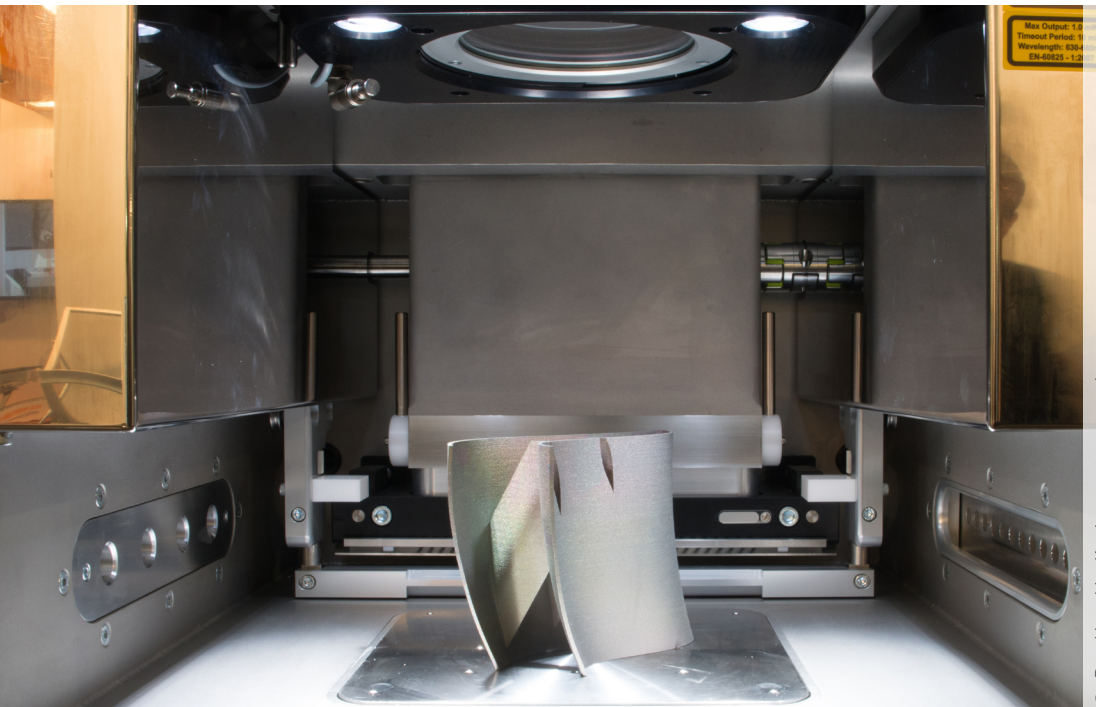


VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

# Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Additive Fertigungsverfahren  
in der industriellen Produktion



© PantherMedia/moreno.soppelsa

Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion

Autorinnen und Autoren:

Marius Bierdel, Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Aron Pfaff, Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Dr. Sebastian Kilchert, Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Dr. Andreas R. Köhler, Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie  
Yifaat Baron, Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie  
Dr.-Ing. Winfried Bulach, Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie

Fachliche Ansprechpartnerin:

Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Dr. André Bergmann vom Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik für seine fachliche Unterstützung.

Die Studie wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellt.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-27 59 506-0  
Fax +49 30-27 59 506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © moreno.soppelsa/panthermedia.net

VDI ZRE Publikationen:  
Studien

Ökologische und ökonomische Bewertung  
des Ressourcenaufwands

Additive Fertigungsverfahren in der  
industriellen Produktion



# INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
TABELLENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	9
KURZFASSUNG	12
1 EINLEITUNG	18
2 ZIEL DER STUDIE	20
3 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK	23
3.1 Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren	23
3.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)	25
3.1.2 Directed Energy Deposition (DED)	30
3.1.3 Material Extrusion	32
3.1.4 Binder Jetting	34
3.1.5 Sheet Lamination	36
3.1.6 Zusammenfassung	37
3.2 Produktentwicklungsprozesse und computergestützte Strukturoptimierung von 3D-Bauteilen	38
4 FESTLEGUNG VON TECHNOLOGIEN, FUNKTIONELLER EINHEIT UND SACHBILANZ	43
4.1 Festlegung eines Anwendungsfalls für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren in KMU	43
4.2 Festlegung des Referenzbauteils für die Bewertung	47
4.2.1 Charakteristika und technische Randbedingungen für die additive Fertigung des Referenzbauteils	47
4.2.2 Strukturoptimierung des additiv zu fertigenden Referenzbauteils	49
4.3 Auswahl der additiven und konventionellen Fertigungsverfahren	54
4.3.1 Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens	54
4.3.2 Auswahl des konventionellen Fertigungsverfahrens	61
4.4 Festlegung der funktionellen Einheit und der Systemgrenze	62

4.4.1	Festlegung der funktionellen Einheit	62
4.4.2	Festlegung der Systemgrenze	64
4.5	Datenerhebung für die additive Fertigung des strukturoptimierten Bauteils	67
4.5.1	Experimentell ermittelter Ressourcenbedarf	67
4.5.2	Material- und Energiebedarf für ein optimiertes Anlagensetup	73
4.6	Quantifizierung der Sachbilanz	75
5	ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG	77
5.1	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	77
5.1.1	Kumulierter Energieaufwand	77
5.1.2	Kumulierter Rohstoffaufwand	78
5.1.3	Wasserverbrauch	80
5.1.4	Flächeninanspruchnahme	81
5.1.5	Treibhausgaspotenzial	83
5.2	Bewertung der Rohstoffkritikalität	84
5.3	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung	86
5.3.1	Investitionskosten der Herstellung	86
5.3.2	Betriebskosten der Herstellung	89
5.3.3	Kosten in der Nutzungsphase	90
5.3.4	Entsorgungskosten	90
5.3.5	Gesamtbewertung der Lebenszykluskosten	91
5.4	Sensitivitätsanalyse	92
5.4.1	Geänderte Parameter für die Sensitivitätsanalyse	92
5.4.2	Ergebnisse der ökologischen Sensitivitätsanalyse	94
5.4.3	Ergebnisse der ökonomischen Sensitivitätsanalyse	96
6	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	98
6.1	Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext	98
6.2	Einschätzung der Relevanz und des Geltungsbereichs unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen	101
7	LITERATURVERZEICHNIS	104
	ANHANG A	108

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Links: Konventionell hergestelltes Bauteil. Rechts: Digitales CAM-Modell nach Strukturoptimierung	13
Abbildung 2: Funktionsprinzip Laser Beam Melting	25
Abbildung 3: Funktionsprinzip des DED-Verfahrens am Beispiel von Pulver mit Laser	30
Abbildung 4: Funktionsprinzip Material Extrusion. Für metallische Werkstoffe dient das Verfahren zur Herstellung von Grünlingen	32
Abbildung 5: Funktionsprinzip Binder Jetting	35
Abbildung 6: Funktionsprinzip Sheet Lamination	36
Abbildung 7: Konventioneller Entwicklungsprozess	39
Abbildung 8: Entwicklungsprozess für die additive Fertigung	40
Abbildung 9: Konventionell hergestellte Dämpfergabel	47
Abbildung 10: Schematische Abbildung der Einbauposition der Dämpfergabel in einem Fahrzeug	48
Abbildung 11: Definiertes Belastungsszenario der Dämpfergabel	49
Abbildung 12: Optimierungsmodell der Dämpfergabel mit Einteilung in Design- und Nicht-Designbereiche	51
Abbildung 13: Materialverteilung in unterschiedlichen Ebenen als Ergebnis der Topologieoptimierung der Dämpfergabel	52
Abbildung 14: Redesign der Dämpfergabel mit Anwendung des Konzepts der hybriden Übergangsbereiche von Hoschke et al.	53
Abbildung 15: Links: Für die Fertigung genutzte EOS M 400/Rechts: M400-Prozesskammer mit zentraler Bauplattform, Beschichtungssystem und Inertgas-Schutzfilm (Stromrichtung: Von rechts nach links)	57

Abbildung 16: Stützstruktur zur Fixierung des Bauteils. Links: Digitales CAM-Modelle Vorbereitung. Rechts: Gefertigtes Bauteil mit Stützstrukturen	58
Abbildung 17: Schichtabhängiges LBM-Belichtungsprinzip anhand einer gängigen Belichtungsstrategie (von Schicht zu Schicht rotierende Streifen) mit Konturbelichtung (blau), Kernbelichtung I (Inskin, weiß) und anderen Belichtungssektoren (D: Downskin, U: Upskin, O: Overlap)	59
Abbildung 18: Systemgrenze der Studie	65
Abbildung 19: Teilschritte einer LBM-basierten Bauteilfertigung und deren Energie- und Massenströme	68
Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit	77
Abbildung 21: Kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit	79
Abbildung 22: Wasserverbrauch je funktioneller Einheit	81
Abbildung 23: Flächennutzung je funktioneller Einheit	82
Abbildung 24: Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit	83
Abbildung 25: Sensitivität kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit	94
Abbildung 26: Sensitivität kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit	95
Abbildung 27: Sensitivität Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit	96



---

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Zusammenfassende Bewertung der betrachteten Verfahrensgruppen	38
Tabelle 2:	Ermittelter Material- und Energiebedarf des LBM-Prozesses	69
Tabelle 3:	Allgemeine Kennwerte bezüglich Referenzbauteil, Maschinenparameter und Maschinenkennwerte	71
Tabelle 4:	Materialaufwand für Wartungsarbeiten	72
Tabelle 5:	Ermittelter Material- und Energiebedarf des LBM-Prozesses für optimiertes Anlagensetup	74
Tabelle 6:	Inputparameter für die Modellierung der Herstellung der beiden Pulver für die additive Fertigung (bezogen auf die Herstellung von 1 kg Metallpulver)	76
Tabelle 7:	Inputparameter pro Stück für die ökologische und ökonomische Bewertung	76
Tabelle 8:	Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800, Blatt 2	84
Tabelle 9:	Aggregierte und gerundete Kritikalitätswerte	85
Tabelle 10:	Investitionskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil	88
Tabelle 11:	Betriebskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil	90
Tabelle 12:	Recyclinggutschriften für konventionell und additiv gefertigte Referenzbauteile	91
Tabelle 13:	Zusammenstellung Lebenszykluskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil	91
Tabelle 14:	Änderungen der Inputparameter der additiven Fertigung pro Stück für die ökologische und ökonomische Bewertung	94

Tabelle 15:	Investitions- und Betriebskosten der optimierten additiven Fertigung pro Referenzbauteil	97
-------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	----

---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Al	Aluminium
AM	Additive Manufacturing (additive Fertigung)
AlSi10Mg	Aluminiumlegierung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
CEM	Composite Extrusion Modeling
CNC	Computerized Numerical Control
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit
DED	Direct Energy Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIS	Draft International Standard
DIW	Direct Ink Write
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
EMI	Fraunhofer Ernst-Mach-Institut
EN	Europäische Norm
EOS M 400	3D-Drucker-Modell
eq	Äquivalente
EU	Europäische Union
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite-Elemente-Methode

<b>FE</b>	funktionelle Einheit
<b>FFF</b>	Fused Filament Fabrication
<b>FLM</b>	Fused Filament Modeling
<b>GB</b>	Gigabyte
<b>GER</b>	Gross Energy Requirement
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>GPa</b>	Gigapascal
<b>h</b>	Stunde
<b>ILCD</b>	International Reference Life Cycle Data System
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>k. D.</b>	keine Datenbasis
<b>KEA</b>	kumulierter Energieaufwand
<b>Kfz</b>	Kraftfahrzeug
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>KMU</b>	kleine und mittlere Unternehmen
<b>KRA</b>	kumulierter Rohstoffaufwand
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>l</b>	Liter
<b>LBM</b>	Laser Beam Melting
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>LDM</b>	Liquid Deposition Modeling
<b>ME</b>	Material Extrusion
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>µm</b>	Mikrometer

---

<b>m<sup>3</sup></b>	Kubikmeter
<b>mm</b>	Millimeter
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>NPV</b>	Net Present Value
<b>PBF</b>	Powder Bed Fusion
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>PSA</b>	Persönliche Schutzausrüstung
<b>RAM</b>	Random-Access Memory
<b>RB</b>	Referenzbauteil
<b>SIMP</b>	Solid Isotropic Material with Penalization
<b>SL</b>	Sheet Lamination
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting
<b>STL</b>	Stereolithografie
<b>Ti6Al4V</b>	hochfeste Titanlegierung
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
<b>VDI ZRE</b>	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

## KURZFASSUNG

Additive Fertigungsverfahren (AM) zeichnen sich durch die schichtweise Generierung von Strukturen aus und sind eine Schlüsseltechnologie der Digitalisierung (Industrie 4.0). Aktuell stehen die sogenannten 3D-Druckverfahren an der Schwelle zur Fertigung von kleinen und mittleren Serien. Künftig werden sie für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des verarbeitenden Gewerbes eine zentrale Rolle spielen.

Aus Ressourcen- sowie ökonomischer Sicht stellt sich aktuell die Frage, wie hoch der Ressourcenverbrauch von additiven Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren (Gießen, Fräsen etc.) ist, und wie sich die Wirtschaftlichkeit beider Verfahren gestaltet. Studien zum Vergleich des Ressourcenbedarfs additiv sowie konventionell hergestellter Bauteile existieren bereits.<sup>1,2,3</sup> An diesen wurden jedoch keine Strukturoptimierungen zur Volumenreduktion der additiv zu fertigenden Bauteile vorgenommen. Aber gerade die Volumenreduktion am Bauteil trägt wesentlich zu einer ressourcenschonenden Fertigung und Nutzung bei. Studien zeigten, dass hier größere Effekte erzielt werden können als durch die reine Auswahl einer Anlagentechnologie bzw. eines Fertigungsverfahrens (Kapitel 1).<sup>4,5</sup>

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, eine vergleichende ökologische sowie ökonomische Bewertung eines additiv sowie eines konventionell hergestellten Bauteils unter Berücksichtigung einer Strukturoptimierung des additiv zu fertigenden Bauteils durchzuführen. Hierbei liegt die additive Verarbeitung von Metallen im Fokus, da deutsche Unternehmen vor allem in diesem Bereich als führend gelten (Kapitel 2).

---

<sup>1</sup> Vgl. Telenko und Seepersad (2012), S. 472–481.

<sup>2</sup> Vgl. Faludi et al. (2015), S. 14–33.

<sup>3</sup> Vgl. Morrow et al. (2007), S. 932–943.

<sup>4</sup> Vgl. Wohlers et al. (2016).

<sup>5</sup> Vgl. Bierdel und Pfaff (2017).

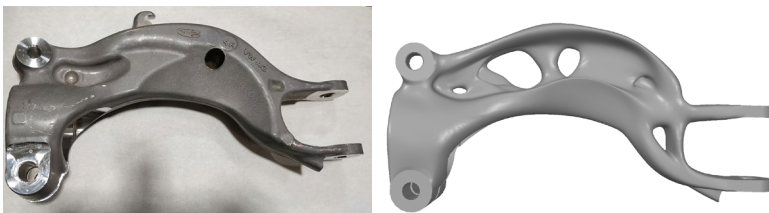
Für die Umsetzung des Vergleichs zur ökologischen und ökonomischen Bewertung des Ressourcenaufwands wurde beginnend folgender Anwendungsfall definiert:

**„Fertigung von Fahrzeugbauteilen in einer Losgröße von jährlich 10.000 Stück.“**

Dieser Anwendungsfall basiert auf der Annahme, dass sich konventionelle Fertigungsverfahren für kleine bis mittelgroße Serien zukünftig durch additive Fertigungsverfahren ersetzen lassen. Die Studie skizziert folglich ein als mittelfristig relevant einzuschätzendes Szenario und besitzt einen prospektiven Charakter (Kapitel 4.1).

Als Referenzbauteil wurde ein Fahrzeugbauteil, speziell eine Dämpfergabel, von einem Automobilzulieferer zur Verfügung gestellt. Diese besteht aus einer gesenkgeschmiedeten Aluminium-Gusslegierung und besitzt ein Gesamtgewicht von 1,3 kg. Für die additive Fertigung dieser Dämpfergabel wurden als Werkstoffe zwei Aluminiumpulver gewählt: ein Aluminiumpulver (Lieferant APWorks) der Legierung Scalmalloy<sup>®</sup> AlMg4.5Sc0.7Zr0.3 und die Aluminiumlegierung AlSi10Mg.

Die Dämpfergabel unterlag folgend einer Topologieoptimierung über die Software OptiStruct: Zuerst wurde dazu ein Simulationsmodell erzeugt, das Optimierungsziel definiert, darauf aufbauend die Topologieoptimierung durchgeführt und die Ergebnisse interpretiert. Abschließend wurde das Redesign ausgearbeitet. Abbildung 1 zeigt das konventionell hergestellte und das digitale CAM-Modell des strukturoptimierten Referenzbauteils.



**Abbildung 1: Links: Konventionell hergestelltes Bauteil. Rechts: Digitales CAM-Modell nach Strukturoptimierung**

Als Ergebnis erzielt die Topologieoptimierung eine Massenersparnis von 12 % mit Scalmalloy<sup>®</sup> und eine Massenersparnis von 5 % mit AlSi10Mg (Kapitel 4.2).

Die Verfahrensauswahl zur additiven Fertigung des strukturoptimierten Referenzbauteils erfolgte nach der ISO DIS 20195<sup>6</sup>. Für die Studie wurde das Laser Beam Melting (LBM) herangezogen, da es ähnliche Werkstoffeigenschaften wie konventionelle Verfahren erzielt, eine gute Aufbaurate bzw. Produktivität besitzt und über eine hohe Marktrelevanz verfügt. Zur Datenerhebung für die ökologische und ökonomische Bewertung wurde das strukturoptimierte Bauteil in einer LBM-Anlage des Typs EOS M 400 hergestellt. Für den konventionellen Herstellungsprozess wurde das tatsächliche Produktionsverfahren des Automobilherstellers herangezogen, das die Schritte Gießen, Gesenkschmieden, Entgraten und Wärmebehandeln sowie Fräsen umfasst (Kapitel 4.3).

Die vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung setzt die Definition einer einheitlichen Bezugsgröße (funktionelle Einheit) voraus. Für die vorliegende Studie wurde folgende funktionelle Einheit festgelegt (Kapitel 4.4):

**„Eine Dämpfergabel für Pkw, ausgelegt für eine Standzeit über die angenommene Gesamtfahrleistung des Fahrzeugs von 150.000 km.“**

Die konventionell hergestellte sowie additiv gefertigte Dämpfergabel leistet in ihrer Nutzungsphase demnach die gleiche Funktion, unterscheidet sich aber in ihren Eigenschaften wie Werkstoff, Geometrie und Masse. Die genannte funktionelle Einheit repräsentiert somit den kleinsten gemeinsamen Nenner der Funktion der hier betrachteten Referenzbauteile: über deren gesamten Produktlebensweg von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung (Systemgrenze, Kapitel 4.4).

Auf Basis der aufgeführten Festlegungen und aggregierten Daten erfolgt die vergleichende ökologische Bewertung anhand der Wirkungskategorien

---

<sup>6</sup> Vgl. ISO/DIS 20195:2015(E).



kumulierter Energieaufwand, kumulierter Rohstoffaufwand, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme und Treibhausgaspotenzial. Die Ergebnisse des ökologischen Vergleichs zeigen, dass die additive Fertigung über alle umweltbezogenen Wirkungskategorien hinweg deutlich stärkere Auswirkungen verursacht als die konventionelle Fertigung. Dies ist vor allem auf den hohen elektrischen Grundverbrauch der LBM-Anlage zurückzuführen und deutet auf eine Anlagentechnik mit Optimierungspotenzial hinsichtlich der Energieeffizienz hin. Über eine Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass technische Verbesserungen an der LBM-Anlage die Umweltauswirkungen um rund die Hälfte reduzieren und den Abstand zwischen konventioneller und additiver Fertigung verringern können. Hier kann abgeschätzt werden, dass Folgegenerationen additiver Fertigungsverfahren solche Optimierungspotenziale in der Entwicklung erschließen und so zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen führen.

Die verwendeten Pulverlegierungen für die additive Fertigung zeigten ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf den Ressourcenaufwand. Die Aluminiumlegierung Scalmalloy<sup>®</sup> besitzt Scandium als Bestandteil, dessen Gewinnung sich wesentlich auf den Rohstoffaufwand auswirkt und zudem als kritischer Rohstoff eingestuft ist. Da Scalmalloy<sup>®</sup> eher für hochoptimierte Bauteile und weniger für generische Fahrzeugkomponenten geeignet ist, empfiehlt es sich im Vergleich der Pulverlegierungen, AlSi10Mg, das geringere ressourcenrelevante Auswirkungen für den Anwendungsfall hervorruft, einzusetzen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wahl der verwendeten Metallpulver auf den Anwendungsfall exakt abzustimmen ist, um umweltrelevante Auswirkungen zu minimieren. Zudem ist der sinnvolle Einsatz eines additiven Fertigungsverfahrens abhängig vom betrachteten Anwendungsfall. In der vorliegenden Studie sind die Einsparungen in der Nutzungsphase durch die Masseneinsparung beider Pulverlegierungen so gering, dass der Treibstoffverbrauch nur unwesentlich reduziert wird. Für andere Anwendungsbereiche wie der Luft- und Raumfahrt oder für Produkte, die einem bionischen Gesamtkonzept folgen, sind hier höhere Einsparpotenziale in der Nutzungsphase erzielbar und die Vorteile der additiven Fertigung besser ausreizbar (Kapitel 5.1).

Die ökonomische Bewertung zeigt ebenfalls, dass neben den Investitionskosten auch die Material- und Betriebskosten bei der additiven Fertigung

wesentlich höher sind als bei einer konventionellen Fertigung. Ausschlaggebend hierfür sind die Pulver- und Wartungskosten für die LBM-Anlage. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt aber auch, dass technologische Innovationen die Wirtschaftlichkeit von additiven Fertigungsanlagen in Zukunft deutlich verbessern können (Kapitel 5.3). Insgesamt ermöglichen die Ergebnisse aus der Studie somit die Ableitung folgender genereller Erkenntnisse (Kapitel 6):

- Die zu produzierende Produktart und -menge bestimmt wesentlich über die Sinnhaftigkeit des Einsatzes additiver Fertigungsverfahren. Hierbei hat vor allem der Grad der Masseneinsparung durch eine Strukturoptimierung sowie die Art des äquivalenten, konventionellen Fertigungsverfahrens (Gießen oder Fräsen etc.) Einfluss auf die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen.
- Die Werkstoffwahl beeinflusst ebenfalls die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen wesentlich und sollte exakt auf die Anforderungen des Anwendungsfalls, also der zu produzierenden Produktart und -menge abgestimmt sein.
- Die dauerhafte Auslastung (z. B. optimierte Bauraumauslastung) und die technische Optimierung (z. B. Reduktion des Energieverbrauchs) additiver Fertigungsanlagen verringern die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen und können in Zukunft neue Anwendungsfelder erschließen.

Zusammenfassend ist die additive Fertigung metallischer Werkstücke als Ergänzung zur konventionellen Fertigung zu sehen. Sie steht an der Schwelle zur Klein- und Mittelserienfertigung und spielt eine zunehmend zentrale Rolle für verschiedene Branchen, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik sowie für bionische Produktkonzepte. Es kann abgeschätzt werden, dass durch die technologische Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren die Prozessabläufe optimiert werden, wodurch sich neue Anwendungsgebiete erschließen und konventionelle Fertigungsverfahren im Schnittmengenbereich beider Technologien (Losgröße) effizient ersetzt werden können. Hierzu bietet die vorliegende Studie einen beispielhaften Einblick in hilfreiche Bewertungsmechanismen bei

der Entscheidungsfindung bezüglich Investitionen in additive Fertigungsverfahren.

## 1 EINLEITUNG

Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing, AM), welche auch als „3D-Druck“ bezeichnet werden, sind durch die Produktionsflexibilität, durch die Möglichkeiten der Funktionsintegration und der Produktindividualisierung sowie durch beschleunigte Innovationszeiten eine Schlüsseltechnologie der Digitalisierung in der Industrie (Industrie 4.0). Die schichtweise Generierung von Strukturen bietet eine neuartige Gestaltungsfreiheit, sodass der Technologie in fast allen Branchen des verarbeitenden Gewerbes ein stetiges Wachstum zugesprochen wird.<sup>7,8,9</sup>

Der Einsatz von Strukturoptimierungsmethoden, insbesondere der Topologieoptimierung, erlaubt es, die Gestaltungsfreiheiten gezielt und effizient auszunutzen. So können ein reduziertes Bauteilgewicht und damit eine Verringerung der Betriebskosten in der Nutzungsphase von 3D-gedruckten Produkten, aber auch eine ressourceneffiziente Fertigung ermöglicht werden.<sup>10,11</sup> Gerade zu Letzterem zeigen Studien, dass die Volumenreduktion an Bauteilen (beispielsweise durch numerische Strukturoptimierung) eine wesentliche Voraussetzung für eine ressourcenschonende Fertigung ist. Durch eine passende Designwahl können hier noch größere Effekte erzielt werden als durch die Entscheidung für eine konkrete Anlagentechnologie.<sup>12</sup> Breite technologieübergreifende Betrachtungen zur Nachhaltigkeit additiver Fertigungsverfahren wurden bereits von Huang, Ford, Gebler und Kohtala durchgeführt.<sup>13,14,15,16</sup>

Aktuell steht die 3D-Technologien an der Schwelle zur Fertigung von kleineren und mittleren Serien in Ergänzung zur bereits etablierten Fertigung

---

<sup>7</sup> Vgl. Gartner (2014).

<sup>8</sup> Vgl. Kianian (2016).

<sup>9</sup> Vgl. Richter und Wischmann(2016).

<sup>10</sup> Vgl. Wohlers et al. (2016).

<sup>11</sup> Vgl. Bierdel; Pfaff (2017).

<sup>12</sup> Vgl. Pfaff et al. (2018).

<sup>13</sup> Vgl. Huang et al. (2013).

<sup>14</sup> Vgl. Ford und Despeisse (2016), S. 1573–1587.

<sup>15</sup> Vgl. Gebler et al. (2014), S. 158–167.

<sup>16</sup> Vgl. Kohtala C. (2015), S. 654–668.

von Prototypen und Pilotprodukten. Die allgemeine Serienfertigung von Produkten erfolgt traditionell durch konventionelle Fertigungsverfahren wie dem Gießen oder dem Fräsen. Aber auch hier wird sich künftig die Frage nach dem ökologisch und ökonomisch sinnvollsten Fertigungsverfahren, insbesondere in Abhängigkeit von der zu fertigen Losgröße und der Bauteilgeometrie, stellen. Vergleiche bezüglich des Ressourcenbedarfs zwischen konventionell und additiv gefertigten Bauteilen wurden bereits von Telenko, Faludi und Morrow erarbeitet.<sup>17,18,19</sup> Hierbei erfolgte jedoch keine Auslegung des betrachteten Bauteils auf ein fertigungsgerechtes AM-Design. Weiterhin wurden in der Entwicklungsphase keine Optimierungen der Konstruktion nach ökonomischen Gesichtspunkten durchgeführt.

Folglich fordern Huang<sup>20</sup> und Ford<sup>21</sup> weiterführende Vergleiche zwischen additiven und konventionellen Fertigungsverfahren unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Anforderungen. Eine erste Einteilung der Stoffströme innerhalb des Fertigungszyklus erfolgt durch Pfaff, Telenko und Baumers.<sup>22,23,24</sup> Um die Überführung der additiven Fertigungsverfahren in die industrielle Kleinserienfertigung erfolgreich zu unterstützen, sind weitere vergleichende Studien nötig, welche Prognosen ermöglichen und die Entscheidungsfindung der potenziellen Anwender unterstützen.

---

<sup>17</sup> Vgl. Telenko und Seepersad (2012), S. 472–481.

<sup>18</sup> Vgl. Faludi et al. (2015), S. 14–33.

<sup>19</sup> Vgl. Morrow et al. (2007), S. 932–943.

<sup>20</sup> Vgl. Huang et al. (2013).

<sup>21</sup> Vgl. Ford und Despeisse (2016), S. 1573–1587.

<sup>22</sup> Vgl. Pfaff et al. (2018).

<sup>23</sup> Vgl. Telenko und Seepersad (2012), S. 472–481.

<sup>24</sup> Vgl. Baumers et al. (2011), S. 2228–2239.

## 2 ZIEL DER STUDIE

Die vorliegende Studie bezweckt eine vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung additiver und konventioneller Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion. Insbesondere sollen die möglichen Verbesserungspotenziale der additiven Fertigungsverfahren hinsichtlich der Energie- und Ressourceneffizienz sowie der Wirtschaftlichkeit analysiert und mit konventionellen Fertigungsverfahren, wie z. B. dem Gießen und Schmieden verglichen werden. Dabei gilt es, neben dem eigentlichen Fertigungsprozess, auch die bei AM-Verfahren mögliche Optimierung der geometrischen Strukturen durch computergestützte Entwicklungsmethoden zu berücksichtigen.

Der Vergleich erfolgt anhand eines für die industrielle Produktion in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) relevanten Betrachtungsrahmens. Da deutsche Unternehmen vor allem im Bereich der additiven Verarbeitung von Metallen als führend gelten, steht diese im Fokus der Betrachtungen. Zudem wird ein Anwendungsfall gewählt, der die Produktionsprozesse Metall verarbeitender KMU möglichst generisch repräsentiert: die Herstellung von Aluminiumleichtbauteilen für Fahrzeuge. Als Referenzbauteil dient eine in der Praxis produzierte Dämpfergabel aus einer Aluminiumlegierung, die in Automobilen eingesetzt wird. Vor der additiven Fertigung unterliegt diese Dämpfergabel einer Strukturoptimierung. Das genannte Referenzbauteil wurde der Studie aus folgenden Erwägungen zugrunde gelegt:

- Das Werkstück lässt sich sowohl mit additiven als auch mit konventionellen Fertigungsprozessen sinnvoll herstellen und besteht aus Werkstoffen mit ähnlichen Eigenschaften.
- Eine funktionelle Äquivalenz des strukturoptimierten, additiven sowie des konventionell gefertigten Bauteils ist gegeben.
- Der Anwendungszweck des Referenzbauteils in Leichtbauweise ermöglicht eine Analyse des Einflusses der Strukturoptimierung auf die Energie- und Ressourceneffizienz sowie die ökonomischen Kosten während der Nutzungsphase des Produkts.

- Das konventionell gefertigte Bauteil entstammt einem aktuellen konventionellen Produktionsprozess, wodurch die Erhebung primärer Sachbilanzdaten für die ökologische und ökonomische Analyse möglich ist.
- Die für die vergleichende Bewertung zugrunde gelegten Annahmen repräsentieren KMU-relevante Geschäftsmodelle.

Der Vergleich des additiv sowie konventionell gefertigten Referenzbauteils erfolgt anhand eines lebenszyklusorientierten Bewertungsansatzes, der den gesamten Produktlebensweg der betrachteten Bauteile in die Analyse einbezieht. Folgende Forschungsfragen werden in diesem Zusammenhang im Einzelnen untersucht:

- Welche Energie- und Rohstoffaufwendungen (kumulierter Energieaufwand (KEA) und kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)) fallen über den gesamten Lebensweg der Bauteile an? Welche Unterschiede resultieren aus dem Einsatz additiver Technologien und der computergestützten Strukturoptimierung der Bauteile?
- Welche Aufwendungen an versorgungskritischen Rohstoffen, Wasser und Fläche sind nötig?
- Welche Treibhausgasemissionen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) werden je Variante emittiert?
- Welche Kosten ergeben sich für die betrachteten Varianten über deren jeweiligen Lebenszyklus? Welche wirtschaftlichen Vorteile liegen im Einsatz von AM und der Nutzung strukturoptimierter Bauteile in Fahrzeugen?

Hauptzielgruppen der Studie sind hierbei

- kleine und mittlere Unternehmen (KMU) der Metall verarbeitenden Industrie als mögliche Anwender von AM Fertigungsverfahren,
- Maschinen- und Anlagenhersteller,
- Fahrzeugindustrie als mögliche Anwender strukturoptimierter Bauteile,

- Forschungsinstitutionen und Berater sowie
- Initiativen und Verbände sowie Einrichtungen des Bundes und der Länder.

KMU sollen durch die Ergebnisse der Studie befähigt werden, den Nutzen einer Investition in additive Fertigungsverfahren aus ökologischer und ökonomischer Perspektive für sich zu bewerten. Weiterhin soll die Studie als Informationsquelle für Initiativen und Verbände sowie Einrichtungen des Bundes, der Länder und deren Vertreter genutzt werden können.



## 3 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

### 3.1 Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren

Aktuell sieht die Norm DIN EN ISO 8580 bisher keine explizite Einteilung von additiven Fertigungsverfahren in die sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren ‚Urformen‘, ‚Umformen‘, ‚Trennen‘, ‚Fügen‘, ‚Beschichten‘ und ‚Stoffeigenschaften ändern‘ vor.<sup>25</sup> Die Fachliteratur ordnet diese jedoch häufig dem ‚Urformen‘ oder ‚Fügen‘ zu (Beispiel siehe Gebhardt<sup>26</sup>).

Die additiven Fertigungsverfahren selbst lassen sich folgendermaßen klassifizieren. Nach Gebhardt<sup>15</sup> ist eine Prozessklassifizierung basierend auf dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials möglich:

- gasförmig,
- flüssig und
- fest (basierend auf Folie, Draht oder Pulver).

Sonderfälle stellen die Ausgangsstoffe Pasten und Aerosole dar.

Eine alternative und weitläufig anerkannte Klassifizierung findet sich in den Normen ISO/ASTM 52900 bzw. ASTM F2792-12a. Diese unterteilen die additiven Fertigungsverfahren, basierend auf der Prozessmethodik, in sieben Gruppen:

- **Powder Bed Fusion (PBF):** Das Material liegt in Form eines Pulverbetts vor und wird mithilfe thermischer Energie selektiv gefügt.
- **Direct Energy Deposition (DED):** Das Material wird während des Auftragens mithilfe thermischer Energie aufgeschmolzen.
- **Material Extrusion:** Aufgeschmolzenes Material wird mithilfe einer Mündung (bspw. Düse) aufgetragen.

---

<sup>25</sup> Vgl. DIN 8580:2003-09.

<sup>26</sup> Vgl. Gebhardt (2013).

- **Binder Jetting:** Flüssiges Bindemittel wird in ein Pulver eingebracht, um dieses zu binden.
- **Sheet Lamination:** Folienförmiges Ausgangsmaterial wird zugeschnitten und gefügt.
- **Vat Photopolymerization:** Flüssige Photopolymere werden selektiv ausgehärtet.
- **Material Jetting:** Das Material wird in Form von Tropfen lokal aufgetragen.

Innerhalb dieser Gruppen existiert wiederum eine Vielzahl von Technologievarianten mit unterschiedlicher Nomenklatur. Marketing und patentrechtliche Gründe haben zu einer großen Vielfalt an herstellereigenspezifischen Bezeichnungen beigetragen. Außerdem gibt es für die meisten englischsprachigen Fachbegriffe bisher noch keine geeignete Übertragung ins Deutsche. Deshalb ist die Nomenklatur im Bereich AM unübersichtlich.

Da die Studie die Herstellung eines metallischen Referenzbauteils fokussiert, werden folgend Verfahren und deren Eigenschaften näher erläutert, die metallische Werkstoffe verarbeiten können. Diese Verfahren sind den Gruppen Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Material Extrusion, Binder Jetting und Sheet Lamination zuzuordnen.<sup>27</sup>

Um eine gut verständliche Einführung in die additiven Fertigungsverfahren zu gewährleisten, werden die technologischen und ökonomischen Einzelheiten stark vereinfacht dargestellt. Spezialverfahren, welche kommerziell bisher nur schwach vertreten sind, werden hierbei nicht berücksichtigt (bspw. thermisches Spritzen).

---

<sup>27</sup> Vgl. Kianian (2016).

### 3.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Laser Beam Melting (LBM, Laserstrahlschmelzen)<sup>28</sup>

**Prinzip:** Der Prozess basiert auf der Verarbeitung eines Metallpulvers mit typischen Korngrößen zwischen 5  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$ . Die schichtweise Generierung des in einem Pulverbett liegenden Bauteils erfolgt über ein selektives Aufschmelzen des Pulvers mittels Laserstrahl und anschließendem Erstarren der lokalen Metallschmelze auf der bereits vorhandenen Oberfläche des entstehenden Werkstücks. Der Laser bearbeitet hierbei nacheinander einzelne Schichten mit typischen Dicken von 10  $\mu\text{m}$  bis 90  $\mu\text{m}$ . Nach der Belichtung einer einzelnen Schicht senkt sich das Pulverbett über die Bauplattform um die entsprechende Schichtdicke ab, gefolgt von der Auflage einer frischen Pulverschicht durch ein klingenbasiertes Beschichtersystem<sup>29</sup>. Das iterative Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt.

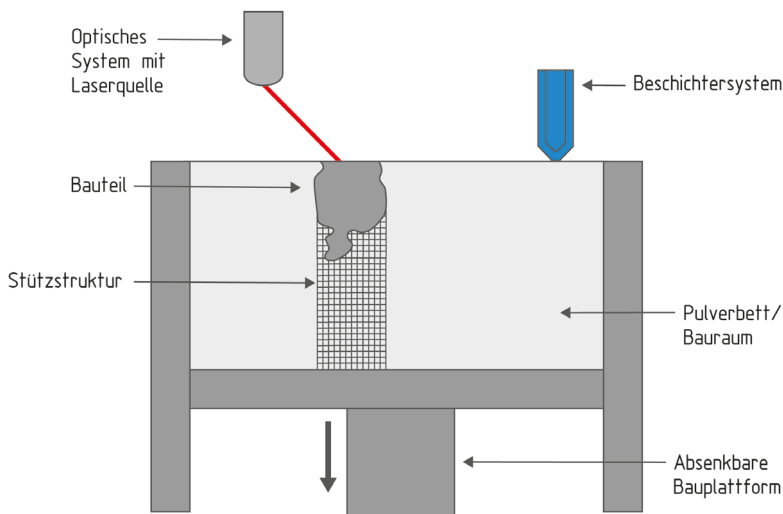


Abbildung 2: Funktionsprinzip Laser Beam Melting

<sup>28</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: Laser Strahl Schmelzen, Selective Laser Melting (SLM), Laser Cusing, Direct Metal Sintering (DMLS), Laser Melting und andere.

<sup>29</sup> Vgl. Gebhardt (2013).

**Verfügbare Werkstoffe:** Aufgrund der hohen Marktrelevanz und der Flexibilität dieses Fertigungsverfahrens ist hierfür zurzeit die größte Auswahl an Pulverwerkstoffen im Markt erhältlich. Die Pulverwerkstoffe lassen sich für verschiedene Anwendungsgebiete, wie dem Leichtbau-, Hochtemperatur- oder dem Werkzeugbau, einsetzen. Die Palette der verfügbaren Werkstoffe wurde in den letzten Jahren erweitert, indem durch verschiedene Forschungsaktivitäten neue Werkstoffe für das Laserstrahlschmelzen qualifiziert wurden. Prinzipiell lassen sich im Laserstrahlschmelzprozess alle schweißbaren Legierungen gut verarbeiten.

**Werkstoffeigenschaften:** Aufgrund der hohen Abkühlraten im Prozess entsteht beim Laserstrahlschmelzen eine charakteristische Mikrostruktur mit typischerweise feinen Kornausscheidungen. Diese bedingt im Vergleich zu konventionell verarbeiteten Werkstoffen eine deutlich erhöhte Festigkeit, jedoch eine reduzierte Duktilität<sup>30</sup>. Die relative Dichte der laserstrahlgeschmolzenen Festkörper liegt üblicherweise deutlich über 99 %. Der additiv verarbeitete Werkstoff besitzt im Vergleich zu einem konventionell verarbeiteten Werkstoff ein ähnliches Werkstoffeignungsprofil. Der Grad der Ausprägung der Anisotropie im Werkstoff ist dabei stark von den gewählten Prozessparametern abhängig<sup>31</sup>. Durch die sehr hohe Erstarrungsgeschwindigkeit der Schmelze werden im Laserstrahlschmelzprozess Eigenspannungen im Bauteil induziert. Diese können mithilfe einer nachgelagerten Wärmebehandlung reduziert werden.

**Oberflächeneigenschaften:** Die Oberflächeneigenschaften sind stark von der eingesetzten Legierung, den Prozessparametern (bspw. Schichtstärke) sowie der Bauteilkonstruktion und der Orientierung im Bauraum abhängig. Die Rauigkeit ist jedoch typischerweise, wie bei allen additiven Fertigungsverfahren, hoch, sodass eine Nachbearbeitung der Funktionsflächen nötig ist. Die Formgenauigkeit der erzeugten Schichten ist parallel zur Bauplattform höher als rechtwinklig zu den aufeinanderliegenden Schichten. Diese Oberflächen weisen eine gewisse Treppenstufentextur auf. Jedoch fällt dieser sogenannte Stair-Step-Effekt bei dieser Technologie aufgrund der

---

<sup>30</sup> Vgl. Buchbinder (2013).

<sup>31</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2.1 (2015).

vergleichsweise dünnen Schichten und der thermischen Effekte im Prozess verhältnismäßig gering aus. Ungünstig positionierte Flächen können Mikrorisse aufweisen, welche später in der Nutzungsphase der Produkte möglicherweise als Rissinitiatoren wirken.

**Prozesslimitationen:** Bei der Bauteilfertigung werden Stützstrukturen benötigt, die das entstehende Bauteil auf der Bauplattform fixieren und eine Wärmeabfuhr ermöglichen. Diese Stützstrukturen werden, wie das Bauteil selbst, additiv im selben Prozess erzeugt. Die Stützstrukturen und das Pulver müssen dann nach dem Prozess manuell entfernt werden. Da die Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren dennoch hoch<sup>32</sup> ist, wird die Technologie immer häufiger zur Fertigung funktionsfähiger Bauteile eingesetzt. Daher entwickeln sich auch die Systeme und Methoden zur Qualitätssicherung rasch weiter<sup>33</sup>.

**Kosten:** Die Investitionskosten sind aufgrund des komplexen Anlagenaufbaus im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren relativ hoch.<sup>21</sup> Auch die Betriebskosten gestalten sich vergleichsweise hoch aufgrund der aktuellen Preise für Metallpulver, den nötigen Hilfsmitteln (bspw. Inertgas, Schutzmaßnahmen wie persönliche Schutzausrüstung (PSA)) sowie der aufwendigen Nachbearbeitung der Bauteile.<sup>21</sup> Zudem ist der Arbeitsaufwand für die manuelle Entfernung der Stützstrukturen, für aufwändige Auf- und Abrüstarbeiten sowie für die Reinigung der Anlagen hoch. Dafür ist speziell geschultes Fachpersonal erforderlich. Hinzu kommen Materialverluste für Stützstrukturen, großer Raumbedarf sowie Entsorgungskosten für Filtereinheiten. Nicht aufgeschmolzenes Pulver hingegen lässt sich ohne nennenswerten Verlust wiederverwenden.

**Aktuelle Marktrelevanz:** In Bezug auf metallische additive Fertigungsverfahren handelt es sich branchenübergreifend um das meistverbreitete Verfahren.<sup>21</sup> Pulverumsätze und Maschinenverkäufe haben über die letzten

---

<sup>32</sup> Aufgrund der Eigenspannungen im Material und der dünnen Metallpulverschichten, welche eine Kraftinteraktion zwischen Beschichtersystem und Werkstück verursacht, ist die Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigungsverfahren begrenzt.

<sup>33</sup> Vgl. Kianian (2016).

Jahre exponentiell zugenommen. Prognosen sagen eine weitere entsprechende Entwicklung voraus. 2015 wurden weltweit 808 Maschinen verkauft (Vergleich 2012: 202). Größte Treiber der Nachfrage sind die Luft- und Raumfahrtindustrie sowie die Medizintechnik.

Aufgrund der großen Universalität dieser Technologie besteht inzwischen ein breites Angebot an Fertigungsanlagen verschiedener Hersteller. Je nach Anlagentyp lassen sich mikroskopisch kleine Bauteile als auch großvolumige Bauteile bis zu 1 m<sup>3</sup> erzeugen (Forschungsanlagen erreichen noch deutlich größere Volumina). Der Trend geht hin zu großvolumigen automatisierten Fertigungssystemen, um eine wirtschaftliche Kleinserienfertigung voranzutreiben.<sup>34</sup>

**Fazit:** Es handelt sich um das am weitesten verbreitete additive Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe. Die Technologie ist kostenintensiv, bietet jedoch bereits eine große Werkstoffauswahl, die in Zukunft noch deutlich wachsen wird. Die Stärken der Technologie liegen vor allem in den resultierenden Werkstoffeigenschaften. Deshalb eignet sich die Methode insbesondere zur Herstellung von Struktur- und Funktionsbauteilen.

Electron Beam Melting (EBM, Elektronenstrahlschmelzen)<sup>35</sup>

**Prinzip:** Es handelt sich um einen dem LBM verwandten Prozess. Das Pulver wird jedoch mithilfe eines Elektronenstrahls anstatt eines Lasers aufgeschmolzen. Darum befindet sich im Vergleich zum LBM auch kein Inertgas in der Prozesskammer, sondern ein Hochvakuum.

**Verfügbare Werkstoffe:** Die hohe Energiedichte des Elektronenstrahls ermöglicht eine deutlich schnellere Exposition im Vergleich zu laserbasierten Systemen. Dies ermöglicht unter anderem ein Vorwärmen des Pulverbetts, gefolgt von der eigentlichen Belichtung der Bauteile. Dies reduziert die Abkühlrate und somit die Eigenspannungen im Werkstück. Darum

---

<sup>34</sup> Vgl. Kianian (2016).

<sup>35</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: keine bekannt (vermutlich aufgrund patentrechtlicher Situation).

finden sich die Stärken der Technologie vor allem in der Verarbeitung eigenspannungsanfälliger Legierungen wie Ti6Al4V, Cobalt-Chrom oder Inconel 718 (Nickelbasislegierung). Die momentane Werkstoffpalette ist begrenzt.

**Werkstoffeigenschaften:** Wie im LBM-Verfahren lassen sich Bauteile mit einer hohen relativen Dichte erzeugen. Die mechanischen Eigenschaften sind gleichwertig zu konventionell verarbeiteten Werkstoffen. Die im Vergleich zum LBM-Prozess geringere Abkühlrate verursacht ein dementsprechend größeres Mikrogefüge. Der Einsatz eines Hochvakuums anstelle von Inertgas beugt Verunreinigungen im Werkstoff besser vor.

**Oberflächeneigenschaften:** Der Einsatz eines Elektronenstrahls macht es schwierig, geringe Energien in das Pulverbett einzutragen. Hieraus resultieren rauere Oberflächen als im LBM-Verfahren. Funktionsflächen müssen dementsprechend nachbearbeitet werden.

**Prozesslimitationen:** Trotz reduzierter Eigenspannungen werden auch hier Stützstrukturen benötigt. Die Gestaltungsfreiheit ist zwar etwas höher als beim LBM-Prozess, aber dennoch begrenzt. Das Angebot an vorhandenen Anlagen im Markt ist noch gering und beschränkt sich hauptsächlich auf diejenigen mittlerer Bauraumgröße.

**Kosten:** Die Investitions- und Betriebskosten gestalten sich ähnlich zu LBM-Anlagen. Die Fertigungszeiten jedoch sind aufgrund des Einsatzes eines Elektronenstrahls im Vergleich zum LBM deutlich reduziert.

**Aktuelle Marktrelevanz:** Bisher befinden sich kommerziell erhältliche EBM-Systeme nur von einem Hersteller am Markt, sodass daraus eine Monopolstellung resultiert.<sup>36</sup> Dies ist ein Grund, weshalb sich EBM-Anlagen im industriellen Umfeld deutlich seltener finden als LBM-Anlagen.

**Fazit:** Die Stärken des EBM-Verfahrens liegen im Vergleich zum LBM vor allem in der höheren Produktivität und den geringeren Eigenspannungen im Werkstoff. Es besteht jedoch ein Monopol am Markt, sodass die Techno-

---

<sup>36</sup> Vgl. Kianian (2016).

logie weniger verbreitet ist. Des Weiteren ist die erzeugte Oberflächengüte geringer. Die Methode eignet vor allem zur Herstellung von Struktur- und Funktionsbauteilen aus Titan, Inconel und Cobalt-Chrombauteilen.

### 3.1.2 Directed Energy Deposition (DED)<sup>37</sup>

**Prinzip:** Energiequelle und Werkstoffzuführung finden sich üblicherweise an einem frei beweglichen Roboterarm (5-Achs-System). Der in Pulver- oder Drahtform zugeführte Werkstoff wird auf ein bestehendes Substrat aufgetragen. Als Energiezufuhr zum Aufschmelzen des zugeführten Werkstoffs dient ein Laser, ein Elektronenstrahl oder ein Plasma. Ein Schutzgasstrom verhindert Verunreinigen im Werkstoff. Das DED-Verfahren ist nicht an ein planares Schichtprinzip gebunden, somit können auch dreidimensionale Schichten aufgetragen werden (z. B. gewölbte Oberflächen). Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.

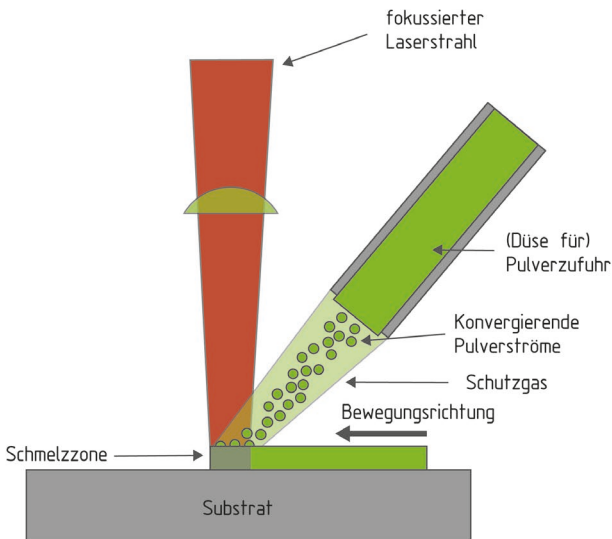


Abbildung 3: Funktionsprinzip des DED-Verfahrens am Beispiel von Pulver mit Laser

<sup>37</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: Electron Beam Additive Manufacturing, Laser Consolidation, LENS, Direct Metal Deposition, Laser engineered net shaping, directed light fabrication, 3D laser cladding, EBFF und andere.



**Verfügbare Werkstoffe:** Es können typische Schweißwerkstoffe zum Einsatz kommen, wodurch das Werkstoffportfolio sehr umfangreich ist. Beispiele verfügbarer Werkstoffe sind Titan- und Nickellegierungen, Werkzeug-, Edel- und weitere Stähle.

**Werkstoffeigenschaften:** Aufgrund ähnlicher thermischer Randbedingungen ähnelt die Mikrostruktur der von LBM-Werkstoffen. Die Porosität ist jedoch aufgrund der geringeren Kontrolle über den Pulverauftrag erhöht.

**Oberflächeneigenschaften:** Aufgrund der weniger präzise steuerbaren Auftragsrate fallen die Oberflächen im Vergleich zu anderen additiven Verfahren rauer aus. Auch die Formgenauigkeit ist geringer. Die einzelnen Schichten sind deutlich zu sehen.

**Prozesslimitationen:** Die Größe der herstellbaren Objekte ist nur durch den Arbeitsraum der 5-Achs-Einheit begrenzt. Somit lassen sich auch sehr große Bauteile herstellen. Hinterschneidungen müssen durch Stützstrukturen getragen werden. Der DED-Prozess eignet sich besonders gut, um Strukturen auf bestehende Bauteile weiter aufzubauen. Somit lassen sich hybride Fertigungsaufbau oder Reparaturarbeiten besonders gut realisieren. Da der DED-Prozess eine niedrige Aufbaugeschwindigkeit aufweist, eignet er sich für Einzelfertigung jedoch nicht für die Serienfertigung.

**Kosten:** Die Investitionskosten sind im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren gering.<sup>38</sup> Die Betriebskosten sind aufgrund des höheren Schutzgasbedarfs im Vergleich zu Pulverbettverfahren jedoch gleichsweise hoch (Schutzgas wird nicht zyklisiert).

**Aktuelle Marktrelevanz:** Die Technologie kommt angesichts ihrer Stärken beim hybriden Fertigungsaufbau von Bauteilen und Reparaturarbeiten von verschlissenen Bauteilen zum Einsatz. Bekannte Beispiele hierfür sind die Reparatur von Turbinenschaufeln.

**Fazit:** Die erzielbaren Werkstoffeigenschaften sind sehr gut, die Oberflächengüte ist aufgrund der höheren Kornverteilung jedoch geringer als im

---

<sup>38</sup> Vgl. Kianian (2016).

LBM-Verfahren. Das DED-Verfahren wird vor allem für Reparaturanwendungen verwendet und stellt ein weitverbreitetes additives Fertigungsverfahren dar. Aufgrund der niedrigen Aufbaurrate ist der Prozess für Serienfertigungen ungeeignet.

### 3.1.3 Material Extrusion<sup>39</sup>

**Prinzip:** Bei diesem Prozess wird ein verflüssigtes oder pastöses Filament durch eine beheizte Düse oder Mündung herausgedrückt (extrudiert) und schichtweise abgelegt (Abbildung 4).

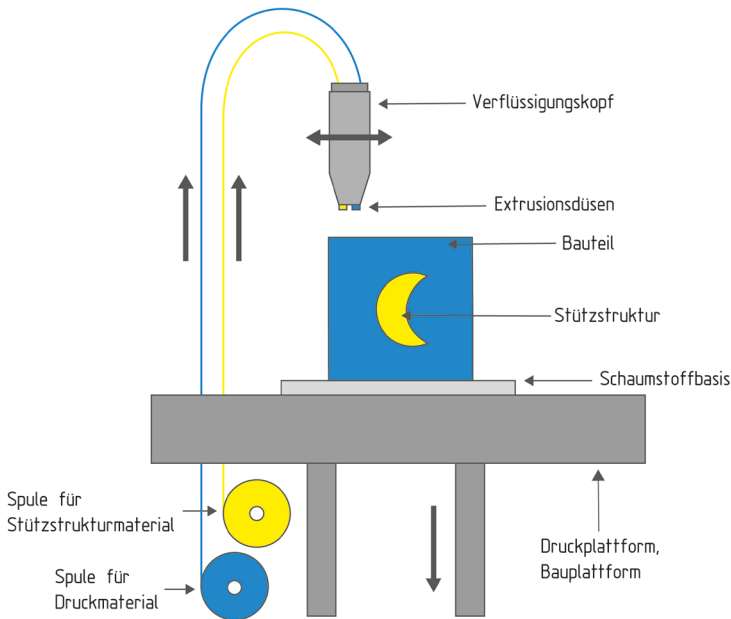


Abbildung 4: Funktionsprinzip Material Extrusion. Für metallische Werkstoffe dient das Verfahren zur Herstellung von Grünlingen

Bauplattform und Druckkopf werden vertikal zueinander bewegt. Typischerweise werden in diesem Fertigungsverfahren Polymere verarbeitet.

<sup>39</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: FDM, FFF, CEM, FLM, Freeformfabrication, DIW, EFF, G3DP, LDM und andere.

Um metallische Werkstoffe zu verarbeiten, werden feine metallische Partikel in eine Polymermatrix eingebracht. Das Filament wird als Stranggut hergestellt. Aus dem Filament wird im Material-Extrusion-Verfahren zunächst ein sogenannter Grünling hergestellt, welcher anschließend noch ausgebrannt und mit einem ausgewählten Werkstoff infiltriert und gegebenenfalls gesintert wird. Hierbei treten Schrumpfungseffekte auf, die in der Baugestaltung zu berücksichtigen sind.

**Verfügbare Werkstoffe:** Das Verfahren ist für eine Vielzahl von Werkstoffen geeignet, die sich in Pulverform herstellen und dann als Füllmaterial in ein Filament verarbeiten lassen. Theoretisch sind alle Legierungen geeignet, die sich für den Sinterprozess oder Infiltrationsprozess eignen. Durch den Infiltrationsprozess entsteht ein hybrides Werkstoffsystem.

**Werkstoffeigenschaften:** Da es sich um eine Fertigung von Grünlingen handelt, entsteht am Ende ein vergleichsweise poröser Festkörper. Wie auch bei den kunststoffbasierten Material-Extrusion-Verfahren weist der nach dem Sintern resultierende Werkstoff im Vergleich zu konventionell hergestellten Werkstoffen schwächere mechanische Kennwerte auf.

**Oberflächeneigenschaften:** Die Oberflächengüte ist für ein additives Fertigungsverfahren als gut zu bewerten. Formgenauigkeiten sind aufgrund des Einsatzes eines Filaments eher gering.

**Prozesslimitationen:** Es werden Stützstrukturen benötigt und die Gestaltungsfreiheit ist im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren gering. Die Gestaltungsfreiheit ist jedoch immer noch größer als bei konventionellen Verfahren. Das Material-Extrusion-Verfahren besitzt eine geringe Aufbaurate, was zu langen Prozesszeiten führt. Hinzu kommen zeitintensive Nachbehandlungen. Aufgrund der großen Bauräume von im Markt verfügbaren Systemen lassen sich sehr große Bauteile herstellen. Um metallische Komponenten zu fertigen, ist das derzeitige verfügbare Volumen momentan noch auf ca. 300 x 300 x 300 mm begrenzt.<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> Vgl. Kianian (2016).

**Kosten:** Der einfache Anlagenaufbau erklärt die günstigen Investitionskosten. Auch die Betriebskosten gestalten sich vergleichsweise niedrig, da wenige Hilfsmittel benötigt werden und der Abfall gering ausfällt. Jedoch handelt es sich im Vergleich zu den anderen additiven Fertigungsverfahren um eines der langsamsten Verfahren.<sup>27</sup>

**Aktuelle Marktrelevanz:** Der Ursprung von Material-Extrusion-Verfahren liegt in der Verarbeitung von Thermoplasten. Die Verarbeitung von Metallen ist eine vergleichsweise neu in den Markt eingeführte Technologie. Es finden sich dementsprechend wenige Anlagentypen. Die Relevanz für einen industriellen Einsatz ist momentan gering. Die Technologie findet derzeit im Bereich Konsument Anwendung, um einfache und individualisierte Komponenten in kleinsten Stückzahlen zu fertigen.

**Fazit:** Es handelt sich um das günstigste, aber auch langsamste Verfahren mit aktuell niedriger Marktrelevanz. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften sind zudem sehr gering, weshalb sich nur wenige industrielle Anwendungen finden.

### 3.1.4 Binder Jetting<sup>41</sup>

**Prinzip:** Wie LBM und EBM basiert das Binder Jetting auf dem Pulverbettprinzip und dem iterativen Auflegen und Verarbeiten von Pulverschichten. Das Material wird jedoch nicht aufgeschmolzen, sondern mit einem flüssigen Bindemittel zu einem Grünling verklebt (Abbildung 5). Hierzu kommen tintenstrahlähnliche Druckköpfe zum Einsatz. Dem eigentlichen Binder-Jetting-Prozess schließen sich schrumpfungsbefahete Nachbearbeitungsschritte an (Sinter- und Infiltrationsprozesse wie bei Material-Extrusion-Verfahren).

---

<sup>41</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: 3DP und andere

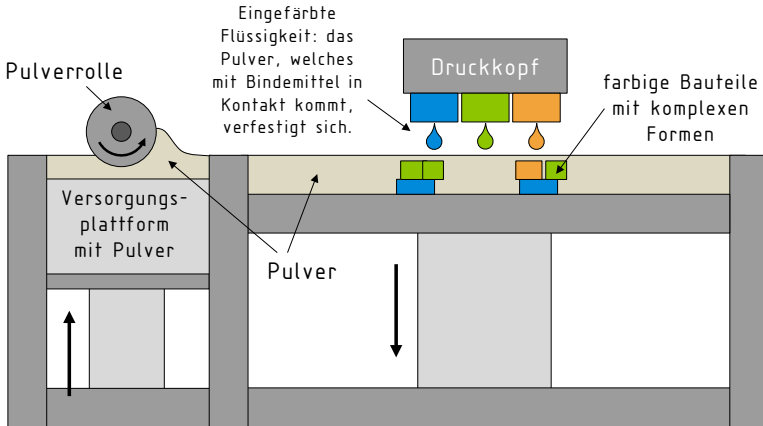


Abbildung 5: Funktionsprinzip Binder Jetting

**Verfügbare Werkstoffe:** Das Verfahren ist bezüglich der einsetzbaren Legierungen flexibel, wodurch eine umfangreiche Werkstoffpalette an Legierungen verfügbar ist. Theoretisch sind alle Legierungen geeignet, die sich für einen Sinterprozess oder Infiltrationsprozess eignen. Durch den Infiltrationsprozess entsteht ein hybrides Werkstoffsystem.

**Werkstoffeigenschaften:** Die Werkstoffeigenschaften verhalten sich ähnlich zu den im Material-Extrusion-Verfahren hergestellten Materialien. Es handelt sich um einen vergleichsweise porösen Werkstoff mit geschwächten mechanischen Kennwerten.

**Oberflächeneigenschaften:** Aufgrund des Einsatzes von tintenstrahlähnlichen Druckköpfen ist die Auflösung des Verfahrens sehr gut. Daraus ergibt sich eine hohe Oberflächengüte und sehr hohe Formgenauigkeit.

**Prozesslimitationen:** Da der Prozess keine ausschlaggebenden Eigenspannungen verursacht, werden keine Stützstrukturen benötigt. Das Verfahren besitzt im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren die höchste Gestaltungsfreiheit. Eine Anpassung der Bauteilkonstruktion auf das Fertigungsverfahren ist praktisch nicht nötig. Der zweite Vorteil des Verfahrens liegt in der hohen Fertigungseffizienz. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass wie beim Material-Extrusion-Verfahren langwierige und

aufwendige Nachbearbeitungsschritte nötig sind. Momentan finden sich Anlagensysteme mit Bauvolumen von 800 x 500 x 400 mm am Markt.<sup>42</sup>

**Kosten:** Es handelt sich um ein kostengünstiges Verfahren. Sowohl Investitionskosten wie auch Betriebskosten sind vergleichsweise gering.<sup>29</sup> Es fallen nur wenig Abfälle an.

**Aktuelle Marktrelevanz:** Der Ursprung des Binder Jetting findet sich in der Prototypenfertigung und im Formenbau. Wie auch im Falle des Material-Extrusion-Verfahrens ist die Verarbeitung von Metallen vergleichsweise neu, mit dementsprechend aktuell geringer Marktrelevanz.

**Fazit:** Es handelt sich um ein produktives Verfahren. Das Prinzip ermöglicht die höchste Gestaltungsfreiheit bei geringen Kosten. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften sind jedoch reduziert.

### 3.1.5 Sheet Lamination<sup>43</sup>

**Prinzip:** Beim metallischen Sheet Lamination werden Bleche mithilfe von Ultraschall miteinander verschweißt. Die Konturgebung der einzelnen Blechschichten erfolgt über zerspanende Methoden. Der zweistufige Bearbeitungsschritt einer Schicht ist in Abbildung 6 dargestellt.

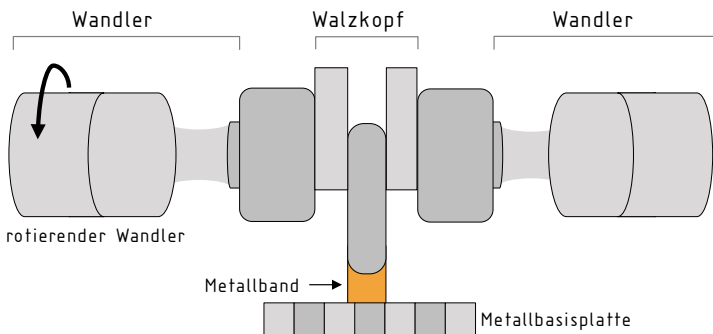


Abbildung 6: Funktionsprinzip Sheet Lamination

<sup>42</sup> Vgl. Kianian (2016).

<sup>43</sup> Synonyme/zugehörige Prozesse: Laminated object manufacturing (LOM) und andere.

**Verfügbare Werkstoffe:** Ein großer Vorteil der Technologie liegt darin, dass sich verschiedene Legierungen miteinander verschweißen lassen, um so hybride Materialverbundsysteme zu erzeugen. Gebräuchlich sind Aluminium, Kupfer, Stahl und Edelstahl. Theoretisch lassen sich aber alle schweißbaren und zerspanbaren Legierungen verarbeiten.

**Werkstoffeigenschaften** Die resultierenden Werkstoffeigenschaften sind werkstoffabhängig. Der Werkstoff ist jedoch aufgrund der Bindenähte stets geschwächt und weist eine hohe Anisotropie auf.

**Oberflächeneigenschaften:** Durch die spanende Bearbeitung sind die Oberflächengüte sowie die Formgenauigkeit für ein additives Fertigungsverfahren sehr hoch.

**Prozesslimitierungen:** Die Gestaltungsfreiheit ist relativ begrenzt. Hinterschnidungen lassen sich zwar durch Stützstrukturen stärken, die Umsetzung gestaltet sich jedoch kompliziert. Das Bauvolumen aktueller Anlagensysteme ist vergleichsweise groß (1800 x 1800 x 900 mm). Es sind keine Nachbearbeitungsschritte nötig.

**Kosten:** Während des Prozesses fällt eine große Menge nicht wiederverwertbaren Abfalls an. Das führt zu hohen Material- und Entsorgungskosten, sodass die Technologie für Serienfertigungen weniger geeignet ist.

**Aktuelle Marktrelevanz:** Aufgrund der Eignung für Spezialanwendungen findet sich keine besondere Marktrelevanz der Technologie bzw. gibt es nur wenige Maschinenhersteller am Markt.

**Fazit:** Es handelt sich um eine Nischentechnologie, deren Stärke sich in Spezialanwendungen findet (bspw. hybride Materialien, innere Strukturen oder Sensorintegration). Es werden keine Nachbearbeitungsschritte benötigt, jedoch fallen große Abfallmengen an. Die Technologie ist somit nicht für Strukturbauteile geeignet und sollte vorrangig für die genannten Spezialanwendungen genutzt werden.

### 3.1.6 Zusammenfassung

Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der vorgestellten additiven Fertigungsverfahren, basierend auf den vorangegange-

nen Erläuterungen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um eine qualitative Bewertung handelt, welche die Unterschiede der verschiedenen Methoden relativ zueinander hervorhebt.

**Tabelle 1: Zusammenfassende Bewertung der betrachteten Verfahrensgruppen**

Anforderung	PBF	DED	BJ	ME	SL
<b>mechanische Eigenschaften</b>					
relative Dichte	+	+	○	○	-
Festigkeit	+	+	○	-	-
Duktilität	○	○	+	+	○
Ermüdungseigenschaften	○	k. D.	k. D.	k. D.	k. D.
Eigenspannung	-	○	+	+	+
Anisotropie	+	+	+	○	-
<b>Kosten</b>					
Investitionskosten	-	○	○	+	○
Betriebskosten	-	-	+	+	-
Baugeschwindigkeit	○	-	+	-	○
<b>allgemeine Anwendbarkeit</b>					
Vorhandene Legierungen	+	+	○	○	○
Oberflächengüte	○	-	+	○	+
Staircase Effect	○	-	+	○	-
Formgenauigkeit	+	-	+	○	+
Designlimitierungen	○	-	+	-	-
Bauvolumen	○	+	○	○	○
<b>Marktrelevanz</b>					
Verbreitung des Verfahrens	+	○	○	○	-
Branchenrelevanz	+	○	-	-	-

*PBF: Powder Bed Fusion; DED: Directed Energy Deposition; BJ: Binder Jetting; ME: Material Extrusion; SL: Sheet Lamination*

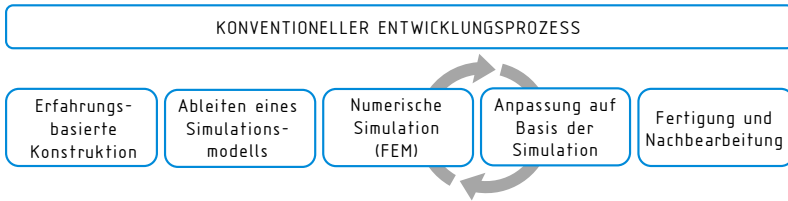
+ Gut      ○ Mittel      - Schlecht      k. D. keine Datenbasis

Grundsätzlich ist an dieser Stelle festzuhalten, dass für jeden Einsatzzweck das jeweils passende additive Fertigungsverfahren genutzt werden sollte (siehe ISO/DIS 20195), denn die Vorzüge der verschiedenen Fertigungsverfahren liegen in jeweils anderen Bereichen. Die Prozesse stehen somit nicht in Konkurrenz zueinander, sondern sind komplementär.

### 3.2 Produktentwicklungsprozesse und computergestützte Strukturoptimierung von 3D-Bauteilen

Traditionell kommt zur Auslegung und Konstruktion von Bauteilen ein **konventioneller Entwicklungsprozess** zum Einsatz (Abbildung 7).





**Abbildung 7: Konventioneller Entwicklungsprozess**

Der konventionelle Produktentwicklungsprozess beschreibt das iterative Vorgehen von Konstruktion und anschließender Berechnung des konstruierten Bauteils bis zum finalen Produkt. Dabei ist es üblich, dass Konstruktionen mehrfach verändert werden müssen, bis z. B. die Vorgaben bezüglich der Steifigkeit und Festigkeit in den Berechnungen erfüllt werden können. Die Effizienz des konventionellen Produktentwicklungsprozesses hängt somit maßgeblich von den Erfahrungen der Konstrukteure ab und lässt sich unter Nutzung konventioneller Produktentwicklungsmethoden nur schwer automatisieren. Hinzu kommt, dass ganze Generationen von Ingenieuren und Konstrukteuren während ihrer Ausbildung einen konventionellen Produktentwicklungsprozess und entsprechende Konstruktionsrichtlinien gelehrt bekommen. Dieser Prozess basiert auf den Fertigungsrestriktionen von konventionellen Fertigungsverfahren (bspw. Drehen, Fräsen, Gießen), die jedoch nicht mehr für additive Fertigungsverfahren gelten.

Um das ganze Potenzial additiver Fertigungsverfahren und der damit verbundenen Gestaltungsfreiheit auszunutzen, bedarf es somit eines dedizierten Produktentwicklungsprozesses und eines Einsatzes moderner Entwicklungsmethoden für die additive Fertigung (Abbildung 8).

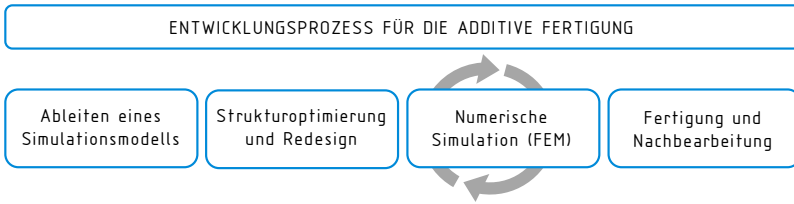


Abbildung 8: Entwicklungsprozess für die additive Fertigung

**Ableiten eines Simulationsmodells:** Im Gegensatz zum konventionellen Produktentwicklungsprozess wird im ersten Schritt ein Simulationsmodell erstellt. In diesem Modell werden die Randbedingungen wie Lagerungen und Belastungen, beispielsweise in Form von Kräften, Momenten oder auch Schwingungen, definiert. In einem nächsten Schritt wird der maximale Bauraum bestimmt sowie eine Einteilung in Design- und Nicht-Design-Bereiche vorgenommen.

**Design-Bereiche** kennzeichnen dabei Gebiete, in denen der Topologieoptimierungsalgorithmus Werkstoff ab- bzw. antragen darf, um eine optimierte Struktur zu errechnen.

**Nicht-Design-Bereiche** hingegen definieren Bereiche, in denen Material unbedingt notwendig ist, um beispielsweise an anderen Strukturen anzubinden oder um Kräfte aufzunehmen.

**Strukturoptimierung und Redesign durch Topologieoptimierung:** Nach der Definition potenzieller Belastungen und der Einteilung des Designraums werden Ziele und Beschränkungen der Optimierung definiert. Typische Ziele einer Topologieoptimierung sind beispielsweise die Reduzierung von Bauteilvolumen, die Maximierung der Bauteilsteifigkeit oder die Reduzierung von Bauteilspannungen. Da die alleinige Definition eines Optimierungsziels zu mathematisch trivialen Lösungen führen würde, müssen Einschränkungen des Lösungsraumes vorgenommen werden. Mögliche Einschränkungen sind die Begrenzung des Bauteilvolumens oder eine Begrenzung der maximalen Spannungen. Eine konkrete Optimierungsaufgabe könnte somit lauten:

- Maximiere die Bauteilsteifigkeit bei einer definierten Kraftwirkung auf das Bauteil und nutze dabei nur 40 % des festgelegten Designraums.

Der Optimierungsalgorithmus würde dann das vorgegebene Material (40 % des Ausgangsvolumens) so im Designraum verteilen, dass unter den definierten Belastungen (Krafteinwirkung) eine verbesserte Steifigkeit des Bauteils erreicht wird. Die optimierte Materialverteilung wird in einem iterativen Prozess ermittelt. Die am häufigsten eingesetzten Topologieoptimierungsalgorithmen basieren auf der Solid-Isotropic-Material-with-Penalization-Methode (SIMP).<sup>44</sup> Bei dieser gradientenbasierten Optimierungsmethode wird jedem Element eine künstliche Dichte zwischen 0 und 1 zugewiesen. Die Dichte hat einen Einfluss auf das Elastizitätsmodul und damit die Steifigkeit des Bauteils. In einem iterativen Prozess wird die Spannungsverteilung im Bauteil berechnet und die Dichte angepasst. Die Elemente in Bereichen mit niedrigen Spannungen bekommen dabei eine Dichte nahe 0 und Elemente mit hoher Spannung eine Dichte von nahe 1 zugewiesen. Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist eine Materialverteilung in Form einer Dichteverteilung des Materials, welche zur Ableitung eines CAD-Modells (Redesign) genutzt wird (detailliertere Erläuterungen zur Topologieoptimierung sind dem Anhang A zu entnehmen).

Zusammenfassend kann für diesen Schritt festgehalten werden, dass zu meist mit einer Topologieoptimierung begonnen wird, um die hohe Gestaltungsfreiheit bei der additiven Fertigung auszunutzen. Ziel dieser Optimierung ist es, einen ersten Konstruktionsvorschlag für die Topologie der Formgebung zu erhalten. Dieser dient als Grundlage für weitere Optimierungsmethoden wie der Formoptimierung. Bei der Formoptimierung wird eine bereits bestehende Topologie nur minimal verändert, bis die definierten Anforderungen an das Bauteil erfüllt werden können. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es noch weitere Strukturoptimierungsmethoden gibt, die ausführlich in Walzl et al.<sup>45</sup> beschrieben werden. Die Kombination von Topologie- und Formoptimierung findet jedoch im Produktentwicklungsprozess für die additive Fertigung am häufigsten Einsatz.

**Numerische Simulation (FEM)/automatisierte Shape Optimierung:** Das CAD-Modell des Redesigns ist Ausgangspunkt für eine erneute Simulation.

---

<sup>44</sup> Vgl. Sigmund und Maute (2013).

<sup>45</sup> Vgl. Walzl und Buchmayr (2017).

Dabei werden die anfangs definierten Belastungsszenarien verwendet, um zu überprüfen, ob das topologieoptimierte Bauteil den Belastungen standhält. Oftmals werden in diesem Schritt auch automatisierte Formoptimierungen angeschlossen. Dabei bleibt die Topologie des Bauteils bestehen und es werden kleinere Änderungen in Radien oder Anpassungen von Bauteildicken durchgeführt, um beispielsweise Spannungen innerhalb des Bauteils zu reduzieren.

**Fertigung und Nachbearbeitung:** Je nach gewähltem additiven Prozess bedarf es unterschiedlicher Vorbereitungsarbeiten für den Druck. Beim LBM-Verfahren werden z. B. Stützstrukturen benötigt, welche das zu fertigende Bauteil mit der Bauplattform verbinden. Des Weiteren spielt die Orientierung im Bauraum eine wichtige Rolle, um das Bauteil effizient zu fertigen (Kapitel 4.3.1). Um die Bauteilqualität zu verbessern, gibt es die Möglichkeit, den Bauprozess zu simulieren. Dadurch können kritische Bauteilbereiche identifiziert und beispielsweise Deformationen im Bauteil durch zusätzliche Stützstrukturen oder eine Anpassung der Bauteilorientierung verringert werden. Anbieter solcher Simulationssoftware sind u. a. Materialise, Additive Works oder Ansys.

Es ist festzuhalten, dass die Automatisierungsmöglichkeiten des beschriebenen Produktentwicklungsprozesses für die additive Fertigung bei Weitem noch nicht ausgeschöpft sind. Komplexere Topologieoptimierungsergebnisse zu interpretieren und damit korrekt zu deuten erfordert bis heute des Zutuns eines erfahrenen Konstrukteurs. Allerdings werden die Topologieoptimierungsalgorithmen beständig weiterentwickelt, sodass Konstrukteure zukünftig weniger eingreifen müssen.

## 4 FESTLEGUNG VON TECHNOLOGIEN, FUNKTIONELLER EINHEIT UND SACHBILANZ

### 4.1 Festlegung eines Anwendungsfalls für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren in KMU

Der erste Schritt für die ökologische und ökonomische Bewertung für die zu vergleichenden additiven und konventionellen Fertigungsverfahren ist die Festlegung eines Szenarios für einen realistischen Anwendungsfall. Zum Zweck dieser Studie wird die Fertigung strukturoptimierter Fahrzeugbauteile in mittelgroßer Serie als Anwendungsfall definiert. Dieses Szenario stützt sich auf die Annahme, dass sich bisher in mittelgroßen Serien verwendete, konventionelle Fertigungsverfahren in Zukunft 1:1 durch die AM-Technologie ersetzen lassen. Gleichzeitig können damit die Möglichkeiten zur Strukturoptimierung voll ausgeschöpft werden. Diese Studie hat also zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung einen prospektiven Charakter. Das heißt, das hier betrachtete Anwendungsszenario ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht im industriellen Maßstab realisiert, sondern skizziert eine als mittelfristig realistisch einzuschätzende Situation.

#### **Definition des Anwendungsfalls für AM in KMU**

Der für diese Studie festgelegte Anwendungsfall beinhaltet die

#### **„Fertigung strukturoptimierter Fahrzeugbauteile in Losgrößen von 10.000 Stück pro Jahr.“**

Das konkrete Anwendungsbeispiel betrifft die Herstellung von strukturoptimierten Dämpfergabeln in Leichtbauweise für die Nutzung in Fahrzeugen (Kapitel 4.2).

Dabei sind für den Vergleich mit der bisher verwendeten Fertigungsverfahren folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die Modalitäten der Design- und Auftragslogistik (z. B. Lohnfertigung) bleiben unberücksichtigt. Es wird angenommen, dass die numerische Strukturoptimierung unabhängig vom handelnden Akteur einen in jedem Fall erforderlichen Teil des Konstruktions- und Entwicklungsvorgangs darstellt.

- Möglichkeiten zur Realisierung nachträglicher Gestaltungsmodifikation für die Verbesserung der Aufwärtskompatibilität zur technischen Umgebung bleiben unberücksichtigt.
- Der Betrachtungsrahmen des hier diskutierten Anwendungsszenarios beschränkt sich auf die Gegebenheiten eines KMU.

Die Festlegung auf den vorgestellten Anwendungsfall gründet auf den folgenden Überlegungen:

Für Unternehmen in der verarbeitenden Industrie ist es wichtig, die Vorteile der additiven Fertigungsverfahren für ihre jeweiligen Bedürfnisse nutzbar zu machen. Sie stellen für Unternehmen ein enormes Potenzial dar, um auch zukünftig Produkte mit dem Anspruch höchster Qualität und Effizienz zu realisieren. Allerdings steht die Integration von AM in die rollende Produktion gerade in der mittelständischen Industrie noch am Anfang. Einerseits kann das AM bislang aus technischen und ökonomischen Gründen noch nicht mit der konventionellen Großserienproduktion Schritt halten. Andererseits lassen sich etablierte Produktionsprozesse nicht ohne weiteres durch neue Technologien wie AM ersetzen. Ein Vergleich konventioneller und additiver Produktionstechnologien ist deshalb nur für solche Anwendungsfälle sinnvoll, bei denen beide Technologievarianten zumindest theoretisch eine äquivalente Funktion<sup>46</sup> erfüllen können.

Beispiele für bereits industriell genutzte Anwendungen des AM sind im Folgenden genannt:

- Generierung von Prototypen aus Computermodellen für die Nutzung im Produktentwicklungsprozess (Rapid Prototyping),
- Herstellung von Spezialwerkzeugen, Vorrichtungen, Gussformlingen und maßgeschneiderten Produktionshilfsmitteln (Rapid Tooling),
- Fertigung von Unikaten oder Einzelanfertigungen auf Basis digitaler Computermodelle (Rapid Manufacturing),

---

<sup>46</sup> Hinsichtlich Losgröße, Wirtschaftlichkeit und realisierbaren Produkteigenschaften

- Kleinstserienfertigung von Werkstücken mit Option zur individuellen Modifikation (Customisierung),
- Herstellung von Ersatzteilen auf Abruf (On-Demand-Fertigung).

AM ermöglicht eine weitgehende Strukturoptimierung in der Bauteilgestaltung. Komplexe Bauteile werden am Computer mit Hilfe numerischer Algorithmen strukturoptimiert designt und computergesteuert gefertigt. Somit kann durch die Fertigung mittels additiver Fertigungsverfahren der volle Leichtbau- bzw. das volle Funktionsintegrationspotenzial ausgeschöpft werden. Dies wäre mit konventionellen Fertigungsverfahren aufgrund prozesstechnischer Limitationen nicht in vergleichbarem Grad machbar. Zwar lassen sich die oben genannten Anwendungen bei niedriger Komplexität der Bauteiletopologie auch mit konventionellen Fertigungsverfahren bewerkstelligen, allerdings ist die Erzeugung optimierter und vor allem bionischer Bauteilstrukturen fast ausschließlich mittels AM möglich.

Zudem benötigen konventionelle Verfahren anders als AM eine höhere Produktionsvorlaufzeit (production lead time) und erzeugen verhältnismäßig hohe Fixkosten für den Werkzeug- und Formenbau (z. B. Gussformen). In einem schnelllebigen Marktumfeld kann eine verkürzte Produktionsvorlaufzeit einen Kostenvorteil bewirken, etwa bei Eilaufträgen oder schwer vorhersehbaren Nachfragespitzen. Die kürzere Produktionsvorlaufzeit durch AM bewirkt auch bei neuen Produktlinien einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil durch zeitnahe Markteinführung.

Bislang kommen additive Fertigungsverfahren jedoch eher für eine Kleinstserienproduktion infrage, während sich konventionelle Verfahren wie Gießen, Schmieden oder Fräsen vor allem für die Großserienfertigung eignen. Auch wenn strukturoptimierte und additiv gefertigte Strukturen sich noch nicht analog zur konventionellen Großserienfertigung realisieren lassen, so ist es dennoch für Unternehmen von hohem Interesse, die Potenziale der AM-Technologie zu verstehen und zu adaptieren.

Ausgehend von diesen Überlegungen, fokussiert diese Studie exemplarisch einen Anwendungsfall in der Automobilbranche. Dieser Industriezweig zeichnet sich durch den ständigen Bedarf an produktionstechnischen Innovationen in einem stark wettbewerblich geprägten Markt aus. Bereits jetzt

sind in der Fahrzeugindustrie verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für den 3D-Druck von Interesse. Dazu zählen u. a.

- Fertigung von Fahrzeugbauteilen mit strukturoptimierter Leichtbauweise in mittelgroßen Serien als Beitrag zur Erreichung von CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen von Motorfahrzeugen,
- bedarfsweise Ersatzteilerfertigung auf Abruf als Ersatz für die langfristige Vorratslagerung von Ersatzteilen,
- Fertigung von Spezialbauteilen für kundenspezifische Nutzfahrzeuge in mittleren Stückzahlen (insbesondere bei Leasingverträgen) und
- Spezialanfertigung von Unikaten für das gehobene Preissegment in der Automobilbranche.

Ob und wie lange die momentan geltenden Limitationen der AM im Bereich der Groß- und Mittelserienfertigung bestehen bleiben, wird sich in den kommenden Jahren zeigen. Gegenwärtige Innovationen wie die Vergrößerung des Bauraums und die Reduktion der Fertigungszeit lassen vermuten, dass AM-Technologien mittelfristig für die Serienfertigung interessant werden. Daher liegt dieser Studie der oben erläuterte Anwendungsfall einer Fertigung strukturoptimierter Fahrzeugbauteile in mittelgroßer Serie zugrunde. Mit Blick auf die zuvor diskutierten Unterschiede der Fertigungsverfahren soll das Vergleichsszenario einen relevanten Anwendungsfall für den industriellen Einsatz konventioneller und additiver Technologien verkörpern. Für das gewählte Szenario gelten die folgenden Prämissen:

- Relevanz für industrielle Anwendung auch außerhalb hoch spezialisierter Marktnischen,
- Aussicht auf ökonomische Vorteile für KMU: Es wird angenommen, dass Unternehmen besonderes an ihrer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit mittels AM interessiert sind
- Kompatibilität mit den sonstigen Fertigungsprozessen in KMU und deren Marktumfeld (insbesondere Qualitätsanforderungen, Prüf- und Testprozeduren, Zulassungen und Zertifikate),



- Kompatibilität zu regulatorischen Rahmenbedingungen und Standards,
- Erfüllbare technische Parameter für den Einsatz der AM zum vorgesehenen Einsatzzweck,

Die ökonomische und ökologische Bewertung bezieht sich dabei ausschließlich auf die im Szenario definierte gemeinsame Schnittmenge zwischen beiden Fertigungsverfahren. Eine universelle Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse für konventionelle und additive Technologien ist nicht das Ziel dieser Studie.

## 4.2 Festlegung des Referenzbauteils für die Bewertung

### 4.2.1 Charakteristika und technische Randbedingungen für die additive Fertigung des Referenzbauteils

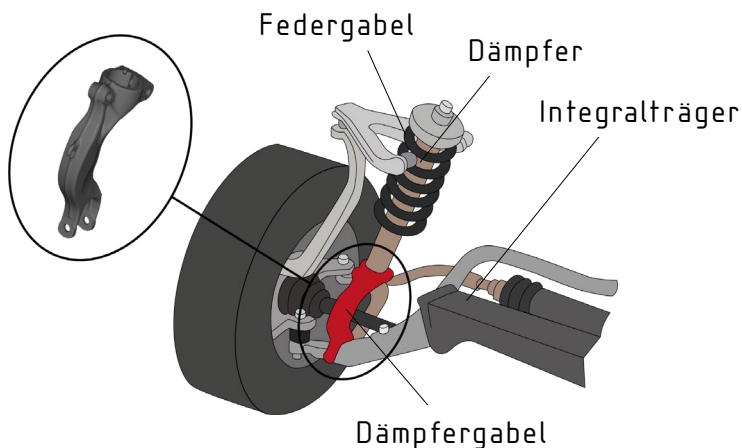
Als Vergleichsgrundlage liegt dieser Studie ein konkret vorhandenes Bauteil zugrunde, welches von einem Automobilzulieferer zur Verfügung gestellt wurde. Abbildung 9 zeigt diese Dämpfergabel eines Pkw, bestehend aus einer gesenkgeschmiedeten Aluminium-Gusslegierung. Die konventionell hergestellte Dämpfergabel besitzt ein Gewicht von 1,3 kg.



**Abbildung 9: Konventionell hergestellte Dämpfergabel**

Die Dämpfergabel überträgt Kräfte von einem Feder-Dämpfer-System auf einen Integralträger des Fahrwerks und ist damit ein zentrales Strukturbauteil eines Automobils. Aufgrund der Charakteristik eines Feder-Dämpfer-Systems müssen die verwendeten Bauteile während ihrer Le-

bensdauer eine Vielzahl an Lastwechseln aushalten. Abbildung 10 skizziert die Dämpfergabel in der eingebauten Position im Fahrzeug.



**Abbildung 10: Schematische Abbildung der Einbauposition der Dämpfergabel in einem Fahrzeug**

Bei der Konstruktion der Dämpfergabel ist zu gewährleisten, dass hohe Belastungen wie das Überfahren von Bordsteinen oder anderen Hindernissen bei höheren Geschwindigkeiten nicht zu einem abrupten Versagen des Gesamtsystems führen. Deshalb definieren Automobilhersteller genaue Anforderungen an verbaute Komponenten. Im Falle der Dämpfergabel definierte der Hersteller einen kritischen Lastfall. Abbildung 11 zeigt in vereinfachter Form die Krafteinleitung und Lagerung der Dämpfergabel.

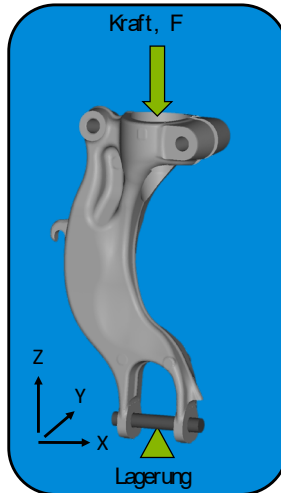


Abbildung 11: Definiertes Belastungsszenario der Dämpfergabel

Das dargestellte Belastungsszenario stellt die Basis für die Randbedingungen des Simulationsmodells dar. Die Kraft wirkt senkrecht von oben auf die Dämpfergabel ein und wird durch diese an die untere Achse weitergeleitet. Die Achse dient dabei als Lagerungspunkt. In dem dargestellten vereinfachten Modell sind alle drei Freiheitsgrade in die jeweiligen Raumrichtungen blockiert.

#### 4.2.2 Strukturoptimierung des additiv zu fertigenden Referenzbauteils

Für das Referenzbauteil wird als Werkstoff ein Aluminiumpulver (Lieferant APWorks) der Legierung **Scalmalloy<sup>®</sup> AlMg4.5Sc0.7Zr0.3** mit folgenden Materialeigenschaften vorgesehen:

- Zugfestigkeit: 520 MPa
- E-Modul: 70 GPa
- Dichte: 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Querkontraktionszahl: 0,33

Zusätzlich wird die **Aluminiumlegierung AlSi10Mg** als potenzieller Werkstoff in die Betrachtungen aufgenommen. Zwar ist die maximale Zugfestigkeit mit 370 MPa geringer als bei Scalmalloy<sup>®</sup>, doch liegen die Beschaffungskosten für das AlSi10Mg-Metallpulver (siehe Kapitel 5.3) deutlich unter denen für Scalmalloy<sup>®</sup>.

Die Wahl der Aluminiumpulver ist durch zwei Faktoren bestimmt. Einerseits handelt es sich bei dem betrachteten Referenzbauteil um eine Leichtbaustruktur und andererseits kann das im Prozess nicht aufgeschmolzene Metallpulver wiederverwertet werden. Hierzu werden die Werkstücke aus dem Pulverbett entfernt und das Restpulver gesiebt, um Verunreinigungen, Agglomerationen oder Schweißperlen zu entfernen.

Für die Topologieoptimierung der vorliegenden Dämpfergabel wird die Software OptiStruct von der Firma Altair eingesetzt und die folgenden Schritte durchlaufen. Die Angaben der Arbeitszeit beziehen sich auf die Durchführung der Topologieoptimierung der in dieser Studie beschriebenen Dämpfergabel.

**Aufbau des Finite Elemente (FE)-Modells/Simulationsmodells:** Um die Topologie eines Bauteils zu optimieren, wird, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, ein maximaler Designraum festgelegt und ein FE-Netz erstellt. Für das Erstellen des FE-Netzes werden Tetra-Elemente benutzt. Je nach Komplexität des vorgegebenen Design- bzw. Nicht-Designraums kann es notwendig sein, das verwendete CAD-Modell vorher zu vereinfachen. Fasen, Abrundungen und Ähnliches werden dabei entfernt, um das Vernetzen des Körpers zu vereinfachen. Im Falle der Optimierung der Dämpfergabel ergab sich durch Rücksprache mit dem Hersteller die Geometrie des konventionellen Designs als maximaler Designraum. Zusätzlich wird festgelegt, welche Bereiche der Bauteilgeometrie nicht veränderbar sind, weil sie beispielsweise Kontaktflächen zu anderen Baugruppen darstellen. Abbildung 12 zeigt die beschriebene Unterteilung in Designraum und Nicht-Designraum.

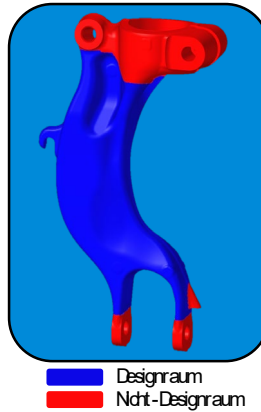


Abbildung 12: Optimierungsmodell der Dämpfergabel mit Einteilung in Design- und Nicht-Designbereiche

Folgend wird ein Belastungsszenario festgelegt. Dabei werden die in Abbildung 11 beschriebenen Kräfte und Lagerungen als Basis für das Simulationsmodell verwendet (Arbeitsaufwand 7 Stunden).

**Definition des Optimierungsziels:** Um die Steifigkeit der Dämpfergabel zu maximieren wird als Optimierungsziel die Minimierung der Verformungsenergie (strain energy oder compliance) gewählt. Die Verformungsenergie ist dabei ein globales Maß der Deformationen im Bauteil (Arbeitsaufwand 2 Stunden).

**Durchführung der Topologieoptimierung:** Nach dem Randbedingungen definiert und die Optimierungsziele formuliert sind, erfolgt die Topologieoptimierung. Je nach Komplexität des Optimierungsmodells kann die Berechnungszeit stark variieren. Haupteinflussfaktoren sind dabei die Art und Anzahl der definierten Lastfälle sowie die Anzahl der verwendeten Elemente. Die Topologieoptimierung für die Dämpfergabel hat mit einem Desktop-Rechner (Windows 8.1 (x64), Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40GHz; 32 GB RAM) und 1,4 Mill. Tetra-Elementen für das vernetzte Bauteil 55 Minuten gedauert.

**Interpretation der Topologieoptimierungsergebnisse:** Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist eine Materialverteilung mit einer zugeordneten künstlichen Dichte von 0 bis 1 für jedes Element (Abbildung 13). Element-

dichten nahe 1 (rot) kennzeichnen Bereiche, in denen Material benötigt wird. Grün eingefärbte Elemente stellen Bereiche mittlerer Dichte (0,5) dar und türkisfarbene Elemente repräsentieren Segmente niedrigerer Dichte, in denen kaum Material benötigt wird.

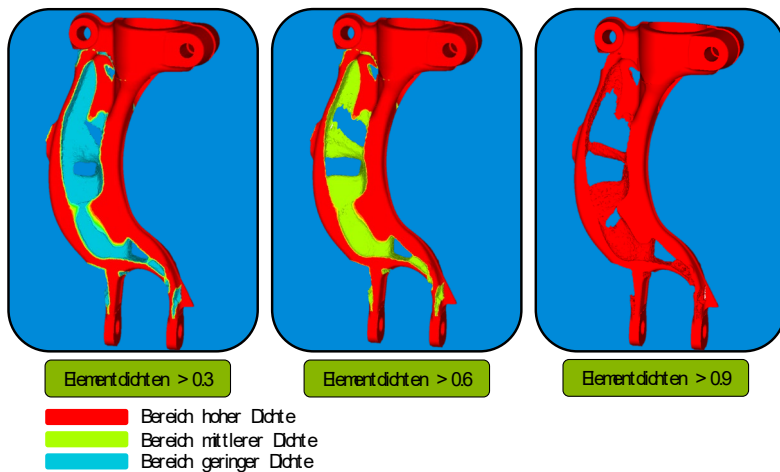


Abbildung 13: Materialverteilung in unterschiedlichen Ebenen als Ergebnis der Topologieoptimierung der Dämpfergabel

Typischerweise bedürfen Ergebnisse einer Topologieoptimierung durch das Auftreten größerer Bereiche einer mittleren Dichte einer Interpretation. Damit wird eine stetige und glatte Oberflächenstruktur einer Komponente gewährleistet. Zwar gibt es in den meisten Topologieoptimierungsprogrammen Möglichkeiten, die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Interpretationsfähigkeit zu verbessern, etwa durch Fertigungsrestriktionen oder auch Filter. Doch gerade bei komplexeren Optimierungsmodellen stoßen diese Methoden derzeit noch an ihre Grenzen.

Für einen optimalen Überblick über die Topologieoptimierungsergebnisse ist es ratsam, verschiedene Bereiche der Dichteverteilungen zu betrachten und in primäre und sekundäre Lastpfade zu unterteilen. Abbildung 13 zeigt die verschiedenen Bereiche der Topologieoptimierungsergebnisse der Dämpfergabel. Links sind alle Elemente mit einer künstlichen Dichte von mehr als 0,3 angezeigt und in der Mitte alle Elemente mit mehr als 0,6. Die Bereiche mit einer größeren Dichte als 0,6, aber mit einer geringeren Dichte-

te als 0,9 werden als sekundäre Lastpfade bezeichnet. Rechts in der Abbildung sind Elemente mit einer Dichte größer gleich 0,9 dargestellt. Hierbei handelt es sich um primäre Lastpfade. Diese Differenzierung ermöglicht und vereinfacht eine konstruktive Interpretation der Strukturen durch einen Ingenieur, kann aber auch für eine spätere Automatisierung dieses Prozesses als Designrichtlinie dienen. Dichtebereiche mit einer Dichte zwischen 0,3 und 0,6 stehen als Design-Bereiche für die anschließende Formoptimierung zur Verfügung.

**Erstellung des Redesigns:** Auf Grundlage der Lastpfaddifferenzierung wird das sogenannte Redesign erstellt. Hierbei werden die Topologieergebnisse in Form von ISO-Surface-Modellen als STL-Datei der Dichtegrenzen (0,6 und 0,9) in eine entsprechende CAD-Software importiert und dort auskonstruiert. Abbildung 14 zeigt das Redesign der Dämpfergabel, welches in CATIA V5 erstellt wurde. CATIA V5 bietet mit den Modulen des ‚Generative Shape Design‘ und ‚Imagine and Shape‘ eine Reihe von Möglichkeiten, Freiformkörper zu realisieren.

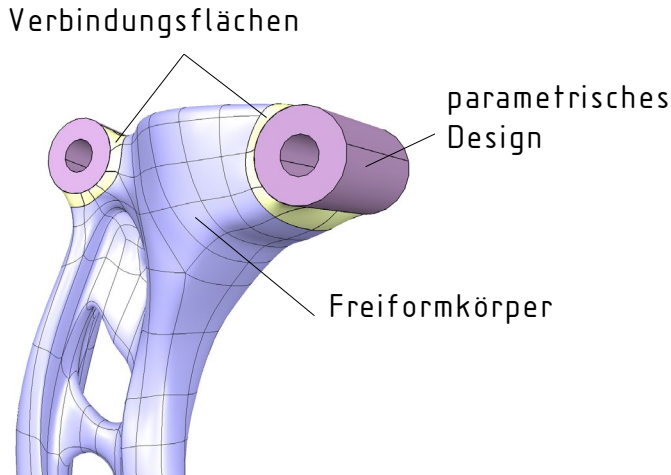


Abbildung 14: Redesign der Dämpfergabel mit Anwendung des Konzepts der hybriden Übergangsbereiche von Hoschke et al.<sup>47</sup>

<sup>47</sup> Vgl. Hoschke et al. (2018).

Bei dem Redesign der Dämpfergabel ist das von Hoschke et al.<sup>36</sup> beschriebene Konzept der hybriden Übergangsbereiche angewandt worden. Dabei wird das Topologieoptimierungsergebnis mithilfe von Freiformkörpern nachmodelliert. Verbindungsbereiche zu anderen Bauteilen werden parametrisch konstruiert. Freiformkörper und parametrische Elemente werden durch Verbindungsflächen verknüpft. Durch dieses hybride CAD-Konzept kann das Beste aus beiden Konstruktionswelten zusammengeführt werden. Zum einen ist es durch den Einsatz des parametrischen Designs möglich, Aufmaßflächen bei Interfacestrukturen genauestens zu definieren und für die Nachbearbeitung (beispielsweise Fräsen von Funktionsflächen) effektiv und genau anzupassen. Zum anderen bietet der Einsatz der Freiformmodellierung die Möglichkeit, das Topologieoptimierungsergebnis in seiner geometrischen Komplexität abzubilden und gegebenenfalls nach einer Formoptimierung effektiv anzupassen.

#### **Ergebnis der Strukturoptimierung:**

- Gewicht der konventionell gefertigten Dämpfergabel: **1,3 kg**
- Gewicht der strukturoptimierten Dämpfergabel mit Scalmalloy<sup>®</sup>: **1,14 kg**  
→ entspricht einer Massensparnis von 12 %
- Gewicht der strukturoptimierten Dämpfergabel mit AlSi10Mg: **1,23 kg**  
→ entspricht einer Massensparnis von 5 %

### 4.3 Auswahl der additiven und konventionellen Fertigungsverfahren

#### 4.3.1 Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens

Um den möglichen Mehrwert durch die Nutzung additiver Fertigungsverfahren zu verdeutlichen, gilt es, eine für den Anwendungsfall (Kapitel 4.1 und 4.2) geeignete AM-Technologie auszuwählen. Bei dem betrachteten Referenzbauteil (Kapitel 4.2) handelt es sich um ein Strukturbauteil für die Anwendung in Automobilen. Dieser Anwendungszweck erfordert die Herstellung hoher Stückzahlen zu vertretbaren Preisen. Dies gilt gleichermaßen für das konventionelle sowie additive Fertigungsverfahren. Da es sich um eine Fallstudie handeln soll, ist des Weiteren die aktuelle Relevanz der



Technologie in der Branche ausschlaggebend. Die Auswahl soll somit auf folgenden Prioritäten basieren:

- (1) gute mechanische Werkstoffeigenschaften,
- (2) eine hohe Marktrelevanz und
- (3) eine hohe Fertigungsrate.

Die folgende Verfahrensauswahl basiert auf der in ISO DIS 20195 vorgestellten Methode. Hierbei wird zunächst das **AM-Potenzial eines Bauteils (1)** identifiziert. Gefolgt von der **Auswahl des AM-Prozesses (2)** und einer anschließenden **Überprüfung der Kosten (3)**, welche eine iterative Designoptimierung unter Berücksichtigung der Vorteile der additiven Fertigungsverfahren vorsieht.

#### Identifizierung des AM-Potenzials des Bauteils (1)

Das AM-Potenzial des Referenzbauteils findet sich in erster Linie im Bereich der Strukturoptimierung und somit im Leichtbau (Kapitel 4.2). Da es sich um eine Komponente aus der Automobilindustrie handelt, könnte auch die reine Ersatzteilmontage von Vorteil sein. Weiteres Potenzial könnte in einer Integralbauweise und Funktionsintegration liegen. Denkbar wäre beispielsweise die Integration von redundanten Gittersystemen und somit von Fail-Safe-Mechanismen.

#### Auswahl des AM-Prozesses (2)

Die ISO DIS 20195 schlägt eine Bewertung auf Basis einer Bewertungstabelle vor. Die folgende Bewertung basiert auf Tabelle 1 (Kapitel 3.1.6).

*Sheet Lamination*-Verfahren sind aufgrund der hohen Anisotropie und relativ schwachen Werkstoffkennwerte für Strukturbauteile ungeeignet. Hinzu kommen eine für das strukturoptimierungstypische bionische Design ungünstige Gestaltungsfreiheit sowie eine niedrige Marktrelevanz.

*Material Extrusion*-Verfahren erzeugen für Strukturbauteile ungünstige, reduzierte mechanische Kennwerte und zeichnen sich zudem durch eine sehr niedrige Baugeschwindigkeit aus.

*Binder Jetting*-Technologien weisen zwar eine hohe Gestaltungsfreiheit und Baugeschwindigkeit auf, basieren jedoch wie Material-Extrusion-Verfahren auf der Fertigung von Grünlingen, welche in Sinterprozessen gebrannt werden müssen. Hieraus resultiert eine mechanische Schwächung des Werkstoffs.

Verfahren der Gruppe *Directed Energy Deposition* werden üblicherweise nicht für komplette Strukturkomponenten eingesetzt, da die schlechte Oberflächengüte für solche Bauteile eine aufwendige Nachbearbeitung erfordert. Die Werkstoffeigenschaften sind zwar gut, die Aufbaurrate ist jedoch nicht ausreichend.

*Powder Bed Fusion*-Prozesse eignen sich am besten aufgrund der zu konventionell gefertigten Materialien ähnlichen Werkstoffeigenschaften<sup>48</sup>, der annehmbaren Aufbaurrate/Produktivität und der damit einhergehenden hohen Marktrelevanz. Das Verfahren wird typischerweise für Strukturkomponenten eingesetzt. Da es sich bei dem Referenzbauteil um eine Leichtbaukomponente handelt, sollten Aluminium oder Titanlegierungen mit hohen spezifischen Kennwerten zum Einsatz kommen. Das Referenzbauteil gibt die Verwendung einer Aluminiumlegierung bereits vor. EBM spielt seine Stärken bei Legierungen mit starken Eigenspannungen aus (beispielsweise Ti6Al4V), ist jedoch bei Materialien mit einem niedrigen Schmelzpunkt wie Aluminium tendenziell weniger geeignet, da sich der hohe Energieeintrag schwer kontrollieren lässt. Somit ist das LBM-Verfahren besser geeignet. Für Titankomponenten wäre EBM vorteilhafter. Die Wahl fällt somit auf das LBM-Verfahren.

Die Charakteristika des angewandten LBM-Verfahrens zur Herstellung des vorgestellten, strukturoptimierten Referenzbauteils gestalten sich dabei folgendermaßen:

---

<sup>48</sup> Vgl. VDI 3405 Blatt 2.1 (2015).

### (a) Eingesetzte Anlage zur Herstellung des Referenzbauteils

Für die Untersuchung kommt eine moderne, auf Produktivität und Kleinserien ausgelegte Anlage zum Einsatz (EOS M 400, Abbildung 15, links). Dies zeigt sich vor allem in den großen Schichtstärken ( $90\ \mu\text{m}$ ), der Doppelweg- und somit beschleunigten Beschichtung, dem großen Bauraum ( $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ ) sowie der hohen Laserleistung ( $1\ \text{kW}$ ), welche schnellere Belichtungen und dickere Schichten ermöglicht. Da das Pulver aufgrund seiner Feinkörnigkeit in einer sauerstoffreichen Atmosphäre leicht entzündlich ist und somit ein Sicherheitsrisiko darstellt, findet der Prozess unter einer Schutzgasatmosphäre statt. Des Weiteren wird ein Schutzgasstrom über die Bauplattform geleitet, um bei der Belichtung entstehende Schweißnebenprodukte abzutragen (Abbildung 15, rechts). Die Bauplattform wird auf  $45\ ^\circ\text{C}$  erwärmt, um die thermischen Bedingungen während des Prozesses annähernd konstant zu halten.



Abbildung 15: Links: Für die Fertigung genutzte EOS M 400/Rechts: M400-Prozesskammer mit zentraler Bauplattform, Beschichtungssystem und Inertgas-Schutzfilm (Stromrichtung: Von rechts nach links)

Da für viele Werkstoffe eine Stickstoffatmosphäre genügt, ist die Anlage mit druckluftbasierten Stickstoffgeneratoren ausgestattet. Die meisten Maschinen werden allerdings über externe Quellen mit Stickstoff oder Argon versorgt. Zur Auf- und Abrüstung sowie zur Pulveraufbereitung und Stützstrukturentfernung kommt noch eine Reihe von Peripheriegeräten (z. B. Nassabscheider, Siebeinheit und Bandsäge) mit geringem Ressourcenbedarf zum Einsatz. Des Weiteren wird der Laser der Anlage über eine externe Kühleinheit gekühlt.

### (b) Bauteil-Positionierung und -Orientierung

Die Orientierung des Werkstücks ist aufgrund fertigungstechnischer Beschränkungen ausschlaggebend für die Herstellbarkeit wie auch für die Qualität.<sup>49,50</sup> Auch wenn es aus ökonomischer Sicht günstig wäre, ein Werkstück mit möglichst geringer Projektionsfläche auf der Bauplattform zu positionieren, um so möglichst viele Werkstücke in einem Fertigungsdurchgang herzustellen, ist dies aus technischen Gründen nicht immer umsetzbar. Für die folgenden Untersuchungen wurde das Werkstück stets in einer für die Fertigung und Qualität günstigen Orientierung positioniert.

### (c) Stützstrukturerzeugung

Bei der Stützstruktur handelt es sich um filigrane Elemente, die aus demselben Werkstoff wie das Werkstück bestehen. Um Bauzeit und Pulver einzusparen, kommen strukturoptimierte Geometrien zum Einsatz. Für die folgenden Untersuchungen wurde eine Standard-Stützstruktur vom Typ »Block« genutzt (Abbildung 16).



Abbildung 16: Stützstruktur zur Fixierung des Bauteils. Links: Digitales CAM-Modelle Vorbereitung. Rechts: Gefertigtes Bauteil mit Stützstrukturen

<sup>49</sup> Vgl. Gebhardt (2013).

<sup>50</sup> Vgl. Kianian (2016).

Die Standard-Stützstruktur „Block“ besteht aus rasterförmig angeordneten Wänden, welche durch einzelne Laserbahnen erstellt werden. Die Wände sind für eine schnellere Fertigung, Pulverentfernbarkeit und Werkstoffeffizienz perforiert. Feine Zähne am Übergang zum Werkstück ermöglichen eine einfache Stützstrukturentfernung sowie eine saubere Oberfläche.

#### (d) Fertigungsparameter

Die numerische Erzeugung der Schichtinformationen erfolgt durch Berechnung von Polygonen, welche die Querschnittskontur parallel zur Bauplattform in regelmäßigen Abständen darstellen. Anschließend folgt die Zuweisung von Belichtungsparametern. Um die Fertigungszeit der Stützstruktur gering zu halten, erfolgt die Belichtung üblicherweise schnell und bei hoher Leistung. Die Belichtung eines reellen Werkstücks ist hingegen mit Unterteilung des Objekts in verschiedene Sektoren weitaus komplexer (Abbildung 17). Der Kern (Inskin) wurde mit einer Streifenbelichtungsstrategie für hohe Dichten und gesteigerten mechanischen Kennwerten gefertigt. Hierbei wird das Volumen über ondulierende<sup>51</sup> Laserbahnen in Form von Streifen erzeugt. Um eine Überlagerung von Schweißstellen und somit eine Schwachstelleneinbringung zu vermeiden, rotieren die Streifen von Schicht zu Schicht.

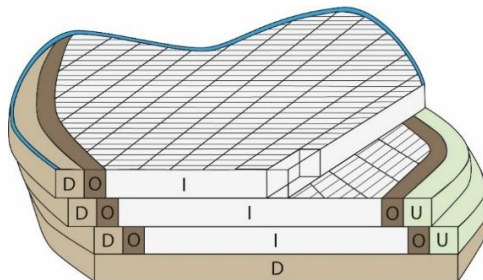


Abbildung 17: Schichtabhängiges LBM-Belichtungsprinzip anhand einer gängigen Belichtungsstrategie (von Schicht zu Schicht rotierende Streifen) mit Konturbelichtung (blau), Kernbelichtung I (Inskin, weiß) und anderen Belichtungssektoren (D: Downskin, U: Upskin, O: Overlap)

<sup>51</sup> Wellenförmige Anordnung der Laserbahnen.

Die Belichtung der Werkstückkontur erfolgt meist über eine einzelne Laserbahn mit erhöhtem Energieeintrag, um so die Oberflächengüte zu verbessern. Oberflächennahe Bereiche benötigen vor allem für flache Winkel angepasste Belichtungsparameter, da sich hierbei andere thermische Randbedingungen ergeben. Darum werden diese Sektoren (Up- und Downskin) separat belichtet. Das gesamtheitliche Belichtungsprinzip ist in Abbildung 17 dargestellt. Aufgrund der komplexen Anordnung der Laserbahnen und zugeordneten Belichtungsparameter sind Zeit- und Energiebedarf für die Fertigung eines Werkstücks nicht nur maschinen- und werkstoffabhängig, sondern auch abhängig von der Werkstückgeometrie und deren Orientierung im Bauraum.

### (e) Pulver

Für die Untersuchung wurde, wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, ein Aluminiumpulver (Lieferant APWorks) der Legierung Scalmalloy<sup>®</sup> AlMg4.5Sc0.7Zr0.3 herangezogen. Neben der Leichtbaustruktur des Referenzbauteils spielte dabei die hohe Recyclingfähigkeit von Aluminium eine wesentliche Rolle.

Die Produktion von Primäraluminium ist mit einem hohen Energieaufwand und der Verwendung von toxischen Nebenaggregaten verbunden. Primäres Aluminium hat eine Energiebilanz (GER-Wert, *Gross Energy Requirement*) von 270 MJ/kg.<sup>52</sup> Im Gegensatz dazu steht das Recycling von Aluminium, welches sich durch eine bessere Energieeffizienz auszeichnet. So besitzt Sekundäraluminium einen GER-Wert von nur 16 MJ/kg.<sup>53,54</sup> Dies liegt in der hohen Recyclingrate von Aluminium begründet, da es nahezu im geschlossenen Kreislauf gefahren werden kann (Möglichkeit des Recyclings ohne Qualitätseinbußen).<sup>55</sup> Für das Recycling werden keine mit Aluminium reaktionsfreudige Chemikalien benötigt. Dadurch bauen sich keine Fremdatome in das Kristallgitter ein und es kommt zur keiner lokalen Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften. Alumi-

---

<sup>52</sup> Vgl. Frees (2008).

<sup>53</sup> Vgl. Leroy (2008).

<sup>54</sup> Vgl. Norgate (2001).

<sup>55</sup> Vgl. Jacob (2014).

um wird somit während des Recyclings nicht chemisch überführt. Es werden bis zu 95 % der Energie bei Erzeugung von Sekundäraluminium im Vergleich zu Primäraluminium eingespart.

#### (f) Nachbehandlung

Ein notwendiger Schritt in der Nachbearbeitung ist das Lösen der gedruckten Werkstücke von der Bauplattform sowie das Entfernen der Stützstrukturen. Zuvor kann die gesamte Bauplattform einer Wärmebehandlung (vier Stunden bei 325 °C) unterzogen werden, um Eigenspannungen abzubauen, bevor die Stützstrukturen von Hand gelöst werden.

Je nach Einsatz, Fertigungsparameter und Werkstoff kann eine zusätzliche Nachbearbeitung des Werkstücks erforderlich sein. Schnittstellen werden teilweise spanend nachbearbeitet. Per Sandstrahl kann eine glattere, glänzende Oberfläche erzeugt werden. Der mikro-maschinelle Bearbeitungsprozess (micro-machining process) kann zusätzlich bei metallischen Bauteilen genutzt werden. Dieser kombiniert eine chemische Reaktion auf der Materialoberfläche mit einen Lösungsprozess durch einen konstanten Fluidfluss. So kann eine spiegelnde Oberfläche erzeugt werden<sup>56</sup>.

#### Überprüfung der Kosten (3)

Eine Überprüfung der Kosten ist mangels Datenlage für die einzelnen Fertigungsverfahren momentan nicht möglich.

#### 4.3.2 Auswahl des konventionellen Fertigungsverfahrens

Die gewählte konventionelle Fertigung der Dämpfergabel lehnt sich an den tatsächlich durchgeführten industriellen Herstellungsprozess des Herstellers der Dämpfergabel an und unterteilt sich in vier unterschiedliche Teilprozesse.

- (1) **Gießen:** Für das Gießen werden zunächst Negativformen hergestellt, welche dann mit der Schmelze befüllt werden. Nach dem Abkühlprozess wird das Werkstück dem nächsten Prozessschritt übergeben.

---

<sup>56</sup> Vgl. Kianian (2016).

- (2) **Gesenkschmieden:** Für den Schmiedeprozess werden ebenfalls Umformwerkzeuge hergestellt. Bei entsprechender Temperatur wird das gegossene Werkstück dann umgeformt.
- (3) **Entgraten und Wärmebehandlung:** Um die Grate am Werkstück zu entfernen, werden Methoden wie Schleifen oder Bürsten eingesetzt.
- (4) **Fräsen:** Abschließend wird das Werkstück durch Fräsen in die finale Form gebracht. Damit ist die Dämpfergabel fertig für den Einsatz.

In der Produktion wird hierbei eine Aluminium-Gusslegierung verwendet.

## 4.4 Festlegung der funktionellen Einheit und der Systemgrenze

### 4.4.1 Festlegung der funktionellen Einheit

Ein Vergleich der Umweltbelastungen sowie der ökonomischen Kosten zweier Produktionssysteme (konventionelle und additive Fertigung) und der damit hergestellten Produkte erfordert die Festlegung einer einheitlichen Bezugsgröße. In der Ökobilanzierung wird diese Vergleichsbasis als „funktionelle Einheit“ bezeichnet. Der genormte Begriff beschreibt einen quantifizierten Nutzen, der für die zu vergleichenden Produktsysteme möglichst äquivalente Eigenschaften aufweisen sollte.<sup>57</sup> Für den Zweck der Vergleichbarkeit unterschiedlich hergestellter Bauteile betrachtet diese Studie funktional äquivalente Referenzbauteile. Als Referenzbauteile werden Dämpfergabeln für Pkw gewählt (Abbildung 9). Diese Dämpfergabeln leisten in ihrer Nutzungsphase die gleiche Funktion, können sich aber je nach Fertigungsverfahren in ihren Eigenschaften (Werkstoff, Geometrie, Gewicht) unterscheiden. Demzufolge repräsentiert die funktionelle Einheit den kleinsten gemeinsamen Nenner der Funktion der hier betrachteten Referenzbauteile.

Auf Basis von Kapitel 4.2 und unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1 skizzierten Annahmen für den Anwendungsfall wurde die funktionelle

---

<sup>57</sup> Vgl. DIN EN ISO 14044:2006 (2006), S. 11.



Einheit wie folgt definiert. Diese gilt sowohl für die ökologische als auch die ökonomische Bewertung:

### **Definition der funktionellen Einheit**

**„Eine Dämpfergabel für Pkw, ausgelegt für eine Standzeit über die angenommene Gesamtfahrleistung des Fahrzeugs von 150.000 km.“**

Die narrative Beschreibung der Funktion enthält die folgenden Elemente:

- Einsatzzweck: Aufhängung der Schwingungsdämpfung an einem Rad.
- Das Bauteil ist so dimensioniert, dass es während der durchschnittlichen Fahrzeuglebensdauer im Normalbetrieb reparaturfrei betrieben werden kann.

Vereinfachungen: Zur Reduktion der Komplexität dieser Studie bleibt hinsichtlich der Funktion unberücksichtigt, dass:

- ein Kfz normalerweise mehrere Dämpfergabeln mit verschiedenen Geometrien (links/rechts) enthält. Es wird nur eine Geometrie betrachtet.
- Automobilkomponenten branchentypischen Meta-Anforderungen an die Funktion unterliegen (z. B. Bautypenzulassungen, Zertifikate für Sicherheitstests etc.). Die dafür nötigen Prozeduren werden vernachlässigt.

Die hier betrachtete Strukturoptimierung dient dem Zweck der Analyse und muss deshalb nicht in jedweder Hinsicht die Erfordernisse im Automobilsektor repräsentieren.

Für die in dieser Studie analysierten konventionell sowie additiv gefertigten Referenzbauteile gilt der zu erbringende Nutzen, also die funktionelle Einheit, unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen (die Zeitdauer der Nutzung). Die Funktion des Referenzbauteils (Dämpfergabel) leitet sich dabei aus dem Einsatzzweck in der Nutzungsphase ab und enthält keine Aussagen zu den verwendeten Materialien, den Modalitäten der Herstellung und der Lieferketten. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Fertigungsverfahren und der Referenzbauteile resultieren demnach in unterschiedlichen Stoff- und Energieströmen sowie Kosten. Diese Aspekte fließen in die Aufstellung der Sachbilanz (Kapitel 4.6) ein und werden dann

mittels Vergleichsrechnung mit der funktionellen Einheit in Bezug gesetzt. Nur auf Basis dieser funktionell einheitlichen Bezugsgröße lassen sich die unterschiedlichen Herstellungstechnologien während deren gesamten Lebenszyklus sinnvoll vergleichen. Die Charakterisierung der für die Erfüllung der Funktion notwendigen technischen Voraussetzungen sowie die Zuordnung der dafür benötigten Material- und Energiemengen (die sogenannten Referenzflüsse) erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln 4.5 und 4.6.

Zusätzlich sei erwähnt, dass der Vergleichszeitraum von einem Jahr für die Fertigungsanlagen gewählt wurde und eine in der Ökobilanz analysierte Periode zum Zweck des Vergleiches unterschiedlicher Technologien mit verschiedenen Lebensdauern beschreibt. Der tatsächliche Einsatzzeitraum der Fertigungsanlagen im KMU umfasst eine längere Zeitdauer. Eine eventuelle parallele Nutzung der Fertigungsanlagen für andere Produktlinien wird mittels Allokation berücksichtigt: Bei der konventionellen Fertigung wird nur der Anteil der Anlagen ökonomisch und ökologisch betrachtet, der für die Fertigung des Bauteils notwendig ist. In der additiven Fertigung wird nur ein Jahr des Anlagenbetriebs betrachtet. Die übrigen neun Jahre der Lebensdauer steht der Drucker anderen Produktionen zur Verfügung, weshalb diese nicht betrachtet werden. In dem betrachteten Zeitraum von einem Jahr wird nicht von einem Stillstand der Anlagen ausgegangen, d. h., die Anlagen stehen nicht für andere Produktionen zur Verfügung.

#### 4.4.2 Festlegung der Systemgrenze

Die Systemgrenze bezeichnet den Betrachtungsrahmen der vergleichenden Bewertung. Bei lebenszyklusorientierten Bewertungen wie in dieser Studie (Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung) umfasst die Systemgrenze den gesamten Lebensweg der betrachteten Bauteile (Abbildung 18): die Rohstoffgewinnung, die eigentlichen Fertigungsprozesse, die Transporte, die Nutzungsphase und die Entsorgung der Bauteile. Dazu gehören auch die unmittelbaren Vorketten der verwendeten Hilfsstoffe und Energieträger. Die Ökobilanz bezieht alle relevanten Stoff- und Energieströme aus der Umwelt und in die Umwelt (Emissionen) mit ein, soweit sie mit dem in der funktionellen Einheit definierten Betrachtungsgegenstand in Zusammenhang stehen. Die ökonomische Bewertung bilanziert die monetären Kosten

des Betrachtungsgegenstands sowie den ökonomischen Nutzen (z. B. Einsparpotenziale).

Im hier betrachteten Fall wird die Systemgrenze für den Anwendungsfall „Fertigung strukturoptimierter Fahrzeugbauteile in Losgrößen von 10.000 Stück pro Jahr“ so definiert, dass die wesentlichen Herstellungsprozesse und die Nutzungsphase der Leichtbauteile im Fokus der Bewertung liegen. Außerdem wird die Rohstoffgewinnung mit einbezogen, weil die Material- und Energieeinsparungen durch Leichtbauweise vor allem hier zur Geltung kommen (dies gilt besonders für die Werkstoffeinsparung im Produktionsprozess sowie für die mögliche Einsparung von Treibstoffen in der Nutzungsphase).

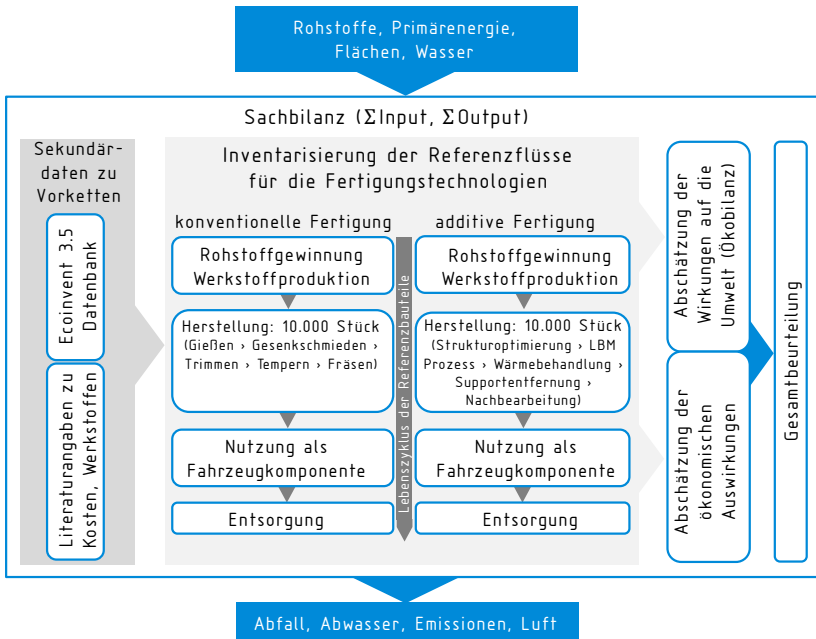


Abbildung 18: Systemgrenze der Studie

In dieser Studie wird eine orientierende Ökobilanz eingesetzt, die nicht alle, typischerweise in LCA-Studien betrachteten Wirkungskategorien be-

rücksichtigt. Insbesondere werden die mit den Umweltauswirkungen korrespondierenden Kennwerte „kumulierter Energieaufwand“ (KEA)<sup>58</sup>, „kumulierter Rohstoffaufwand“ (KRA)<sup>59</sup>, Versorgungskritikalität sowie Flächenbedarf und Wasserverbrauch ermittelt. Diese inputbasierten Indikatoren gründen ebenfalls auf dem Lebenszyklusansatz und erlauben eine ökologische Bewertung von Produkten anhand ihrer technisch erfassbaren Einflussgrößen. Recyclinggutschriften werden nicht berücksichtigt, da die zugrunde liegende methodische Grundlage für die Ökobilanzierung gemäß VDI-Richtlinien VDI 4600:2012 und VDI 4800, Blatt 1<sup>60</sup> keine Gutschriften für Ressourceneinspareffekte durch Recycling vorsieht. Stattdessen werden marktübliche Anteile an rezyklierten Materialien für die in der Bauteilfertigung verwendeten Werkstoffe (v. a. Metalle) berücksichtigt. Dadurch wird eine richtungssichere Aussage über die Ressourceneffizienz ermöglicht, welche für die Zielgruppe der KMU als besonders relevant erachtet wird. Zusätzlich wird als wesentliche Kategorie für Umweltauswirkungen das Treibhausgaspotenzial ermittelt.

Die Analyse der Lebenszykluskosten berücksichtigt die gleiche Systemgrenze. Dabei werden die folgenden Kostenarten berücksichtigt: die Investitionskosten (anteilig), die Material- und Energiekosten, die Betriebs- und Personalkosten sowie die Entsorgungskosten.

Eine Monetarisierung der Wettbewerbsvorteile durch Verkürzung der Produktionsvorlaufzeit erfolgt nicht, da dieser Aspekt von sehr einzelfallabhängigen Faktoren bestimmt wird, die sich kaum verallgemeinern lassen. Ebenfalls werden die Kosten des konventionellen Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesses vernachlässigt.

---

<sup>58</sup> Vgl. VDI 4600:2012-01.

<sup>59</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

<sup>60</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 15.

## 4.5 Datenerhebung für die additive Fertigung des strukturoptimierten Bauteils

### 4.5.1 Experimentell ermittelter Ressourcenbedarf

Aufgrund der Komplexität des Fertigungsprinzips sind eine Vielzahl von Energie- und Massenströmen bei der additiven Fertigung zu berücksichtigen. Die Sub-Prozesse einer LBM-basierten Bauteilherstellung und deren In- und Outputströme finden sich in Abbildung 19.

Im Zuge dieser Arbeit wird lediglich der LBM-Prozess vermessen. Verbrauchsmaterialien wie Reinigungsmittel, persönliche Schutzausrüstung oder Kleinwerkzeuge wurden vernachlässigt. Es ist zu erwähnen, dass eine Vielzahl von additiven Anlagensystemen eine externe Inertgaszufuhr benötigt. Dies ist für die verwendete Anlage nicht der Fall. Im vorliegenden Fall wird Stickstoff als Inertgas verwendet, welches mithilfe von in der Anlage verbauten Stickstoffgeneratoren gewonnen wird. Dies verursacht einen deutlich höheren Druckluftbedarf als bei anderen Anlagentypen (teilweise druckluftfrei). Der Strombedarf wurde für die gesamte Anlage gemessen. Eine direkte Unterteilung des Strombedarfs für die Lasereinheit, für die Heizung oder Sonstiges liegt nicht vor.

Die Prozesskette wurde sowohl für den Werkstoff Scalmalloy<sup>®</sup> als auch für AlSi10Mg betrachtet. Die Werte für Scalmalloy<sup>®</sup> sind direkt im Versuch ermittelt und die Werte bezüglich AlSi10Mg teilweise aus vorangegangenen Studien generiert worden. Da der Werkstoffbedarf bei LBM-Verfahren jedoch bauteilabhängig ist, kann es hierbei zu geringfügigen Ungenauigkeiten kommen.

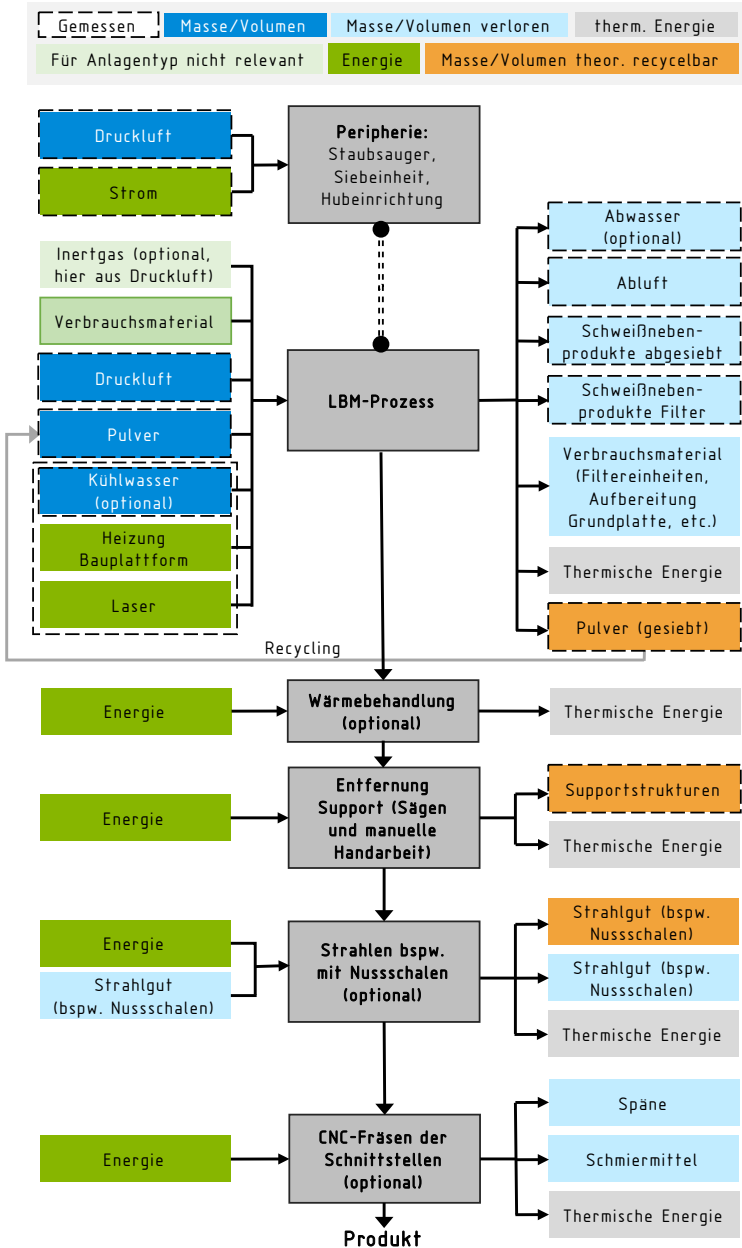


Abbildung 19: Teilschritte einer LBM-basierten Bauteilfertigung und deren Energie- und Massenströme

Zur Auf- und Abrüstung der LBM-Anlage werden Peripherieeinheiten wie ein Staubsauger/Nassabscheider, ein Pulverfördermodul, eine Siebeinheit sowie eine Hubeinrichtung (bspw. Kran oder Flurförderfahrzeug) benötigt. Zum Betrieb der Einheiten kommen Druckluft und Strom zum Einsatz. Der Verbrauch der Peripherie wurde über zwölf Durchläufe gemittelt. Folgende Arbeitsschritte sind in den Messdaten „Vorbereitung“ enthalten (Tabelle 2): Maschine kalibrieren, Beschichterklingen einrichten, Schutzglas reinigen, auflegen erster Pulverschicht, Maschine mit Inertgas fluten, Bauplattform aufheizen, Pulverbett abkühlen, reinigen der Prozesskammer, Pulver ab-saugen, sieben und rückfüllen sowie der Austausch der Bauplattform.

**Tabelle 2: Ermittelter Material- und Energiebedarf des LBM-Prozesses**

Losgröße:	Einzelteil	Charge (gesamt)		Charge (pro Teil)	
Werkstoff:	Scalmalloy <sup>®</sup>	AlSi10Mg	Scalmalloy <sup>®</sup>	AlSi10Mg	Scalmalloy <sup>®</sup>
<b>Vorbereitung</b>					
Anzahl Bauteile	1	18	18	1	1
Strom	6,51 kWh	12,26 kWh	6,51 kWh	0,68 kWh	0,36 kWh
Maschinenzeit	4,85 h	7,00 h	4,85 h	0,39 h	0,27 h
Arbeitszeit	4,60 h	4,60 h	4,60 h	0,26 h	0,26 h
Druckluft	24,90 m <sup>3</sup>	29,09 m <sup>3</sup>	24,90 m <sup>3</sup>	1,62 m <sup>3</sup>	1,38 m <sup>3</sup>
Arbeitszeit Stützstruktur	0,12 h	1,80 h	2,16 h	0,10 h	0,12 h
<b>Fertigung</b>					
Strom Fertigung	105,40 kWh	711,02 kWh	890,94 kWh	39,50 kWh	49,50
Schichtanteil	59,19 kWh	45,99 kWh	59,19 kWh	2,56 kWh	3,29 kWh
Belichtungsanteil	46,21 kWh	665,03 kWh	831,75 kWh	36,95 kWh	46,21 kWh
Bauzeit	22,15 h	118,70 h	166,95 h	6,59 h	9,27 h
Beschichtungsdauer	13,63 h	9,09 h	13,63 h	0,50 h	0,76 h
Belichtungsdauer	8,52 h	109,61 h	153,32 h	6,09 h	8,52 h
Druckluft	617,99 m <sup>3</sup>	3311,73 m <sup>3</sup>	4657,87 m <sup>3</sup>	183,99 m <sup>3</sup>	258,77 m <sup>3</sup>
Stützstrukturmasse	0,03 kg	0,35 kg	0,43 kg	0,02 kg	0,02 kg
Pulververlust	0,15 kg	1,72 kg	1,59 kg	0,10 kg	0,09 kg
<b>Gesamt</b>					
Maschinenzeit	27,00 h	133,94 h	171,80 h	7,44 h	9,54 h
Arbeitszeit	4,72 h	6,40 h	6,76 h	0,36 h	0,38 h
Energiebedarf	11,91 kWh	723,29 kWh	897,45 kWh	40,18 kWh	49,86 kWh
Pulverbedarf	1,28 kg	23,95 kg	21,89 kg	1,33 kg	1,22 kg
Pulverkosten	457,73 €	838,11 €	7815,62 €	46,56 €	434,20 €
Druckluftbedarf	642,89 m <sup>3</sup>	3379,08 m <sup>3</sup>	4682,77 m <sup>3</sup>	187,73 m <sup>3</sup>	260,15 m <sup>3</sup>
Kühlwasserbedarf	0,06 m <sup>3</sup>	19,66 m <sup>3</sup>	27,35 m <sup>3</sup>	1,09 m <sup>3</sup>	1,52 m <sup>3</sup>

*Grau: Messwerte; Gelb: Theoretisch ermittelte Werte (digital berechnet oder aus Voruntersuchungen für ähnliche Komponente); Weiß: Berechnete Werte (aus theoretischen Werten oder Messwerten).*

Der Strombedarf und Volumenstrom wurden dabei mit folgenden Sensoren/Methoden erfasst:

- Strom:
  - 16-Ampere-Versorgung: Voltcraft Logger 4000
  - 32-Ampere-Versorgung: TIP 43201
  - Festanschluss (LBM-Anlage): Eltako DSZ15D-3x80A
- Druckluft: Festo SFAB-1000U-WQ10-2SV-M12
- Pulvermasse: Kern DS 36K0.2
- Kühlwasser: Volumetrische Stichprobenentnahme

Um den Werkstoffbedarf für das vorliegende Referenzbauteil (Dämpfergabel) zu bestimmen, wurde dieses in einem einzigen Durchlauf als einzelnes Exemplar gefertigt und die Fertigungsdauer, der Strombedarf sowie der Pulverbedarf ermittelt (graue Felder in Tabelle 2). Der Pulverbedarf wurde anhand einer Massebilanz berechnet. Hierzu wurde die Masse der Bauplattform vor Prozessstart und nach Prozessstart (Bauplattform mit Bauteil und Stützstruktur), die Masse des Partikel auffangbehälters der Filtereinheit vor und nach Prozessende sowie die im Sieb verbleibende Masse bestimmt. Hieraus ergibt sich der Pulververlust in Tabelle 2. 92 % des Pulververlusts finden sich in der Siebeinheit und wären theoretisch recycelbar, während sich 8 % in der Filtereinheit befinden und somit als Sondermüll behandelt werden müssen. Kühlwasser- und Druckluftbedarf wurden in mehr als 17 Stichprobenmessungen während des Betriebs bestimmt und für den totalen Bedarf mit der Fertigungsdauer multipliziert:

- Kühlwasser: 0,00273 m<sup>3</sup>/h ( $\sigma = 0,00018$ )
- Druckluft: 0,465 m<sup>3</sup>/h ( $\sigma = 0,002$ )

Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass sich aus der Fertigung einer einzelnen Komponente auf die Fertigung einer maximalen Fertigungscharge schließen lässt.<sup>61</sup> Hierzu ist es nötig, den Leistungsbedarf der Anlage im

---

<sup>61</sup> Vgl. Norgate (2001).



stationären Zustand zu ermitteln, also den Strombedarf zum Erhalt des Betriebszustands (Heizung, Inertgasgeneratoren, Steuerungstechnik etc.) ohne Einsatz des Lasers. Hierzu wurde der Betriebszustand der Anlage für 24 Stunden gehalten und der Leistungsbedarf gemittelt (Ergebnis siehe Tabelle 3 „Leistung stationär“). Der erhöhte Bedarf für AlSi10Mg ergibt sich aus der Beheizung der Bauplattform auf 160 °C statt 45 °C. Weitere allgemeine Kennzahlen, Maschinenparameter und Komponenten finden sich in Bezug auf den verwendeten Werkstoff in Tabelle 3.

**Tabelle 3: Allgemeine Kennwerte bezüglich Referenzbauteil, Maschinenparameter und Maschinenkennwerte**

	Scalmalloy <sup>®</sup>	AlSi10Mg	Einheit
Abmaße	73 x 144 x 284	73 x 144 x 284	mm <sup>3</sup>
Bauhöhe	286,44	286,47	mm
Schichtdicke	60	90	µm
Bauteil- & Stützstrukturvolumen	425,72	457,28	cm <sup>3</sup>
Charge	18	18	Teile
Pulverpreis (Brutto)	357	35	€/kg
Leistung stationär	4,34	5,06	kW
Energiedichte	0,021	0,012	kWh/cm <sup>3</sup>

*Grau: Messwerte. Gelb: Theoretisch ermittelte Werte (digital berechnet oder aus Voruntersuchungen für ähnliche Komponente). Weiß: Berechnete Werte (aus theoretischen Werten oder Messwerten).*

Berücksichtigt man die nötige Zeit zum Aufbringen einer Schicht, die Anzahl der Schichten und die stationäre Leistung, so lässt sich der Gesamtbedarf zum Aufbringen der Schichten ermitteln. Die benötigte Zeit zum Aufbringen einer Schicht wurde mithilfe von dreißig Messungen ermittelt (10,28 Sekunden). Voruntersuchungen zeigen, dass die Multiplikation der Chargengröße mit dem verbleibenden Belichtungsanteil (Gesamtanteil minus Beschichtungsanteil) auf den Gesamtbedarf einer maximalen Charge schließen lässt.

Der Pulververlust lässt sich jedoch nicht direkt skalieren, da Schweißnebenprodukte bei einem mit Bauteilen maximal gefüllten Bauraum auf benachbarten Teilen landen und wieder aufgeschmolzen werden, statt im Pulverbett zu verbleiben. Darum wurde aus einem vergleichbaren Fertigungssetup ein Faktor von 57 % abgeleitet, um den Pulververlust der Chargefertigung zu prognostizieren.

Mithilfe des Bauteilvolumens und des Strombedarfs der Bauteilbelichtung lässt sich eine benötigte Energiedichte ableiten (Tabelle 3). Dieser Wert ist

vor allem fertigungsparameterabhängig, aber auch abhängig von der hergestellten Komponente und deren Orientierung im Bauraum. Der Wert für AlSi10Mg ist aus Voruntersuchungen für ein vergleichbares Bauteil bekannt. Die Bauzeit für dieses Bauteil aus AlSi10Mg wurde anhand der Laserbahnen und den zugeordneten Belichtungsgeschwindigkeiten ermittelt. In Kombination mit der Energiedichte lässt sich so auf den Strombedarf schließen.

Ein weiterer Einflussfaktor sind Wartungsarbeiten. Grundsätzlich sind LBM-Anlagen weitgehend imstande, ohne personelle Betreuung zu arbeiten, sodass ein ununterbrochener Betrieb denkbar ist. Jedoch ist es von Zeit zu Zeit nötig, Wartungsarbeiten an der Anlage durchzuführen. Diese in den Ergebnissen berücksichtigten Wartungsarbeiten finden sich in Tabelle 4.

**Tabelle 4: Materialaufwand für Wartungsarbeiten**

Arbeitsschritt	Intervall	Kosten Material (Brutto)	Kosten Entsorgung (Brutto)	Arbeitszeit	Zeit Maschinenstillstand
	h	h	€	H	h
Filterwechsel	2500	534	149	4	4
Wechsel Partikel auffangbehälter	150	23	30	0,17	0,2
Filterreinigung (automatisiert)	48	n/a	n/a	n/a	0,1
Jährliche Wartung	n/a	n/a	n/a	3	72

Abschließend zu diesem Kapitel lässt sich noch anmerken, dass der hohe Strombedarf der Anlage im stationären Zustand schwer nachzuvollziehen ist. Eine Änderung der Bauplattformheizung von 45 °C auf 160 °C bewirkt eine Differenz von ca. 0,7 kWh. Ca. 0,3 kWh entfallen auf die Stickstoffgeneratoren. Somit verblieben ca. 4 kWh für die Beheizung der Bauplattform auf 45 °C und Sonstiges wie Rechner, Sensorik, Steuerung und Laser (nur betriebsbereit; keine emittierte Leistung). Den korrekten Einbau der Sensoreinheit vom Typ „Eltako DSZ15D-3x80A“ kontrollierten zwei staatlich geprüfte Elektriker. Auch ließen sich die Messungen an zwei unterschiedlichen Standorten mit jeweils verschiedenen Sensoreinheiten des gleichen Typs reproduzieren. Laut Ausstellbedingungen des Herstellers ist ein Anschluss von 20 kW nötig. Die Messung kann somit trotz des hohen, nicht nachvollziehbaren Bedarfs als korrekt angenommen werden. Es scheint, dass die Anlage zum momentanen Entwicklungszeitpunkt noch ineffizient aufgebaut ist. Dies zeigt sich auch bei der Bauzeit (22,15 h), der stationären Leistung der Anlage (4,34 kW) sowie beim gemessenen Gesamtstrombedarf für die Fertigung (105,4 kWh). Für den Erhalt des stationären Zu-

stands der Anlage werden also ca. 96,13 kWh benötigt. Somit bleiben für die Belichtung des Bauteils, also für das Aufschmelzen des Metallpulvers, gerade einmal 8,8 % (9,27 kWh) des gesamten Strombedarfs.

Ähnliches gilt für die Kühleinheit. Diese arbeitet momentan mit dem technisch vorgegebenen Minimum an Kühlwasser (gemessener Verbrauch ca. 0,00273 m<sup>3</sup>/h). Die Aufstellbedingungen geben sogar einen Verbrauch von 20 m<sup>3</sup>/h an. Das Wasser wird lediglich um ca. 7 °C erwärmt. Es ist zu vermuten, dass der Kühler überdimensioniert ist und deutlich mehr Leistung abführen könnte. Des Weiteren wäre ein geschlossener Kreislauf für das Kühlwasser möglich. Es ist somit festzuhalten, dass es sich bei den für die Berechnungen zugrunde liegenden Messwerten um den nach Stand der Technik tatsächlich vorliegenden Bedarf handelt, dieser aber technologisch nicht nötig wäre.

#### 4.5.2 Material- und Energiebedarf für ein optimiertes Anlagensetup

Es zeigt sich, dass der Material- und Energiebedarf einer LBM-Anlage von einer Vielzahl an Faktoren abhängt. Bei der vorliegenden Anlage handelt es sich um ein flexibles Setup, welches zur Fertigung verschiedener Bauteile herangezogen werden kann. Für die Betrachtung eines auf Produktivität eines einzelnen Bauteils optimierten Setups für eine Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5.4) sind somit einige Annahmen nötig. Folgende Annahmen wurden zur Betrachtung für ein optimiertes Anlagensetup getroffen:

- Schichtdicke wird für Scalmalloy<sup>®</sup> von 60 µm auf 90 µm erhöht ,
- Größter kommerziell erhältlicher Bauraum (800 x 400 x 500 mm) verdoppelt Chargengröße von 18 auf 36 Teile,
- Einsatz einer 4-Laser-Anlage reduziert Belichtungsdauer um Faktor vier,
- Kühlerwassermenge erhöht sich aufgrund der vier Laser um Faktor vier,
- Zusätzliche Arbeitszeit für größeren Bauraum und Zusatzlaser nötig (hier zwei Stunden),

- Reduktion der vorhandenen Totzeiten beim Beschichten, sodass Beschichtung auf sieben Sekunden pro Schicht reduziert wird,
- Automatisierte Entnahme und Zuführung einer Bauplattform und Pulver in die Prozesskammer ermöglicht einen 24-h-Betrieb. Die nötige manuelle Arbeit (Stützstruktur entfernen, Pulver entfernen und Aufbereiten etc.) kann jederzeit nachgeholt werden (kein Schichtbetrieb nötig).

Der aus diesen Annahmen resultierende Material- und Energiebedarf für ein optimiertes Setup findet sich in Tabelle 5.

**Tabelle 5: Ermittelter Material- und Energiebedarf des LBM-Prozesses für optimiertes Anlagensetup**

Losgröße:	Charge (gesamt)		Charge (pro Teil)	
Werkstoff:	AlSi10Mg	Scalmalloy <sup>®</sup>	AlSi10Mg	Scalmalloy <sup>®</sup>
<b>Vorbereitung</b>				
Anzahl Bauteile	36	36	1	1
Strom	12,26 kWh	6,51 kWh	0,34 kWh	0,18 kWh
Maschinenzeit	1,00 h	0,85 h	0,03 h	0,02 h
Arbeitszeit	6,60 h	6,60 h	0,18 h	0,18 h
Druckluft	29,09 m <sup>3</sup>	24,90 m <sup>3</sup>	0,81 m <sup>3</sup>	0,69 m <sup>3</sup>
Arbeitszeit Stützstruktur	3,6 h	4,32 h	0,10 h	0,12 h
<b>Fertigung</b>				
Strom Fertigung	530,25 kWh	697,62 kWh	14,73 kWh	19,38
Schichtanteil	45,99 kWh	39,46 kWh	13,45 kWh	1,10 kWh
Belichtungsanteil	484,26 kWh	658,16 kWh	36,95 kWh	18,28 kWh
Bauzeit	60,99 h	82,85 h	1,69 h	2,30 h
Beschichtungsdauer	6,19 h	6,19 h	0,17 h	0,17 h
Belichtungsdauer	54,81 h	76,66 h	1,25 h	2,13 h
Druckluft	1701,75 m <sup>3</sup>	2311,42 m <sup>3</sup>	183,99 m <sup>3</sup>	258,77 m <sup>3</sup>
Stützstrukturmasse	0,70 kg	0,85 kg	0,02 kg	0,02 kg
Pulververlust	3,44 kg	3,17 kg	0,10 kg	0,09 kg
<b>Gesamt</b>				
Maschinenzeit	61,99 h	83,70 h	1,72 h	2,32 h
Arbeitszeit	10,20 h	10,92 h	0,28 h	0,30 h
Energiebedarf	542,51 kWh	704,13 kWh	15,07 kWh	19,56 kWh
Pulverbedarf	47,89 kg	43,78 kg	1,33 kg	1,22 kg
Pulverkosten	1676,21 €	15631,24 €	46,56 €	434,20 €
Druckluftbedarf	1754,79 m <sup>3</sup>	2336,32 m <sup>3</sup>	48,74 m <sup>3</sup>	64,90 m <sup>3</sup>
Kühlwasserbedarf	40,47 m <sup>3</sup>	54,28 m <sup>3</sup>	1,12 m <sup>3</sup>	1,51 m <sup>3</sup>

*Grau: Messwerte. Gelb: Theoretisch ermittelte Werte (digital berechnet oder aus Voruntersuchungen für ähnliche Komponente). Weiß: Berechnete Werte (aus theoretischen Werten oder Messwerten).*

Folgende potenzielle Annahmen würden die Produktivität weiter steigern. Diese wurden jedoch nicht betrachtet, da die Faktoren schwer zu prognostizieren sind oder der Stand der Technik noch nicht weit genug fortgeschritten ist:

- produktivere Fertigungsparameter,
- optimierte Stützstrukturen,
- reduzierte Pulverpreise aufgrund großer Bestellmengen oder Marktentwicklung,
- reduzierte Maschinenpreise aufgrund von Marktentwicklung oder vereinfachter Anlagentechnologie,
- automatisierte Stützstrukturentfernung,
- automatisierte Supportentfernung,
- reduzierte stationäre Leistung, Druckluftbedarf oder Kühlwasserbedarf aufgrund ausgereifterer Anlagentechnologie,
- geringerer Sicherheitsfaktor bezüglich Konstruktion und somit eine Reduktion des Bauteilvolumens,
- Kombination verschiedener Bauteilorientierungen, um die die Chargengröße zu erhöhen.

#### 4.6 Quantifizierung der Sachbilanz

Die Sachbilanz enthält eine quantitative Inventarisierung der ökologisch und ökonomisch relevanten Parameter als Grundlage für die Vergleichsrechnung. In Vorbereitung der Lebenszyklusbewertung wurden Inventarinformationen zur konventionellen und additiven Fertigung zusammengestellt. Die Daten für die konventionelle Fertigung stammen von den Angaben des Automobilherstellers der Dämpfergabel, also des Referenzbauteils. Für die additive Fertigung resultieren die Daten aus direkten Versuchen in der LBM-Anlage des Fraunhofer EMI (Kapitel 4.5).

Die Hintergrunddaten zur Bilanzierung stammen aus der Datenbank „ecoinvent V3.5“<sup>62</sup>. Die Daten zur Herstellung von Scandium, welches nicht

---

<sup>62</sup> Vgl. Ecoinvent (2014).

in der Datenbank verfügbar ist, sind der Publikation von Nuss entnommen.<sup>63</sup> In Tabelle 6 sind die Daten für die Herstellung der verwendeten Metallpulver dargestellt.

**Tabelle 6: Inputparameter für die Modellierung der Herstellung der beiden Pulver für die additive Fertigung (bezogen auf die Herstellung von 1 kg Metallpulver)**

Input	Scalmetalloy <sup>®</sup>	AlSi10Mg
Aluminium (g)	1143,0	1087,3
Silicium (g)	2,1	121,2
Magnesium (g)	54,5	3,6
Zirconium (g)	4,5	-
Scandium (g)	8,0	-
Argon (m <sup>3</sup> )	1,3	1,3
Energie (MJ)	9,8	9,8

Der Tabelle 7 können die Parameter für die notwendigen Inputs der konventionellen und der additiven Fertigung (mit Scalmetalloy<sup>®</sup> bzw. AlSi10Mg) für die ökologische und ökonomische Bewertung entnommen werden.

**Tabelle 7: Inputparameter pro Stück für die ökologische und ökonomische Bewertung**

Inputparameter	Konventionelle Fertigung	Additive Fertigung (Scalmetalloy <sup>®</sup> )	Additive Fertigung (AlSi10Mg)
Strommenge (kWh)	0,28	49,86	40,64
Wärmemenge (kWh Gas)	2,83	0,07	0,08
Rohstoffmenge (kg)	1,36	1,22	1,33
Druckluftmenge (m <sup>3</sup> )	-	260,15	187,73
Kühlwassermenge (m <sup>3</sup> )	-	1,52	1,09
Maschinenzeit (h)	Keine Daten verfügbar	9,54	7,09
Arbeitszeit (h)	Keine Daten verfügbar	0,38	0,38

Zur Bewertung der Gewichtseinsparung in der Nutzungsphase des Bauteils werden der Treibstoffverbrauch und die Emissionen bei dessen Verbrennung bilanziert. Die Einsparung für etwa 100 kg Gewichtsreduktion auf 100 km beträgt etwa 0,2 l<sup>64</sup>. Umgerechnet entspricht das 1,94 kWh. Bei einer angenommenen Laufleistung von 150.000 km ergibt sich eine Einsparung von 2.910 kWh. Bezogen auf 100 g, sind dies 2,91 kWh. Die additive Fertigung mit Scalmetalloy<sup>®</sup> realisiert eine Gewichtseinsparung von 156 g und damit von 4,54 kWh pro Bauteil über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs.

<sup>63</sup> Vgl. Nuss und Eckelman (2014).

<sup>64</sup> Vgl. Helms und Kräck (2016).

## 5 ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG

### 5.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

#### 5.1.1 Kumulierter Energieaufwand

Für die Betrachtung des kumulierten Energieaufwands für die additive und konventionelle Fertigung des Referenzbauteils wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand (KEA); Begriffe, Berechnungsmethoden“<sup>65</sup> angewandt (Abbildung 20). Es werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die beiden Kategorien „erneuerbar/regenerativ“ und „nicht erneuerbar/erschöpflich“ dargestellt.

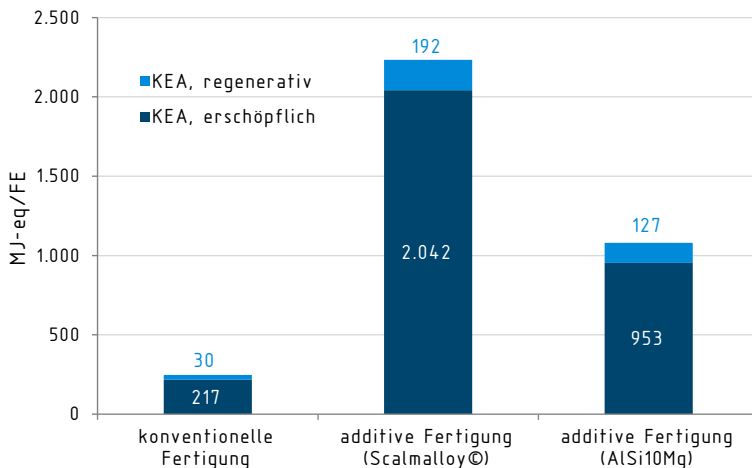


Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit

Die Ergebnisse zeigen, dass die konventionelle Fertigung einen neunfach bzw. vierfach geringeren Energieaufwand (rund 250 MJ-eq./FE) als das additive LBM-Verfahren mit Scalmalloy® (rund 2.230 MJ-eq./FE) bzw. AlSi10Mg (rund 1.080 MJ-eq./FE) verursacht. Zudem benötigt das additive Verfahren mit AlSi10Mg rund halb so viel Energie je funktioneller Einheit

<sup>65</sup> Vgl. VDI 4600:2012-01.

als das additive Verfahren mit dem Metallpulver Scalmalloy®. Die wegen der geringeren Masse des strukturoptimierten Bauteils mögliche Kraftstoff einsparung in der Nutzungsphase eines Fahrzeugs ist im Vergleich zum gesamten Energieaufwand vernachlässigbar gering (60 MJ-eq./FE).

Der große Unterschied zwischen den Fertigungsverfahren ist zum einen auf den direkten Energiebedarf der Verfahren in Form von Strom und Gas (Unterschied zwischen konventioneller Fertigung und additiver Fertigung mit AlSi10Mg) zurückzuführen. Zum anderen benötigt die Herstellung von 1 kg Scandium (Bestandteil von Scalmalloy®) fast 100.000 MJ-eq. Dies trägt unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Rohmaterialverbrauchs (additive Fertigung mit Scalmalloy® und mit AlSi10Mg) ebenfalls zum höheren Energieaufwand bei. Dieses Muster wiederholt sich auch in den folgenden Wirkungskategorien.

Bei der konventionellen Fertigung ergeben sich rund 80 % des Energieaufwands aus der Bereitstellung des Aluminiums. Während der additiven Fertigung resultieren bei Nutzung von Scalmalloy® rund 60 % des Energieaufwands aus der Pulverherstellung (die genannten Prozessschritte sind stets inkl. Rohstoffbereitstellung), bei AlSi10Mg dominieren die Bereitstellung von Strom für den Fertigungsprozess mit über 40 % und die Pulverproduktion mit knapp 40 %.

### 5.1.2 Kumulierter Rohstoffaufwand

Für die Betrachtung des kumulierten Rohstoffaufwandes für die additive und konventionelle Fertigung des Referenzbauteils wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 „Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands“<sup>66</sup> verwendet.

Die Richtlinie unterscheidet zwischen vier verschiedenen Arten des kumulierten Rohstoffaufwandes: dem energetischen, dem metallischen, dem biotischen Rohstoffaufwand sowie dem Rohstoffaufwand für Bau- und Industriemineralien. Die Ergebnisse der betrachteten Fertigungsverfahren für den kumulierten Rohstoffaufwand sind in Abbildung 21 dargestellt.

---

<sup>66</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.



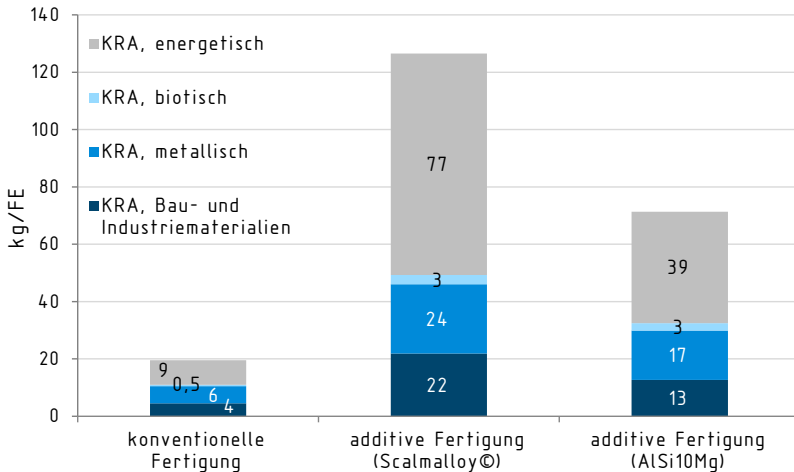


Abbildung 21: Kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit

Die Ergebnisse zeigen, dass die konventionelle Fertigung einen ca. 6,5-fach bzw. 3,5-fach geringeren Rohstoffaufwand (rund 20 kg/FE) benötigt als das additive Verfahren mit Scalmalloy® (rund 125 kg/FE) bzw. AlSi10Mg (rund 70 kg/FE). Der geringere Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase eines Fahrzeugs mit dem strukturoptimierten Leichtbauteil ist im Vergleich zum gesamten kumulierten Rohstoffaufwand vernachlässigbar (1,5 kg/FE).

Der Großteil des gesamten Rohstoffaufwands entfällt insbesondere bei den additiven Fertigungsverfahren auf den energetischen KRA. Dieser beinhaltet die Energieträger, die notwendig sind, um Rohmaterialien und Elektrizität für die Fertigung bereitzustellen. Der metallische KRA und der KRA für Bau- und Industriemineralien spielen auch eine große Rolle: Im metallischen KRA werden alle Aufwände summiert, welche auf die Bewegung von Erzgestein zurückzuführen sind, also hier beispielsweise auf Bauxit. Im KRA für Bau- und Industriemineralien sind die Bedarfe von z. B. Sand oder auch Salzen aufgeführt. Der biotische KRA spielt eine untergeordnete Rolle. Er subsummiert stoffliche (z. B. Holzbalken im Minenbau) und energetische Nutzungen (z. B. Holzhackschnitzel für die Stromproduktion) von Biomasse.

In der konventionellen Fertigung ergeben sich über 60 % des Rohstoffaufwands im metallischen KRA aus der Herstellung der Werkzeuge aus legiertem Stahl. Nur 35 % entfallen auf das im Bauteil enthaltene Aluminium. Im Falle der Bau- und Industriemineralien entstehen rund 80 % des Rohstoffaufwands in der Aluminiumherstellung. Im energetischen KRA sind über 80 % des Bedarfs Folge der Aluminiumproduktion. Beim biotischen KRA gehen rund 60 % des Bedarfs bei der Aluminiumherstellung hervor, während weitere 35 % auf die Siliziumproduktion entfallen.

In der additiven Fertigung<sup>67</sup> entstehen mehr als 50 % des Aufwands im metallischen KRA bei der Herstellung der benötigten LBM-Drucker. Der Grund dafür liegt im dort eingesetzten Stahl mit den darin enthaltenen Legierungsmetallen. Nur rund 20 % bei Scalmalloy<sup>®</sup> bzw. rund 17 % bei AlSi10Mg des metallischen KRA entfallen auf die Pulverherstellung. Im Falle des Aufwands an Bau- und Industriemineralien entstehen beim Einsatz von Scalmalloy<sup>®</sup> rund 55 % des Aufwands bei der Pulverherstellung. Wird AlSi10Mg eingesetzt, dominiert diese ebenfalls mit einem Anteil von mehr als 45 %, während mehr als 35 % auf die Bereitstellung der Elektrizität entfallen. Im energetischen KRA entstehen beim Einsatz von Scalmalloy<sup>®</sup> knapp 55 % des Bedarfs in der Pulverproduktion, während gut 35 % auf die Bereitstellung der Elektrizität entfallen. Wird AlSi10Mg eingesetzt, dominiert der Elektrizitätsbedarf mit einem Anteil von rund 55 %, während auf die Pulverherstellung mehr als 30 % entfallen. Beim biotischen KRA entstehen rund 45 % des Bedarfs bei der Bereitstellung der Elektrizität, während weitere 30 % auf die Pulverherstellung entfallen. Wird auch hier AlSi10Mg eingesetzt, dominiert die Strombereitstellung mit einem Anteil von über 40 %, während knapp 35 % auf die Pulverherstellung entfallen.

### 5.1.3 Wasserverbrauch

Für die Betrachtung des Wasserverbrauchs für die additive und konventionelle Fertigung des Referenzbauteils wird auf die aktuelle Bewertungsmethode ILCD 2011, Midpoint (v1.0.10, August 2016) für openLCA<sup>68</sup> zurück-

---

<sup>67</sup> Dies gilt für den Einsatz von AlSi10Mg ebenso wie für Scalmalloy<sup>®</sup>.

<sup>68</sup> Vgl. openLCA (2018).

gegriffen. Der gesamte Wasserverbrauch für die betrachteten Fertigungsverfahren ist in Abbildung 22 dargestellt.

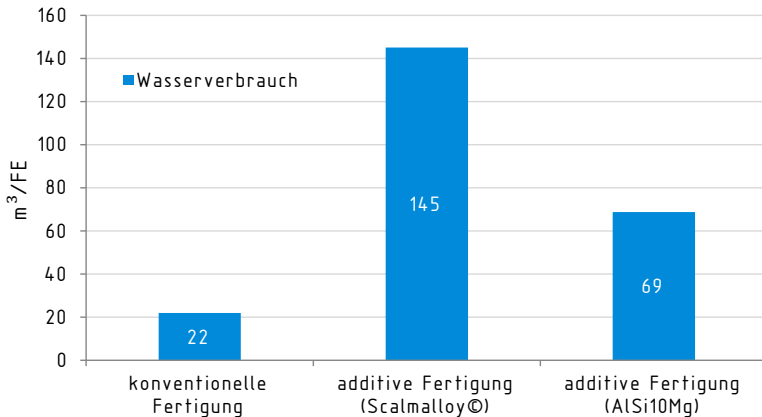


Abbildung 22: Wasserverbrauch je funktioneller Einheit

Die Ergebnisse zeigen, dass die konventionelle Fertigung einen knapp siebenfach bzw. gut dreifach geringeren Wasserverbrauch (rund 22 m³/FE) benötigt als das additive Verfahren mit Scalmalloy® (rund 145 m³/FE) bzw. mit AlSi10Mg (rund 69 m³/FE). Auch beim Wasserbedarf ist die Kraftstoffeinsparung in der Nutzungsphase des strukturoptimierten Bauteils im Vergleich zum Gesamtbedarf vernachlässigbar gering (1,5 m³/FE).

In der konventionellen Fertigung entfallen über 80 % des Wasserverbrauchs auf die Herstellung des benötigten Aluminiums.

In der additiven Fertigung entfallen bei der Nutzung von Scalmalloy® knapp 65 % des Wasserverbrauchs auf die Pulverherstellung, bei AlSi10Mg dominiert die Pulverherstellung ebenfalls, jedoch nur mit rund 45 %.

#### 5.1.4 Flächeninanspruchnahme

Für die Betrachtung der Flächeninanspruchnahme für die Bereitstellung der Rohstoffe für die additive und konventionelle Fertigung des Referenz-

bauteils wird ebenfalls auf die Bewertungsmethode ReCiPe Midpoint (H) V 1.13 Dezember 2016<sup>69</sup> für openLCA<sup>70</sup> zurückgegriffen. Hier wird die Kategorie „urban land occupation“ zur Quantifizierung herangezogen. Die gesamte Flächeninanspruchnahme für die betrachteten Fertigungsverfahren ist in Abbildung 23 dargestellt.

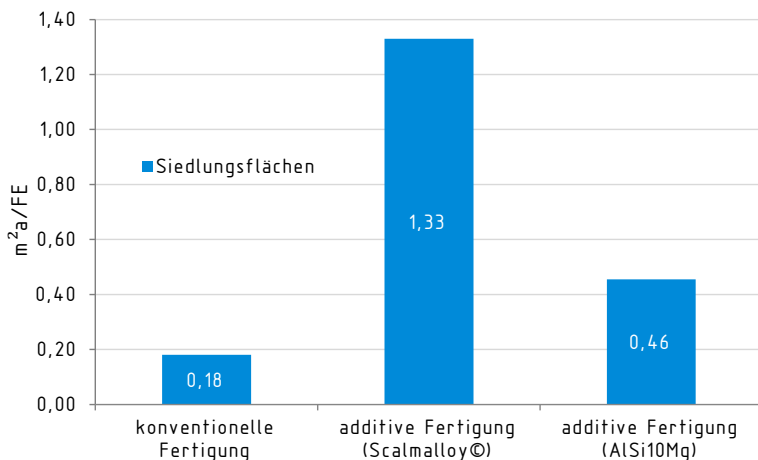


Abbildung 23: Flächennutzung je funktioneller Einheit

Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass die konventionelle Fertigung einen rund 7,5-fach bzw. 2,5-fach geringeren Flächenbedarf (rund 0,18 m²a Siedlungsfläche) beansprucht als das additive Verfahren mit Scalmalloy® (rund 1,33 m²a Siedlungsfläche) bzw. AlSi10Mg (rund 0,46 m²a Siedlungsfläche).

In der konventionellen Fertigung entstehen auch in der Kategorie Flächeninanspruchnahme über 80 % des Bedarfs in der Aluminiumproduktion.

In der additiven Fertigung entfallen bei der Nutzung von Scalmalloy® knapp 65 % des Wasserverbrauchs auf die Pulverherstellung. Wird AlSi10Mg verwendet, dominiert die Pulverherstellung ebenfalls, jedoch nur

<sup>69</sup> Vgl. ReCiPe (2016).

<sup>70</sup> Vgl. openLCA (2018).

mit rund 45 %. Der Rest verteilt sich auf die Strom- und Druckluftbereitstellung.

### 5.1.5 Treibhausgaspotenzial

Für die Betrachtung des Treibhausgaspotenzials wird auf die aktuelle Bewertungsmethode ReCiPe Midpoint (H) V 1.13 Dezember 2016<sup>71</sup> für openLCA<sup>72</sup> zurückgegriffen. Diese Methode verwendet die aktuellen Werte der IPCC zur Umrechnung aller relevanten Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Das summierte Treibhausgaspotenzial für die betrachteten Fertigungsverfahren sind in Abbildung 24 dargestellt.

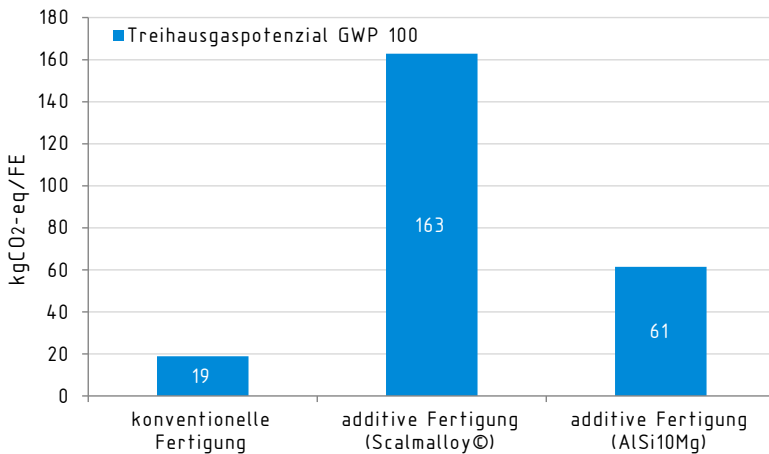


Abbildung 24: Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit

Die Kategorie Treibhausgaspotenzial ist analog zum kumulierten Energieaufwand zu betrachten. Da die KEA-Werte zum Großteil aus den Energiebedarfen der Rohstoffherstellung resultieren, gelten im Hinblick auf das Treibhauspotenzial die Bedingungen der jeweiligen Rohstoffherkunftsländer. International wird der Energiebedarf der Rohstoffindustrie heute vorwiegend über fossile Energieträger bereitgestellt. Die spezifischen Treibhauspotenziale werden hier entsprechend berücksichtigt.

<sup>71</sup> Vgl. ReCiPe (2016).

<sup>72</sup> Vgl. openLCA (2018).

Aus Abbildung 24 ist ersichtlich, dass die konventionelle Fertigung fast 9-fach bzw. gut 3-fach geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen (rund 19 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) verursacht als das additive Verfahren mit Scalmalloy® (rund 160 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) bzw. AlSi10Mg (rund 60 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE). Die Kraftstoffeinsparung in der Nutzungsphase über die geringere Masse des strukturoptimierten Fahrzeugbauteils ist im Vergleich mit dem Gesamtbedarf vernachlässigbar (4 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE).

In der konventionellen Fertigung entstehen fast 85 % der Treibhausgasemission während der Aluminiumproduktion.

In der additiven Fertigung mit Scalmalloy® entstehen mehr als 60 % der Treibhausgasemission bereits bei der Pulverherstellung<sup>73</sup>. Bei AlSi10Mg dominiert die Bereitstellung von Elektrizität zum eigentlichen LBM-Fertigungsprozess mit fast 45 %, während die Pulverherstellung rund 40 % zum Treibhausgaspotenzial beiträgt.

## 5.2 Bewertung der Rohstoffkritikalität

Für die Bewertung der Kritikalität der eingesetzten Rohstoffe wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 „Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands“<sup>74</sup> genutzt. Die Richtlinie basiert auf einem System von 13 Indikatoren, die in drei Gruppen eingeteilt sind (Tabelle 8).

**Tabelle 8: Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800, Blatt 2**

Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Geopolitische und regulatorische Indikatoren	Ökonomische Indikatoren
Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen
Grad der Koppelproduktion / Nebenproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Grad der Nachfragesteigerung
Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life - Recyclingtechnologien	Politisches Länderrisiko	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen
Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Regulatorisches Länderrisiko	Annualisierte Preisvolatilität
Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete		

<sup>73</sup> Dieser Prozess wird auch als "Atomisierung" bezeichnet.

<sup>74</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

Jeder Rohstoff erhält für jeden Indikator eine Bewertung, wobei die Bewertungsskala von 0 bis 1 reicht und die Zwischenschritte 0,3 und 0,7 beinhaltet. Eine Bewertung einzelner Rohstoffe wird über eine Zahl vorgenommen. Hierbei werden die einzelnen Indikatorwerte der Größe nach geordnet. Es werden Gewichtungsfaktoren  $G_i$  nach der folgenden Formel:

$$G_i = \frac{2^{(i-1)}}{3^i}$$

berechnet. Diese werden mit den Indikatorwerten multipliziert und nach der folgenden Formel:

$$K_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^j G_i}$$

zu einer Gesamtkritikalität addiert. In der VDI 4800 finden sich für viele der zu betrachtenden Rohstoffe Bewertungen aufgrund von Berechnungen, Schätzungen und Expertenmeinungen. Die Richtlinie beinhaltet die vollständige Tabelle. Zirconium und Scandium sind jedoch nicht vermerkt. Diese fehlenden Werte wurden über Analogieschlüsse ausgeglichen. Für Zirconium wurde auf die Daten von Hafnium zurückgegriffen, da diese Metalle meist vergesellschaftet sind und die Rohstoffe gemeinsam gewonnen werden. Für Scandium wurde die Bewertung von Terbium angesetzt, da diese Metalle hinsichtlich ihrer Kritikalität, Förderart (als Nebenprodukt) und Gesamtjahresproduktion miteinander vergleichbar sind.

Die für die verschiedenen Fertigungsprozesse relevanten Metalle, welche in die jeweiligen Legierungen einfließen und deren aggregierter Kritikalitätswert, sind in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9: Aggregierte und gerundete Kritikalitätswerte**

Metall	Kritikalitätswert		Anwendung in Produktionstechnologie
	Aggregiert	Gerundet	
Aluminium	0,71	0,7	Alle
Silicium	0,76	0,7	Alle
Magnesium	0,76	0,7	Alle
Zirconium	0,92	1	Additive Fertigung
Scandium	0,93	1	Additive Fertigung

Für die Metalle Zirconium und Scandium, welche in der Legierung Scalmalloy<sup>®</sup> eingesetzt werden, resultiert der Kritikalitätswert 1, also ein sehr hohes Versorgungsrisiko. Sie sind nur für die additive Fertigung notwendig.

Für die übrigen Metalle errechnet sich ein gerundeter Kritikalitätswert von 0,7. Silicium und Magnesium finden sich in allen betrachteten Technologien, da sie üblicherweise in Aluminiumlegierungen für die betrachtete Anwendung eingesetzt werden.

Die Kritikalitätswerte der in der additiven Fertigung verwendeten Metalle lassen den Schluss zu, dass die Versorgungssicherung aktuell mit einem hohen Risiko behaftet ist, wenn Scalmalloy<sup>®</sup> eingesetzt wird. Bei üblichen Aluminiumlegierungen ist dieses, auch aufgrund der geschlossenen Kreislaufführung von Aluminium, deutlich geringer.

### 5.3 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Die Analyse der Lebenszykluskosten umfasst die wesentlichen Kostenfaktoren, welche im gesamten Lebenszyklus des hier betrachteten Fahrzeugbauteils (Dämpfergabel) in Erscheinung treten. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Kostenvergleich in der Herstellungsphase. Um einen Kostenvergleich der konventionellen und der additiven Fertigungsverfahren zu ermöglichen, werden die Kosten der verschiedenen Prozessabschnitte aufgeschlüsselt. Dem Vergleich liegt der in Kapitel 4.1 für den Zweck dieser Studie festgelegte Anwendungsfall und die in Abbildung 18 skizzierte Systemgrenze zugrunde. Demzufolge beziehen sich die der Analyse zugrunde gelegten Kostendaten auf die Fertigung von 10.000 Dämpfergabeln pro Jahr.

Der Kostenvergleich für konventionell und additiv gefertigte Bauteile erfolgt anhand der in Kapitel 4.4.1 erläuterten Definition der funktionellen Einheit. Es werden also die Kosten, bezogen auf eine Dämpfergabel, mit den in Kapitel 4.4.1 angegebenen Randbedingungen dargestellt.

#### 5.3.1 Investitionskosten der Herstellung

Die Investitionskosten umfassen die Kosten für die Bereitstellung der Fertigungsanlagen und der für die Werkstückbearbeitung erforderlichen



Werkzeuge. Bei der konventionellen Fertigung gehören dazu Schmelz- und Tunnelöfen, eine Gussanlage, eine hydraulische Gesenkschmiedepresse und weitere Metallbearbeitungsmaschinen. Außerdem zählen dazu die Kosten für die Werkzeugfertigung, insbesondere der Gussform und der Gesenkschmiedeform. Die Investitionskosten für diese Betriebsmittel fließen (mittels Allokation) entsprechend der hier betrachteten Losgröße von 10.000 Stück anteilig zur gesamten Fertigungsleistung eines beispielhaften Industriebetriebs in die Analyse ein.

Bei der additiven Fertigung werden die Investitionskosten der LBM-Anlagen in die Analysen einbezogen. Relevante, speziell angefertigte Formungswerkzeuge sind hier im Gegensatz zur konventionellen Fertigung nicht erforderlich. Es werden lediglich Hilfseinrichtungen<sup>75</sup> mit vergleichsweise geringen Investitionskosten eingesetzt. Eine spanende Nachbearbeitung von Funktionsflächen der Werkstücke ist bei konventioneller als auch additiver Fertigung notwendig. Diese sind im gegebenen Fall jedoch minimal und werden daher bei der vergleichenden Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Anzahl der für die Fertigung von 10.000 Bauteilen pro Jahr notwendigen LBM-Anlagen leitet sich aus den experimentell ermittelten Maschinen- und Wartungszeiten bei der Herstellung des Referenzbauteils ab. Diese unterscheiden sich je nach verwendetem Werkstoff (Legierungen). Daraus resultiert auf der gleichen LBM-Anlage des Typs EOS M 400 eine unterschiedliche jährliche Fertigungsleistung. Es werden deshalb je nach Pulvermaterial (Legierung) unterschiedliche Maschinenzeiten pro Werkstück veranschlagt. Für die Fertigung von 10.000 Bauteilen pro Jahr leitet sich daraus aufgerundet die folgende Anzahl von erforderlichen LBM-Anlagen des Typs EOS M 400 ab:

- Fertigungsprozess mit Scalmalloy<sup>®</sup> Legierung: 14 LBM-Anlagen
- Fertigungsprozess mit AlSi10Mg Legierung: 11 LBM-Anlagen

---

<sup>75</sup> Eine Säge zur Trennung der Bauteile von den Supportstrukturen und ein Ofen für die Wärmenachbehandlung der Werkstücke.

Zusätzlich erforderliche Nebenanlagen wie Druckluftherzeugung, Bauteilnachbehandlung und Pulverauffbereitung sind in den experimentell ermittelten Daten zu Investitionskosten bereits enthalten und wurden hier auf die im Produktionsszenario erforderliche Gesamtausstattung der additiven Fertigungsanlage hochgerechnet. Tabelle 10 zeigt die Zusammenfassung der anteiligen Investitionskosten pro Stück des Referenzbauteils.

**Tabelle 10: Investitionskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil**

Prozess	Investitionskosten je RB		zugrunde liegende Allokationsfaktoren
	Einzelpositionen	gesamt	
konventionelle Fertigung		2,94 €	
Fertigungsanlagen inkl. Flächenbedarf (gesamt)	2,05 €		1/20 der Anlagenlebensdauer; 3 % Zinssatz (Diskontierung); 2,4 % des jährlichen Produktionsvolumens
Spritzgusswerkzeug	0,23 €		1/10 der Werkzeugstandzeit; 3 % Zinssatz (Diskontierung);
Gesenkschmiedewerkzeug	0,66 €		1/5 der Werkzeugstandzeit; 3 % Zinssatz (Diskontierung);
additive Fertigung		-	
LBM-Anlage mit Scalmalloy®	213,36 €	213,36 €	1/10 der Anlagenlebensdauer; 3 % Zinssatz (Diskontierung);
LBM-Anlage mit AlSi10Mg	167,64 €	167,64 €	1/10 der Anlagenlebensdauer; 3 % Zinssatz (Diskontierung);

*RB - Referenzbauteil*

### 5.3.2 Betriebskosten der Herstellung

Die Datengrundlage der konventionellen Fertigung resultiert aus Angaben des Automobilherstellers der Dämpfergabel. Dieser industrielle Fertigungsprozess repräsentiert einen nach aktuellem Stand der Technik optimierten Kostenrahmen einschließlich der Skaleneffekte einer Massenproduktion.

Die Datengrundlage der additiven Fertigung basiert auf experimentell ermittelten Werten, also den Messwerten der Einzelanlage. Diese wurden verwendet, um auf die im Produktionsszenario anzunehmende Betriebsweise mit 14 bzw. elf LBM-Anlagen hochzurechnen. Dabei wurden die möglichen Optimierungspotenziale einer aus Serienproduktion getrimmten Betriebsweise eher konservativ abgeschätzt. Die ermittelten Betriebskosten stellen daher die obere Grenze des anzunehmenden Kostenrahmens dar.

Der Betriebsmodus der LBM-Anlagen ermöglicht mit Maschinenbelegungszeiten pro Charge (Kapitel 4.6) von 171,80 Stunden (Scalmalloy<sup>®</sup>) bzw. 133,94 Stunden (AlSi10Mg) einen unbeaufsichtigten Betrieb an Wochenend- und Feiertagen. Daraus wird einschließlich der notwendigen Richt- und Wartungszeiten ein Betrieb der LBM-Anlagen an gerundet 360 Tagen pro Jahr angenommen (Beschickung und Betrieb der 14 bzw. elf LBM-Anlagen erfolgt dabei in zeitversetzten Intervallen).

Die Produktivität der Anlagen ist in erster Linie bedingt durch die Maschinenbelegungszeiten, welche sich aus den Messwerten für die Beschichtungsdauer und die Belichtungsdauer der Werkstücke zuzüglich der Arbeitszeit zur Vorbereitung je Charge zusammensetzt. Hingegen kann die Nachbearbeitung der Werkstücke (Wärmebehandlung, Stützstrukturentfernung, Entgraten) parallel zu den Maschinenbelegungszeiten erfolgen. Letztere Zeiten fließen deshalb in die Arbeitskosten mit ein, nicht aber in den Kostenfaktor Maschinenzeit. Wartungskosten setzen sich aus einem hochgerechneten Anteil an Arbeits-, Material- und Entsorgungskosten zusammen (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Betriebskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil**

Prozess	Betriebskosten der Fertigung pro Stück	
	Einzelpositionen	Summe
konventionelle Fertigung		6,83 €
- Rohmaterialkosten	5,50 €	
- Energiekosten	0,15 €	
- Arbeitskosten	1,10 €	
- Kosten Abfallentsorgung	0,08 €	
additive Fertigung mit Scalmalloy <sup>®</sup>		560,54 €
- Rohmaterialkosten	402,75 €	
- Energiekosten	11,99 €	
- Kosten für Kühlwasser	5,95 €	
- Arbeitskosten	6,38 €	
- Kosten für Wartung	98,74 €	
- Kosten für Platzbedarf	3,28 €	
- Kosten Abfallentsorgung	31,45 €	
additive Fertigung mit AlSi10Mg		134,90 €
- Rohmaterialkosten	43,21 €	
- Energiekosten	9,25 €	
- Kosten für Kühlwasser	4,52 €	
- Arbeitskosten	6,04 €	
- Kosten für Wartung	70,53 €	
- Kosten für Platzbedarf	2,57 €	
- Kosten Abfallentsorgung	3,35 €	

### 5.3.3 Kosten in der Nutzungsphase

Die Dämpfergabel ist für die wartungsfreie Nutzung als Bestandteil eines Kraftfahrzeugs ausgelegt. Während der Nutzungsphase entstehen deshalb keine unmittelbaren Kosten. Ein indirekter Einspareffekt wäre theoretisch durch die additive Fertigung des Referenzbauteils in strukturoptimierter Leichtbauweise möglich, da die Gewichtsreduktion des Referenzbauteils zu einem verminderten Treibstoffverbrauch des Fahrzeugs beiträgt. Der anzunehmende Einspareffekt beträgt in dieser Studie je Referenzbauteil etwa 0,5 l Treibstoff über die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs. Der Effekt kann somit vernachlässigt werden.

### 5.3.4 Entsorgungskosten

Nach der Nutzung der Dämpfergabel als Bestandteil eines Kraftfahrzeugs wird dieses zusammen mit dem Altauto entsorgt. Als Entsorgungsweg wird eine ordentliche Altautoentsorgung einschließlich Recycling der metallischen Bestandteile angenommen. Die hier betrachteten Referenzbauteile werden dabei ungeachtet ihrer spezifischen Legierung als Aluminiumschrott behandelt. Dieser recycelbare Wertstoff erzielt einen Marktpreis,

welcher in der Lebenszykluskostenrechnung als einmalige Gutschrift berücksichtigt wird. Da diese Recyclinggutschrift erst mit einer Verzögerung von etwa 15 Jahren wirksam wird, stellen die in Tabelle 12 genannten Werte die diskontierten Werte (NPV) dieser Gutschrift dar.

**Tabelle 12: Recyclinggutschriften für konventionell und additiv gefertigte Referenzbauteile**

Referenzbauteil	Masse	Gutschrift
Bauteil aus konventioneller Fertigung	1,32 kg	1,41 €
Bauteil aus Scalmalloy®	1,1 kg	1,17 €
Bauteil aus AlSi10Mg	1,2 kg	1,28 €

### 5.3.5 Gesamtbewertung der Lebenszykluskosten

Tabelle 13 zeigt die Gesamtkosten pro Stück bei einer Fertigung von 10.000 Dämpfergabeln. Betrachtet wird sowohl die konventionelle Fertigung als auch die additive Fertigung mit Scalmalloy® und AlSi10Mg.

**Tabelle 13: Zusammenstellung Lebenszykluskosten der konventionellen und additiven Fertigung pro Referenzbauteil**

Prozess	Lebenszykluskosten der Fertigung pro Stück	
	Einzelpositionen	Summe
konventionelle Fertigung		8,36 €
- Investition	2,94 €	
- Betriebskosten	6,83 €	
- Kosten in der Nutzungsphase	vernachlässigt	
- Entsorgungsphase	1,41 €	
additive Fertigung mit Scalmalloy®		837,70 €
- Investition	213,36 €	
- Betriebskosten	625,52 €	
- Kosten in der Nutzungsphase	vernachlässigt	
- Entsorgungsphase	1,17 €	
additive Fertigung mit AlSi10Mg		363,94 €
- Investition	167,64 €	
- Betriebskosten	197,58 €	
- Kosten in der Nutzungsphase	vernachlässigt	
- Entsorgungsphase	1,28 €	

Der Unterschied in den Investitionskosten für die zwei Szenarien der Additivfertigung hat in erster Linie mit der Anzahl an benötigten LBM-Maschinen (elf Stück für AlSi10Mg und 14 Stück für Scalmalloy®) zu tun. Zudem besteht ein großer Unterschied zwischen der konventionellen und der additiven Fertigung hinsichtlich der pro Werkstück benötigten Herstellungszeit. Dies wirkt sich stark auf die Stückkosten aus.

Bei der konventionellen Fertigung ist die existierende Fertigungsanlage bei einer Losgröße von 10.000 Stück nur für sieben Tage pro Jahr ausgelastet. Bei angenommenen 300 Betriebstagen pro Jahr bedeutet das, dass eine Allokation von 2,4 % der jährlichen Abschreibung von anlagenbezogenen Investitionskosten erfolgt (hinzukommen noch die anteiligen Investitionskosten für die Werkzeuge). Bei der AM hingegen sind in beiden Szenarien alle LBM-Maschinen an rund 360 Tagen pro Jahr mit der Verarbeitung der betrachteten Losgröße ausgelastet. Daher werden 100 % der jährlichen Abschreibung von anlagenbezogenen Investitionskosten (Werkzeuge entfallen) in Rechnung gestellt. Als Konsequenz fällt die anteilige Allokation der jährlichen Investitionskosten bei der konventionellen Fertigung relativ gering aus, während diese der additiven Fertigung der Dämpfergabeln insgesamt zugeschrieben wird. Dies betrifft ebenso die Wartungskosten, welche sich bei den ohnehin relativ wartungsintensiven LBM-Anlagen voll auf die Fertigungsstückkosten auswirken. Im Gegensatz dazu findet bei der konventionellen Herstellung eine Allokation von nur 2,4 % der jährlichen Wartungskosten statt.

Des Weiteren bewirken die verschiedenen hohen Pulverpreise einen starken Unterschied der Betriebskosten zwischen der additiven Fertigung mit Scalmalloy<sup>®</sup> und AlSi10Mg (Faktor 10). Dies beeinflusst sowohl die Rohmaterial- als auch die Abfallentsorgungskosten (Pulververluste).

## 5.4 Sensitivitätsanalyse

### 5.4.1 Geänderte Parameter für die Sensitivitätsanalyse

Der heutige Stand der Technik für die additive Fertigung befindet sich an der Schwelle von der Einzelteilfertigung zur Fertigung von Klein- und Mittelserien von Werkstücken. Die in dieser Studie betrachtete Fertigung einer mittleren Losgröße von 10.000 Stück pro Jahr mittels LBM-Technologie wäre zwar technisch machbar, aber im Sinne der industriellen Praxis der Zeit noch etwas voraus. Jedoch ist absehbar, dass die additive Fertigung in Zukunft durch technologische Innovationen weiter optimiert werden kann. Dadurch könnte eine Klein- und Mittelserienfertigung in der betrachteten Losgröße in einen industriell sinnvollen Anwendungsbereich rücken.

Die im Folgenden dargelegte Sensitivitätsanalyse testet die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen technologischer Innovationen für die Herstellung von größeren Stückzahlen mittels LBM. Aus der Vielzahl der zukünftigen technologischen Optimierungsmöglichkeiten bei additiven Fertigungsverfahren werden in dieser Studie die folgenden vier Aspekte in Betracht gezogen (alle anderen Aspekte bleiben unverändert, Kapitel 4.5.2):

- Anzahl der Laser je LBM-Anlage steigt von eins auf vier. Dies bewirkt eine Reduktion der Bauzeit je Charge und damit eine Reduktion der für die Produktion von 10.000 Stück benötigten Anlagen von 14 auf drei Anlagen für Scalmalloy<sup>®</sup> bzw. von elf auf zwei Anlagen für AlSi10Mg.
- Die mit Scalmalloy<sup>®</sup> herstellbare Schichtdicke steigt von 60 µm auf 90 µm, dadurch verringert sich die Bauzeit.
- Die Größe des Pulverbetts steigt auf 400 mm x 400 mm x 800 mm, dadurch können pro Charge 36 statt 18 Werkstücke auf einmal hergestellt werden.
- Reduzierte Stillstandszeiten der LBM-Anlagen durch unbeaufsichtigten oder fernüberwachten Betrieb (Betriebsdauer = 360 Tage pro Jahr).

Die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen dieser zukünftigen Optimierungsmöglichkeiten werden auf Basis der heutigen Kosten und aktuell gültigen Impactfaktoren berechnet. Daher testet die Sensitivitätsanalyse Veränderungen, die sich ergeben würden, wenn die erst zukünftig möglichen Optimierungen jetzt schon umsetzbar wären.

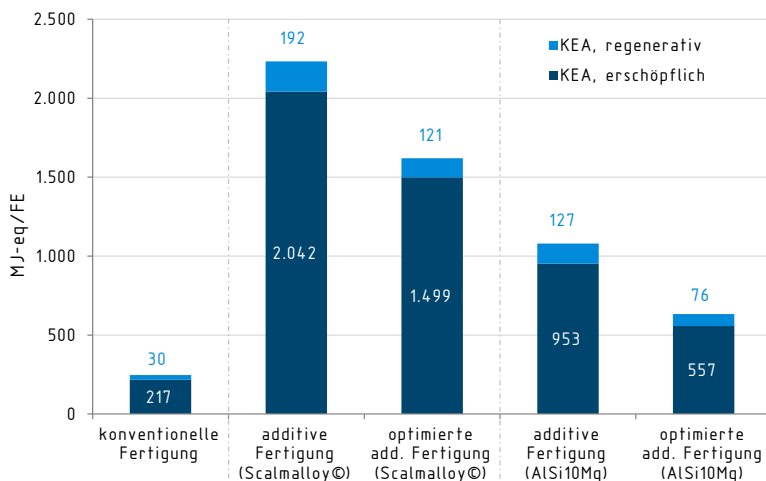
In Tabelle 14 werden die heutigen und die optimierten Parameter der additiven Fertigung für die beiden Legierungen Scalmalloy<sup>®</sup> und AlSi10Mg dargestellt. Diese bilden die Grundlage für die in den nächsten beiden Kapiteln dargestellten Ergebnisse.

**Tabelle 14: Änderungen der Inputparameter der additiven Fertigung pro Stück für die ökologische und ökonomische Bewertung**

Inputparameter	Basis (Scalmalloy <sup>®</sup> )	optimiert (Scalmalloy <sup>®</sup> )	Basis (AlSi10Mg)	optimiert (AlSi10Mg)
Anzahl Teile pro Charge	18	36	18	36
Strommenge (kWh)	49,86	19,56	40,18	15,25
Wärmemenge (kWh Gas)	0,07	0,07	0,07	0,08
Rohstoffmenge (kg)	1,22	1,22	1,33	1,33
Druckluftmenge (m <sup>3</sup> )	260,15	64,90	187,73	48,74
Kühlwassermenge (m <sup>3</sup> )	1,52	1,51	1,09	1,12
Maschinenzeit (h)	9,54	2,32	6,98	1,75
Arbeitszeit (h)	0,38	0,3	0,36	0,31

### 5.4.2 Ergebnisse der ökologischen Sensitivitätsanalyse

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Szenarios für die additive Fertigung mit einer optimierten LBM-Anlage im Vergleich zur unveränderten konventionellen Fertigung in der Kategorie kumulierter Energieaufwand dargestellt.



**Abbildung 25: Sensitivität kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit**

Es wird deutlich, dass mit einer optimierten LBM-Anlage sowohl im Falle von Scalmalloy<sup>®</sup> als auch im Falle von AlSi10Mg eine deutliche Einsparung von fast 30 % bzw. über 40 % des kumulierten Energieaufwands erzielt werden könnte. In diesem Optimierungsfall benötigt die additive Fertigung



mit AlSi10Mg beispielsweise statt viermal nur noch 2,5-mal so viel Energie wie die konventionelle Fertigung.

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse des Szenarios für die additive Fertigung mit einer optimierten LBM-Anlage im Vergleich zur unveränderten konventionellen Fertigung in der Kategorie kumulierter Rohstoffaufwand dargestellt.

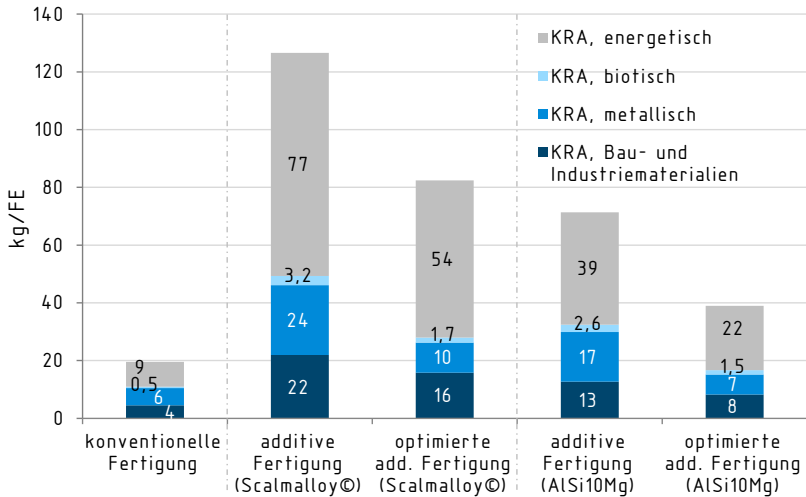


Abbildung 26: Sensitivität kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit

Auch beim KRA zeigt sich, dass sowohl im Falle von Scalmalloy® als auch im Falle von AlSi10Mg eine deutliche Einsparung durch eine optimierte LBM-Anlage von fast 35 % bzw. rund 45 % des kumulierten Rohstoffaufwands erzielt werden könnte. Durch die Optimierung würde die additive Fertigung mit AlSi10Mg nur noch rund doppelt so viele Rohstoffe benötigen wie die konventionelle Fertigung.

In Abbildung 27 sind abschließend die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für eine additive Fertigung mit einer optimierten LBM-Anlage gegenüber der unveränderten konventionellen Fertigung in der Kategorie Treibhausgaspotenzial dargestellt.

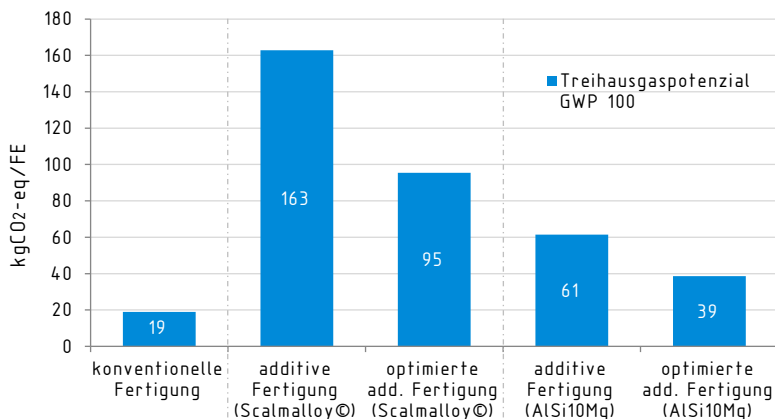


Abbildung 27: Sensitivität Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit

Sowohl bei der additiven Fertigung mit Scalmalloy® als auch mit AlSi10Mg können die CO<sub>2</sub>-Emissionen um mehr als 40 % bzw. um mehr als 35 % gesenkt werden. In diesem Optimierungsfall emittiert die additive Fertigung mit AlSi10Mg nur noch rund doppelt so viele Treibhausgasemissionen wie die konventionelle Fertigung.

### 5.4.3 Ergebnisse der ökonomischen Sensitivitätsanalyse

Die für optimierte additive LBM-Fertigungsanlagen errechneten Investitionskosten und Betriebskosten sind in Tabelle 15 angegeben (Vergleichswerte Tabelle 10 und Tabelle 11). Für die Kosten der Nutzungsphase und die Recyclinggutschrift ergeben sich hierbei keine Änderungen.

Die Ergebnisse der ökonomischen Sensitivitätsanalyse zeigen ein deutliches Kosteneinsparpotenzial bei den Investitionen (Tabelle 15). Dieser Kostenanteil sinkt durch technische Optimierungen um etwa 80 %. Die Ursache dafür ist die geringere Anzahl der für die Fertigung von 10.000 Stück pro Jahr erforderlichen LBM-Anlagen. Mit AlSi10Mg werden nur noch zwei optimierte Anlagen (statt elf) benötigt, mit Scalmalloy® sind es drei (statt vierzehn). Aufgrund des zunehmenden internationalen Wettbewerbs ist eine Reduktion der Investitionskosten für LBM-Anlagen in den kommenden Jahren zu erwarten. Eine genaue Prognose lässt sich jedoch nicht stellen. Darum wird dieser Faktor nicht berücksichtigt.

Tabelle 15: Investitions- und Betriebskosten der optimierten additiven Fertigung pro Referenzbauteil

Prozess	Investitionskosten pro Stück	zugrunde liegende Allokationsfaktoren
Optimierte LBM-Anlage mit Scalmalloy®	45,72 €	1/10 der Anlagenlebensdauer; 3% Zinssatz (Diskontierung);
Optimierte LBM-Anlage mit AlSi10Mg	30,48 €	1/10 der Anlagenlebensdauer; 3% Zinssatz (Diskontierung);
Prozess	Jährliche Betriebskosten der Fertigung pro Stück	
	Einzelpositionen	Summe
Optimierte additive Fertigung mit Scalmalloy®		482,61 €
- Rohmaterialkosten	402,75 €	
- Energiekosten	4,06 €	
- Kosten für Kühlwasser	5,90 €	
- Arbeitskosten	5,16 €	
- Kosten für Wartung	32,59 €	
- Kosten für Platzbedarf	0,70 €	
- Kosten Abfallentsorgung	31,45 €	
Optimierte additive Fertigung mit AlSi10Mg		81,01 €
- Rohmaterialkosten	43,21 €	
- Energiekosten	3,09 €	
- Kosten für Kühlwasser	4,35 €	
- Arbeitskosten	4,82 €	
- Kosten für Wartung	21,73 €	
- Kosten für Platzbedarf	0,47 €	
- Kosten Abfallentsorgung	3,35 €	

Die Auswirkung der anlagentechnischen Optimierung auf die Betriebskosten ist deutlich geringer. Weiterhin bleiben die Materialkosten der wesentlichste Kostenfaktor, insbesondere bei Scalmalloy®. In diesem Fall reduzieren sich die Betriebskosten um etwa 14 %. Bei AlSi10Mg sind immerhin bis zu 40 % Kosteneinsparpotenzial zu erwarten. Der deutlichste Einspareffekt resultiert aus reduzierten Wartungskosten.

## 6 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 6.1 Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext

Die in Kapitel 5.1 dargestellten Ergebnisse der ökologischen Bewertung zeigen, dass die additive Fertigung über alle umweltbezogenen Wirkungskategorien hinweg deutlich stärkere Auswirkungen verursacht als die konventionelle Fertigung. Dies ist vor allem auf den elektrischen Grundverbrauch der LBM-Anlagen zurückzuführen. Insbesondere hat sich die konstant messbare elektrische Grundlast der eingesetzten EOS-M-400-Anlage mit etwa 5 kW als überraschend hoch erwiesen. Der gemessene Grundstrombedarf deutet in erster Linie auf eine noch nicht voll ausgereifte Anlagentechnologie hin. Demgegenüber ist der Strombedarf für den eigentlichen, laserbasierten Schmelzvorgang des Pulvers vergleichsweise moderat (8,8 % des gesamten Strombedarfs; Herleitung siehe Kapitel 4.5.1). Hier besteht also bei der Anlagentechnik ein signifikantes Potenzial zur Optimierung der Energieeffizienz.

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass technische Verbesserungen bei LBM-Anlagen bei den ökologischen Wirkungskategorien ein deutliches Verbesserungspotenzial bewirken könnten. Allein die höhere Anzahl der parallel arbeitenden Laser sowie ein größeres Bauraumvolumen führen zu einer deutlichen Reduktion der für die Fertigung von 10.000 Bauteilen benötigten Anzahl an LBM-Anlagen. Diese Produktivitätssteigerung hätte auch einen geringeren Energiebedarf zur Folge. Beispielsweise kann im Falle von Scalmalloy<sup>®</sup> bzw. von AlSi10Mg eine Einsparung von fast 30 % bzw. über 40 % des kumulierten Energieaufwands erzielt werden. In diesem Optimierungsfall benötigt die additive Fertigung mit AlSi10Mg-Pulver nur noch 2,5-mal so viel Energie pro Werkstück wie die konventionelle Fertigung. Weitergehende technische Verbesserungen, insbesondere die Reduktion der elektrischen Grundlast der LBM-Anlagen, könnten dazu beitragen, den Abstand der additiven zur konventionellen Fertigung in Hinblick auf deren Umweltauswirkungen zu verringern. Die hier berücksichtigten Optimierungen innerhalb einer einzigen LBM-Anlagengeneration verdeutlichen das Potenzial weiterer Folgegenerationen zur weiteren Reduktion der Umweltwirkungen.

Zudem zeigen die Ergebnisse deutlich den Einfluss der verwendeten Pulverlegierung auf den Ressourcenaufwand und das Treibhausgaspotenzial. Im Falle der Anwendung von Scalmalloy<sup>®</sup> wirkt sich der Aufwand für die Bereitstellung der Rohstoffe erheblich auf das Gesamtergebnis aus. Dies betrifft insbesondere den Legierungsbestandteil Scandium, welches die EU-Kommission (2017) zudem als einen für die EU kritischen Rohstoff identifiziert hat.<sup>76</sup> Scalmalloy<sup>®</sup> eignet sich als Hightech-Werkstoff vorrangig für die Fertigung hoch optimierter Bauteile mit überdurchschnittlichem Marktwert, jedoch weniger für generische Fahrzeugkomponenten. Für solche Produkte ist AlSi10Mg wesentlich günstiger und auch weniger ressourcenrelevant.

Darüber hinaus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass der Einsatz einer hochfesten Stahllegierung, beispielsweise eines für LBM-Prozesse häufig verwendeten Maraging-Stahlpulvers (Festigkeit ca. 2200 MPa), ein ebenso erhebliches Einsparpotenzial birgt. Bei gleicher Festigkeit lässt sich hier ein geringeres Bauteilvolumen als mit Aluminiumlegierungen realisieren. Die LBM-Fertigung von Werkstücken mit geringem Volumen benötigt weniger Energie für den Schmelzvorgang. Hieraus würde nicht nur ein deutlich geringerer Pulverbedarf resultieren, sondern auch eine deutlich geminderte Fertigungsdauer. Hingegen hat der höhere Schmelzpunkt von Stahl nur geringen Einfluss auf den Energiebedarf des laserbasierten selektiven Schmelzprozesses. Je nach Anwendungsfall sollten somit die Entscheidungsfaktoren ‚spezifische Werkstoffeigenschaften‘ und ‚Werkstückgeometrie‘ unterschiedlich bewertet werden.

Die mittels numerischer Strukturoptimierung erzielte Massenreduktion der additiv gefertigten Referenzbauteile war im gegebenen Anwendungskontext der Referenzbauteile zu gering, um den Treibstoffverbrauch eines Fahrzeugs im Gebrauch deutlich zu reduzieren. Bei anderen Anwendungsgebieten, wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt, würde die Leichtbauweise wesentlich stärkeren Einfluss auf die Verringerung der für Hubarbeit und Beschleunigung benötigten Treibstoffmengen haben. Gleichwohl ist die Strukturoptimierung eine notwendige Voraussetzung zur Nutzung der

---

<sup>76</sup> Vgl. EU-Kommission (2017).

LBM-Technologie. Ohne Strukturoptimierung würden die in dieser Studie ermittelten ökonomischen und ökologischen Kennwerte der additiven Fertigung ungünstiger ausfallen.

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung in Kapitel 5.3 zeigen, dass die Anwendung der additiven Fertigung für den gewählten Anwendungsfall, also der Herstellung von 10.000 Dämpfergabeln, wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Sie ist bei Anwendung von AlSi10Mg, dem günstigeren Werkstoff, immer noch um den Faktor 40 teurer als die konventionelle Fertigung.

Neben den Investitionskosten sind bei der additiven Fertigung auch die Material- und Betriebskosten wesentlich höher als bei einer konventionell industriellen Fertigung. Insbesondere zu nennen sind hier die Kosten für das Pulver (v. a. bei Verwendung von Scalmalloy<sup>®</sup>) sowie die Wartungskosten der LBM-Anlagen. Die Herstellung von Bauteilen mit relativ einfacher Geometrie und geringem Marktpreis erreicht nicht die Höhe der Wertschöpfung, die erforderlich wäre, um die Nutzung der gegenwärtig noch sehr teuren LBM-Technologie zu amortisieren. Für die hier betrachtete Losgröße (10.000 Stück) ist die konventionelle Fertigung zum gegenwärtigen Zeitpunkt deutlich günstiger. Gleichzeitig ist jedoch hervorzuheben, dass die wirtschaftliche Bewertung stark vom jeweilig betrachteten Anwendungsfall abhängt. Generelle Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung sind deswegen nicht möglich. Vielmehr bietet diese Studie einen detaillierten Einblick in die Bewertungsmechanismen und Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt, um solide Entscheidungen bezüglich der Investition in additive Fertigungsverfahren zu tätigen.

In der Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass technologische Innovationen bei additiven Fertigungsanlagen deren Wirtschaftlichkeit in Zukunft deutlich verbessern könnten. Allein die in Kapitel 5.4.1 genannten technischen Optimierungen bewirken eine deutliche Steigerung der Produktivität von LBM-Anlagen. Dies bewirkt eine Reduktion der Maschinenzeit pro Werkstück und würde bei gleicher Losgröße eine geringere Anzahl von LBM-Anlagen erforderlich machen. Der Stückpreis konnte so, beispielsweise bei der Verwendung von AlSi10Mg, um fast 80 % reduziert werden.

Allerdings ist anzunehmen, dass die Materialkosten für das Pulver weiterhin deutlich über den Materialkosten der konventionellen Fertigung liegen. Die Pulverherstellung wird weiterhin einen zusätzlichen Kostenfaktor in der gesamten Wertschöpfungskette darstellen. Deshalb bleibt die LBM-basierte Fertigung in absehbarer Zukunft noch mindestens um den Faktor 10 teurer als die konventionelle Fertigung (zumindest im hier betrachteten Anwendungskontext).

## 6.2 Einschätzung der Relevanz und des Geltungsber reichs unter Berücksichtigung der getroffenen An nahmen

Unter den in dieser Studie angenommenen Rahmenbedingungen könnte die additive Fertigung ihre technologischen Vorteile nur bei sehr kleiner Losgröße ausspielen. Hier wären die Stückkosten der konventionellen Fertigungsverfahren ebenfalls hoch. Allerdings würde im Fall der konventionellen Fertigung bei kleinerer Losgröße als 10.000 Stück pro Jahr nicht das in dieser Studie betrachtete Gießverfahren eingesetzt werden.<sup>77</sup> Dieses ist auf wesentlich größere Stückzahlen ausgelegt. Stattdessen würden für konventionell herzustellende Kleinserien andere Fertigungsverfahren, wie beispielsweise CNC-Fräsen oder Gießen mit verlorener Form, genutzt werden. Diese alternativen Fertigungsverfahren weisen andere ökonomische und ökologische Kennwerte auf, die im Rahmen dieser Studie zwar nicht betrachtet wurden, jedoch weitere interessante Erkenntnisse bezüglich eines Vergleichs von additiven und konventionellen Fertigungsverfahren erzeugen würden.

Ein wesentlicher Vorteil der additiven Fertigung liegt in der Möglichkeit zur topologischen Strukturoptimierung von Leichtbauteilen. Diese konnten mit dem in dieser Studie betrachteten Referenzbauteil nicht vollends ausgereizt werden, da die (aus Gründen der Vergleichbarkeit gewählte) Anlehnung an das konventionelle Automobildesign nur eine geringe Gestaltungsfreiheit gestattete. Durch ein explizit auf additive Fertigung optimiertes Gesamtdesign von komplexen Produktsystemen, wie beispielsweise

---

<sup>77</sup> Das Verfahren wurde dennoch gewählt, da über den Automobilhersteller Praxisdaten für den Produktionsprozess für die ökologische und ökonomische Bewertung zur Verfügung standen.

Automobilen oder Flugzeugen, lässt sich das Leichtbaupotenzial von Einzelkomponenten umfassender erschließen. Dadurch würde sich die Wirtschaftlichkeit der additiven Verfahren verbessern und auch deutlichere Energiespareffekte in der Nutzungsphase mobiler Produkte erzielen. Eine umfangreiche Strukturoptimierung in Verbindung mit der Wahl kostengünstigerer Werkstoffe (z. B. Stahlpulver statt Aluminiumlegierung) könnte die Fertigung mittels LBM gegenüber der konventionellen Fertigung im Einzelfall konkurrenzfähig machen. Dabei kommt es jedoch sehr stark auf die zugrunde liegenden Geschäftsmodelle an. Beispielsweise bleibt die Serienfertigung von Bauteilen mit identischem Design in absehbarer Zeit den konventionellen Fertigungsverfahren vorbehalten. Hingegen lohnt sich die additive Fertigung für die Serienfertigung individualisierter Bauteile, wie z. B. digital modifizierbare Unikate mit bionischen Strukturen, welche Funktions- und Integralbauweisen ermöglichen. Trotz des hohen Potenzials der numerischen Strukturoptimierung ist festzuhalten, dass die Materialeffizienz stark von der Werkstoffwahl abhängt.

In Anbetracht der hohen Investitionskosten der LBM-Anlagen ist eine dauerhaft hohe Auslastung der Fertigungskapazität von LBM-Anlagen anzustreben. Dies lässt sich nur durch rationalisierte Geschäftsmodelle erreichen, etwa Fertigung durch Dienstleister, die eine optimierte Bauraumauslastung und weitgehend unterbrechungsfreie Betriebsweise der LBM-Anlagen erreichen können. In Zukunft könnte die Anwendungsbreite der additiven Fertigung ausgeweitet werden. Dazu erscheint allerdings eine verbesserte verfahrenstechnische Toleranz der LBM-Technologie notwendig, um die Nutzung von kostengünstigen Pulverwerkstoffen zu ermöglichen. Geringere Anforderungen an Legierungsbestandteile, Körnungsqualität und Homogenität der Pulverwerkstoffe könnten helfen, Kostennachteile und höhere Umweltwirkungen gegenüber dem in der konventionellen Fertigung eingesetzten Werkstoffen abzumildern. Bei Titanlegierungen beispielsweise, wo die konventionelle Fertigung einen subtraktiven Fräsvorgang mit erheblichem Materialverlust umfasst, könnte die additive Fertigung bereits in naher Zukunft ökonomisch wie ökologisch besser abschneiden. Dies liegt u. a. darin begründet, dass sich nicht aufgeschmolzenes Pulver direkt wiederverwerten lässt, während sich Titanspäne aus der spanenden Verarbeitung aufgrund der Verunreinigung mit Kühl-



schmierstoffen nicht in einen geschlossenen Recyclingkreislauf rückführen lassen.

Zusammenfassend kann die additive Fertigung als Ergänzung zur konventionellen Fertigung verstanden werden. Es ist zu vermuten, dass Innovationen die Prozessabläufe von additiven Fertigungsverfahren optimieren und damit weitere bzw. neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Dadurch können konventionelle Fertigungsverfahren im Schnittmengenbereich beider Technologien (Losgröße) ressourceneffizient ersetzt werden. Hierzu bietet die vorliegende Studie einen beispielhaften Einblick in Bewertungsmechanismen, die eine Entscheidungsfindung bezüglich Investitionen in additive Fertigungsverfahren unterstützen können.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

**Baumers, M.; Tuck, C.; Bourell, D. L.; Sreenivasan, R.; Hague, R. (2011):** Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225. Jahrgang.

**Bierdel M.; Pfaff A. (2017):** Ressourceneffizienz wie in der Natur durch intelligentes Leichtbaudesign für den Herstellungsprozess der Additiven Fertigung [online]. Verfügbar unter: <http://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/120025/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=120025&MODE=METADATA>

**Buchbinder, D. F. S. (2013):** Selective Laser Melting von Aluminiumgusslegierungen. 1. Auflage, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 978-3-8440-2439-5.

**DIN EN ISO 14044:2006:** Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**DIN 8580:2003-09:** Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**Ecoinvent (2018):** Swiss Centre for Life Cycle Inventories: ecoinvent 3.5. Ökobilanzdatenbank. Zürich 2018.

**EU-Kommission (2017):** COM(2017) 490 final - Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. Brüssel.

**Faludi, J.; Bayley, C.; Bhogal, S.; Iribarne, M. (2015):** Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. In: Rapid Prototyping Journal, 21. Jahrgang.

**Ford, S.; Despeisse, M. (2016):** Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier, 137. Jahrgang, ISSN 0959-6526.

**Frees, N. (2008):** Crediting aluminium recycling in LCA by demand or by disposal. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer Verlag, ISSN 1614-7502.

**Gartner, J.; Maresch, D.; Fink, M. (2014):** Generative Fertigungsverfahren: Technologieabschätzung. In: FI-JKU Bericht 2014. Linz: IFI – Institute for Innovation Management.

**Gebhardt, A. (2013):** Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-446-43651-0.

**Gebler, M.; Schoot Uiterkamp, A. J. M.; Visser, C. (2014):** A global sustainability perspective on 3D printing technologies. In: Energy Policy, Elsevier, 74. Jahrgang, ISSN 0301-4215.

**Helms, H.; Kräck, J. (2016):** Energy savings by light-weighting - 2016 Update [online]. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Dezember 2016 [abgerufen am: 06. März 2019], verfügbar unter: [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2018/01/02/ifeu\\_-\\_energy\\_savings\\_by\\_light-weighting\\_2016\\_update\\_final\\_3-2017\\_corrected\\_12-2017.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2018/01/02/ifeu_-_energy_savings_by_light-weighting_2016_update_final_3-2017_corrected_12-2017.pdf)

**Hoschke, K.; Pfaff, A.; Fleig, L.; Bierdel, M.; Jäcklein, M; Riedel, W.; Hiermaier, S. (2018):** A parametric mesostructural approach for robust design of additive manufacturing parts. In: Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2018. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, ISBN: 978-3-8396-1320-7.

**Huang, S. H.; Liu, P.; Mokasdar, L.; Hou, L. (2013):** Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Heft 5-8, 67. Jahrgang, ISSN 1433-3015.

**ISO/DIS 20195:2015(E):** Standard Practice - Guide for Design for Additive Manufacturing. International Organization of Standards, 7. Mai 2015, ICS: 25.040.20, Schweiz.

**Jacob, S. (2014):** Titan-Recycling: Vom Span zum Hochleistungsbauteil. [online]. Phi Produktionstechnik, 10. Juni 2014 [abgerufen am 06. März 2019], verfügbar unter: <http://www.phi-hannover.de/forschung/artikel/detail/titan-recycling-vom-span-zum-hochleistungsbauteil/>

**Kianian, B. (2016):** 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. 21. Auflage, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, USA, ISBN 978-0-9913332-2-6.

**Kohtala, C. (2015):** Addressing sustainability in research on distributed production: An integrated literature review. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier, 106. Jahrgang, ISSN 0959-6526.

**Leroy, C. (2008):** Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry: Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe.

**Morrow, W. R.; Qi, H.; Kim, I.; Mazumder, J.; Skerlos, S. J. (2007):** Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier, Heft 10, 15. Jahrgang.

**Norgate, T. E. (2001):** A Comparative Life Cycle Assessment of Copper Production Processes. In: CSIRO Minerals Report DMR-1768, CSIRO Minerals.

**Nuss, P.; Eckelman, M. J. (2014):** Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis [online]. PLoS ONE, 7. Juli 2014 [abgerufen am: 06. März 2019], verfügbar unter: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0101298>

**openLCA (2018):** LCIA-Methodenpack 2.0.3, verfügbar unter: <https://nexus.openlca.org/>.

**Pfaff, A.; Bierdel, M.; Hoschke, K.; Wickert, M.; Riedel, W.; Hiermaier, S. (2018) (under review):** Resource Analysis Model and Validation for SLM, Constituting of the Lightweight Design for Material Efficiency. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier.

**ReCiPe (2016):** ReCiPe-LCIA-Methode, verfügbar unter: <http://www.lcia-recipe.net/>.

**Richter, S.; Wischmann, S. (2016):** Additive Fertigungsmethoden - Entwicklungsstand, Marktperspektiven für den industriellen Einsatz und IKT-spezifische Herausforderungen bei Forschung und Entwicklung. VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: <https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Additive-Fertigungsmethoden-2016.pdf>

**Sigmund, O.; Maute, K. (2013):** Topology optimization approaches: A comparative review. In: Structural and Multidisciplinary Optimization, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, Heft 6, 48. Jahrgang, ISSN 1615-1488.

**Telenko, C.; Seepersad, C. C. (2012):** A Comparison of the Energy Efficiency of Selective Laser Sintering and Injection Molding of Nylon Parts. In: Rapid Prototyping Journal, Heft 6, 18. Jahrgang.

**VDI 3405 Blatt 2.1. (2015):** Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**VDI 4600:2012-01:** Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

**VDI 4800 Blatt 1:2016-02:** Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

**VDI 4800 Blatt 2:2018-03:** Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

**Walzl, A.; Buchmayr, B. B. (2017):** Topologieoptimierung - Entwicklungswerkzeug für die additive Fertigung. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Springer Vienna, Heft 3, 162. Jahrgang, ISSN 1613-7531.

## ANHANG A

### Ausführungen zu Strukturoptimierungen

Ein moderner Designansatz ist die Nutzung von Strukturoptimierungsmethoden und -Algorithmen im Designprozess. Durch diese können Konstrukteure auch bei komplexen technischen Problemstellungen im Designprozess unterstützt und Arbeitsschritte automatisiert werden. Zudem vereinfachen automatisierte Designentwürfe und Formanpassung die Nutzung von komplexen Geometrien in der Designlösung, was ein Konstrukteur manuell nicht leisten könnte.<sup>78</sup>

Durch das geeignete Setzen von Optimierungszielen und Randbedingungen für die Strukturoptimierung ist es möglich, dass Bauteile eine verbesserte Leistung (beispielsweise Steifigkeit, Vibrations- oder Thermalverhalten) bei geringem Bauteilgewicht aufweisen. Dieser Leichtbau im Design ist bei der additiven Fertigung von besonderem Interesse. Im Gegensatz zu den konventionellen (beispielsweise abtragenden) Fertigungsverfahren wird bei der additiven Fertigung nur dort Material aufgebaut, wo es auch wirklich benötigt wird. Je weniger Masse ein Bauteil hat, desto schneller und ressourcenschonender kann es additiv gefertigt werden. Leichtbau wird bei der additiven Fertigung somit zum ökonomischen Imperativ, um unternehmerische Anforderungen wie das Senken von Material- und Betriebskosten zu realisieren<sup>79</sup>.

Die Anforderungen an CAD-Programme verändern sich ebenfalls. Traditionell werden die CAD-Programme für das parametrische Gestalten von Bauteilen benutzt. Hierbei werden Parameter, wie die Wandstärke einer Rippe, in der Konstruktion exakt eingegeben. In Bezug auf die additive Fertigung stellt die parametrische Beschreibung allerdings eine Restriktion in der möglichen Komplexität der Formgebung dar. Denn die Designfreiheit bei der additiven Fertigung erlaubt völlig neue Formen, die sich parameterbasiert nur sehr schwer oder oftmals auch gar nicht beschreiben lassen. So zeigt die Entwicklung der vergangenen Jahre, dass immer mehr Anbieter

---

<sup>78</sup> Vgl. Sigmund, O.; Maute, K. (2013), S. 1031-1055.

<sup>79</sup> Vgl. Bierdel, M und Pfaff, A. (2017).

---

von CAD-Programmen Freiform-Designmöglichkeiten in ihre Software integrieren und es dem Konstrukteur so ermöglichen, beliebige Strukturen in der CAD-Umgebung zu entwickeln und zu konstruieren. Ein weiterer zu beobachtender Trend ist die Integration von Strukturoptimierungsmethoden wie der Topologieoptimierung in die CAD-Programme. Der Konstrukteur wird somit in die Lage versetzt, optimierte Designkonzepte für definierte Belastungsszenarien zu berechnen und direkt in der CAD-Umgebung umzusetzen. Einige der gängigsten Hersteller für solche Lösungen sind beispielsweise Altair Engineering, Siemens PLM, Ansys, LSTC oder Dassault Systèmes. Der Vorteil des Einsatzes von Strukturoptimierungsalgorithmen wie der Topologieoptimierung liegt dabei im hohen Automatisierungspotenzial. So ist die entstehende Konstruktion nicht länger von den Erfahrungen des Konstrukteurs abhängig, sondern einzig von den definierten Randbedingungen, welche zu einem optimierten Bauteil führen.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-2759506-0  
Fax +49 30-2759506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit



NATIONALE  
KLIMASCHUTZ  
INITIATIVE