichte Spannungserhöhung im Bereich der schmalen unteren Strebe feststellen, welche jedoch unbedenklich ist. Am unteren Angriffspunkt sind die Spannungsspitzen aufgrund der größeren Ausrundung gegenüber der ersten Optimierung verschwunden. Die vorhandenen Spannungsspitzen am unteren Angriffspunkt resultieren aus den vereinfachten Randbedingungen der Lagerung und können vernachlässigt werden, da diese in der Realität nicht auftreten.

#### Optimierungslauf 3:

Optimierungsvariante 3 zeigt die errechnete Gestalt beim Ziel der minimalen Masse. Durch die filigrane Konstruktion kommt es zu einer enormen Massereduktion, wie in Tabelle 17 erkennbar. Die dadurch resultierenden höheren Spannungswerte an vielen Stellen sind im Konturplot zu sehen. Durch die Restriktion des Spannungssicherheitsfaktors mit 1.5 (bezogen auf die Streckgrenze), entspricht das Bauteil den Festigkeitsanforderungen beim verwendeten Lastfall.

### **Iteration 1: Anpassung des Designbereichs**

Da beim zu konstruierenden Flächenöffner auch auf die Optik, also das Design und die Handhabung (Ergonomie) Rücksicht genommen werden soll, wird das Ausgangsmodell adaptiert, wie in Abbildung 103. zu sehen. Seitlich werden zwei Streben als Non-Designbereich deklariert, um einen Schriftzug anzubringen. Des Weiteren wird der untere Angriffspunkt am Kronkorken schmaler gestaltet, damit der Eingriff sichergestellt ist. Aus optischen Gründen wird auch das hintere Ende des Flaschenöffners schmaler konstruiert, um eine zulaufende Kontur zu designen.

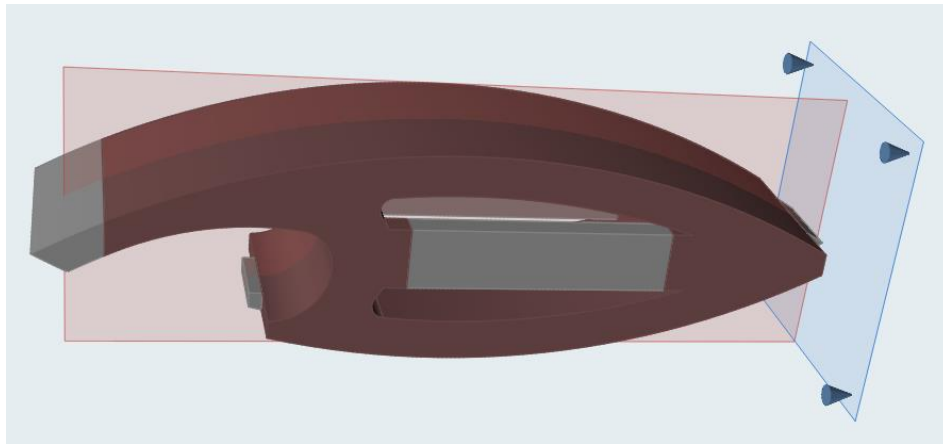


Abbildung 103: Adaptiertes Ausgangsmodell

All diese Maßnahmen beschränken die Gestaltungsfreiheit des Optimierungsalgorithmus und lenken das Design in eine gewisse Richtung. Im allgemeinen Fall, bei dem Optik und Handhabung keine Rolle spielen, sollten derartige Adaptionen vermieden werden, um ein optimales Ergebnis nach Masse und Steifigkeitsgesichtspunkten zu erhalten. Im Folgenden werden weitere Optimierungsläufe mit den neuen Randbedingungen durchgeführt.

Tabelle 18: Optimierungslauf 4 Inspire

### Optimierungslauf 4:

**Zielfunkt.:** max. Steifigkeit

**Masseziel:** 40% des Designbereichs

**Dickenrestriktion:** 2mm

### Ergebnis:

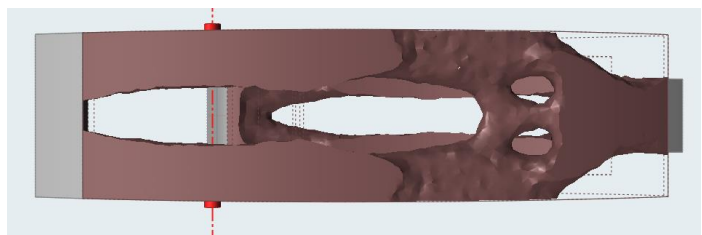
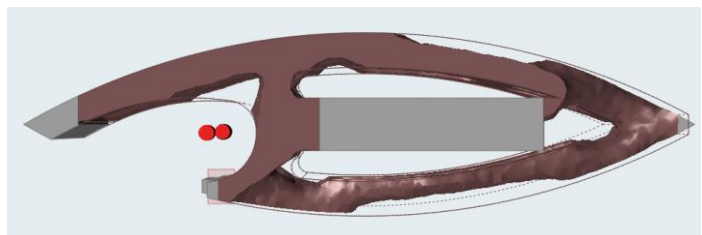


Abbildung 104: Inspire Opt. 4: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten)



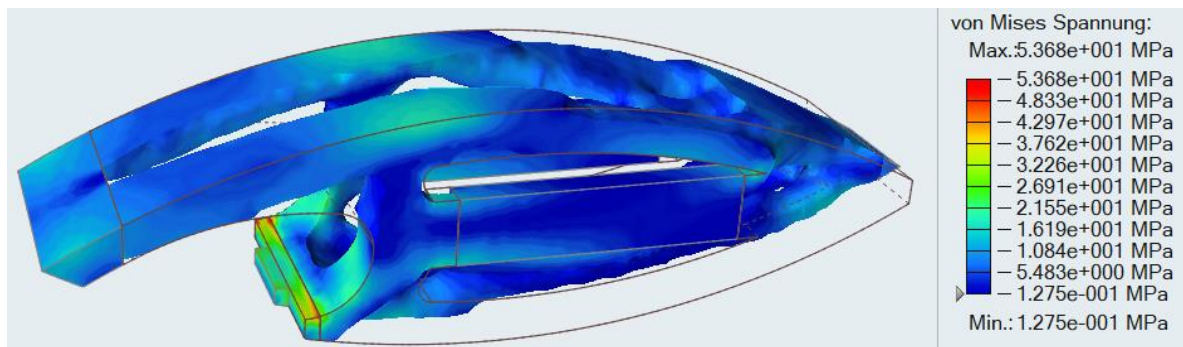
**FE-Analyse:**

Abbildung 105: Inspire Opt. 4: Analyse

Tabelle 19: Optimierungslauf 5 Inspire

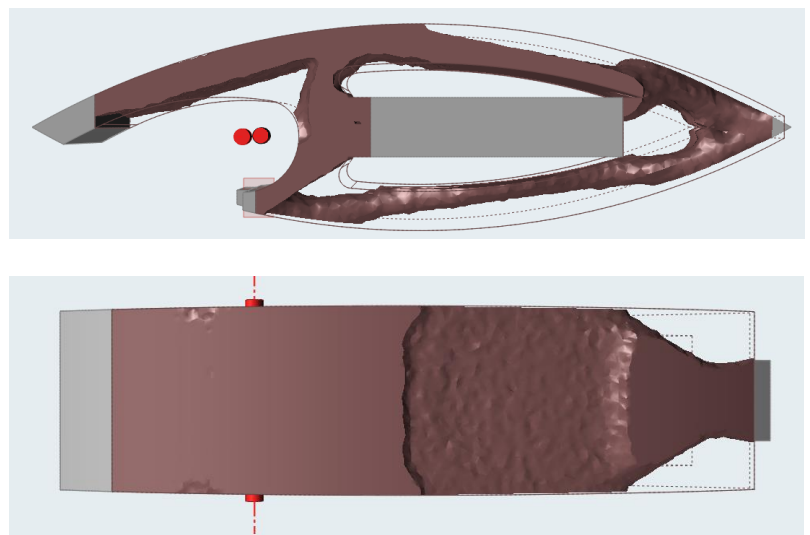
**Optimierungslauf 5:****Zielfunkt.:** max. Steifigkeit**Masseziel:** 40% des Designbereichs**Dickenrestriktion:** 1.5mm**Ergebnis:**

Abbildung 106: Inspire Opt. 5: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten)

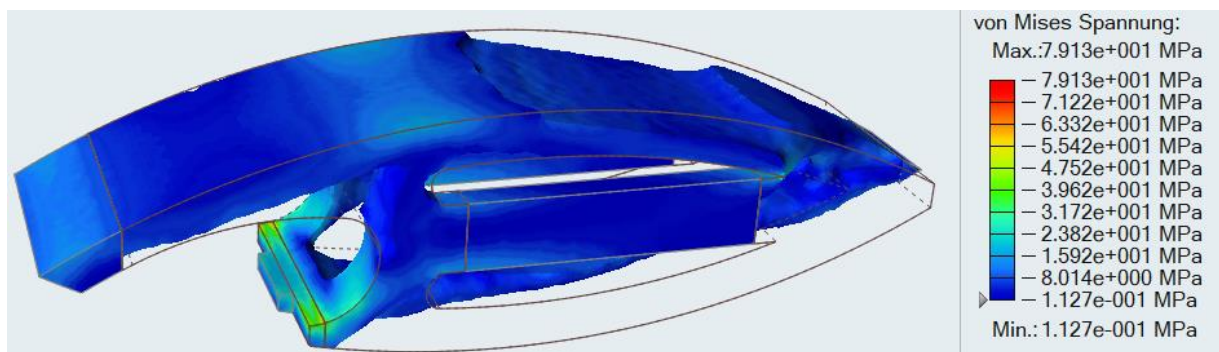
**FE-Analyse:**

Abbildung 107: Inspire Opt. 5: Analyse

## Optimierungslauf 6:

**Zielfunkt.:** Masse minim.

**Spannungsrestriktion:** min.

Sicherheitsfaktor 1.5

**Dickenrestriktion:** 1.5mm

## Ergebnis:

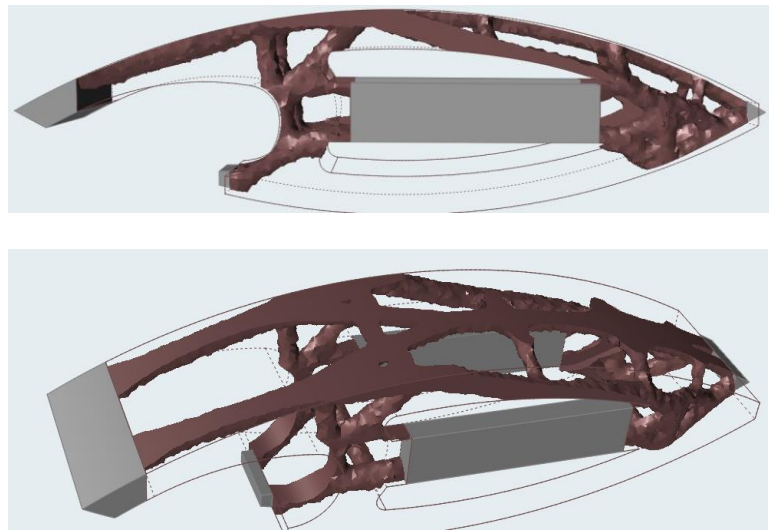


Abbildung 108: Inspire Opt. 6: Seitenansicht (oben), Iso-Ansicht (unten)

## FE-Analyse:

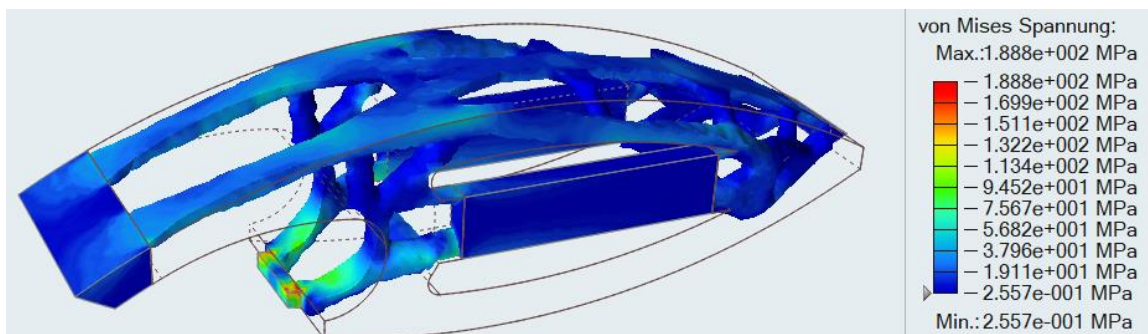


Abbildung 109: Inspire Opt. 6: Analyse

## Erkenntnisse und Vergleich







Im Vergleich zu den ersten Optimierungsläufen konnte festgestellt werden, dass die zusätzlichen Seitenstreben die Belastbarkeit deutlich steigern. Darüber hinaus ist eine leichte Änderung in der Charakteristik der generierten Formen festzustellen. Durch die stabilisierende Wirkung der Seitenstreben kann man anhand von Optimierungslauf 4 sehen, dass im oberen Bereich mehr Masse eingespart werden kann. Vergleicht man Optimierungslauf 4 und 5, ist zu erwähnen, dass durch die unterschiedlichen Dickenrestriktionen, Einfluss auf die generierte Form genommen werden kann. Liegt 2mm Dickenrestriktion vor, tendiert der Algorithmus dazu, die Strebenquerschnitte oben und unten nicht zu verändern und dafür im mittleren

Bereich Material zu entfernen. Werden dünnere Wandstärken toleriert, wird die obere Strebe stattdessen dünner gestaltet und kein Material entfernt.

Beim Optimierungsziel „minimale Masse“, wird die untere Strebe komplett entfernt, dies geschieht wiederum aufgrund der stabilen Seitenstreben. Im oberen Bereich wurde eine skelettähnliche Struktur implementiert. Da die Überhangrestriktion bei Masseminimierung nicht wirksam ist (eventuell Problem der academic Version), muss auf dies während der Rückführungsphase geachtet werden.

An den FE-Analysen erkennt man, dass die Spannungen in allen Bereichen unter der Streckgrenze liegen. Beim Optimierungslauf 6 sind zwar etwas erhöhte, aber trotzdem unkritische Werte zu erkennen. Die Spannungsspitzen im Bereich des unteren Angriffspunktes sind wiederum nur theoretischer Natur und resultieren aus den vereinfachten Lagerungsbedingungen mit Inspire. Ein Masse- und Spannungsvergleich der Optimierungsläufe 4-6 ist in Tabelle 20 zu sehen.

**Tabelle 20: Vergleich Ergebnisse Inspire Iteration 1**

Ausführen	Lastfall	Max. von Mises Spannung	Masse gesamt
Flaschenöffner ausgangs inspire_1.5mm Max. Steifigkeit Masse 40% (29)	Lastfall 1	7.913e+001 MPa 	2.087e+001 g 
Flaschenöffner ausgangs inventor_hohl2 Min. Masse SF 1.2 (17)	Lastfall 1	1.888e+002 MPa 	1.051e+001 g 
Flaschenöffner ausgangs inspire_2mm Max. Steifigkeit Masse 40% (28)	Lastfall 1	5.368e+001 MPa 	2.061e+001 g 

### 5.2.3 Schritt 3: Rückführung mittels NURBS

Nach den Erkenntnissen aus der Optimierungsphase bietet Inspire nun die Möglichkeit der Geometrierückführung mittels PolyNURBS, um ein CAD File zu generieren, siehe Abbildung 110 und Abbildung 111. Als Vorlage wurde das Optimierungsergebnis bei minimaler Masse verwendet. Aus optischen und ergonomischen Gründen wurde die untere Strebe beibehalten. Alternativ dazu, kann das Optimierungsergebnis auch direkt als STL exportiert und in Softwarelösungen zur Anpassung von Facettengeometrien weiterverarbeitet werden. Das finale Modell hat eine Masse von 12,63g, was einer Massereduktion von 71.75% gegen über den Ausgangsmodell entspricht.



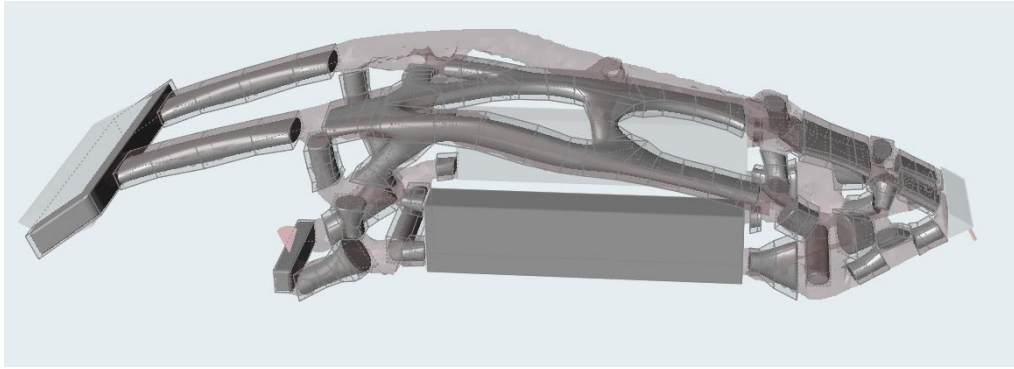


Abbildung 110: Modellierung mittels PolyNURBS-Tool

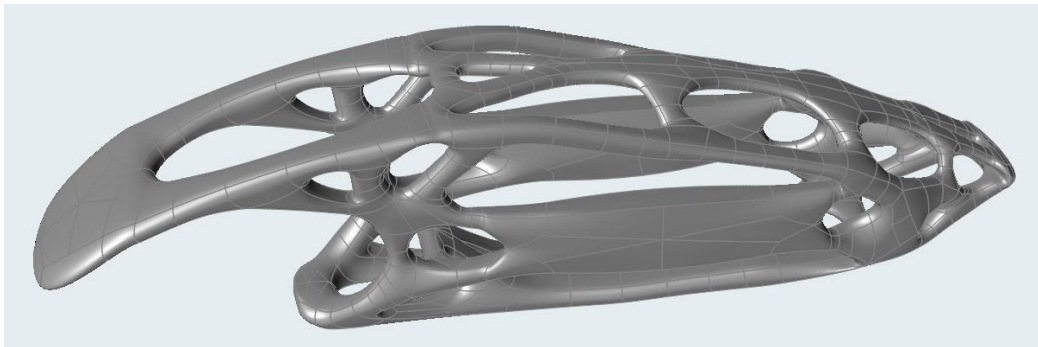


Abbildung 111: finales CAD Modell (Masse: 12,63g)

#### 5.2.4 Schritt 4: FE Validierung

Die folgenden Plots zeigen abschließend die Ergebnisse der FE Analyse mit Inspire. Durch die teilweise sehr dünnen Streben ist in einigen Bereichen eine etwas erhöhte Spannung feststellbar, jedoch im weit unterkritischen Bereich. Die lokalen Spannungsspitzen am unteren Angriffspunkt sind der Lagerung geschuldet und in der Praxis nicht relevant. Der Konstruktionsprozess kann mit einem positiven Ergebnis der Festigkeitsanalyse abgeschlossen werden.

##### Spannungs-Plot:

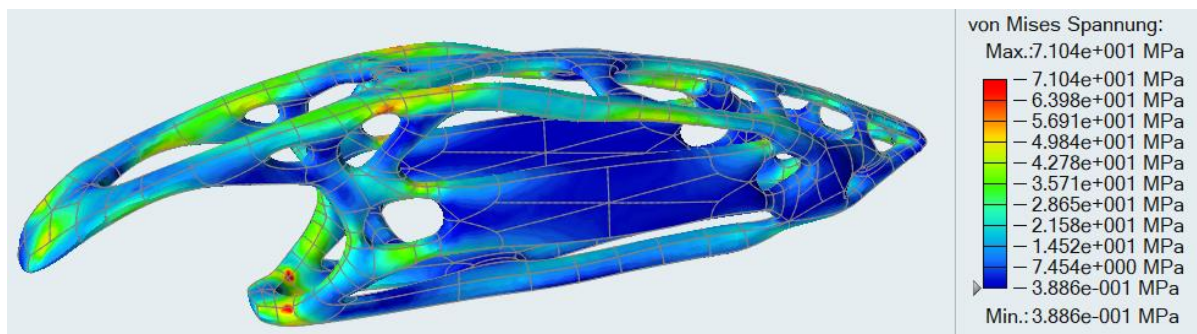
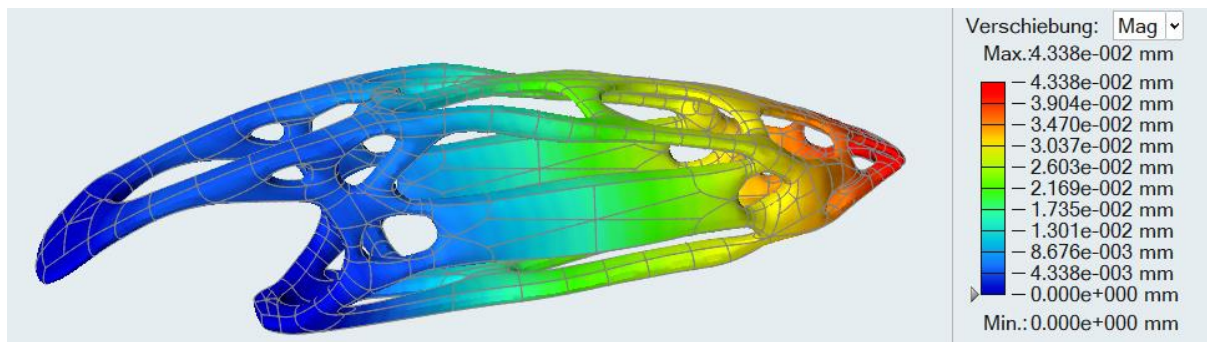


Abbildung 112: Von Mises Spannungsplot Inspire

**Verschiebungs-Plot:****Abbildung 113: Verschiebungs-Plot Inspire**

Das finale, validierte CAD-Modell, kann nun für die additive Fertigung vorbereitet werden.

**5.2.5 Schritt 5 (Optional) Implementierung von Gitterstrukturen**

Mit Inspire besteht die Möglichkeit statt oder nach der Topologie-Optimierung einen weiteren Optimierungszyklus zur Implementierung von belastungsoptimierten Gitterstrukturen durchzuführen. Im Folgenden ist das Ergebnis eines Lattice Optimierungslaufs am Beispiel des zuvor auf 40% des Gesamtvolumens des Designbereichs optimierten Modells zu sehen.



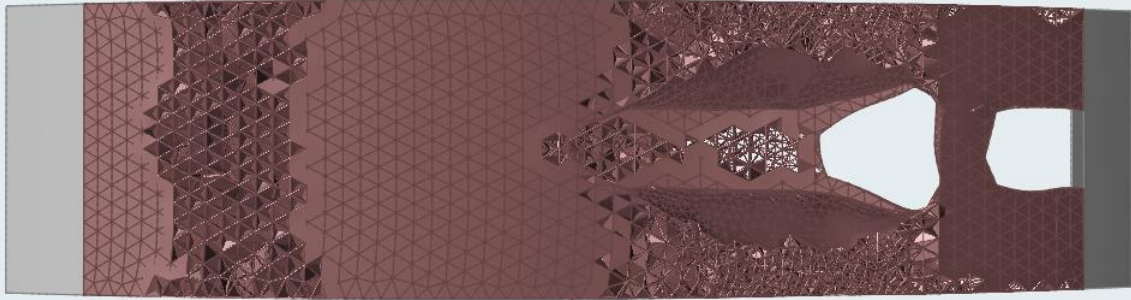


Abbildung 115: Inspire Lattice Opt.: Draufsicht

### FE-Analyse:

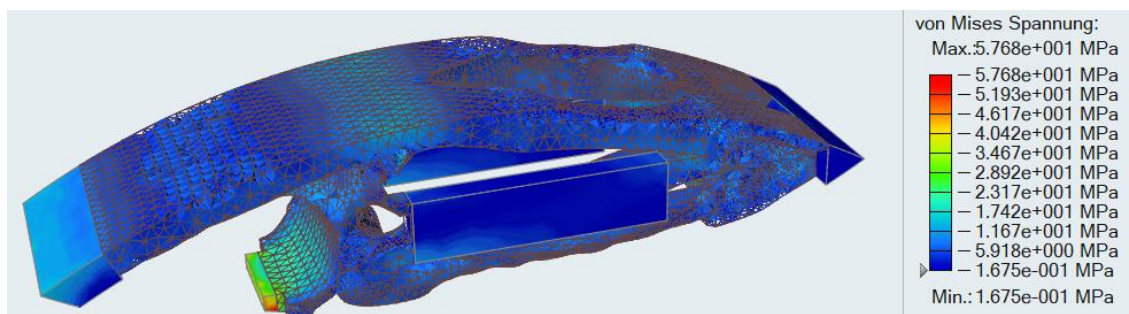


Abbildung 116: Inspire Lattice Opt.: Analyse

Das optimierte Modell mit Gitterstruktur wird direkt als FE-Kontorplot dargestellt. Man erkennt, dass die gering beanspruchten Bereiche durch Gitterstrukturen ersetzt wurden und etwa am unteren Angriffspunkt aufgrund der höheren Spannung Vollmaterial beibehalten wurde. Das resultierende Facettenmodell kann nun mittels Front-End -oder AM Software weiterverarbeitet werden, eine Rückführung in CAD Format ist nicht mehr möglich, da die Gitterstruktur auf den Facetten basiert.

## 5.3 Variante 2: Vereinfachte CAD Geometrierückführung

Bei Variante 2 soll die Geometrierückführung mittels eines klassischen parametrischen CAD-Systems erprobt werden. Dazu wird der gesamte, in Abbildung 117 dargestellte, Konstruktionsprozess mit Autodesk Inventor durchgeführt.

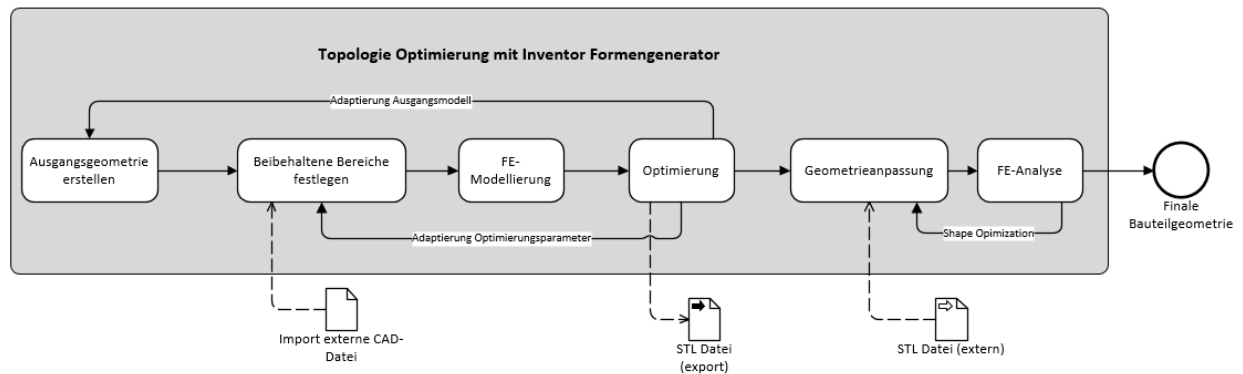


Abbildung 117: Prozess der vereinfachten Geometrierückführung mit Inventor

### 5.3.1 Schritt 1: Definition Non Design Space und FE Modellierung

#### Definition Beizubehaltende Bereiche

Die beizubehaltenden Bereiche sind in Abbildung 118 dargestellt. Am oberen Greifarm, sowie am hinteren Ende werden dazu Zylinderkörper verwendet. Am unteren Angriffspunkt und an den Seiten werden Rechtecks-Formen definiert.

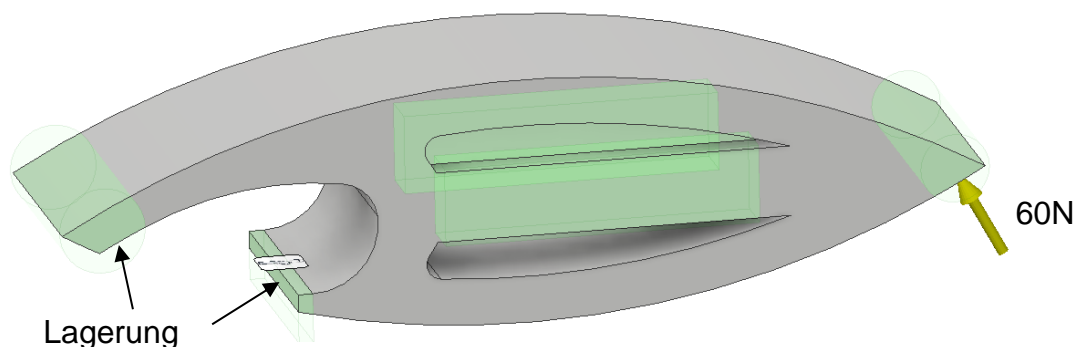


Abbildung 118: Beizubehaltende Bereiche Inventor

#### Material Definition

Als Werkstoff wird, wie schon in Variante 1, der Stahl AISI L316 verwendet.

#### Definition Lasten und Randbedingungen

Wie in Abbildung 118 zu sehen, werden die Angriffspunkte am Kronkorken wiederum vereinfacht als Lagerungen definiert und eingespannt. Der Kraftangriffspunkt befindet sich am hintersten Ende, um den größten Hebel und somit den Worst Case



anzunehmen. Die Belastung wird dabei, wie schon in Variante 1 erläutert, mit 60N angenommen.

### Definition einer Symmetrieebene

Als zusätzliche Restriktionen für den Optimierungsvorgang wird außerdem, wie in Variante 1, der vertikale-Längsschnitt (X-Y Ebene) als Symmetrieebene definiert.

## 5.3.2 Schritt 2: Topologie-Optimierung mit Formengenerator

Tabelle 21: Optimierungslauf 1 Inventor

<b>Optimierungslauf 1</b>	<b>Zielfunktion:</b> max. Steifigkeit <b>Massereduktion:</b> 40% <b>Masse:</b> 0,0265kg
<p data-bbox="226 824 375 857"><b>Ergebnis:</b></p>  <p data-bbox="497 1619 1040 1653"><b>Abbildung 119: Inventor Opt. 1 Ergebnisse</b></p>	

Tabelle 22: Optimierungslauf 2 Inventor

**Optimierungslauf 2**

**Zielfunktion:** max. Steifigkeit  
**Massereduktion:** 60%  
**Masse:** 0,0175kg

**Ergebnis:**

Abbildung 120: Inventor Opt. 2 Ergebnisse

Tabelle 23: Optimierungslauf 3 Inventor

**Optimierungslauf 3**

**Zielfunktion:** max. Steifigkeit  
**Massereduktion:** 70%  
**Masse:** 0,0131kg

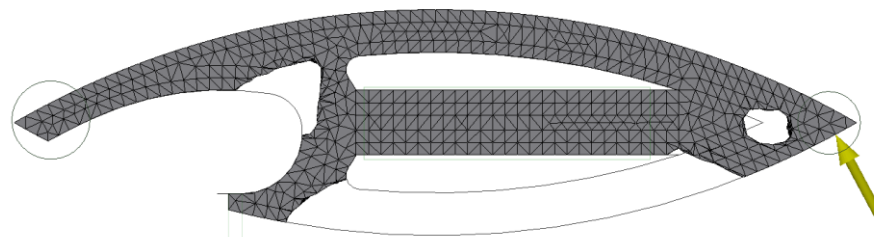
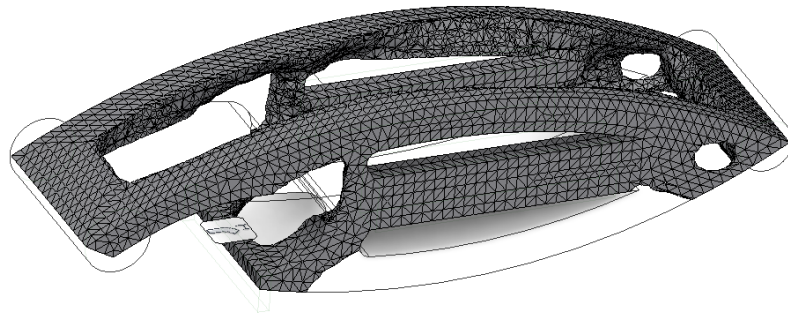
**Ergebnis:**

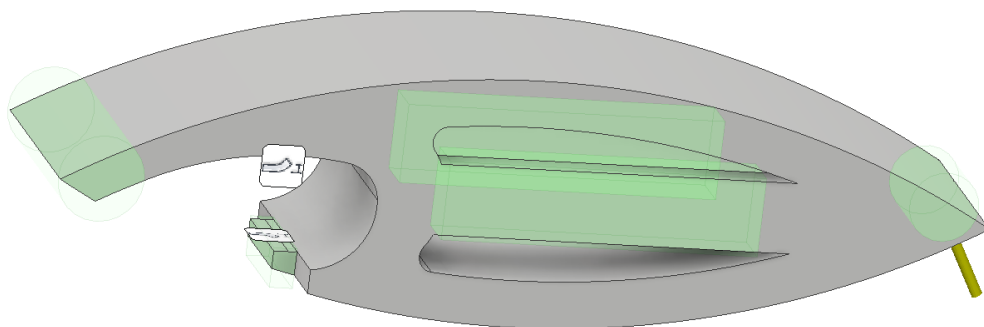
Abbildung 121: Inventor Opt. 3 Ergebnisse: Seitenansicht



**Abbildung 122: Inventor Opt. 3 Ergebnisse Iso-Ansicht**

### **Iteration1: Anpassung des Design-Bereichs**

Die Randbedingungen werden angepasst, um am unteren Greifarm und am hinteren Ende des Öffners eine schmalere Form zu generieren. Dazu wird der Designbereich in diesem Bereich schmaler gestaltet, wie in Abbildung 123 zu sehen und ein erneuter Optimierungslauf durchgeführt.



**Abbildung 123: Modell mit angepasstem Designbereich**

Tabelle 24: Optimierungslauf 4

Optimierungslauf 4	Zielfunktion: max. Steifigkeit Massereduktion: 60% Masse: 0.0174kg
<p><b>Ergebnis:</b></p>  <p><b>Abbildung 124: Inventor Opt. 4 Ergebnisse</b></p>	

### Erkenntnisse:

In den errechneten Formen der ersten Optimierungsdurchläufe kann man erkennen, dass bei einer Massereduktion vor allem im unteren Bereich Material entfernt wird, da dort die geringsten Belastungen vorhanden sind. Außerdem bildet sich ein Loch am hinteren Ende des Öffners. Bei Reduzierung um 60 % wird anschließend auch an der oberen Strebe Material abgetragen. Es bildet sich also immer mehr die Form von zwei schmalen Streben oben und unten am Flaschenöffner aus. Schließlich wird bei weiterer Massereduzierung die untere Strebe komplett entfernt, wie in Optimierungslauf 3 dargestellt. Aufgrund der gewählten Randbedingungen wird grundsätzlich eine sehr simple Geometrie generiert. Da die beizubehaltenden Bereiche, bei den ersten 3 Optimierungsläufen, über die gesamte Breite positioniert sind, bleibt die Außenkontur im Wesentlichen erhalten.

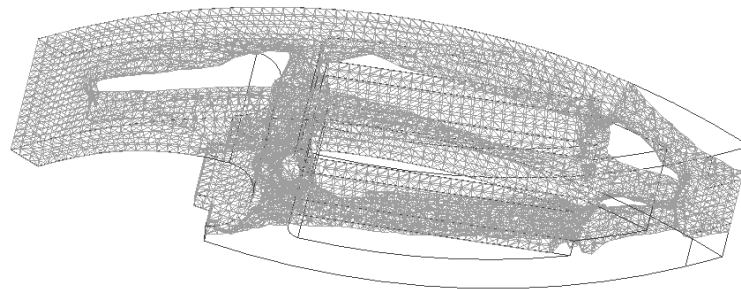
Durch das Adaptieren der Randbedingungen wird nun auch Material in Breitenrichtung entfernt. Es bildet sich dementsprechend eine sehr schmale Strebe im unteren Bereich aus. Die seitlichen Bereiche für den Schriftzug werden nur mehr



mit dem oberen Teil des Flaschenöffners verbunden, was auf eine sehr geringe Belastung in diesem Bereich schließen lässt. Durch die verschiedenen Optimierungsläufe konnte ein guter Eindruck gewonnen werden, in welchem Bereich Material notwendig. Da die Optimierungsergebnisse im Vergleich zu Inspire jedoch nicht gleich direkt überprüft werden können, dienen sie lediglich als Orientierung für die geometrische Umsetzung. Eine Validierung mittels FE-Analyse ist erst am CAD Modell möglich.

### 5.3.3 Schritt 3: Geometrie-Rückführung

Als Orientierung für die konstruktive Umsetzung wird das Optimierungsmodell mit 60% Massereduktion (Optimierungslauf 3) gewählt, was einem mittleren Optimierungsgrad entspricht und daher als guter Anhaltspunkt angesehen wird. Das Optimierungsergebnis wird dem Modell wie eine Schablone hinterlegt, wie in Abbildung 125 zu sehen.



**Abbildung 125: Modell mit hinterlegtem Optimierungsergebnis**

In Abbildung 126 ist das konstruierte Modell zu sehen. Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Aufbaurichtung bei der Optimierung, wurde während der Konstruktion darauf Rücksicht genommen und versucht Überhangwinkel unter  $45^\circ$  zu vermeiden. Besonders günstig ist dabei eine sogenannte Tropfenform, wie etwa im oberen Bereich des Flächenöffners zu sehen. Um Spannungsspitzen zu vermeiden werden schon vorab einige Bereiche angepasst (markiert in Abbildung 126). Das finale Modell mit einer Masse von 23g, ist in Abbildung 127 dargestellt. Die Masse konnte somit um 48,5% gegenüber dem Ausgangsmodell (44.71g) reduziert werden.

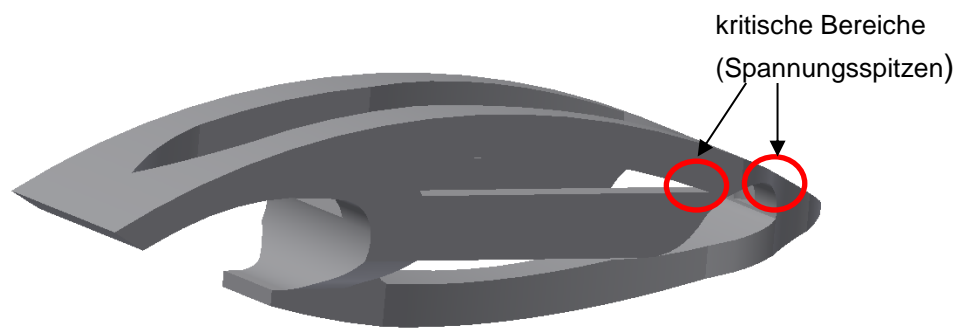


Abbildung 126: Ergebnis der ersten Konstruktion

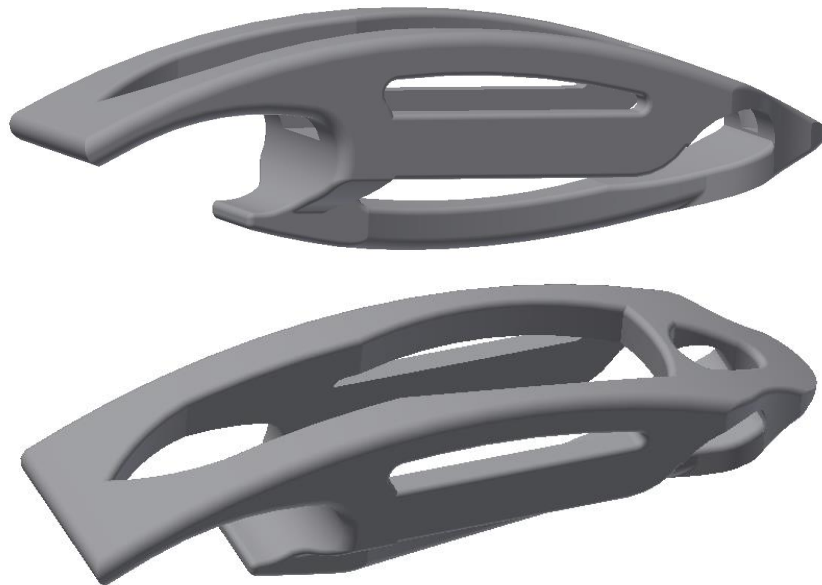


Abbildung 127: finales Modell des Flaschenöffners (Inventor)

#### 5.3.4 Schritt 4: FE Validierung

Die anschließende FE-Analyse wird mit der, in Inventor integrierten Belastungsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 128 und Abbildung 129 zusehen.

##### Spannungsplot:

Typ: Von Mises-Spannung  
Einheit: MPa  
12.05.2018, 15:33:25

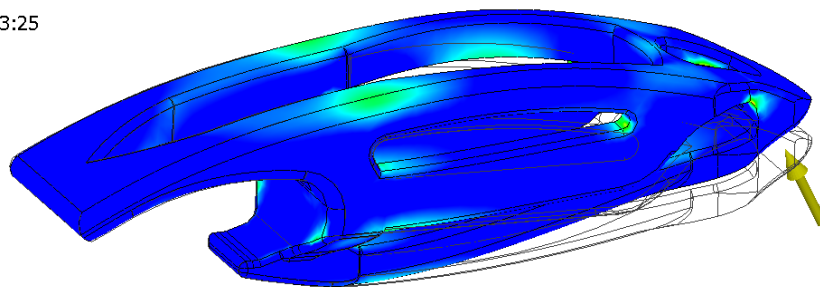
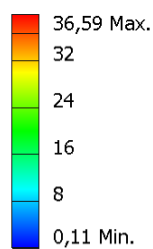
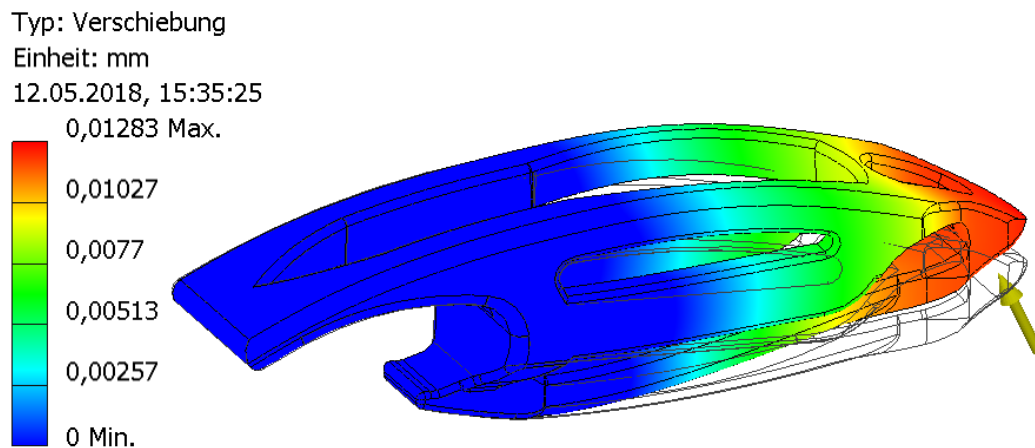


Abbildung 128: Spannungsplot FEA Inventor

**Verschiebungsplot:****Abbildung 129: Verschiebungsplot FEA Inventor**

Obwohl schon eine beachtliche Masseeinsparung erzielt werden konnte, erkennt man in anhand der Spannungsplots, dass die maximal zu erwartenden Spannungen weit unter der Steckgrenze liegen und daher keine Gefahr für Bauteilversagen besteht. Durch die massive Ausgestaltung des unteren Eingriffs und Adaptionen bei den Lagerungsbedingungen, welche Inventor bietet, konnten Zwangsspannungen in diesem Bereich verhindert werden. Die am ersten Modell als kritisch markierten Bereiche konnten durch entsprechende Verrundungen entschärft werden.

## 5.4 Variante 3: Direkte Verarbeitung der Facettengeometrie

Bei Variante 3 wird die Möglichkeit dargestellt, das Ergebnis direkt aus der Topologie-Optimierung zu übernehmen, zu bearbeiten und in weiterer Folge zu analysieren, ohne den oft zeitaufwändigen Weg über die CAD Geometrierückführung zu gehen. Ein großes Anwendungsgebiet ist außerdem die direkte Verarbeitung von Scandaten aus der Medizin. Im Zuge dieser Arbeit wird dafür die Softwarelösung Materialise 3-matic Version 12.0 verwendet, welche auf dieses Anwendungsfeld spezialisiert ist. Zur darauffolgenden Festigkeitsanalyse wird das Hyperworks-Softwarepaket von Altair verwendet. Der Workflow ist in Abbildung 130 skizziert.

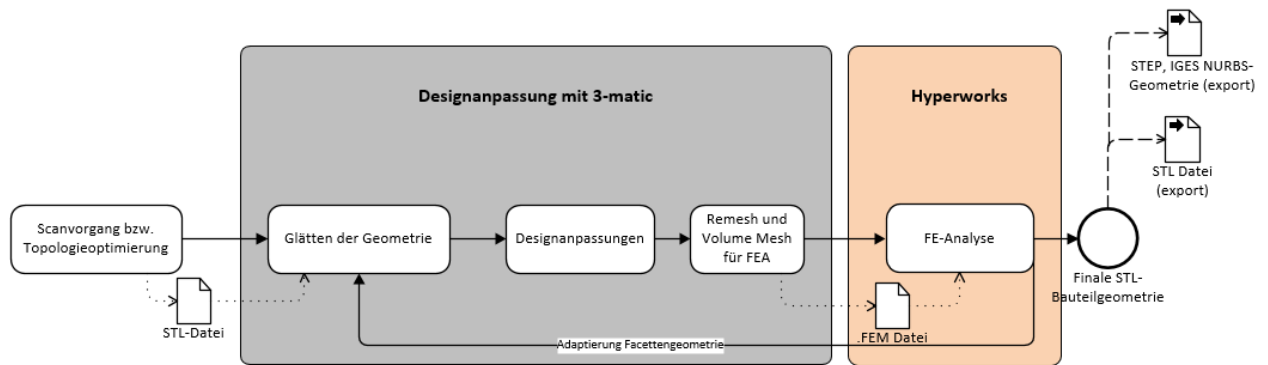


Abbildung 130: Prozess der Geometrierückführung mit 3-matic

### 5.4.1 Schritt 1: Geometrieanpassung

#### Import der optimierten Daten als STL

Die meisten Softwarelösungen, welche Topologie-Optimierungs-Algorithmen implementiert haben, bieten die Möglichkeit, die Ergebnisse direkt als STL Datei zu exportieren. Dabei handelt es sich je nach Optimierungssoftware um mehr oder weniger exakte Facettenkörper. In Abbildung 131 ist die verwendete Geometrie aus dem Inventor Formengenerator dargestellt. Materialise 3-matic stellt nun Tools zur Verfügung, um die Geometrie anzupassen und die Objektqualität zu erhöhen, damit ein produktionsfähiges Bauteil zustande kommt.

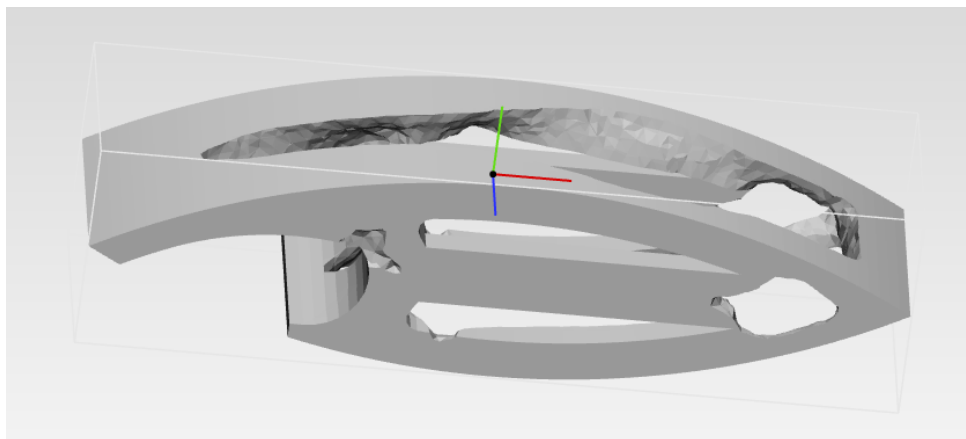


Abbildung 131: Geometrie aus der Topologie-Optimierung mit Inventor

#### Anpassen und Glätten

Die in 3-matic implementierten Werkzeuge unterscheiden sich stark von klassischen parametrischen CAD-Lösungen und ebenso von NURBS-basierten Systemen, auch wenn einige ähnliche Funktionen, wie etwa Extrusionen existieren.

Mit der Funktion „Glätten“ können die äußeren Konturen der gesamten Oberfläche geglättet werden. Dadurch erreicht man bereits eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zur Ausgangsgeometrie und erhält die für den 3D Druck spezifische bionisch anmutende Form. In Abbildung 132 ist außerdem erkennbar, dass die

Abtrennung von Flächen, hier am Beispiel der seitlichen Strebe, möglich ist. Dadurch wird die rechteckige Form zum Anbringen des Schriftzuges beibehalten. Durch lokales Glätten können anschließend gezielte lokale Verfeinerungen vorgenommen werden, siehe Abbildung 133.

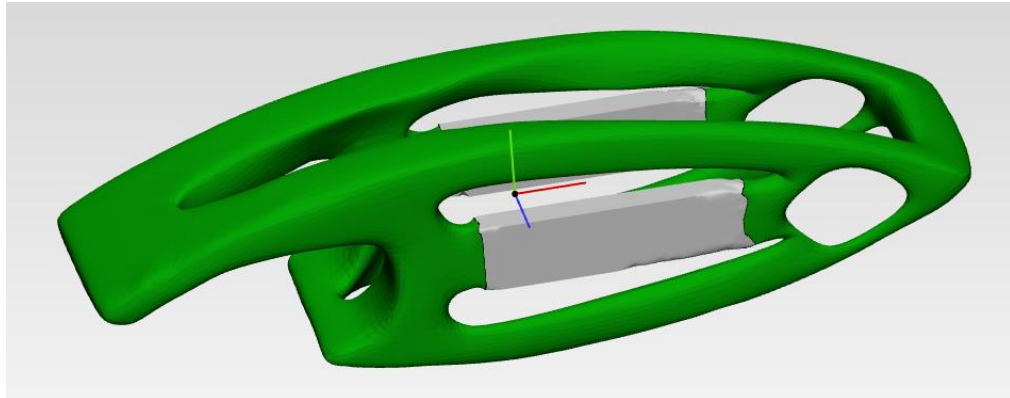


Abbildung 132: Global smoothing

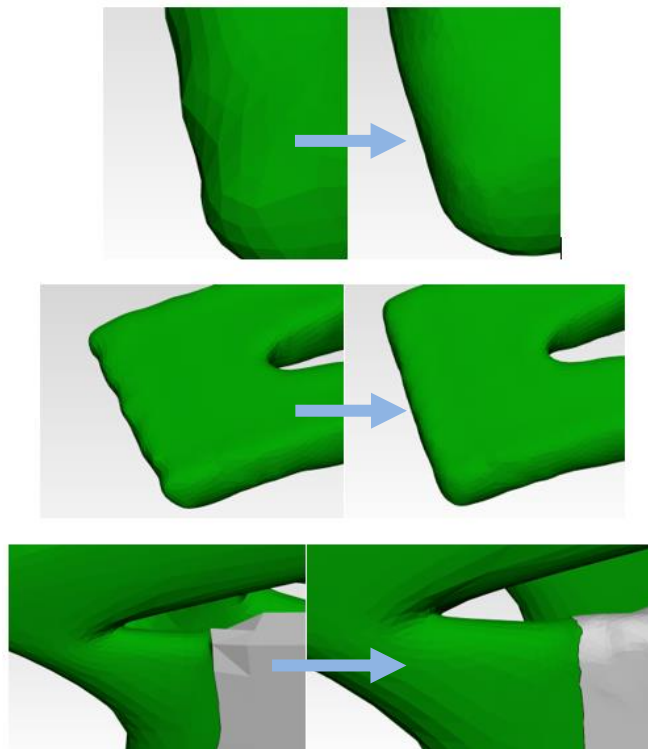
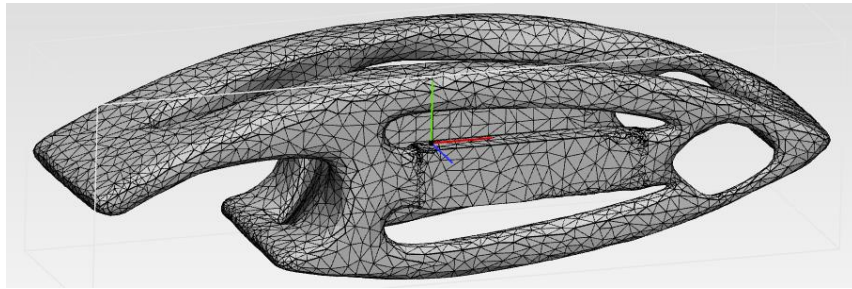


Abbildung 133: Local smoothing

### Volume Mesh

Um das Bauteil anschließend einer Festigkeitsanalyse zu unterziehen, bietet 3-matic die Möglichkeit, mit Hilfe des Remesh-Moduls, direkt ein Volume-Mesh, also 3D Voxel zu generieren und diese anschließend in einer gängigen externen FE-Software zu analysieren. Um den Rechenaufwand gering zu halten wird die Anzahl

der Elemente reduziert, das Volume-Mesh wird als „.fem“ Datei zur Verwendung in Hypermesh Optistruct abgespeichert, siehe Abbildung 134

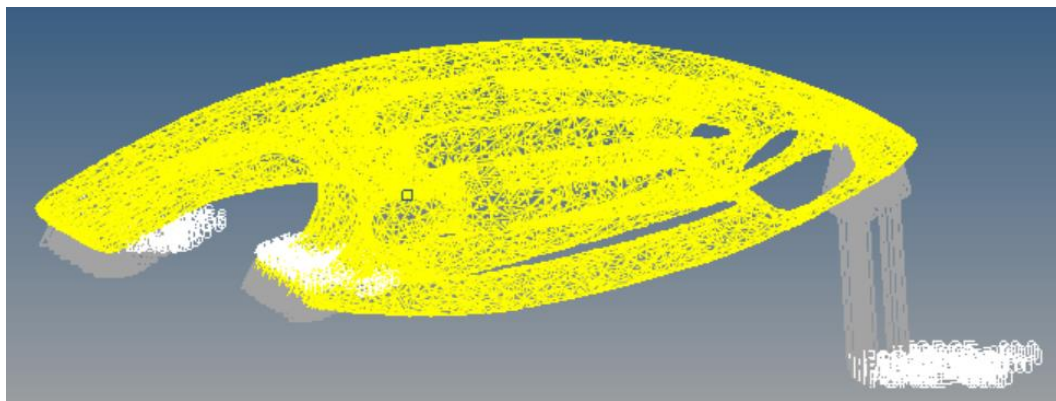


**Abbildung 134: Volume Mesh als Input für FEA**

## 5.4.2 Schritt 2: FE-Validierung

### Export und Analyse in Hypermesh

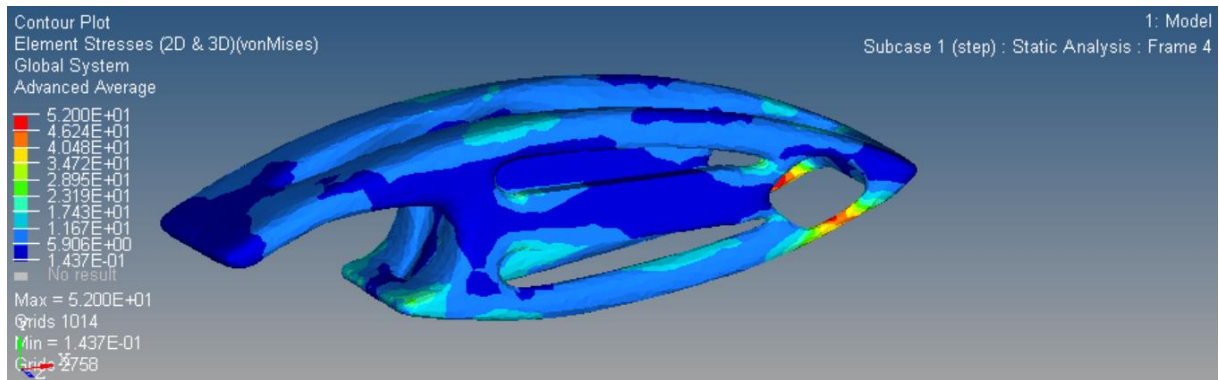
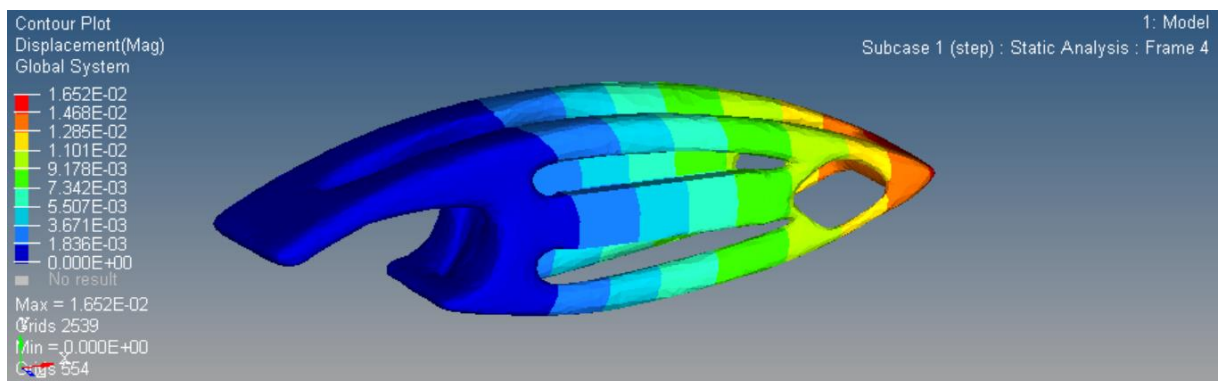
Im Pre-Processing werden die Randbedingungen angebracht und der Werkstoffkennwert angegeben, siehe Abbildung 135. Diesbezüglich erfolgen keine Änderungen gegenüber den Variaten 1 und 2. Es ist in diesem Zusammenhang wichtig zu bemerken, dass neben dem Volumen-Mesh auch ein 2D Netz der Oberfläche exportiert ist. Es muss daher die Zuordnung der Lasten und Lagerungen zum Volumen-Mesh beachtet werden.



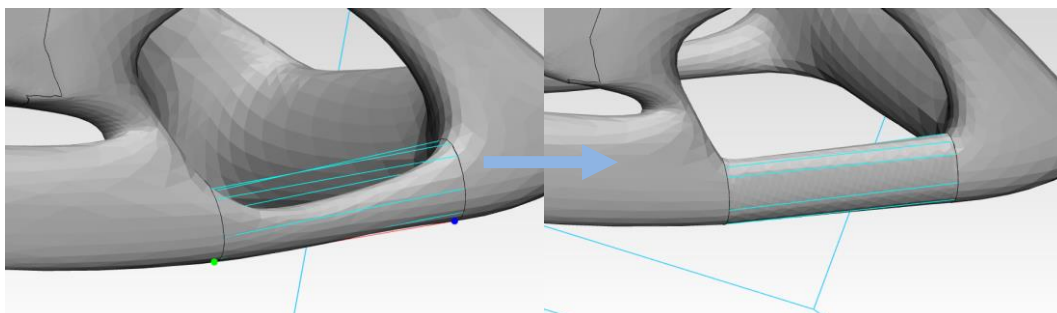
**Abbildung 135: Preprocessing Anordnung**

In der Abbildung 108 und 109 sind die Spannungs- und Verschiebungsergebnisse dargestellt. Man erkennt, dass im hinteren Bereich des Flaschenöffners an den sehr dünnen Streben Spannungsspitzen auftreten. Generell kann jedoch gesagt werden, dass die Spannungen unkritisch sind. In einer folgenden Shape-Optimierung wird durch einen erneuten Bearbeitungsschritt in 3-matic versucht den Durchmesser zu erhöhen, um die Spannungskonzentration zu reduzieren.



**Spannungs-Plot:****Abbildung 136: Spannungsplot der FEA (Einheit MPa)****Verschiebungs-Plot:****Abbildung 137: Verschiebungsplot der FEA (Einheit mm)****5.4.3 Schritt 3: Shape Optimization**

In Abbildung 138 ist zu sehen, wie die dünnen Streben durch eine zylinderförmige Geometrie mit größerem Querschnitt ersetzt werden. Durch lokales Glätten werden anschließend glatte Übergänge geschaffen.

**Abbildung 138: Geometrieangepassung im Zuge der Shape Optimization**

### Erneute FE-Analyse:

In den folgenden Spannungs- und Verschiebungsplots ist erkennbar, dass die auftretenden Spannungen weit unter der Streckgrenze bleiben und auch die Spannungsspitzen im hinteren Bereich durch die dickere Strebe eliminiert werden konnte, siehe Abbildung 139 und Abbildung 140. Die abschließende Festigkeitsanalyse kann als positiv befunden werden. Im Vergleich zu Inventor und Inspire ist Hypermesh eine Analyse-Software für Berechnungsingenieure und bietet dementsprechend deutlich mehr Möglichkeiten. Am Spannungsplot erkennt man gut wie diffizil und genau die Spannungen dargestellt werden. Auch die in Inspire auftretenden Spannungsspitzen an der Lagerstelle konnten verhindert werden.

### Spannungs-Plot:

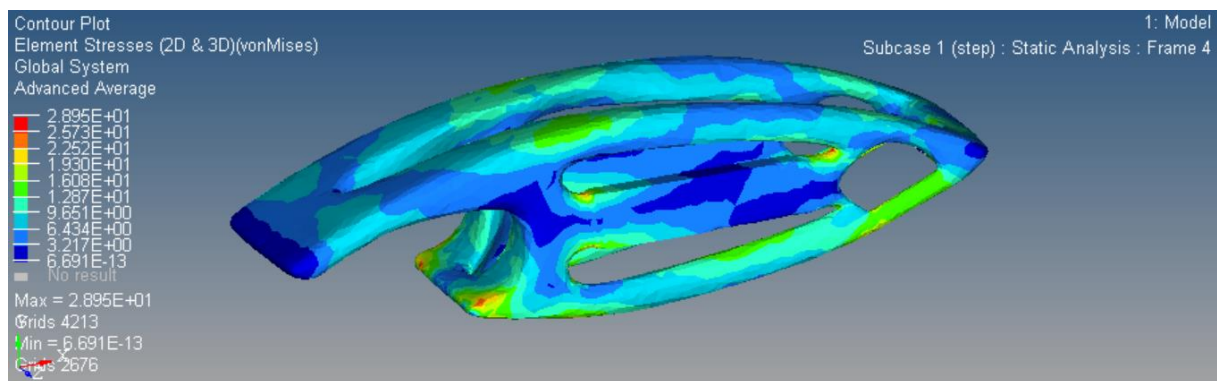


Abbildung 139: Spannungsplot nach Shape Optimization (Einheit MPa)

### Verschiebungsplot:

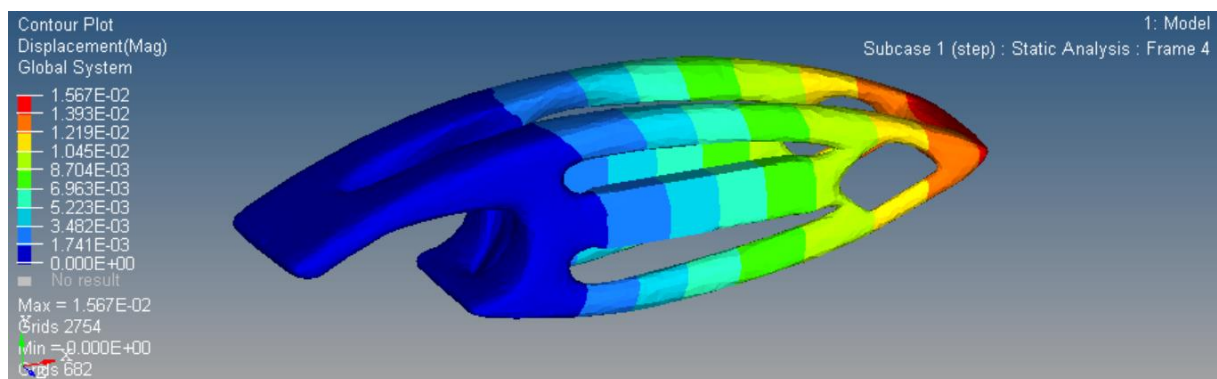


Abbildung 140: Verschiebungsplot nach Shape Optimization (Einheit MPa)

Die finale, validierte Geometrie (Abbildung 141) kann nun anschließend als STL direkt für die Fertigung vorbereitet werden.



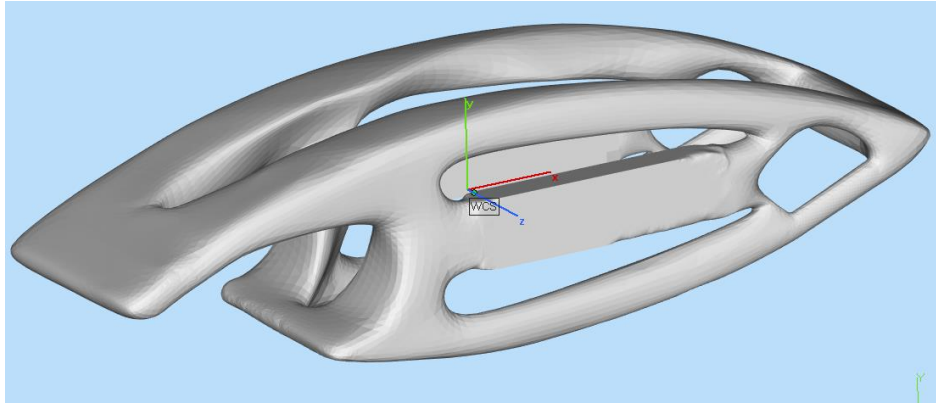


Abbildung 141: finale Geometrie 3-matic

## 5.5 Datenaufbereitung für die additive Fertigung

Als Demonstrationsteil wurde das in Variante 1 mittels NURBS Rückführung konstruierte Modell, aufgrund seiner sehr bionisch anmutenden Form, ausgewählt. Für die Fertigstellung wird der in Abbildung 142 dargestellte Workflow, welcher schon zuvor im Zuge der Softwareanalyse erläutert wurde, verwendet.

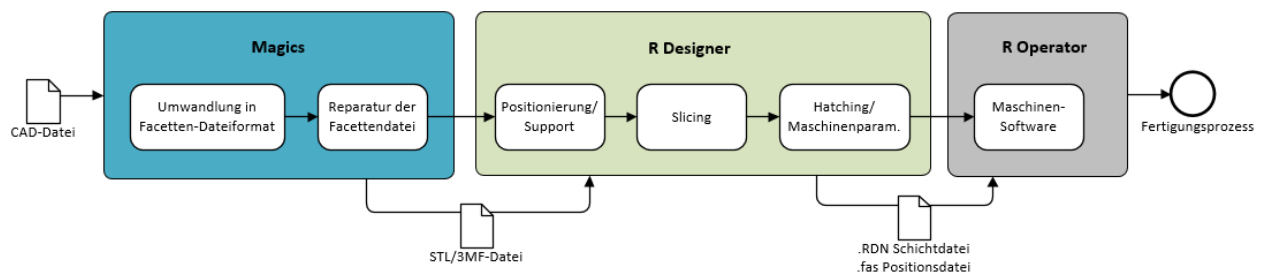


Abbildung 142: Workflow zur Fertigstellung










### 5.5.1 Schritt 1: Facetten-Reparatur mit Materialise Magics

Magics wird in dieser Prozesskette zur Konvertierung und Reparatur der STL Datei, sowie zur Implementierung des Schriftzuges und des LOGOs verwendet, siehe Abbildung 143.



**Abbildung 143: finales Modell mit Schriftzug**

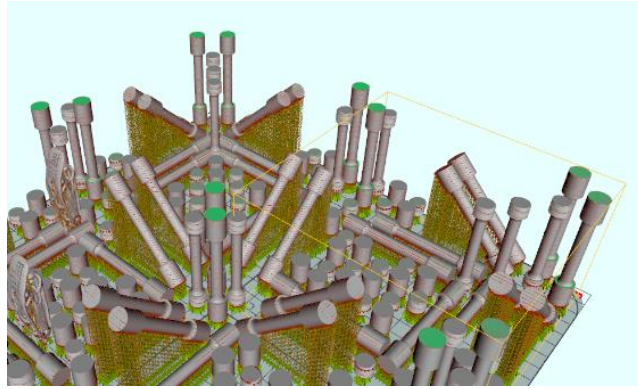
Bevor der Export der STL-Datei in R Designer erfolgt, kann der Orientierungsvergleich in Magics noch genutzt werden um Positionierungsvorschläge zu erhalten, siehe Abbildung 144. Schon während des Designprozesses wurde die stehende Position bevorzugt, um einen geringeren Support-Bedarf, und leichteres Entfernen von der Bauplattform zu ermöglichen. Die Vorteile spiegelt auch dieser Vergleich wieder.

	Z-Höhe	Supportoberfläche
		
		
 Z-Höhe	-44,117 mm	58,779 mm
 Supportoberfläche	793,106 mm <sup>2</sup>	85,074 mm <sup>2</sup>
 XY-Projektion	501,812 mm <sup>2</sup>	192,249 mm <sup>2</sup>
 Höhe Schwerpunkt	-21,812 mm	34,080 mm
 Supportvolumen	7139,595 mm <sup>3</sup>	2272,850 mm <sup>3</sup>

**Abbildung 144: Orientierungsoptimierung in Magics**

### 5.5.2 Schritt 2: Support- und Schichtgenerierung mit R Designer

In R Designer werden zwei Flaschenöffner auf der Bauplattform positioniert und Supports generiert. Da nur zwei Stück produziert werden sollen, wird eine gemischte Produktion verwendet, wie in Abbildung 145 dargestellt. Dies bedeutet, dass der Flaschenöffner gemeinsam mit anderen Bauteilen, in diesem Fall Zugprobekörper, gedruckt wird, um die Bauplattform zu füllen und so die Produktionskosten pro Bauteil zu senken.

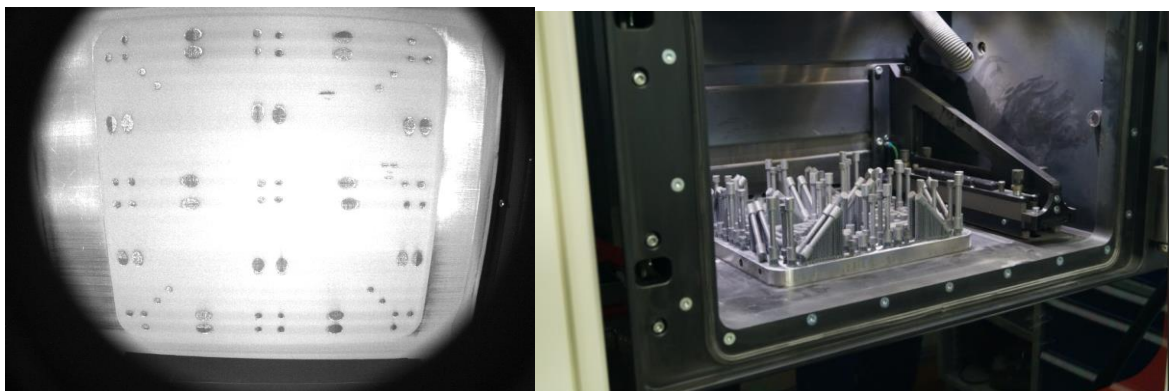


**Abbildung 145: Positionierung auf der Bauteilplattform in R Designer**

Die Flaschenöffner werden in stehender Position aufgebaut, wie schon im Orientierungsvergleich in Magics, vorgeschlagen. Die benötigten Laserparameter für den verwendeten Werkstoff werden von DMG Mori vorgegeben. Aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit des L316 Stahlpulvers zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit, wird die Aluminiumlegierung AlSi10Mg zu Produktion verwendet. Nach erfolgten Slicing und Hatching, wird die .RDN Datei der Bauteile, plus die .fas Datei für die Positionsdaten, an die Maschine zum R Operator übertragen.

## **5.6 Herstellungsprozess auf der DMG Mori Lasertec 30 SLM**

Der Fertigungsverfahren kann nun gestartet werden. Die Fertigungsdauer für diesen Druckvorgang beträgt etwa 35 Stunden. Grund für die lange Dauer ist vor allem die große Zahl an Kleinteilen, wodurch das Lasern jeder Schicht sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. In Abbildung 146 (links) ist ein Bild der Monitoring-Kamera bei einer Aufbauhöhe von 700  $\mu\text{m}$  zu sehen, welche den gesamten Fertigungsverfahren aufnimmt und damit Rückschlüsse auf mögliche Fehler zulässt. In Abbildung 146 (rechts) sind die fertig generierten Bauteile nach Absaugung des überschüssigen Pulvers zu sehen.



**Abbildung 146: Monitoring Kamera (links), Entnahme der fertigen Bauteile (rechts)**

Nach Ablösen des Flaschenöffners von der Bauplattform und anschließendem Entfernen der Stützstrukturen, stellt sich der fertige Flaschenöffner, wie in Abbildung 147 zu sehen dar. Alle Strukturen sind wie gewünscht und maßhaltig generiert worden, auch die sehr filigranen Schriftzüge und Logo sind in hoher Qualität vorhanden. Um die gewünschte Oberflächenqualität zu erreichen müssen Nachbearbeitungsschritte, wie Schleifen oder Sandstrahlen folgen.



**Abbildung 147: Endprodukt Flaschenöffner aus AlSi10Mg**

Abschließend sollte noch erwähnt werden, dass die verwendete Aluminiumlegierung nicht den optimalen Werkstoff darstellt. Wegen der geringen Härte und dem hohem Oberflächenverschleiß, schon nach wenigen Öffnungsvorgängen, ist der angedachte Stahl 316L zu bevorzugen. Für erste Demonstrationszwecke ist das Modell jedoch ausreichend.

## 6 Resümee und Ausblick

Da es sich um eine initiale Arbeit zum Thema Metall 3D Druck (SLM) handelt, wurde das Thema sehr umfangreich bearbeitet. Der Leser soll einen breiten Einblick an die Herangehensweise zum Thema additive Fertigung bekommen, um die schlussendlich entwickelten Workflows und Prozessketten nachvollziehen zu können. Im Zuge der Recherche stellte sich neben dem Bereich der Individual- und Kleinserienfertigung vor allem die geometrische Gestaltungsfreiheit als eines der wesentlichen Vorteile heraus. Das Thema Leichtbau birgt in diesem Zusammenhang enorme Potentiale. Die Implikationen dieser Möglichkeiten auf den Konstruktionsprozess in Hinblick auf Simulationslösungen wie Topologie Optimierung wurden in weiterer Folge untersucht. Eine prinzipielle Prozesskette für die additive Fertigung war zwar relativ schnell gefunden, nach genauerer softwareseitigen Betrachtung der einzelnen Schritte wurde jedoch klar, wo die kritischen Punkte im Produktentstehungsprozesses liegen. Es zeigte sich, dass die Vorstellung „die“ Prozesskette für die additive Fertigung zu kreieren in der Form nicht möglich ist.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Prozesskette hat die Besonderheit der additiven Verfahren, dass die Bauteile für den Herstellungsprozess als Facettendatei vorliegen müssen. Der Industriestandard STL stellte sich in diesem Zusammenhang aufgrund seiner Limitierungen als nicht optimal heraus. Versuche STL durch ein einheitliches Format mit größerem Funktionsumfang zu ersetzen scheiterten jedoch bis jetzt. Da die Maschinenhersteller zur anschließenden Schichtgenerierung fast ausschließlich eigene Slice-Formate verwenden, welche herstellereigene Softwarelösungen zur Konvertierung notwendig machen, ist dem Entwurf einer allgemeingültigen Prozesskette ebenfalls nicht zuträglich. Vorgelagerte, separate Softwarelösungen zur Datenaufbereitung, meist von Drittanbietern, verdeutlichen das Problem der heterogenen Softwarelandschaft. Ansätze diese Probleme zu umgehen, etwa mit den Build-Prozessoren in Materialise Magics wurden beschrieben, stellen aber auch keine optimale Lösung dar. Ein Grund dafür ist die mangelnde Verbreitung, so steht diese Lösung für die verwendete Maschine von DMG MORI bis dato nicht zur Verfügung. Der aus meiner Sicht vielversprechendste Ansatz für die Zukunft ist das beschriebene 3MF Format, da es auf Basis einer breiten Kooperation der führenden Anlagenhersteller entwickelt wird. Es wird interessant sein zu sehen, wie die Entwicklung in diesem Bereich weiter geht, da es durchaus auch Bestrebungen gibt, die Konvertierung in Facettenformate komplett zu umgehen und Slice-Algorithmen direkt ins STEP-Format in Form von Applikations-Protokollen zu implementieren.

Neben dem Umweg über die heterogene Formatlandschaft der Facetten-Dateien stellt sich die Implementierung der Topologie Optimierungslösungen bzw. Softwarelösungen zur Generierung von inneren Strukturen als zweiter großer

Knackpunkt im Produktentstehungsprozess heraus. Obwohl Topologie Optimierungsalgorithmen nichts Neues sind, haben sich erst in den letzten Jahren Softwarelösungen entwickelt, welche es auch Konstrukteuren ermöglichen Optimierungsmöglichkeiten effizient in den Designprozess einzubauen und somit Leichtbaupotentiale zu heben. Die Softwarehersteller gehen hier jedoch verschiedene Wege der Implementierung, was in unterschiedlich durchgängigen Prozessketten resultiert.

Der große Unterschied in diesem Zusammenhang stellt die Umsetzung der Ergebnisse aus der Topologie Optimierung dar. Diesem Thema hat sich auch die Case Study Flaschenöffner in Kapitel 5 gewidmet. Da die Ergebnisse der Topologie Optimierung in Form eines Voxel-Körpers (Facettengeometrie) dargestellt werden, ist diese Darstellung als Endprodukt meist nicht geeignet. Im Zuge der Case Study wurden die drei wesentlichsten Rückführungsmöglichkeiten beleuchtet.

Als erste Variante wurden die Ergebnisse aus der Topologie Optimierung mit Hilfe von direkt Modelling Tools in Form der sogenannten PolyNURBS durchgeführt. Wie man anhand des bionisch anmutenden Flaschenöffners in Abbildung 143 erkennen kann, ist dadurch eine sehr genaue Annäherung der Optimierungsergebnisse möglich. Es konnte eine Massereduktion zur Ausgangsgeometrie von 71, 5% erreicht werden. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass es keine Modellierungshistorie gibt, wodurch sich etwa die Variantenkonstruktion schwierig gestaltet. Genau dieser Aspekt stellt den Vorteil der zweiten Modellierungsvariante mittels Inventor dar. Die klassischen sehr simplen Manipulationsmöglichkeiten am Volumskörper machen eine Konstruktion nahe am Optimierungsergebnis schwer und zeitaufwendig, was sich in einer geringeren Massereduktion von nur 48,5% niederschlägt. Dafür sind eine nachträgliche Veränderung, sowie die genaue Kontrolle über die Feature-Maße wesentlich besser möglich.

In Variante 3 wird der Ansatz, ohne Geometrierückführung auszukommen, beleuchtet. Grundsätzlich stellt sich diese Möglichkeit als sehr verlockend dar, vor allem nachdem man im Zuge der Case Study mit der teils aufwendigen Geometrierückführung konfrontiert war. Die Bearbeitung mit Materialise 3-matic ist zwar gewöhnungsbedürftig und mit CAD Programmen nicht vergleichbar, funktioniert aber in weiten Strecken problemlos. Die Manipulationsmöglichkeiten sind im Vergleich zur CAD Rückführung, wo man sich zwar am Optimierungsergebnis orientiert, aber wenn gewünscht auch abweichen kann, eher begrenzt. Als Grundlage ist also ein sehr gutes Ergebnis aus der Topologie Optimierung notwendig. Man kann davon ausgehen, dass in diesem Bereich in Zukunft noch Weiterentwicklungen stattfinden werden. Neuartige Softwaremodule, wie unter Kapitel 4 beschriebene Convergent Modeling für Siemens NX und andere Hybrid Modelling Ansätze, bei denen Facetten und CAD Modellierung verschmelzen, sind Anzeichen für diesen

Trend. Ein weiterer Grund für Entwicklungen in diese Richtung, ist die zusätzliche Optimierung der Bauteilmasse mit inneren Strukturen. Die Generierung dieser erfolgt direkt am Facettenkörper, was eine Rückführung in CAD unmöglich macht. Dass es zu einer Annäherung zwischen Facettenmodellierung und CAD Modellierung im Zuge der Verbreitung von additiven Verfahren kommt, ist auch in der Solidthinking Inspire erkennbar, wo FE-Analysen direkt am Facettenkörper aus der Topologie Optimierung möglich sind. Welche Umsetzungsmethode sich als Standard durchsetzt, oder ob weiterhin je nach Anwendung gewählt wird, wird die Zukunft zeigen.

Abschließend ist zu sagen, dass die durchgehende virtuelle Produktentwicklungskette des AM durch optimale Vernetzung und dezentrale Fertigung einen fixen Platz in der Industrie 4.0 haben wird. Die Nachteile in Bezug auf Wiederholgenauigkeit, Kosten und Geschwindigkeit werden sich laut Prognosen in den nächsten Jahren wesentlich reduzieren. So gehen Experten von einer Steigerung der Aufbaurrate bei SLM-Maschinen um den Faktor 1,5 - 2 alle 4 Jahre aus. Gleichzeitig soll trotz steigender Anlagenkomplexität im optimistischen Szenario eine nur geringfügige Preissteigerungen der SLM-Maschinen stattfinden. Im Bereich der Metallpulver sind dagegen deutliche Preissenkungen von über 50% zu erwarten (Schmidt, 2016 S. 174-176).

Aus heutiger Sicht steht für die Industrialisierung der SLM Verfahren jedoch nicht die Verdrängung von konventionellen Fertigungsverfahren im Vordergrund (Brøtan et al., 2016). Es stehen stattdessen einerseits die Spezialisierung auf Personalisierung von Produkten, sowie die Produktion sehr komplexer Bauteile in Kleinserien und andererseits der Bereich Ersatzteile und Reparaturen (Additive Repair) im Fokus. Des Weiteren wird die sogenannte hybride Fertigung, bei der additive und subtraktive Verfahren kombiniert werden, eine Rolle spielen, um die Nachteile zu kompensieren und die additiven Verfahren im industriellen Umfeld zu etablieren.



## 7 Literaturverzeichnis

- 3D Printing Creates New Parts for Aircraft Engines [WWW Document], 2017. . GE Global Research. URL <https://www.geglobalresearch.com/blog/3d-printing-creates-new-parts-aircraft-engines> (accessed 5.22.18).
- 3MF Specification [WWW Document], n.d. URL <https://3mf.io/specification/> (accessed 5.14.18).
- Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Maskery, I., Ashcroft, I., Tuck, C., 2017. Selective laser melting of aluminium alloys. *MRS Bulletin* 42, 311–319.
- Additive-Fertigung-mit-NX [WWW Document], n.d. URL [https://www.bct-technology.com/fileadmin/specialty\\_distribution/public/documents/Additive-Fertigung-mit-NX.pdf](https://www.bct-technology.com/fileadmin/specialty_distribution/public/documents/Additive-Fertigung-mit-NX.pdf) (accessed 5.14.18).
- Ali, H., Ghadbeigi, H., Mumtaz, K., 2018. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A* 712, 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>
- Allen, G., 2014. Additive Manufacturing Impacts on CAD [WWW Document]. URL [http://www.cs.technion.ac.il/gdm2014/Presentations/GDM2014\\_allen.pdf](http://www.cs.technion.ac.il/gdm2014/Presentations/GDM2014_allen.pdf) (accessed 3.25.18).
- AlMangour, B., Grzesiak, D., Yang, J.-M., 2017. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds* 728, 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
- Ault, H.K., Phillips, A., n.d. Direct Modeling: Easy Changes in CAD? [WWW Document]. URL [https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&http\\_sredir=1&article=1026&context=asee-edgd](https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&http_sredir=1&article=1026&context=asee-edgd) (accessed 5.14.18).
- Bai, Y., Yang, Y., Wang, D., Zhang, M., 2017. Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* 703, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.033>
- Bendsoe, M.P., Sigmund, O., 2004. *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Build Prozessoren [WWW Document], n.d. . Materialise. URL <http://www.materialise.com/de/software/build-processor/build-prozessoren> (accessed 3.25.18).



- Bulgurlu, D.: Technical and commercial evaluation of new manufacturing methods for secondary structure. Master thesis, 3 Nov. 2014.
- Chakravorty, D., 2017. STL File Format for 3D Printing [WWW Document]. All3DP. URL <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/> (accessed 3.21.18).
- Chua, C.K., Wong, C.H., Yeong, W.Y., 2017. Chapter Four - Software and Data Format, in: Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. Academic Press, pp. 75–94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813489-4.00004-0>
- Dai, N., Zhang, L.-C., Zhang, J., Chen, Q., Wu, M., 2016. Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4 V alloy in NaCl solution. Corrosion Science 102, 484–489. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.041>
- Danjou, S., Koehler, H., 2008. Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik. RTejournal - Forum für Rapid Technologie 5(2008).
- Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R., 2015. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technology Review.
- DMG Mori AM ePaper [WWW Document], n.d. URL [http://media.dmgmori.com/media/epaper/additive\\_manufacturing\\_de/index.html#14](http://media.dmgmori.com/media/epaper/additive_manufacturing_de/index.html#14) (accessed 5.19.18).
- Eigner, M., 2010. Future PLM Trends aus Forschung und Praxis [WWW Document]. URL <http://docplayer.org/1978780-Future-plm-trends-aus-forschung-und-praxis.html> (accessed 5.21.18).
- Engineering Design Platforms [WWW Document], n.d. URL <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/14534/Engineering-Design-Platforms-and-Simulation-in-CAD-Benefit-Product-Development-Teams.aspx> (accessed 5.14.18).
- Eragubi, M., 2013. Slicing 3D CAD Model in STL Format and Laser Path Generation. International Journal of Innovation, Management and Technology. <https://doi.org/10.7763/IJIMT.2013.V4.431>
- Fritz, A.H., Schulze, G. (Eds.), 2012. Fertigungstechnik, 10., neu bearb. Aufl. ed, Springer-Lehrbuch. Springer Vieweg, Berlin.
- Gebhardt, A., 2017. Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Gebhardt, A., 2003. Rapid Prototyping. Hanser Publishers.

- Gieseke, M., Noelke, C., Kaierle, S., Wesling, V., Haferkamp, H., 2016. Selective Laser Melting of Magnesium and Magnesium Alloys, in: Magnesium Technology 2013. p. 65. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48150-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48150-0_11)
- Grupp, M., 2007. Der Faserlaser als Werkzeug in der Materialbearbeitung. Laser Technik Journal 3, 41–44.
- Grützmann, C. und Wischeropp, T. M.: A380 Fuel Connector unter Anwendung generativer Fertigungsverfahren. Hamburg, 28 Mrz. 2014. 13. Fachtagung Rapid Prototyping.
- Günther, M., Tremmel, 2014. Gewichtsoptimierung mit Optistruct [WWW Document]. URL [https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/01/Studienarbeit\\_T3100\\_Guenther\\_Tremmel\\_FINAL.pdf](https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/01/Studienarbeit_T3100_Guenther_Tremmel_FINAL.pdf) (accessed 1.27.18).
- Hagemann, R., Rust, W., Noelke, C., Kaierle, S., Overmeyer, L., Rau, T., Huegl, S., Wesling, V., Wolkers, W., 2015. Möglichkeiten der funktionellen lokalen Konfiguration von Mikroaktoren aus Nickel-Titan für medizinische Implantate durch selektives Laserstrahlmikroschmelzen, in: Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 109–124. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48473-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48473-9_8)
- Hällgren, S., Pejryd, L., Ekengren, J., 2016. 3D Data Export for Additive Manufacturing - Improving Geometric Accuracy. Procedia CIRP, 26th CIRP Design Conference 50, 518–523. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.046>
- Heiko, H., Wirth, M., 2014. Vergleich von Dateiformaten für 3D-Modelle [WWW Document]. Center for digital fabrication Arbeitsbereich. URL [http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07\\_3D-Modell-Formate.pdf](http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07_3D-Modell-Formate.pdf) (accessed 3.21.18).
- Hilbert, K., Ley, M., Busch, M., 2016. Topologieoptimierung und additive Fertigung in der Produktentwicklung für die Nutzfahrzeugtechnik [WWW Document]. URL [http://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2016/03/09\\_Altair\\_Anwendertreffen\\_Hilbert.pdf](http://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2016/03/09_Altair_Anwendertreffen_Hilbert.pdf) (accessed 5.14.18).
- Hiller, J.D., Lipson, H., 2009. Stl 2.0: A proposal for a universal multi-material additive manufacturing file format, in: In Mechanical and Aerospace Engineering. pp. 266–278.
- Hybrid Modelling Software Offers Freedom and Precision [WWW Document], n.d. URL <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/9843/Hybrid-Modelling-Software-Offers-Freedom-and-Precision.aspx> (accessed 5.21.18).

- Inside metal AM [WWW Document], n.d. . Inside Metal Additive Manufacturing. URL <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/1/post/2014/10/the-role-of-super-powders-in-slm.html> (accessed 12.17.17).
- Jacobs, P.F., 1992. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography. Society of Manufacturing Engineers.
- Jandin G., Bertin J. M., Dembinski L., and Coddet C., Manufacture of Stainless Steel Parts by Selective Laser Melting Process (CRC Press, 2005), pp. 431–434.
- Karapatis, P., 2002. A sub-process approach of selective laser sintering. EPFL, Lausanne.
- Klocke, F., 2015. Generative Fertigungsverfahren, in: Fertigungsverfahren 5. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 127–170. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69512-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69512-7_5)
- Kranz, J.: Systematischer Leichtbau von Funktionsbauteilen der Luft-fahrttechnik mittels Strukturoptimierung und Lasergenerieren. Diplomarbeit. Hamburg, 1 Mrz. 2010.
- Lachmayer, R., Lippert, R.B. (Eds.), 2017. Additive Manufacturing Quantifiziert. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54113-5>
- Langefeld, B., Veenker, H., Schaeff, C., Balzer, C., 2016. Additive Manufacturing - next generation (AMnx) Study [WWW Document]. URL [http://www.ecoparts.ch/fileadmin/media/doc/Referate/Additive\\_Manufacturing\\_-\\_next\\_generation\\_AMnx\\_Study\\_by\\_Roland\\_Berger\\_1....pdf](http://www.ecoparts.ch/fileadmin/media/doc/Referate/Additive_Manufacturing_-_next_generation_AMnx_Study_by_Roland_Berger_1....pdf) (accessed 12.10.17).
- LASERTEC 30 SLM [WWW Document], n.d. URL <https://www.youtube.com/watch?v=te9OaSZ0kf8> (accessed 5.15.18).
- LASERTEC 65 3D hybrid - ADDITIVE MANUFACTURING Maschinen von DMG MORI [WWW Document], n.d. URL <https://at.dmgmori.com/produkte/maschinen/advanced-technology/additive-manufacturing/pulverdueseverfahren/lasertec-65-3d-hybrid> (accessed 5.15.18).
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W., 2012. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 59, 1025–1035. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1>
- Lipson, H., 2017. Additive Manufacturing File Format [WWW Document]. URL <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/04/28/Lipson-Cornell-NIST-AMF.pdf>

- Magics user manual [WWW Document], n.d. URL [http://www.materialise.com/en/system/files/uploads/resources/IFU/MagicsPrintDLP\\_User\\_Guide-.pdf](http://www.materialise.com/en/system/files/uploads/resources/IFU/MagicsPrintDLP_User_Guide-.pdf) (accessed 2.14.18).
- Malvern instruments [WWW Document], n.d. URL [https://www.copybook.com/media/profiles/malvern-instruments/documents/Optimizing\\_metal\\_powders\\_for\\_additive\\_manufacturing.pdf](https://www.copybook.com/media/profiles/malvern-instruments/documents/Optimizing_metal_powders_for_additive_manufacturing.pdf) (accessed 5.19.18).
- Mansouri Tehrani, A., Shahrokhshahi, H., Parvin, N., Brgoch, J., 2015. Influencing the martensitic phase transformation in NiTi through point defects. Journal of Applied Physics 118, 014901. <https://doi.org/10.1063/1.4923474>
- Materialise 3-matic User Community [WWW Document], n.d. URL <http://uc.materialise.com/magics/3-matichomepage> (accessed 5.14.18).
- Materialise 3-matic [WWW Document], n.d. . Materialise. URL <http://www.materialise.com/en/cases/materialise-3-matic-makes-topology-optimization-more-attractive> (accessed 5.14.18).
- Meiners, W., 1999. Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe, Berichte aus der Lasertechnik. Shaker, Aachen.
- Metal Tree Support Module [WWW Document], n.d. . Materialise. URL <http://www.materialise.com/en/software/magics/modules/metal-tree-support-module> (accessed 5.21.18).
- MIVP, Virtuelle Produktentwicklung Vorlesungseinheiten 1 und 5 LVA 307414 TU Wien WS2016, n.d.
- Modeling PolyNURBS [WWW Document], n.d. URL [https://solidthinking.com/help/Evolve/2016/win/en/252\\_edit\\_polymesh.htm](https://solidthinking.com/help/Evolve/2016/win/en/252_edit_polymesh.htm) (accessed 5.21.18).
- Netfabb-File-Formats [WWW Document], 2017. URL [https://www.netfabb.com/sites/default/files/Netfabb-File-Formats\\_2017.pdf](https://www.netfabb.com/sites/default/files/Netfabb-File-Formats_2017.pdf) (accessed 5.14.18).
- Nöken, S., 1997. Technologie des selektiven Lasersinterns von Thermoplasten, Als Ms. gedr. ed, Berichte aus der Produktionstechnik. Shaker, Aachen.
- ÖNORM EN ISO/ASTM 52915 Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2, 2017.

- Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I., 2018. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* 19, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.008>
- Paul, R., Anand, S., 2015. A new Steiner patch based file format for Additive Manufacturing processes. *Computer-Aided Design* 63, 86–100. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.01.002>
- Poprawe, R., Hinke, C., Meiners, W., Schrage, J., Bremen, S., Merkt, S., 2015. SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design, in: Brecher, C. (Ed.), *Advances in Production Technology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 49–65. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12304-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12304-2_5)
- Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, Danninger, H., European Powder Metallurgy Association (Eds.), 2004. Conference proceedings / Euro PM 2004, Powder Metallurgy World Congress & Exhibition: Austria Centre, Vienna, Austria, 17 - 21 October 2004. European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury.
- Prashanth, K.G., Damodaram, R., Maity, T., Wang, P., Eckert, J., 2017. Friction welding of selective laser melted Ti6Al4V parts. *Materials Science and Engineering: A* 704, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.004>
- Prill, T.: Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung. Dissertation. Stuttgart: IMA, 14 Feb. 2013. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Antriebstechnik, CAD, Dichtungen, Zuverlässigkeit. 142. 978-3-936100-43-3.
- Qi, T., Zhu, H., Zhang, H., Yin, J., Ke, L., Zeng, X., 2017. Selective laser melting of Al7050 powder: Melting mode transition and comparison of the characteristics between the keyhole and conduction mode. *Materials & Design* 135, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.014>
- Renhof, L., 2007. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften der Nickellegierung IN 718 (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Schledermann, A., n.d. STL-Dateiformat [WWW Document]. URL <https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2015ss/seminar/3dp/presentations/stl-dateiformat-schledermann.pdf> (accessed 3.20.18).
- Schmid, D., Renza, J., Zaeh, M.F., Glasschroeder, J., 2016. Process Influences on Laser-beam Melting of the Magnesium Alloy AZ91. *Physics Procedia, Laser Assisted Net Shape Engineering 9 International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the LANE 2016 September 19-22, 2016 Fürth, Germany* 83, 927–936. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.097>

- Schmidt, T., 2016. Potentialbewertung generativer Fertigungsverfahren für Leichtbauteile. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52996-6>
- Schwab, H., Bönisch, M., Giebeler, L., Gustmann, T., Eckert, J., Kühn, U., 2017. Processing of Ti-5553 with improved mechanical properties via an in-situ heat treatment combining selective laser melting and substrate plate heating. Materials & Design 130, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.010>
- Scott, C., 2016. 3MF Consortium Introduces Two New Extensions to 3MF Core Specification [WWW Document]. 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. URL <https://3dprint.com/144590/3mf-consortium-extensions/> (accessed 3.24.18).
- Siemens introduces 'end-to-end' AM, 2017. . Metal Powder Report 72, 65–66. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.024>
- SLM 500 SLM Solutions [WWW Document], n.d. URL <https://slm-solutions.de/produkte/maschinen/selective-laser-melting-maschine-slmr500> (accessed 5.14.18).
- SLM mit optimierter Prozesstechnik und neuen Materialien: Magnesiumlegierungen eröffnen weitere Anwendungsgebiete - Fraunhofer ILT [WWW Document], n.d. . Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT. URL [https://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/pm2016/pressemitteilung\\_01032016.html](https://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/pm2016/pressemitteilung_01032016.html) (accessed 5.23.18).
- SLM Solutions bi-directional recoating [WWW Document], n.d. URL <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20> (accessed 5.19.18).
- solidThinking Inspire 2018 [WWW Document], n.d. URL <https://solidthinking.com/inspire2018.html> (accessed 5.21.18).
- VDI3405, 2014. VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen.
- Wall, J., Blekinge tekniska högskola, Avdelningen för maskinteknik, 2007. Simulation-driven design of complex mechanical and mechatronic systems. Blekinge Institute of Technology, Karlskrona.
- Walzl, A., Buchmayr, B., 2017. Topologieoptimierung – Entwicklungswerkzeug für die additive Fertigung. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 162, 110–116. <https://doi.org/10.1007/s00501-017-0582-y>

- Wycisk, E., 2017. Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4, Light Engineering für die Praxis. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56060-0>
- Yap, C.Y., K. Chua, C., L. Dong, Z., H. Liu, Z., Q. Zhang, D., Loh, L.E., Sing, S.L., 2015. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews 2, 041101. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Yu, K.-M., Wang, Y., Wang, C.C.L., 2017. Smooth geometry generation in additive manufacturing file format: problem study and new formulation. Rapid Prototyping Journal 23, 34–43. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2015-0067>
- Zha, W., Anand, S., 2015. Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing. Journal of Manufacturing Processes, Additive Manufacturing 20, 465–477. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.021>
- Zhang, L.-C., Attar, H., 2016. Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review. Adv. Eng. Mater. 18, 463–475. <https://doi.org/10.1002/adem.201500419>

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgangsweise der Arbeit .....	11
Abbildung 2: Hauptphasen generativer Fertigungsverfahren (Schmidt, 2016, S. 20) .....	13
Abbildung 3: Einteilung der generativen Verfahren nach der Anwendung (Gebhardt, 2013, S.8).....	15
Abbildung 4: Insel (links), Überhang mit Überhanglänge a (rechts) (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S.7).....	16
Abbildung 5: Treppenstufeneffekt (links), Downskinwinkel $\delta$ und Upskinwinkel $\nu$ (rechts) (VDI 3404 Blatt 3, 2014 S. 8) .....	17
Abbildung 6: Aufbau einer Laser-Stereolithographieanlage (VDI 3405, 2014 S.8)....	18
Abbildung 7: Verfahrensprinzip Fused Deposition Modeling (Gebhardt, 2013 S 249) .....	19
Abbildung 8: Prinzipskizze 3D Druck Verfahren (Klocke, 2015 S.138).....	20
Abbildung 9: Prinzipskizze des LLM Verfahrens am Beispiel des Laminated Objects Manufacturing (LOM) (Gebhardt, 2013 S 229) .....	21
Abbildung 10: Laserauftragsschweißen (links), Pulver-Laser Verfahren (rechts) (Klocke, 2015 zit. nach: Fraunhofer ITP Aachen) (Gebhardt, 2013 zit. nach: Fraunhofer ITP Aachen).....	22
Abbildung 11: Verfahrensprinzip des selektiven Lasersintern bzw. Laserschmelzen (Schmidt, 2016 S. 24).....	23
Abbildung 12: Curl Effekt Beispiele (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 26).....	28
Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Rauheit und Upskin ( $\nu$ )-bzw. Downskinwinkel( $\delta$ ) (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 27).....	28
Abbildung 14: Aufbau Galvanoscanner (Gebhardt, 2013 S 81).....	32
Abbildung 15: Laserparameter (Klocke, 2015 S. 140 zit. nach: Nöken, 1997) .....	32
Abbildung 16: Vergleich Tiefenschweißen (a) und Wärmeleitungsschweißen (b) (Qi et al., 2017) .....	33
Abbildung 17: Schmelzcharakteristik in der Überlappungszone (Bai et al., 2017) ....	34
Abbildung 18: Prinzipskizze "Balling Effekt" (Li et al., 2012). .....	34
Abbildung 19: double hatch(links) cross hatch (rechts) (AlMangour et al., 2017).....	36
Abbildung 20: alternating hatch (links) Schachbrett hatch (rechts) (Ali et al., 2018).....	36
Abbildung 21: typisches 2 Kammer SLM Verfahrensaufbau (Carter et al., 2014) .....	37
Abbildung 22: Recoater DMG Mori Lasertec 30 SLM (LASERTEC 30 SLM, n.d.) ....	37
Abbildung 23: Pulverkreislauf der DMG Mori Lasertec 30 SLM.....	38
Abbildung 24: Verfahrensprinzip der Gas Atomisierung ("LPW Technology Powder production," n.d.) .....	39
Abbildung 25: Packungsdicht zu Volumsanteil großer Partikel ("Malvern instruments," n.d.) .....	40



Abbildung 26: Gefüge Vergleich Ti-6Al-4V: SLM-Herstellung (a) konventionelle Herstellung (b) (Dai et al., 2016) .....	45
Abbildung 27: Gefüge Inconel 718 (Amato et al., 2012) .....	48
Abbildung 28: SLM mit zwei Laser/Scanner-Einheiten (Parallelization) (Poprawe et al., 2015) .....	52
Abbildung 29: Vergleich Aufbaurrate SLM vs. Fräsen (Klocke, 2015 S. 166 zit. nach IPT, Aachen, Fraunhofer ILT, Aachen, Promotionsvortrag Dr. Arntz, Aachen, 2013) .....	53
Abbildung 30: Automatisierte Reparatur mit Auftragsschweißen (Klocke, 2015 S. 167 IPT, Aachen, Fraunhofer ILT, Aachen, Promotionsvortrag Dr. Arntz, Aachen, 2013) .....	54
Abbildung 31: Einteilung der additiven Verfahren nach Produktentstehungsschritt (Gebhardt, 2013 S. 15) .....	55
Abbildung 32: Kategorien der Wirtschaftlichkeitsbewertung (Schmidt, 2016 S. 85) ..	58
Abbildung 33: Funktionspotentiale (Schmidt, 2016 S.131) .....	59
Abbildung 34: Entwicklung der Herstellkosten bei verschiedenen Stückzahlen (Schmidt, 2016 S. 201) .....	61
Abbildung 35: Prozesskette Produktentstehung AM .....	62
Abbildung 36: Kostenentwicklung Frontloading (Eigner, 2010) .....	64
Abbildung 37: Konstruktionsprozess additive Fertigung (eigene Abb. in Anlehnung an Langefeld et al., 2016) .....	65
Abbildung 38: Optimierungsprozess SIMP-Verfahren (Bendsoe and Sigmund, 2004, S. 14) .....	67
Abbildung 39: Einfluss des Strafexponenten p (Schmidt, 2016 S. 45) .....	68
Abbildung 40: Topologie Optimierungsergebnis (Hilbert et al., 2016) .....	69
Abbildung 41: Topologie Optimierungsprozess (eigene Abb. in Anlehnung an Langefeld et al., 2016) .....	69
Abbildung 42: Design und Non-Design Bereiche am Bauteil (Schmidt, 2016, S 99) ..	70
Abbildung 43: Zellentypen (links), Anpassung des Zellenvolumens (rechts) (Panesar et al., 2018) .....	72
Abbildung 44: Überlagerung des Bauteils mit konstanter Gitterstruktur (Panesar et al., 2018) .....	72
Abbildung 45: Belastungsorientierte Gitterstruktur (Walzl and Buchmayr, 2017) .....	73
Abbildung 46: Topologie Optimierung inkl. Innere Strukturen .....	74
Abbildung 47: Nachgelagerte Implementierung Innerer Strukturen .....	74
Abbildung 48: Prozessschritte Datenaufbereitung .....	75
Abbildung 49: Schnittstellen der AM Produktentstehung .....	78
Abbildung 50: 3D Digitalisierung (VDI) .....	80
Abbildung 51: Dreiecksdefinition STL Format (Chakravorty, 2017) .....	81
Abbildung 52: Grundaufbau ASCII STL Datei (Chakravorty, 2017) .....	82
Abbildung 53: Grundaufbau binäre STL Datei (Chakravorty, 2017) .....	83
Abbildung 54: Vertex Rule (Schledermann, n.d.) .....	83
Abbildung 55: Einfluss des Sekantenfehlers in STL (Gebhardt, 2013 S.38) .....	85

Abbildung 56: Minimaler Grundaufbau einer AMF Datei (lipson, n.d.).....	88
Abbildung 57: gebogene Dreiecke AMF Format (ÖNORM EN ISO/ASTM 52915, 2017) .....	89
Abbildung 58: AMF Formulierung mit gebogenen Dreiecken (lipson, n.d.) .....	89
Abbildung 59: Rekursion beim AMF Format (lipson, n.d.) .....	90
Abbildung 60: Fehlervergleich AMF vs. STL (lipson, n.d.).....	90
Abbildung 61: Dateigrößenvergleich AMF vs. STL (lipson, n.d.) .....	91
Abbildung 62: Angestrebte Prozesskette 3MF-Format (Allen, n.d.).....	93
Abbildung 63: 3MF-Format Model-Beschreibung ("3mf Specification," n.d.) .....	94
Abbildung 64: Object Element des 3MF-Formats ("3mf Specification," n.d.).....	95
Abbildung 65: Aufbau beamlattice-Element (oben), cap-mode (unten) ("3mf Specification," n.d.).....	97
Abbildung 66: Formulierung CLI Format (Gebhardt, 2013 S 41).....	100
Abbildung 67: Softwaretypen im PEP .....	102
Abbildung 68: Modellierung mit Evolve ("Hybrid Modelling," n.d .), ("Modeling PolyNURBS n.d.) .....	104
Abbildung 69: Formengenerator Einstellungen (links), Beibehaltene Bereiche (rechts) .....	106
<b>Abbildung 70: Workflow 3-matic ("Materialise 3-matic," n.d.).....</b>	<b>107</b>
Abbildung 71: Prozesse bei der Implementierung von Gitterstrukturen mit 3-matic ("Materialise 3-matic User Community," n.d.).....	109
Abbildung 72: Workflow NX ("Additive-Fertigung-mit-NX.pdf," n.d.) .....	109
Abbildung 73: Modellierung Inspire .....	112
Abbildung 74: Optimierungseinstellungen Inspire .....	113
Abbildung 75: Einstellmöglichkeiten und Ergebnis Lattice-Optimierung Inspire (solidThinking Inspire 2018," n.d.) .....	114
Abbildung 76: Orientierungsvergleich Magics (Magics).....	118
Abbildung 77: Supports X-Y Offset in Magics.....	119
Abbildung 78: verbreiterte Supports in Magics .....	119
Abbildung 79: Zähne auf Plattform in Magics .....	119
Abbildung 80: Wandstärkenanpassung in Magics .....	120
Abbildung 81: Abgewinkelte Supports Magics (Magics) .....	120
Abbildung 82: Hatching in Magics .....	121
Abbildung 83: Hatching der Zähne in Magics .....	121
Abbildung 84: Perforierte Supports in Magics .....	121
Abbildung 85: Gussetsupport Magics (Magics) .....	122
Abbildung 86: Baum Supports (links), Blocksupport (rechts) in Magics (Magics) ("Metal Tree Support Module," n.d.) .....	123
Abbildung 87: Einbindung der Build Processor ("Build Prozessoren," n.d.).....	125
Abbildung 88: Softwarevergleich in Bezug auf die Prozessabbildung .....	127
Abbildung 89: Workflow aus separaten Softwarelösungen .....	128

Abbildung 90: Durchgängige Workflows mit externer FEA (oben) bzw. integrierter FEA (unten) .....	129
Abbildung 91: Allgemeiner Workflow der Fertigungsverfahren .....	130
Abbildung 92: Workflows zur Datenaufbereitung bzw. Fertigungsverfahren .....	131
Abbildung 93: Ausgangsmodell .....	134
Abbildung 94: Prozess der Geometrierückführung mit Polynurbs in Inspire .....	134
Abbildung 95: Optimierungsmodell Inspire .....	136
Abbildung 96: Inspire Opt. 1: Seitenansicht .....	136
Abbildung 97: Inspire Opt. 1: Analyse .....	136
Abbildung 98: Inspire Opt 2: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten) .....	137
Abbildung 99: Inspire Opt. 2: Analyse .....	137
Abbildung 100: Inspire Opt. 3: Seitenansicht .....	137
Abbildung 101: Inspire Opt. 3: Iso-Ansicht .....	138
Abbildung 102: Inspire Opt. 3: Analyse .....	138
Abbildung 103: Adaptiertes Ausgangsmodell .....	140
Abbildung 104: Inspire Opt. 4: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten) .....	140
Abbildung 105: Inspire Opt. 4: Analyse .....	141
Abbildung 106: Inspire Opt. 5: Seitenansicht (oben), Draufsicht (unten) .....	141
Abbildung 107: Inspire Opt. 5: Analyse .....	141
Abbildung 108: Inspire Opt. 6: Seitenansicht (oben), Iso-Ansicht (unten) .....	142
Abbildung 109: Inspire Opt. 6: Analyse .....	142
Abbildung 110: Modellierung mittels PolyNURBS-Tool .....	144
Abbildung 111: finales CAD Modell (Masse: 12,63g) .....	144
Abbildung 112: Von Mises Spannungsplot Inspire .....	144
Abbildung 113: Verschiebungs-Plot Inspire .....	145
Abbildung 114: Inspire Lattice Opt.: Seitenansicht .....	145
Abbildung 115: Inspire Lattice Opt.: Draufsicht .....	146
Abbildung 116: Inspire Lattice Opt.: Analyse .....	146
Abbildung 117: Prozess der vereinfachten Geometrierückführung mit Inventor .....	147
Abbildung 118: Beizubehaltende Bereiche Inventor .....	147
Abbildung 119: Inventor Opt. 1 Ergebnisse .....	148
Abbildung 120: Inventor Opt. 2 Ergebnisse .....	149
Abbildung 121: Inventor Opt. 3 Ergebnisse: Seitenansicht .....	149
Abbildung 122: Inventor Opt. 3 Ergebnisse Iso-Ansicht .....	150
Abbildung 123: Modell mit angepasstem Designbereich .....	150
Abbildung 124: Inventor Opt. 4 Ergebnisse .....	151
Abbildung 125: Modell mit hinterlegtem Optimierungsergebnis .....	152
Abbildung 126: Ergebnis der ersten Konstruktion .....	153
Abbildung 127: finales Modell des Flaschenöffners (Inventor) .....	153
Abbildung 128: Spannungsplot FEA Inventor .....	153
Abbildung 129: Verschiebungsplot FEA Inventor .....	154

Abbildung 130: Prozess der Geometrierückführung mit 3-matic .....	155
Abbildung 131: Geometrie aus der Topologie-Optimierung mit Inventor .....	155
Abbildung 132: Global smoothing .....	156
Abbildung 133: Local smoothing .....	156
Abbildung 134: Volume Mesh als Input für FEA .....	157
Abbildung 135: Preprocessing Anordnung .....	157
Abbildung 136: Spannungsplot der FEA (Einheit MPa) .....	158
Abbildung 137: Verschiebungsplot der FEA (Einheit mm) .....	158
Abbildung 138: Geometrieanpassung im Zuge der Shape Optimization .....	158
Abbildung 139: Spannungsplot nach Shape Optimization (Einheit MPa) .....	159
Abbildung 140: Verschiebungsplot nach Shape Optimization (Einheit MPa) .....	159
Abbildung 141: finale Geometrie 3-matic .....	160
Abbildung 142: Workflow zur Fertigungsvorbereitung .....	160
Abbildung 143: finales Modell mit Schriftzug .....	161
Abbildung 144: Orientierungsoptimierung in Magics .....	161
Abbildung 145: Positionierung auf der Bauteilplattform in R Designer .....	162
Abbildung 146: Monitoring Kamera (links), Entnahme der fertigen Bauteile (rechts) .....	162
Abbildung 147: Endprodukt Flaschenöffner aus AlSi10Mg .....	163

## 9 Formelverzeichnis

(1) Laser Volumsenergiesichte.....	33
(2) Definition Designvariable.....	67
(3) Zusammenhang normiertes E –Modul und Designvariable bei SIMP.....	67

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stützkonstruktionen Beispiele (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 24) .....	26
Tabelle 2: Beispiele zur Bauteilorientierung (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 25) .....	27
Tabelle 3: Einfluss der Orientierung auf die Stützstrukturen (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S. 26) .....	27
Tabelle 4: Werkstoffgruppen SLM (VDI 3405 Blatt 3, 2014 S 23) .....	43
Tabelle 5: max. Festigkeitswerte der Stahlwerkstoffe (eigene Abb. in Anlehnung an Yap et al., 2015) .....	44
Tabelle 6: max. mechanische Parameter von Titanlegierungen (eigene Abb. in Anlehnung an Zhang and Attar, 2016) .....	46
Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften AlSi10Mg (VDI 3405 Blatt 2.1, 2014 S. 2) ...	47
Tabelle 8: Mechanische Kennwerte Inconel 718 (VDI 3405 Blatt 2.2, 2014 S.5) .....	49
Tabelle 9: Übersicht Slice-Formate verschiedener Hersteller ("Netfabb-File-Formats," 2017) .....	101
Tabelle 10: Support Konfiguration Generell Magics .....	118
Tabelle 11: Supportkonfiguration Allgemein Magics .....	119
Tabelle 12: Blocksupports Magics .....	121
Tabelle 13: Materialkennwerte Stahl AISI 316 aus Inspire .....	135
Tabelle 14: Optimierungslauf 1 Inspire .....	136
Tabelle 15: Optimierungslauf 2 Inspire .....	137
Tabelle 16: Optimierungslauf 3 Inspire .....	137
Tabelle 17: Vergleich der Topologie Optimierungsergebnisse .....	138
Tabelle 18: Optimierungslauf 4 Inspire .....	140
Tabelle 19: Optimierungslauf 5 Inspire .....	141
Tabelle 20: Vergleich Ergebnisse Inspire Iteration 1 .....	143
Tabelle 21: Optimierungslauf 1 Inventor .....	148
Tabelle 22: Optimierungslauf 2 Inventor .....	149
Tabelle 23: Optimierungslauf 3 Inventor .....	149
Tabelle 24: Optimierungslauf 4 .....	151

## 11 Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive manufacturing
AMF	Additive manufacturing file format
ASC	aufsteigend
ASCII	American standard code for information exchange
ASTM	American Standard for testing and material
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAX	Computer Aided x
CFD	Computational fluid dynamics
CLI	Common Layer Interface
CT	Computer Tomographie
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
IGES	Initial Graphics exchange specification
inkl.	Inklusive
MRT	Magnet Resonanz Tomographie
OEM	Original Equipment Manufacturer
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLI	Standard Layer Interface
SLM	Selektive Laser melting
STEP	Standard for exchange of product model data
Stk.	Stück
STL	Standard Tessellation Language
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
XML	Extensible Markup language
z.B.	zum Beispiel