

STUDIE ZUR BEDARFSERMITTLUNG VON ADDITIVEN FERTIGUNGSMETHODEN MIT FOKUS AUF DIE MARITIME WIRTSCHAFT IN DER ERWEITERTEN METROPOLREGION HAMBURG

Im Auftrag des Maritimen Clusters Norddeutschland e. V.

April 2019



Autoren

Ina Ludwig M.Sc. / Jochen Loock M.Sc. / Tobias Kosubek M.Sc.
Dipl.-Ing. Olaf Steinmeier / Christian Franke M.Sc.

Bedarfsermittlung von additiven Fertigungsmethoden mit Fokus auf die maritime Wirtschaft in der erweiterten Metropolregion Hamburg

Im Auftrag des Maritimen Clusters Norddeutschland e. V.

Autoren

Ina Ludwig, M.Sc.
Jochen Looock M.Sc.
Tobias Kosubek M.Sc.
Dipl.-Ing. Olaf Steinmeier
Christian Franke M.Sc.

April 2019

Auftraggeber



Das Netzwerk für die maritime Branche

Schiffbau, Zulieferer, Meerestechnik, Schifffahrt, Offshore und mehr: Die maritime Wirtschaft hat viele Facetten – und enormes Zukunftspotenzial. Sie ist eine Schlüsselbranche im Norden und bestimmt dessen wirtschaftliche Entwicklung wesentlich mit.

Der Verein Maritimes Cluster Norddeutschland (MCN) fördert und stärkt die Zusammenarbeit in der Branche. Wir bündeln Kräfte, bundeslandübergreifend. Wir fördern Kooperationen und Innovationen, sektorübergreifend. Wir unterstützen unter anderem bei der Suche nach Innovationspartnern, beraten zu Fördermitteln und vermitteln Kontakte in die maritime Branche.

Regional und länderübergreifend aktiv

Das MCN ist ein maritimes Netzwerk mit rund 350 Mitgliedern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Mit Geschäftsstellen in Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein sind wir vor Ort. Denn wir wissen: Nur im fortwährenden Dialog mit allen Akteuren können wir herausfinden, welchen Kurs wir setzen, welche Schleusen wir öffnen, welche Häfen wir anlaufen müssen.

Das Maritime Cluster Norddeutschland wurde 2011 gegründet. Zunächst arbeiteten die Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein in dem länderübergreifenden Cluster zusammen, im September 2014 kamen auch Bremen und Mecklenburg-Vorpommern hinzu. Seit Anfang 2017 agiert das MCN als Verein.

Auftragnehmer



Die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT ist Teil der Fraunhofer-Gesellschaft, die eine der führenden Organisationen für angewandte Forschung mit ca. 25.000 Mitarbeitern/innen in Europa ist. Das Fraunhofer IAPT hat sich aus der LZN Laser Zentrum Nord GmbH und Teilen des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik der Technischen Universität Hamburg als eine der weltweit führenden Einrichtungen im wissenschaftlich-industriellen Technologietransfer im 3D-Druck gegründet, und ist in der Forschung und in der Entwicklung der Additiven Produktionstechnologien mit den Schwerpunkten Design, Prozess und Fabrik mit ca. 100 Mitarbeiter/innen an den Standorten Hamburg und Lüneburg tätig. Im Fokus steht die Anwendung additiver Technologien im Flugzeug-, Fahrzeug-, Schienenfahrzeug-, Schiff-, Werkzeug- und Maschinenbau sowie der Medizin- und Kunststofftechnik für die Serienfertigung im Sinne des Rapid und Bionic Manufacturing. Das Fraunhofer IAPT verfolgt dabei das Ziel, seine Kunden für die additive Serienfertigung mit einzigartiger technisch konstruktiver Leistungseffizienz sowie höchster Qualität und Kosteneffizienz im Produkt zu befähigen und über anwendungsorientierte Forschung neue profitable Geschäftsfelder mit Alleinstellungsmerkmalen zu erschließen.

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendung der additiven Fertigung	2
1.1	Branchenübergreifende Anwendungspotentiale von additiven Fertigungsverfahren.....	2
1.1.1	Industrielle Anwendungspotentiale für additive Fertigung	2
1.1.2	Verfahrensbenchmark von additiven Fertigungstechnologien.....	12
1.2	Anwendungspotentiale für die additive Fertigung im maritimen Kontext..	27
1.2.1	Kategorisierung sämtlicher Unternehmen im maritimen Bereich.....	28
1.2.2	Zuordnung theoretischer Anwendungsbeispiele und Bewertung gem. Erfüllungsgrad der Potentiale der additiven Fertigung	31
1.2.3	Fazit	40
1.3	Prüfung der AM-Potentiale bei Unternehmen der maritimen Wirtschaft	42
1.3.1	Bauteilanalyse am Beispiel der Hamburg Port Authority.....	42
1.3.2	Bauteilanalyse am Beispiel von German Naval Yards	45
1.3.3	Bauteilanalyse am Beispiel von Becker Marine Systems.....	47
1.3.4	Bauteilanalyse am Beispiel von Gebr. Potthast Kunststoffspritzguss.....	49
1.3.5	Bauteilanalyse am Beispiel von develogic subsea systems.....	51
1.3.6	Bauteilanalyse am Beispiel von Reintjes Power Train Solutions.....	55
1.3.7	Fazit der Bauteilanalysen	58
2	Identifikation von AM-Dienstleistern in Deutschland entlang der AM- Prozesskette	60
3	Implementierung von Additiver Fertigung in KMU	67
3.1	Hemmnisse für die Implementierung von AM	67
3.1.1	Know-how	68
3.1.2	Technologie.....	69
3.1.3	Regularien.....	69
3.1.4	Kosten.....	70
3.1.5	Business Case	71
3.1.6	Fazit	71
3.2	Best Practice Beispiele für die Implementierung von AM in KMU	72
3.2.1	Implementierung von AM am Beispiel der robomotion GmbH	72
3.2.2	Implementierung von AM am Beispiel der JELL GmbH & Co. KG	74

Literaturverzeichnis.....	77
Abbildungsverzeichnis.....	82
Tabellenverzeichnis.....	84
Impressum	85

Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive Fertigung (Englisch: Additive Manufacturing)
AMA	Additive Fertigungsanlagen bzw. Additive Manufacturing Anlage
AMT	Additive Fertigungstechnologie bzw. Additive Manufacturing Technologie
AMV	Additive Fertigungsverfahren bzw. Additive Manufacturing Verfahren
BJ	Binder Jetting
CNC	Computerized Numerical Control
DED	Directed Energy Deposition
EBM	Elektronenstrahlschmelzen (Englisch: Electron Beam Melting)
FDM	Fused Deposition Modeling
HP	Hewlett Packard
IAPT	Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien
KF	Konventionelle Fertigung
KFV	Konventionelles Fertigungsverfahren
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LBM	Laserstrahlschmelzen (Englisch: Laser Beam Melting)
LMD	Laserbasiertes DED-Verfahren (Englisch: Laser Metal Deposition)
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißen
MCN	Maritimes Cluster Norddeutschland e. V.
MJF	Multi Jet Fusion
OEM	Originalgerätehersteller (Englisch: Original Equipment Manufacturer)
PA	Polyamide (bspw. PA6, PA11, PA12)
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
SLS	Selektives Lasersintern
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
WAAM	Lichtbogenbasiertes DED-Verfahren (Englisch: Wire Arc Additive Manufacturing)

Einleitung

Die industrielle Produktion unterliegt einem ständigen Weiterentwicklungsprozess und passt sich fortwährend an technische Innovationen und wechselnde Kundenbedürfnisse an. Es vollzieht sich ein Wandel von der Massenfertigung zur flexiblen, kundenindividuellen Fertigung. Die industriellen Rahmenbedingungen haben sich hin zu verkürzten Produktlebenszyklen und Entwicklungszeiten, höherer Produktkomplexität und kleineren Stückzahlen je Produktvariante entwickelt. Auch additive Fertigung ist ein Bestandteil davon und kann einen Beitrag dazu leisten, den neuen Produktionsanforderungen gerecht zu werden. Additive Fertigung beschreibt ein Fertigungsverfahren, bei dem Bauteile durch schichtweisen Auftrag von Material aus einem formlosen Rohstoff, wie beispielsweise Metallpulver, generiert werden. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren, wie Drehen, Fräsen oder Gießen, erlauben additive Fertigungsverfahren die wirtschaftliche Herstellung komplexer, organischer Strukturen in kleinen Stückzahlen bis hin zur Losgröße 1.

Die additive Fertigung ist in vielen Industriebereichen bereits weit verbreitet. In der maritimen Branche sind die genauen Potentiale und Möglichkeiten, die die Technologie bietet, bisher wenig bekannt und nicht vollständig genutzt. Des Weiteren ist vielen Akteuren der maritimen Branche unbekannt, welche Unternehmen und Expertise im Bereich additiver Fertigung in der Region und in Deutschland vorhanden sind.

Die vorliegende Studie setzt sich daher zum Ziel, Unternehmen aus der maritimen Branche ein tieferes Verständnis von additiver Fertigung zu geben und die Potentiale von additiver Fertigung mit Fokus auf maritime Anwendungen aufzuzeigen. Hierzu werden im ersten Kapitel Anwendungen von additiver Fertigung erklärt. Dies umfasst einerseits branchenübergreifende Anwendungsbeispiele von additiver Fertigung, aber auch eine Übersicht der verfügbaren additiven Fertigungstechnologien. Anschließend werden die branchenübergreifend aufgezeigten Potentiale von additiver Fertigung auf die maritime Branche übertragen und kategoriespezifisch erläutert. Im letzten Schritt des ersten Kapitels werden die theoretisch analysierten Potentiale für die maritime Branche durch praktische Bauteilanalysen bei Unternehmen aus der maritimen Wirtschaft verifiziert.

Im zweiten Kapitel wird eine Übersicht gegeben, welche Dienstleister es für additive Fertigung in Deutschland und insbesondere im Einzugsgebiet des Maritimen Clusters Norddeutschland gibt. Bei diesen Dienstleistern handelt es sich um potentielle Kooperationspartner, mit denen Projekte mit additiver Fertigung initiiert oder abgewickelt werden können.

Im dritten Kapitel wird die Implementierung von additiver Fertigung in Industrieunternehmen mit Fokus auf KMU betrachtet. Einerseits werden die aktuellen Hemmnisse untersucht, die den Implementierungsprozess von additiver Fertigung in einem Unternehmen behindern können. Andererseits wird aber auch anhand von konkreten Best-Practice Beispielen die erfolgreiche Implementierung von additiver Fertigung dargestellt. Es wird in beiden Fällen der Verlauf von der initialen Idee bis hin zur vollständigen Implementierung von additiver Fertigung in der Serie aufgezeigt.

1 Anwendung der additiven Fertigung

1.1 Branchenübergreifende Anwendungspotentiale von additiven Fertigungsverfahren

In Kapitel 1.1 wird ein Gesamtüberblick über die grundsätzlichen Potentiale vom Einsatz additiver Fertigungsverfahren gegeben. Im ersten Schritt werden dazu in Kapitel 1.1.1 branchenspezifische Anwendungsbeispiele erläutert. Anhand dieser Beispiele werden die sich durch den Einsatz von additiver Fertigung ergebenden Vorzüge gegenüber konventioneller Fertigung aufgezeigt. Im anschließenden Kapitel 1.1.2 werden die verschiedenen kunststoff- sowie metallverarbeitenden additiven Fertigungstechnologien verglichen und der jeweilige Einsatzbereich geschlussfolgert. Auf diese Weise wird zunächst eine Inspiration zur Identifikation von relevanten Bauteilen für die additive Fertigung gegeben und im Anschluss eine Empfehlung ausgesprochen, welche additive Fertigungstechnologie sich im konkreten Anwendungsfall am besten eignet.

1.1.1 Industrielle Anwendungspotentiale für additive Fertigung

In diesem Kapitel wird die Betrachtung der Potentiale von additiver Fertigung (Kurzform: AM von Additive Manufacturing) in industrieller Anwendung vertieft. Um eine hohe Praxisnähe bei der Analyse dieser Potentiale zu gewährleisten, werden sie anhand von Anwendungsbeispielen ausgewählter Industriebranchen aufgezeigt. Das Kapitel ist nach Branchen gegliedert. In jedem der folgenden Unterkapitel werden Anwendungsbeispiele aus einer bestimmten Branche vorgestellt und die entsprechenden Potentiale, die sich im jeweiligen Anwendungsfall durch den Einsatz der additiven Fertigungstechnologie (Kurzform: AMT von Additive Manufacturing Technology) ergeben, analysiert. Durch die Identifikation von Anwendungspotentialen für die additive Fertigung anhand von Anwendungsbeispielen lassen sich in Kapitel 1.2 Rückschlüsse auf Anwendungsfälle von additiver Fertigung im maritimen Kontext ziehen.

Branchenübergreifende Beispiele

Die Produktentwicklung und der After-Sales-Service sind zwei Bereiche in der Wertschöpfungskette, in denen AM branchenübergreifend eingesetzt wird. Da die Verwendung von AM in diesen beiden Bereichen in sämtlichen Branchen ähnlich von statten geht, werden sie in diesem Kapitel branchenneutral erläutert.

Der Einsatz von AM unterstützt den Produktentwicklungsprozess durch die Fertigung von Prototypen. Die Iterationszyklen im Laufe des Produktentwicklungsprozesses lassen sich durch den Einsatz von AM verkürzen, denn durch die werkzeuglose Fertigung gegenüber konventioneller Fertigungsverfahren (KFV) läuft der Prototypenbau deutlich schneller ab. Im Zuge einer solchen Verkürzung der Produktentwicklungsphase, kann der Herausforderung schrumpfender Produktlebenszyklen begegnet werden. AM leistet demnach einen Beitrag zur Prozessoptimierung durch das schnelle und einfache zur Verfügung stellen von Informa-

tionen bei der Produktentwicklung in Form von Prototypen. Physische Prototypen von Bauteilen tragen dazu bei, mögliche Fehlkonstruktionen, die bei der Betrachtung des digitalen Bauteilmodelles unentdeckt blieben, bereits während des Entwicklungsprozesses aufzudecken. Dadurch lässt sich die Qualität des finalen, marktreifen Produktes bereits in frühen Stadien der Produktentwicklung maßgeblich steigern.¹ Es wird zwischen Geometrieprototypen und Funktionsprototypen unterschieden. Bei Geometrieprototypen steht die Beurteilung von Maß, Form und Lage eines Bauteiles im Fokus. Die mechanischen und funktionalen Eigenschaften sind dabei sekundär.² In der Medizintechnikbranche werden solche Geometrieprototypen beispielsweise zur Operationsplanung eingesetzt. Der Arzt kann anhand eines additiv gefertigten Modelles, des Körperteiles an dem die Operation (OP) durchgeführt werden soll, die OP detailgetreu simulieren. Auf diese Weise wird eine individuelle Planung des Eingriffes sichergestellt, um zu effizienteren Ergebnissen für das Krankenhaus und den Patienten zu gelangen. Etwaige Eingriffsrisiken werden durch sehr genaue Trainingsmöglichkeiten reduziert.³ Auch im Maschinen- und Anlagenbau werden Geometrieprototypen eingesetzt. Solche Prototypen können die Layoutplanung einer Fabrik und die räumliche Anordnung von Anlagekomponenten unterstützen, da die Planer durch die physischen Anschauungsobjekte ein besseres Gefühl für die räumlichen Dimensionen bekommen, als es mit digitaler Planungssoftware möglich ist. Angesichts der gestalterischen Freiheiten bei additiv gefertigten Bauteilen, weisen die Anschauungsobjekte einen wesentlich höheren Detailgrad auf, als würden sie konventionell gefertigt werden.⁴ Funktionsprototypen können ebenfalls mittels AM gefertigt werden. Ein beispielhafter Anwendungsfall ist ein neu entwickeltes Getriebe. Die konventionelle Fertigung der sehr komplexen Gehäuseteile wäre kostenintensiv und mit hohen Lieferzeiten verbunden. Angesichts der Unsicherheit über die Funktionsfähigkeit des neu entwickelten Getriebes stellt dies ein hohes finanzielles Risiko dar. Mittels AM lassen sich diese Gehäuseteile günstiger und schneller als mit KF bereitstellen. Zwar ist die mechanische Belastbarkeit der additiv gefertigten Gehäuseteile geringer, allerdings ausreichend, um den Vorserientests des Getriebes standzuhalten. Die Qualität des finalen Getriebes lässt sich auf diese Weise kostengünstig steigern.⁵

Im Bereich des Ersatzteilmanagements kann AM ebenfalls einen Beitrag leisten. Dies gilt insbesondere für Ersatzteile, deren Lagerhaltung oder konventionelle Herstellung sich im Bedarfsfall nicht wirtschaftlich abbilden lässt, weil die Lebensdauer des jeweiligen Bauteiles schwer prognostizierbar ist oder es sich um Einzelanfertigungen handelt. Mit Hilfe von AM können solche Ersatzteile dezentral und verwendungsnah bedarfsgesteuert gefertigt werden. So können Transportwege und Lieferzeiten minimiert werden. Als Folge reduziert sich die Stillstandszeit der zu reparierenden Maschine oder Anlage.⁶ Die Deutsche Bahn ist beispielsweise auf die Wahrung der Einsatzfähigkeit ihrer Züge angewiesen. Zugausfälle sind

¹ [Feld 16] - Feldmann, Pumpe: 3D-Druck Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit. 2016, S. 8/9

² [VDI 3404] - VDI-Richtlinie 3404: Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping). 2009, S. 5

³ [3dgr 17d] - 3d-grenzenlos.de: Britisches Krankenhaus spart bis zu 20.000 Euro pro Operation dank des 3D-Drucks, 2017
[Deut 15] - Deutsches Ärzteblatt: 3D-Drucker hilft bei der OP-Planung, 2015

⁴ [3trp 17a] - 3T Building Success Layer by Layer: 3D Printing for Oil Rig model, 2017

⁵ [3trp 17b] - 3T Building Success Layer by Layer: Plastic AM gearbox prototype gives superb results, 2017

⁶ [Verb 17] - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: AM für die Luftfahrt, 2017

mit Umsatzeinbußen verbunden. Deswegen ist eine schnelle Bereitstellung von Ersatzteilen essentiell. Ausfallkritische Zugkomponenten lassen sich mittels AM bedarfsgesteuert herstellen. Zusätzlich kann die Deutsche Bahn mit Hilfe von AM Ersatzteile für alte Zugmodelle bereitstellen, deren Ersatzteile sich nicht mehr von externen Lieferanten beziehen lassen.⁷

Eine Möglichkeit der Vor-Ort-Produktion bieten transportfähige additive Fertigungszentren als Containerlösung (siehe Abbildung 1). Solche additiven Fertigungszellen decken im Idealfall die gesamte additive Prozesskette ab, um auch in produktionsungeeigneten Umgebungen Ersatzteile fertigen zu können. Ein im Umgang mit der eingesetzten Analagentechnologie geschulter Techniker, kann die AM-Fertigungszelle bedienen.



Abbildung 1: Transportable additive Fertigungszelle⁸

Auch der Automobilhersteller Mercedes-Benz produziert Ersatzteile mit AM. Thermostatabdeckungen für LKW aus älteren Baureihen werden additiv aus Metall gefertigt und weisen dabei Originalteilqualität auf. Der Bedarf an diesem Ersatzteil ist angesichts des Alters der Baureihe gering, weshalb es nicht wirtschaftlich ist, einen hohen Lagerbestand an konventionell gefertigten Thermostatabdeckungen vorzuhalten. Durch den Einsatz von AM ist Mercedes-Benz in der Lage die Ersatzteillagerbestände zu reduzieren und trotzdem bedarfsgerecht Ersatzteile bereitstellen zu können.⁹

Ein weiterer Anwendungsbereich von additiver Fertigung ist der Formenbau für das Sandgussverfahren. Es wird in diesem Fall nicht das finale Bauteil, sondern die zum Gießen erforderliche Sandgussform additiv generiert. Es lassen sich damit Sandgussformen herstellen, die konventionell wegen sehr komplexer Kernformen mit Hinterschneidungen nicht realisierbar waren. Die bisher notwendigen Aushebeschrägen zum Entnehmen der Modelle aus der Sandform haben dadurch beispielsweise an Bedeutung verloren. Additiv gefertigte können im Vergleich zu konventionell gefertigten Formen zusätzlich kosteneffizienter und mit verkürzter Bereitstellungszeit gefertigt werden.

Das Auftragsschweißen ist eine additive Fertigungstechnologie, die sich insbesondere für die Fertigung von metallischen Großstrukturen eignet. Ein typischer Einsatzbereich dieser ist

⁷ [Deut 17a] - Deutsche Bahn: 3D-Druck: Neue Fertigungstechnik für Ersatzteile, 2017

⁸ [Hens 18] - Hensoldt: „AM Suite – Die 3D-Druck Lösung“, 2018

⁹ [Daim 17] - Daimler AG: Mercedes-Benz Lkw: Neu aus dem 3D-Drucker: erstes Lkw-Ersatzteil aus Metall, 2017

einerseits die Instandhaltung, um beispielsweise Verschleißbereiche von Turbinenschaufeln additiv instand zu setzen. Anstatt die gesamte Turbinenschaufel auszutauschen und gegen eine neue Schaufel zu ersetzen, ermöglicht es additive Fertigung die Verschleißbereiche der Schaufel lokal, nach einem Planfräsen der betroffenen Bereiche, neu aufzubauen. Ein weiterer Einsatzbereich des Auftragsschweißens ist die Fertigung von Bauteilrohlingen (siehe Abbildung 2). Im Gegensatz zum Fräsen ist das Auftragsschweißen materialeffizienter, da kein Spanabfall entsteht. Im Vergleich zum Gussverfahren lassen sich bereits kleinste Stückzahlen eines Bauteils wirtschaftlich fertigen, da keine initialen Werkzeugformkosten anfallen. Nach Fertigstellung des Bauteilrohlings wird dieser an den Fügeflächen spanend nachbearbeitet, um eine ausreichende Maßhaltigkeit des Bauteils sicherzustellen.



Abbildung 2: Additive Fertigung des Rohlings (links) und spanende Nachbearbeitung des Rohlings (rechts)¹⁰

Tabelle 1 fasst die Potentiale zusammen, mit denen AM die Anwendungsbereiche Prototypenbau (1.1), Ersatzteilversorgung (1.2), Formenbau (1.3) und Rohlinge für Großstrukturen (1.4) unterstützt. Die Zuordnung der Anwendungspotentiale erfolgt anhand einer dreistufigen Skala. Wenn ein Anwendungsbeispiel sich ein bestimmtes AM-Anwendungspotential nicht zu Eigen machen kann, so gilt „kein Erfüllungsgrad“. Falls eines der AM-Anwendungspotentiale einen direkten und maßgeblichen Einfluss auf die Optimierung des Anwendungsbeispiels hat, so gilt ein „hoher Erfüllungsgrad“. Dies trifft beispielsweise auf den „Prototypenbau“ im Hinblick auf das AM-Potential „Einführungszeitreduzierung“ zu. Mit AM ist es möglich den Produktentwicklungsprozess durch physische Verifikationsmodelle zu verkürzen und so die Produkteinführung zu beschleunigen. Für den Fall, dass ein AM-Anwendungspotential einen indirekten Einfluss auf die Optimierung des Anwendungsbeispiels hat, gilt ein „mittlerer Erfüllungsgrad“.

¹⁰ [Dmg 19] - DMG Mori: „LASERTEC 65 3D hybrid - Hybride Komplettbearbeitung“, 2019

Tabelle 1: Branchenübergreifende Potentialausprägungen von additiver Fertigung

			Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
			Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Einführungszeitreduzierung
Branche	Nr.	Anwendungsbeispiel									
Branchenübergreifend	1.1	Prototypen									
	1.2	Ersatzteile									
	1.3	Formenbau									
	1.4	Rohling für Großstruktur									

Bewertungssystematik
 = Hoher Erfüllungsgrad
 = Mittlerer Erfüllungsgrad
 = Kein Erfüllungsgrad

Beispiele aus der Maschinen- und Anlagenbaubranche

In der Maschinen- und Anlagenbaubranche wird AM ebenfalls eingesetzt. Anhand von fünf Anwendungsbeispielen werden die Vorteile, die der Einsatz von AM in dieser Branche mit sich bringt, aufgezeigt: Werkzeugbau, Ventilblock, Dosenfüllventil und Gasturbinenbrenner.

Bei werkzeugaustypischen Verfahren, wie der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen und Druckgusskernen, können die Grenzen des Machbaren durch AM ausgeweitet werden. Werkzeugeinsätze für das Spritzgussverfahren lassen sich additiv effizient, schnell und flexibel herstellen, da AM im Vergleich zu KF neue gestalterische Möglichkeiten zu niedrigen Fertigungskosten bietet. Ein hierfür charakteristisches Beispiel stellt das in Abbildung 3 gezeigte Spritzgusswerkzeug dar.

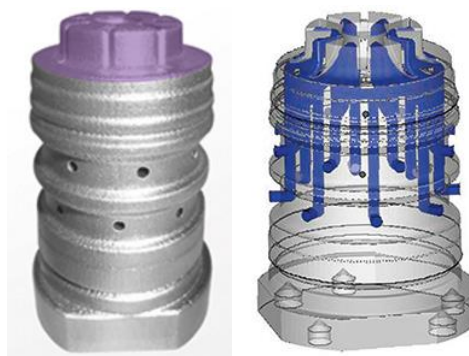


Abbildung 3: Spritzgusswerkzeug (links) und Kühlkanäle im Spritzgusswerkzeug (rechts)¹¹

Durch den Einsatz von AM ist es möglich, dem Werkzeug innenliegende Kühlkanäle und minimierte Wandstärken zu verleihen. Es wird folglich die Funktion „gezieltes Kühlen“ in das Bauteil integriert. Dadurch lassen sich Spritzgusszyklen bei höherer Bauteilqualität be-

¹¹ [Eos 17] - EOS GmbH: Powerful EOSINT M 280 supersedes hybrid solution of the tool insert, 2017

schleunigen, da ein Spritzgussbauteil nun schneller abkühlt. Außerdem wird durch die konstante Kühlung die Lebenszeit des Spritzgusswerkzeuges deutlich verlängert, weil die Temperaturprofile homogenisiert werden.¹²

Auch beim metallischen Druckguss können Gusskerne durch AM individuell und flexibel hergestellt werden. Beim Guss von hohlen Bauteilen werden Kerne, bei denen es sich um verlorene Formen handelt, eingesetzt. Konventionell werden diese Kerne mit dem Kernschießverfahren gefertigt. Für die Herstellung des Kerns ist eine gesonderte Form erforderlich. Diese entfällt durch den Einsatz von AM zur Kernherstellung. Außerdem stößt das konventionelle Verfahren bei komplexen Kernen in geringer Stückzahl an seine Grenzen, da die Herstellung einer Kernform auf konventionelle Weise kostenintensiv ist. Änderungen oder Skalierungen lassen sich mit dem werkzeuglosen additiven Fertigungsverfahren (AMV) hingegen ohne Mehrkosten realisieren.¹³

Ein weiteres Beispiel für den erfolgreichen Einsatz von AM sind Ventilblöcke. Konventionell gefertigte Ventilblöcke werden aus einem Rohmaterialblock gefräst und die entsprechenden Kanäle in den Block gebohrt (siehe Abbildung 4 links). Durch den Einsatz von AM ist es möglich, den Ventilblock konstruktiv grundlegend umzugestalten und somit dessen Eigenschaften zu optimieren. Additiv müssen die Kanäle nicht rund und gerade sein, sondern können in fließkritischen Bereichen oval und ansonsten beliebig geformt sein.¹⁴ Diese neuen gestalterischen Möglichkeiten steigern die Fließleistung des Ventilblocks. Zudem wird mittels einer AM-Software eine Topologieoptimierung durchgeführt. Basierend auf einer Finite-Elemente Berechnung werden festigkeitsirrelevante Materialbereiche aufgelöst. So lässt sich das Gewicht des Ventilblocks um über 75% reduzieren, was eine deutliche Materialeinsparung zur Folge hat (siehe Abbildung 4 rechts).¹⁵ Trotz dieser topologischen Optimierung weist der additiv gefertigte Ventilblock die gleichen Festigkeits- und Dichteigenschaften wie ein konventionell aus Vollmaterial gefertigter Ventilblock auf. Zudem besteht durch den Einsatz von AM die Möglichkeit, das Design des Ventilblocks an Kundenanforderungen anzupassen, ohne dass dabei Mehrkosten in der Fertigung entstehen, weil diese werkzeuglos erfolgt.

¹² [Arbe 17] - Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing: Technology Scout. 2017, S. 21

[Eos 17] - EOS GmbH: Powerful EOSINT M 280 supersedes hybrid solution of the tool insert, 2017

¹³ [Arbe 17] - Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing: Technology Scout. 2017, S. 20

¹⁴ [Vtt 17] - VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: Case Study: Hydraulic valve block. 2017, S. 2

¹⁵ [Vtt 17] - VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: Case Study: Hydraulic valve block. 2017, S. 7



Abbildung 4: Ventilblock konventionell gefertigt (links) und Ventilblock additiv gefertigt (rechts)¹⁶

Auch Füllventile von Abfüllanlagen für Getränkedosen sind ein Beispiel, an dem die Potentiale von AM deutlich werden. Ursprünglich werden Dosenventile konventionell gefertigt, sodass es aus sieben Komponenten wie Frästeile, Dichtungen und Schrauben montiert werden muss (siehe Abbildung 5 links). Durch eine Umkonstruktion des Dosenfüllventils kann es nun additiv in einem Arbeitsgang gefertigt werden (siehe Abbildung 5 rechts). Dadurch entfallen die Abdichtungen und Fügstellen. Der Entfall des Montageaufwandes bringt nicht nur Fertigungskostenvorteile mit sich, sondern senkt auch die Stillstandzeiten der Abfüllanlage. Die Herstellungszeit lässt sich durch AM um bis zu 90% auf eine Woche reduzieren.¹⁷ Es wird also möglich, das Ventil bei Bedarf herzustellen, anstatt es vorzuhalten. Als Nebeneffekt ist das Dosenfüllventil noch um 35% leichter geworden und bei Bedarf lassen sich weitere Funktionen wie Kühlung oder Sensorik integrieren.¹⁸



Abbildung 5: Dosenfüllventil konventionell gefertigt (links) und Dosenfüllventil additiv gefertigt (rechts)¹⁹

In technologisch anspruchsvollen Maschinenbauanwendungen wie beispielsweise Gasturbinen sind ebenfalls additiv gefertigte Komponenten verbaut. In Gasturbinen verbaute Komponenten werden extrem hohen Temperaturen, Zentrifugalkräften sowie Geschwindigkeiten ausgesetzt.²⁰ Die daraus resultierenden, hohen mechanischen Anforderungen können additiv gefertigte Bauteile erfüllen. Den Brenner der Gasturbine, der vorher aus 13 Teilen gefertigt worden ist, erstellt eine AMA in einem Stück, mit 25% Gewichtseinsparung.

¹⁶ [Vtt 17] - VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: Case Study: Hydraulic valve block. 2017, S. 2/9

¹⁷ [Verp 17] - Verpackungsrundschau: Ersatzteile on demand im 3D-Metalldruck, 2017

¹⁸ [Arbe 17] - Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing: Technology Scout 2017. 2017, S.18

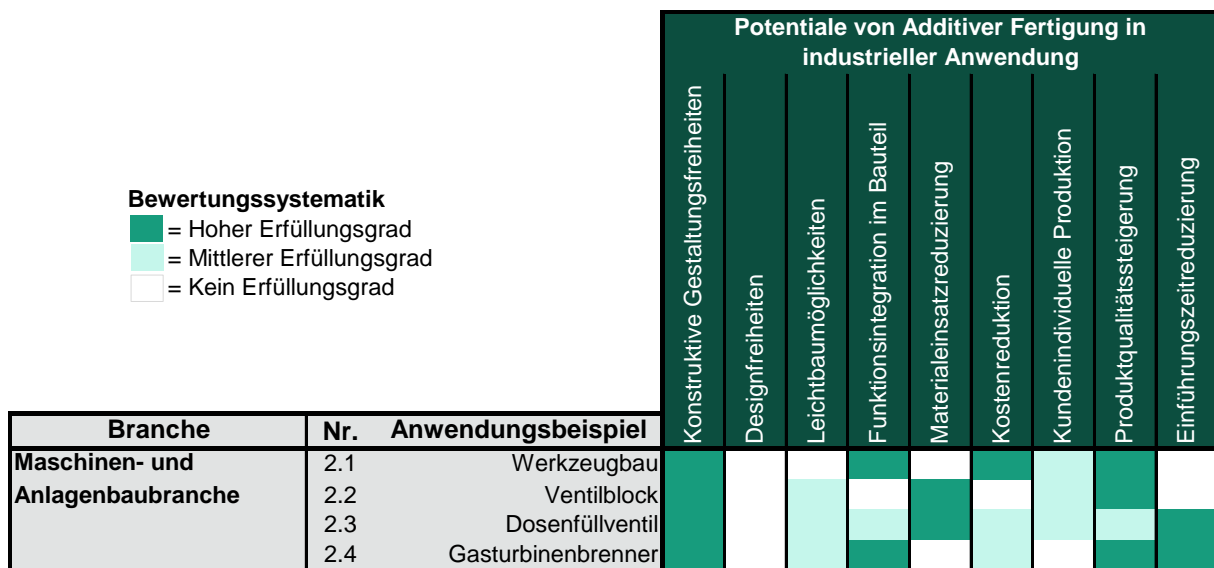
¹⁹ [Vtt 17] - VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: Case Study: Hydraulic valve block. 2017, S. 2ff

²⁰ [Siem 17a] - Siemens AG: Zahlen und Fakten zum Mehrwert von Additive Manufacturing, 2017

Die Treibstoff- und Luftleitungen, die vorher außerhalb des Brenners gelegen haben, können durch AM in das Brennergehäuse integriert werden, was das Risiko von Beschädigungen deutlich reduziert. Außerdem verfügt der Brenner über eine nur durch AM erzeugbare Gitterstruktur, die Treibstoff spart und den Wirkungsgrad der Turbine erhöht.²¹

Tabelle 2 fasst die Potentiale zusammen, mit denen AM die vorgestellten Anwendungsbeispiele Werkzeugbau (2.1), Ventilblock (2.2), Dosenfüllventil (2.3), Gasturbinenbrenner (2.4) unterstützt.

Tabelle 2: Potentialausprägungen von additiver Fertigung in der Maschinen- und Anlagenbaubranche



Beispiele aus der Luft- und Raumfahrtbranche

In der Luftfahrtindustrie wird AM ebenfalls verwendet. Zentrale Zielsetzung dieser Branche ist es, die Betriebskosten der Flugzeuge zu senken. Durch Gewichtseinsparungen kann der Treibstoffverbrauch maßgeblich gesenkt werden. Aus diesem Grunde werden die Leichtbaumöglichkeiten von AM vorrangig in der Luftfahrtbranche ausgenutzt.

Der in Abbildung 6 dargestellte Kabinenhalter stellt hierfür ein typisches Beispiel dar. Dieser Kabinenhalter dient der Befestigung des Crew-Ruheraums in einem Langstreckenflugzeug des Flugzeugherstellers Airbus.²² Durch eine Optimierung der Topologie des Halters können die Kraftflüsse gezielt aufgefangen werden und dadurch der Ansatz des Leichtbaus realisiert werden (siehe Abbildung 6 unten). Der überarbeitete Kabinenhalter ist deswegen um ein Drittel leichter als der konventionell gefertigte. Bereits ein Kilogramm weniger Gewicht spart

²¹ [Siem 17] - Siemens AG: Additive Manufacturing für Gasturbinen, 2017

²² [Verb 17] - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: AM für die Luftfahrt, 2017

bis zu 30 Tonnen Kerosin im Jahr.²³ Außerdem wird der Materialverbrauch deutlich gesenkt, da das Bauteil nicht mehr aus Vollmaterial gefräst werden muss.



Abbildung 6: Kabinenhalter konventionell gefertigt (oben) und Kabinenhalter additiv gefertigt (unten)²⁴

Insbesondere in der Luftfahrtindustrie ist die Bauteilverlässlichkeit von zentraler Bedeutung. Im Gegensatz zu am Boden fahrenden Fahrzeugen, hat ein Bauteilversagen bei einem Flugzeug verheerende Folgen. Aus diesem Grunde sind die Zulassungsvoraussetzungen in dieser Branche besonders umfangreich. Angesichts der Neuartigkeit der AMT, sind die Qualitätstests von additiv gefertigten Flugzeugbauteilen entsprechend streng und es werden alle Bauteile einzeln einem Test der mechanischen Eigenschaften unterzogen. Um diesen Qualitätssicherungsaufwand zu reduzieren, werden zunehmend aktive Qualitätskontrollen bereits während des Fertigungsprozesses durchgeführt. Kameras überwachen den Fertigungsprozess live, sodass eine 3D-Landkarte des Bauteils entsteht und lokale Hinweise auf fehlerhafte Stellen im Bauteil liefert.²⁵ Zukünftig soll der Einsatz von AM-Bauteilen in der Luftfahrtbranche noch weiter vorangetrieben werden. Im Zuge steigender Prozessstabilität der AMT können neben sicherheitsunkritischen Bauteilen, wie beispielsweise Kabinenhaltern, auch sicherheitskritische Strukturbauteile additiv gefertigt werden.

Der Rohrkrümmer für ein militärisches Transportflugzeug, bei dem es sich um ein in das Kraftstoffsystem eingebautes doppelwandiges Rohr handelt, ist ein Beispiel für additiv gefertigte Bauteile, für die höchste Sicherheitsanforderungen gelten (siehe Abbildung 7).²⁶ Knapp ein Jahr hat die Qualifikationsphase des Rohrkrümmers gedauert, bei der dem Luftfahrt-Bundesamt sowie der europäischen Agentur für Flugsicherheit nachgewiesen werden musste, dass die additiv gefertigten Bauteile alle Anforderungen für die Luftfahrt erfüllen. Damit zukünftig nicht jeder Rohrkrümmer einzeln zugelassen werden muss, arbeiten die Hersteller daran, eine Qualifikation für den gesamten Fertigungsprozess zu erhalten.²⁷ Konventionell ist der Rohrkrümmer aus zwei Titan-Gussteilen entstanden, die zusammengeschnitten und an-

²³ [Scit 16] - Scitec-media: 3D-Druck – Evolution statt Revolution, 2016

²⁴ [Scit 16] - Scitec-media: 3D-Druck – Evolution statt Revolution, 2016

²⁵ [Inge 16] - Ingenieur.de: 3D-Drucker aus Franken checkt Haltbarkeit schon beim Drucken, 2016

²⁶ [Kons 16] - Konstruktionspraxis.de: Laserschmelzen für den Airbus, 2016

²⁷ [Flug 16] - Flug Revue: Flugzeugbau - 3D-Druck mit Metallen, 2016

schließlich zerspannt worden sind. Der Bereitstellungsprozess durch mehrere Zulieferer dauert bei diesem Verfahren über ein Jahr. Additiv lässt sich der Rohrkrümmer in einem Stück fertigen und der Herstellungsprozess inklusive sämtlicher Nachbearbeitungsschritte lässt sich um bis zu 60% reduzieren.²⁸ Zudem ist der Materialausnutzungsgrad bei der additiven Rohrkrümmervariante wesentlich höher, da wesentlich weniger Material spanend abgetragen wird. Beim konventionellen Prozess wird für ein Kilogramm Bauteil rund zehn Kilogramm Material benötigt, bei der additiven Fertigung nur etwa 1,2 Kilogramm.



Abbildung 7: Additiv gefertigter Rohrkrümmer²⁹

Auch in der Raumfahrtbranche wird AM aufgrund des Leichtbaupotentials eingesetzt. Ein Anwendungsbeispiel aus dieser Branche ist der Antennenarm für einen Radarsatelliten. Bislang wird der Antennenarm konventionell als eine genietete Blechkonstruktion gefertigt (siehe Abbildung 8 links). Mit etwa 40 Zentimetern Länge reizt dieses Bauteil die maximale Bauraumgröße der auf dem Markt erhältlichen AMA fast komplett aus. Durch den Einsatz von AM lässt sich der Antennenarm in einem Stück fertigen und zusätzlicher Montageaufwand entfällt.³⁰ Die entscheidende Veränderung gegenüber dem konventionell gefertigten Antennenarm ist jedoch die Topologieoptimierung (siehe Abbildung 8 rechts).



Abbildung 8: Antennenarm konventionell gefertigt (links) und Antennenarm additiv gefertigt (rechts)³¹

Mit Hilfe der Finiten Elemente Simulation werden die Kraftflüsse des Antennenarmes ausfindig gemacht. Eine spezielle Topologieoptimierungssoftware generiert auf Basis dieser Simulation eine Gitterstruktur, bei der überflüssige Materialbereiche ausgespart werden.

²⁸ [Vere 17] - Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigung von Ti-Bauteilen in der Luftfahrt, 2017

²⁹ [Vere 17] - Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigung von Ti-Bauteilen in der Luftfahrt, 2017

³⁰ [Alta 14] - Altair Engineering: From the 3D Printer into Space, 2014

³¹ [Berg 16] - Roland Berger: Additive Manufacturing – next generation AMnx. 2016, S. 21/22

Die Topologieoptimierung bringt eine Gewichtsersparnis des Bauteils von 50% bei gleichzeitiger Steifigkeitssteigerung mit sich.³²

Tabelle 3 fasst die Potentiale zusammen, mit denen AM die vorgestellten Anwendungsbeispiele Kabinenhalter (Nr. 5.1), Rohrkrümmer (Nr. 5.2) und Antennenhalter (Nr. 5.3) unterstützt.

Tabelle 3: Potentialausprägungen von additiver Fertigung in der Luft- und Raumfahrtbranche

			Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
			Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Einführungszeitreduzierung
Luft- und Raumfahrtbranche	Nr.	Anwendungsbeispiel									
	5.1	Kabinenhalter	■	□	■	□	■	□	□	■	■
	5.2	Rohrkrümmer	■	□	□	□	■	□	□	□	■
	5.3	Antennenarm	■	□	■	□	■	□	□	■	□

Bewertungssystematik
 ■ = Hoher Erfüllungsgrad
 ■ (hell) = Mittlerer Erfüllungsgrad
 □ = Kein Erfüllungsgrad

1.1.2 Verfahrensbenchmark von additiven Fertigungstechnologien

Im Markt der Additiven Fertigung existieren verschiedene Fertigungsverfahren mit unterschiedlichen Eigenschaften. Für Einsteiger in die Technologie ist es schwer zu bewerten, wie sich Technologien differenzieren und welche für die individuelle Anwendung am besten geeignet ist. Im Folgenden werden die gängigsten und für die maritime Wirtschaft am vielversprechendsten additiven Fertigungsmethoden für Kunststoffe und Metalle verglichen. Weiterführende Informationen und technische Hintergründe zu den Wirkprinzipien der einzelnen additiven Fertigungsverfahren können folgenden Quellen entnommen werden:

Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion (2016, A. Gebhardt)

Schulungen der Additive Academy (<https://additive-academy.com/>)

The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications (2017, B. Redwood; F. Schöffner; B. Garret)

Wohlers Report 2018 (2018, T. Wohlers)

³² [Berg 16] - Roland Berger: Additive Manufacturing – next generation AMnx. 2016, S. 20/22

Verfahrensbenchmark Metall-Additive Fertigung

Laserstrahlschmelzen (LBM)

Der Prozess des Laserstrahlschmelzens (Kurzform: LBM von Laser Beam Melting) ist die am weitesten verbreitete additive Metall Technologie. Der industrielle Einsatz der Technologie wurde bereits in vielen Anwendungen unter Beweis gestellt. First-Mover in der Luftfahrt und der Medizintechnik verwenden den Prozess bereits für die Serienproduktion von einzelqualifizierten Bauteilen. Weitere Branchen wie der Maschinenbau oder die Automobilindustrie fertigen bereits Kleinserien und Einzelteile mittels LBM-Verfahren. Auch für Ersatzteile existieren Anwendungen z.B. in der Schienenfahrzeugindustrie. Für eine breitere Anwendung der Technologie müssen insbesondere die Bauteilkosten weiter sinken und die Qualifizierbarkeit der Prozesskette erleichtert werden.³³

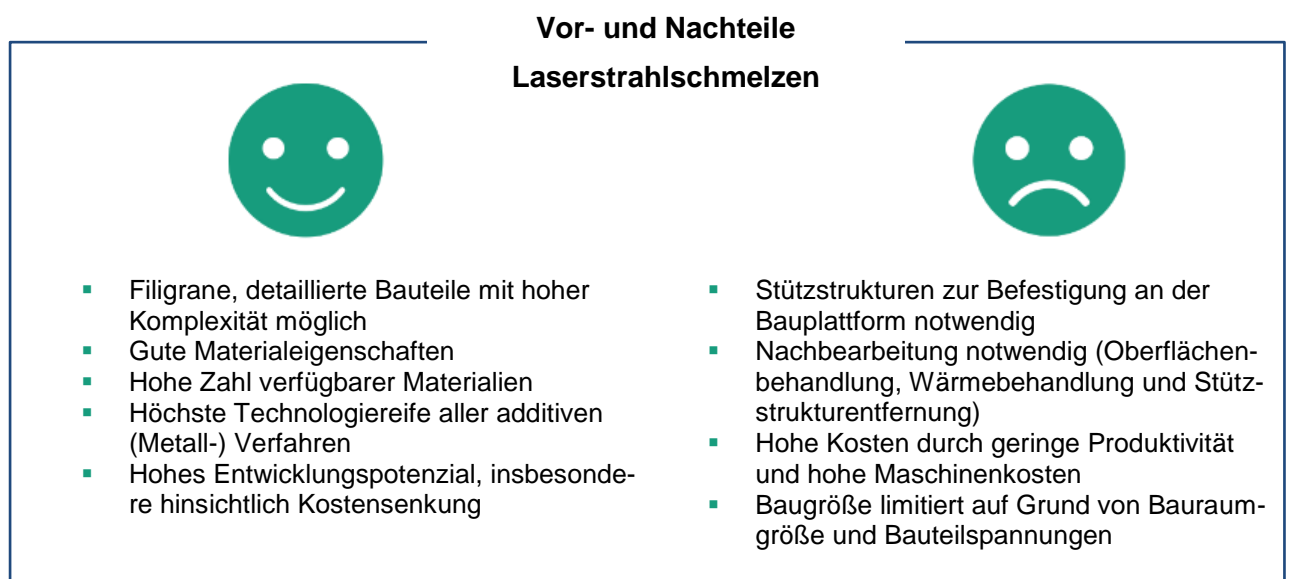
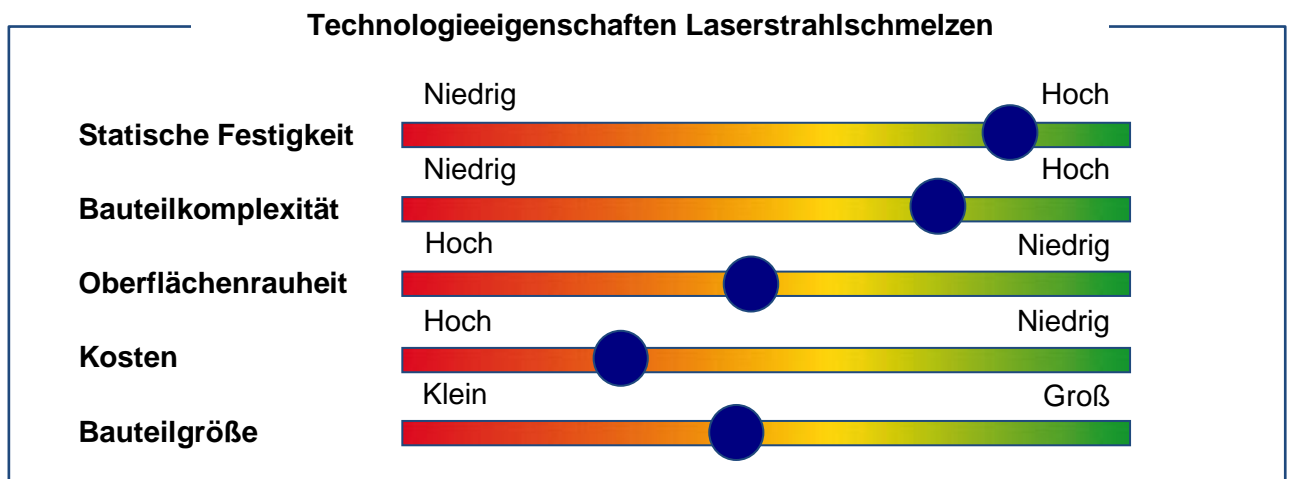
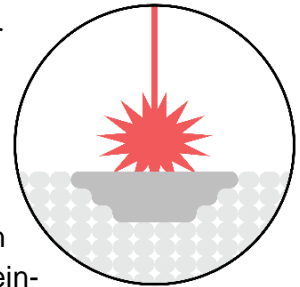
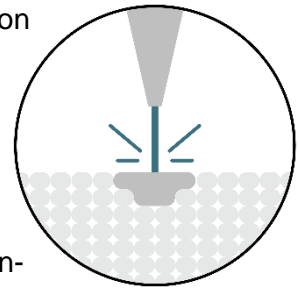


Abbildung 9: Überblick Laserstrahlschmelzen

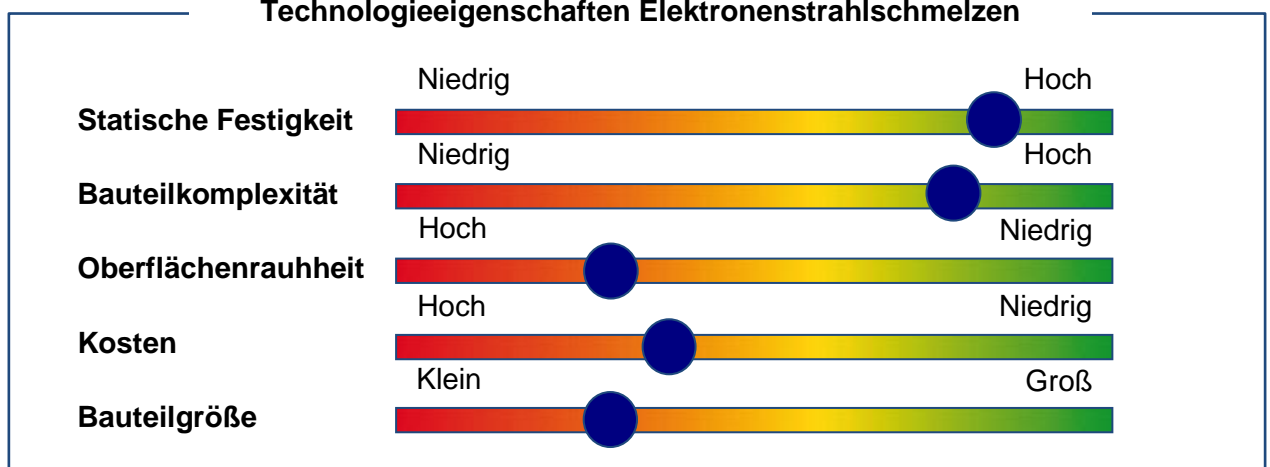
³³ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

Das pulverbettbasierte Elektronenstrahlschmelzen (Kurzform: EBM von Electron Beam Melting) ist als ergänzendes Verfahren zum Laserstrahlschmelzen zu betrachten. Die Lenkung des Elektronenstrahls mit Hilfe von Spulen ermöglicht es gegenüber dem LBM-Prozess eine schnellere Baugeschwindigkeit zu erreichen. Außerdem treten kaum Eigenspannungen auf, weswegen das Verfahren sich in erster Linie für massive, komplexe Titanbauteile eignet. Qualifizierte Serienanwendungen finden sich bereits in der Luftfahrt (insbesondere Turbinenbau) und bei Implantaten in der Medizintechnik. Bedingt durch die eingeschränkte Materialvielfalt (Titan und Kobalt-Chrom), die komplexe Prozesssteuerung und eingeschränkte Bauraumgröße, eignet sich das Elektronenstrahlschmelzen nur für Nischenapplikationen.³⁴



Technologieeigenschaften Elektronenstrahlschmelzen



Vor- und Nachteile

Elektronenstrahlschmelzen



- Schnelle Produktionsgeschwindigkeit und hohe Bauraumausnutzung
- Hohe Auslastung des Bauraums möglich
- Gute Materialeigenschaften (Dichte >99,9 % möglich)
- Keine Bauteileigenspannungen
- Massive Bauteile möglich
- Kein Spannungsarmglühen notwendig
- Weniger Stützstrukturen als LBM



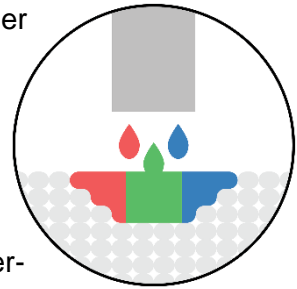
- Stützstrukturen zur Abführung der Wärme notwendig
- Nachbearbeitung notwendig
- Bauteilgröße limitiert
- Einschränkung auf Titan und Kobalt-Chrom Legierungen
- Oberflächengüte und Detailgenauigkeit geringer als bei LBM

Abbildung 10: Überblick Elektronenstrahlschmelzen

³⁴ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Binder Jetting (BJ)

Das auf der Sinter-technologie basierende Pulverbettverfahren Binder Jetting ist ein aufstrebendes, additives Fertigungsverfahren. Durch Verfahrensinnovationen soll in den nächsten 2-5 Jahren die Produktivität additiver Fertigungsverfahren sprunghaft um ein vielfaches erhöht werden. Für das Verfahren spricht zudem, dass günstige Sinterpulver (MIM) als Ausgangswerkstoff verwendet werden. Bis auf Aluminium, das sich nicht sintern lässt, sind gängige Werkstoffe verwendbar. Limitiert ist das Verfahrensprinzip hinsichtlich seiner Bauteileigenschaften und darin, dass das Sintern nur für kleine Bauteile möglich ist.



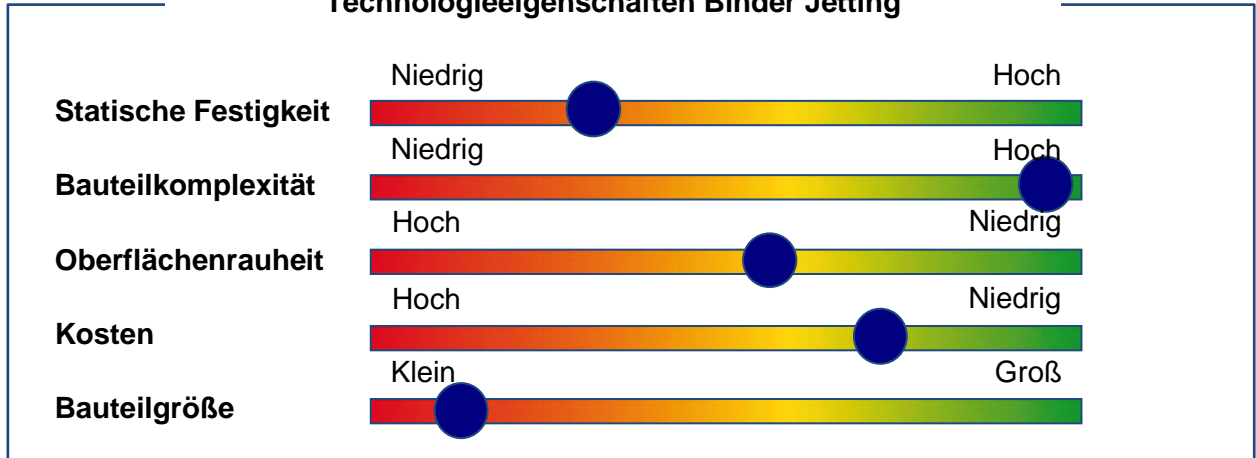
Heute findet das Binder Jetting vorwiegend Anwendung bei der Herstellung von Werkzeugen. Auf Grund der Skalierbarkeit und des Kostensparpotenzials wird dieses Verfahren derzeit für die Serienfertigung beispielsweise in der Automobilindustrie erprobt.

Bei der Herstellung von Sandguss Formen bis zu 4 x 2 x 1 m kann ein Sonderprozess des Binder Jetting angewendet werden. Hier wird anstelle eines Metalls Sand mit Hilfe eines Harzes gebunden.

Eine weitere ähnliche Technologiegruppe sind die Metal-Fused-Deposition Verfahren, bei denen der metallische Werkstoff mit einem Kunststoff gebunden wird. Vorteilhaft ist dieses Verfahren gegenüber dem BJ, auf Grund der geringen Kosten für die Anschaffung einer Anlage. Die größten Nachteile liegen in dem zweistufigen Sinterprozess, der die Bauteilgröße einschränkt und dass es zu noch höheren Schwindungen (bis zu 30%) als beim BJ kommen kann.³⁵

³⁵ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Technologieeigenschaften Binder Jetting



Vor- und Nachteile

Binder Jetting



- Alle sinterbaren Materialien lassen sich potenziell nutzen
- Geringe Materialkosten
- Skalierbarkeit von Bauraum und Baugeschwindigkeit
- Geringe Bauteilspannungen
- Hohe konstruktive Freiheit
- Darstellung sehr feiner Strukturen und Funktionen möglich

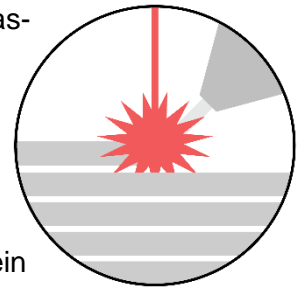


- Komplexe Nachbehandlung notwendig
- Mechanische Eigenschaften vergleichbar mit Metall- Spritzgussbauteilen (> 95% Dichte)
- Sintern beschränkt auf kleine Objekte
- Reaktive Materialien lassen sich schwer (Titanwerkstoffe) oder gar nicht verarbeiten (Aluminium)
- Maßhaltigkeit schwierig auf Grund von Schrumpfungen beim Sintern

Abbildung 11: Überblick Binder Jetting

Directed Energy Deposition (DED)

Die Directed Energy Deposition (DED) Technologien, die auf dem klassischen Auftragsschweißen basieren, ergänzen die Pulverbettverfahren. Mit ihnen lassen sich sehr große Strukturen aufbauen, die lediglich durch die Reichweite des Handhabungssystems (Roboter oder Portal) begrenzt sind. Zudem liegen die Bauteilkosten deutlich niedriger und die Aufbaurate ist um ein vielfaches schneller. Nachteile hat das Verfahren hinsichtlich der erreichbaren Bauteilkomplexität, da ein Support von Überhängen nicht zielführend ist und die Oberfläche in der Regel komplett nachzerspannt werden muss. Die Materialvielfalt ist sehr breit und vom verwendeten DED Verfahren abhängig. Mit diesem Verfahren werden häufig schwer zu zerspannende Materialien, wie Titan oder Inconel verarbeitet, da die DED-Verfahren werkzeuglos fertigen und sich somit ein wirtschaftlicher Vorteil durch die Einsparung von Werkzeugverschleiß gegenüber KF ergibt.



Klassische, etablierte Applikationen befinden sich im Werkzeugbau, der Beschichtung und der Reparatur von Verschleißstellen. Erste Strukturbauteile aus Titan wurden von Boeing und Norsk Titanium für die Luftfahrt gebaut.

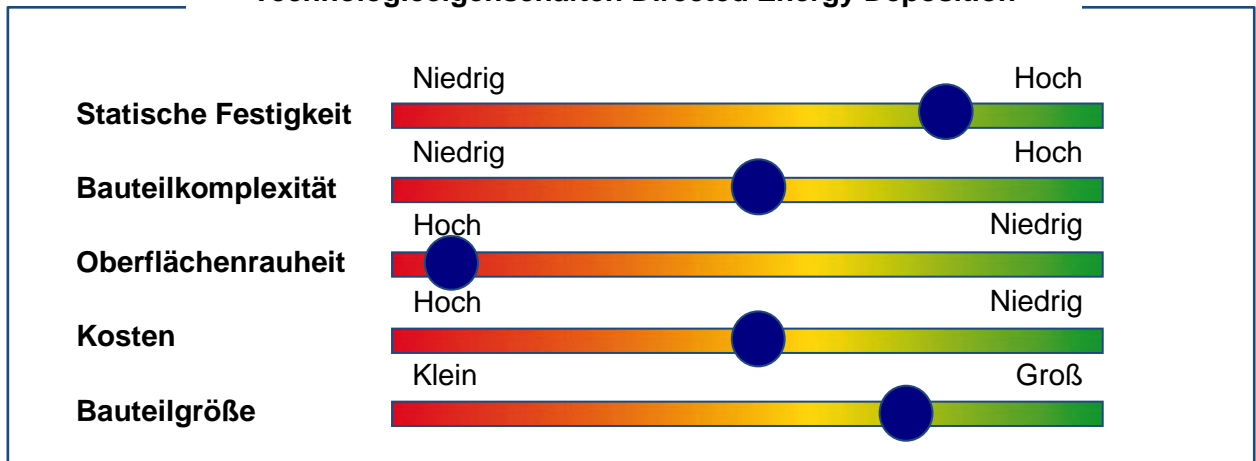
Die Verfahrensgruppe Directed Energy Deposition umfasst verschiedene Prozesse, die auf verschiedenen Wirkprinzipien basieren. Die Lichtbogenbasierten DED-Verfahren (Kurzform: WAAM von Wire Arc Additive Manufacturing) zeichnen sich durch geringe Anlagenkosten und den schnellen Aufbau großer, grober Strukturen aus. Als Ausgangswerkstoffe sind alle schweißbaren Materialien anwendbar. Materialeinschränkungen ergeben sich zudem aus der Verwendung eines Drahtes. Spröde Materialien, wie Hartmetalle oder Stellite Legierungen, lassen sich nicht zu einem Draht verarbeiten und sind daher nicht für die drahtbasierten DED Prozesse erhältlich.

Die Anwendungen, die mit Hilfe des laserbasierten DED-Verfahrens (Kurzform: LMD von Laser Metal Deposition) gefertigt werden, sind eher kleiner als bei den Lichtbogentechnologien. Dafür lassen sich vergleichsweise feinere Strukturen darstellen. Außerdem ist es möglich, neben dem Draht auch Pulver als Ausgangsmaterial für das laserbasierte DED zu verwenden. Mit dem Pulverprozess stehen auch spröde Materialien zur Verfügung und es lassen sich komplexere Strukturen darstellen. DMG Mori bietet zudem hybride Systeme an, bei denen eine 5-Achs Fräsbearbeitung und ein Laserauftragsprozess in eine Maschine integriert sind. Vorteil des hybriden Verfahrens ist eine direkte Nachbearbeitung der Oberfläche innerhalb des Bauprozesses und eine ausgereifte Steuerung. Nachteilig zu bewerten sind bei den hybriden Verfahren die hohen Anlagenkosten, der eingeschränkte Bauraum und geringere mechanische Eigenschaften durch Verunreinigungen (Span).

Ein Überblick über die Unterschiede der relevantesten DED Verfahren befindet sich in den folgenden Tabellen. Darüber hinaus existieren weitere DED-Verfahren wie zum Beispiel Rührreißschweißen oder Elektronenstrahlschweißen.³⁶

³⁶ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Technologeeigenschaften Directed Energy Deposition



Vor- und Nachteile

Directed Energy Deposition



- Hohe Schichtstärke erlaubt schnelle Aufbaugeschwindigkeit
- Skalierbarer Bauraum erlaubt große Bauteile
- Hohe Materialvielfalt
- Gute mechanische Eigenschaften
- Aufbau auf existierenden Strukturen möglich



- Geringe Auflösung der Verfahren
- Oberflächengüte gering und erfordert fräsende Nachbearbeitung
- Maschinelle Bearbeitung der Oberfläche schränkt Komplexität des Bauteils ein
- Mangel an Standards und geringer Industrialisierungsgrad

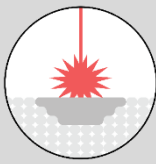
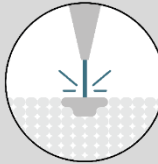

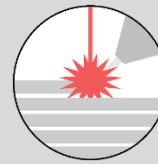
Abbildung 12: Überblick Directed Energy Deposition

Tabelle 4: Verfahrensbenchmark Directed Energy Deposition

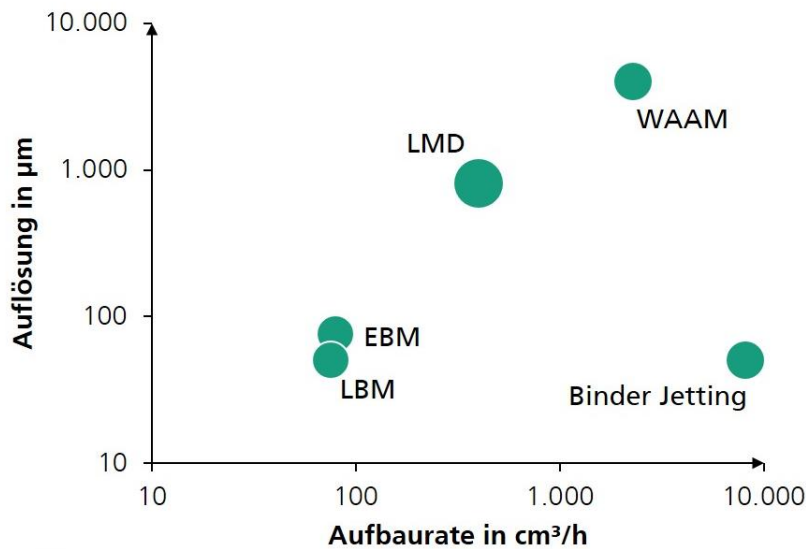
Technologie	Laserbasiertes DED		Lichtbogenbasiertes DED mit Draht	
	Mit Draht	Mit Pulver	MAG Verfahren	Plasma Verfahren
Bauteilkomplexität	-	O	-	-
Industrialisierung	-	-	-	+
Bauteilgröße	+	+	++	++
Materialauswahl	+	++	+	+
Materialeigenschaften	+	+	+	+
Erreichbare Aufbauraten	O	O	+	+
Materialkosten	+	O	+	+
Maschinenkosten	O	O	++	+
Prozessbeherrschbarkeit	-	-	O	O
Eignung für Reparaturanwendungen & Beschichtung	++	++	++	++
Aufbau auf existierenden Strukturen	++	++	O	O
Neigung zu Spannungen & Verzügen	O	O	-	-

- ++ Sehr gute Charakteristika
- + Gute Charakteristika
- O Durchschnittliche Charakteristika
- Schlechte Charakteristika
- Sehr schlechte Charakteristika

Tabelle 5: Benchmark additive Fertigungstechnologien Metall

Technologie	Laserstrahl-schmelzen (LBM)	Elektronenstrahl-schmelzen (EBM)	Binder Jetting (BJ)	Directed Energy Deposition (DED)
				
Statische Festigkeit	++	++	-	+
Bauteilkomplexität	++	++	++	O
Oberflächenrauheit	O	-	+	--
Kosten	-	-	O	O/+
Bauteilgröße	O	-	--	++

- ++ Sehr gute Charakteristika
- + Gute Charakteristika
- O Durchschnittliche Charakteristika
- Schlechte Charakteristika
- Sehr schlechte Charakteristika



Maschinenkosten

-  > 1 Mio €
-  > 0.5 Mio €
-  > 0.25 Mio €
-  > 0.1 Mio €

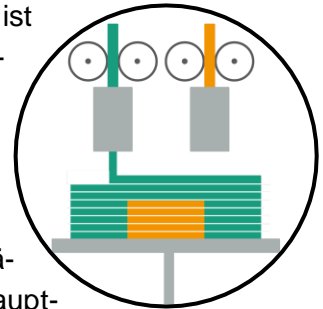
Abbildung 13: Aufbauraten, Auflösung und Investitionskosten additiver Fertigungsverfahren (Metall)

Verfahrensbenchmark Kunststoff-Additive Fertigung

Fused Deposition Modeling (FDM)

Das düsenbasierte Verfahren Fused Deposition Modeling (FDM) ist aus dem Hobbybereich und Prototypenbau bekannt. Einfache Geräte sind schon für Preise unter 1000 € erhältlich, weswegen sich die Technologie sehr gut für den Einstieg in die additive Fertigung eignet. In der industriellen Anwendung wird FDM für größere Kunststoffteile und die kostengünstige Fertigung in kleinen Serien eingesetzt. Ein Vorteil ist zudem die breite Materialpalette, die leistungsfähige Materialien enthält (PEK, PEI, PEKK, ASA, PC, PETG). Die Haupteinschränkung für das Fused Deposition Modeling sind die begrenzten Materialeigenschaften, die durch eine deutliche Anisotropie gekennzeichnet sind.

Durch die Verfügbarkeit von Hochleistungspolymeren wie dem temperaturbeständigen, nicht-brennbaren PEI Werkstoff ergeben sich auch Anwendungen in kritischen Bereichen wie z.B. bei Kabinenbauteilen. So ist die Technologie bereits für Serienanwendungen in der Luftfahrt qualifiziert. Vielfältige Einsatzmöglichkeiten in allen Branchen für das Fused Deposition Modeling finden sich zudem in der Herstellung von Prototypen, Vorrichtungen und Montagehilfen.³⁷



³⁷ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

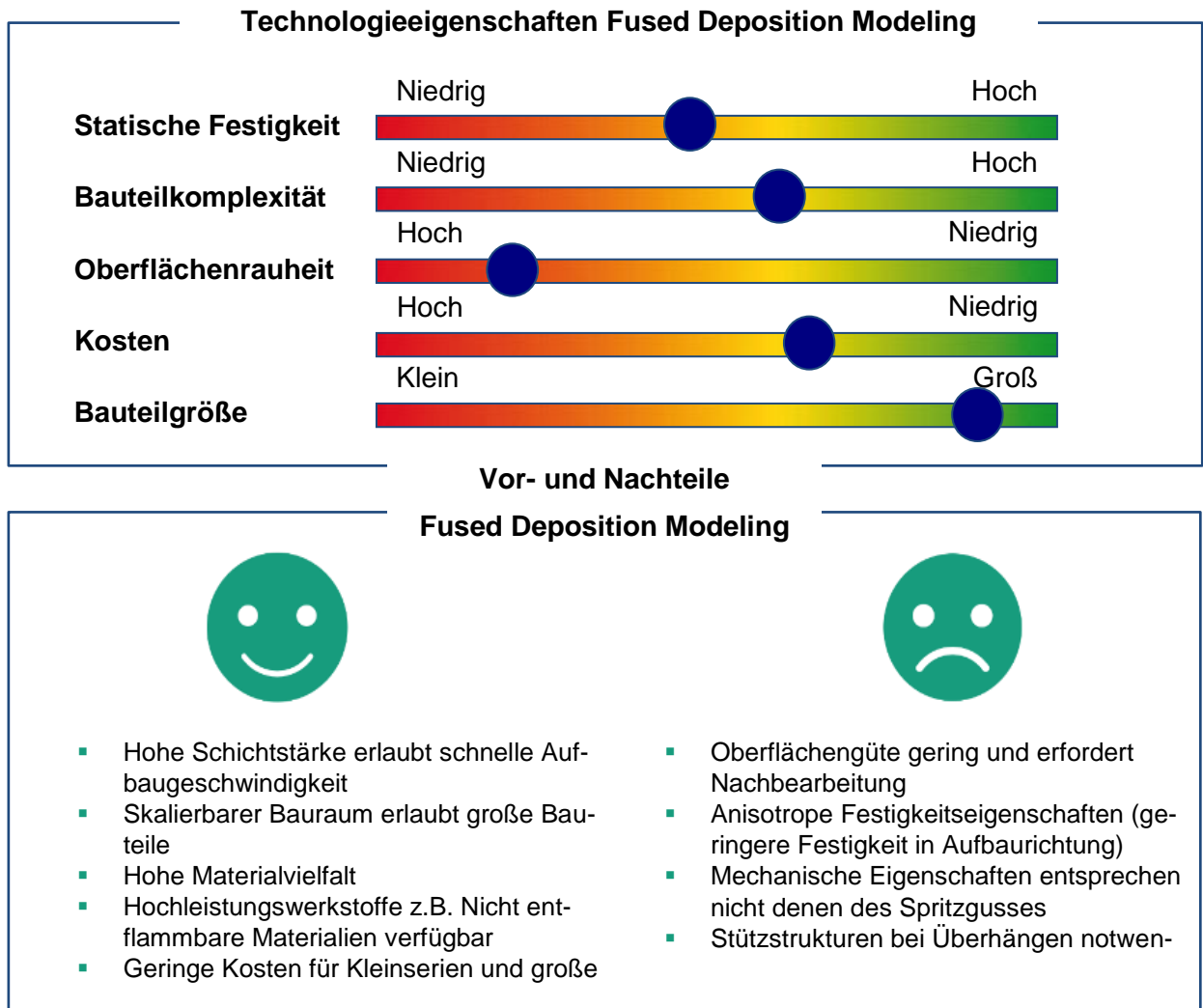
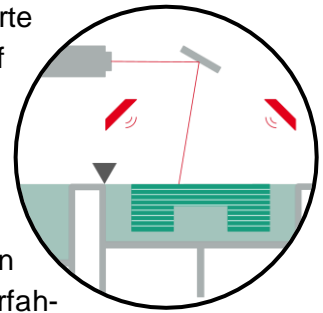


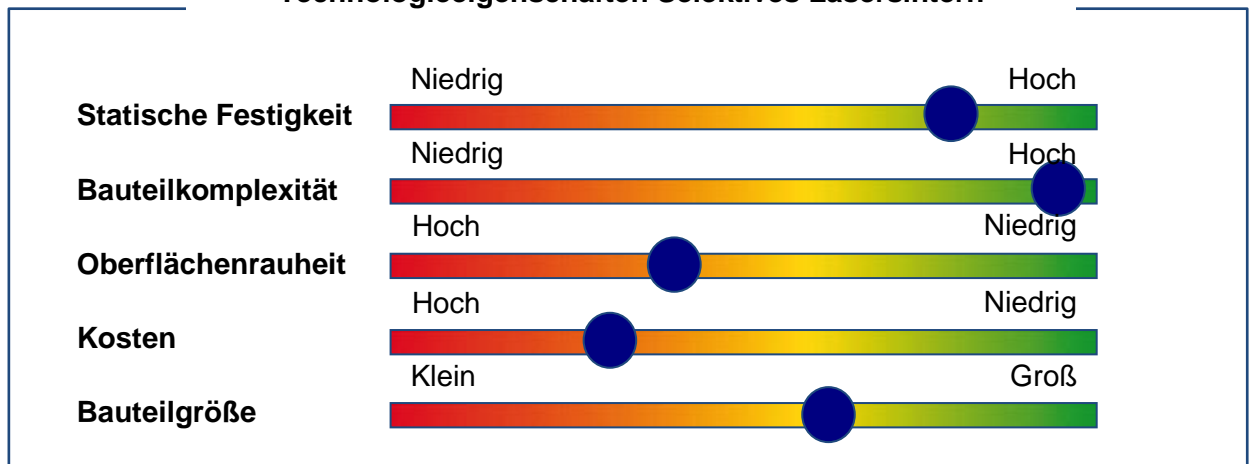
Abbildung 14: Überblick Fused Deposition Modeling

Selektives Lasersintern (SLS)

Für die additive Fertigung von Kunststoffen ist das pulverbettbasierte Selektive Lasersintern die am weitesten verbreitete Technologie. Auf Grund guter mechanischer Festigkeitswerte, sehr hoher Designfreiheit sowie der Verfügbarkeit des leistungsfähigen PA12 Werkstoffes ist SLS für viele Applikationen geeignet. Einer flächendeckenden Verbreitung stehen vor allem die limitierte Auswahl an Materialien (PA 12, PA 11) sowie die im Verhältnis zum Spritzguss höheren Stückkosten bei großen Serien entgegen. Anwendung findet das Verfahren in der Kleinserienproduktion z.B. bei Konsumgütern wie Brillen. Boeing nutzt zudem SLS, um komplexe Lüftungkanalstrukturen unter Einhaltung kurzer Lieferzeiten in einem Schritt herzustellen. Durch dessen hohe Flexibilität ist das Selektive Lasersintern zudem ein beliebtes Verfahren zur Ersatzteilerfertigung und im Prototypenbau in allen Branchen.³⁸



Technologieeigenschaften Selektives Lasersintern



Vor- und Nachteile

Selektives Lasersintern



- Sehr hohe Bauteilkomplexität
- Keine Stützstrukturen
- Gute Festigkeitseigenschaften
- Kaum Anisotropie



- Eingeschränkte Materialauswahl (nur PA 11, PA 12 & TPU verfügbar, PA 6 in Entwicklung)
- Material spröde
- Hohe Anlagenkosten
- Nachbearbeitung zur Verbesserung der Oberflächenqualität
- Verzüge des Bauteils möglich

Abbildung 15: Überblick Selektives Lasersintern

³⁸ Vgl. Quellen auf Seite 12 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Multi Jet Fusion (MJF)

Die auf dem Binderprinzip aufbauende, neue Multi Jet Fusion Technologie nimmt einen zunehmend höheren Stellenwert bei der additiven Fertigung von Kunststoffen ein. Es ähnelt von den Bauteileigenschaften und verwendbaren Werkstoff (PA 12, PA 11) dem Selektiven Lasersintern. Der Vorteil liegt in prinzipiell schnelleren Bauzeiten und geringerer Bauteilkosten. Die Skalierbarkeit der Prozesskette und die „Industrie 4.0“-Fähigkeiten des Verfahrens sollen eine individualisierte Produktion großer Stückzahlen ermöglichen. Die Zielgruppe des Verfahrens sind insbesondere Branchen mit Serienanwendungen und Individualisierungspotenzialen, wie der Konsumgüterbranche und die Automobilindustrie.³⁹

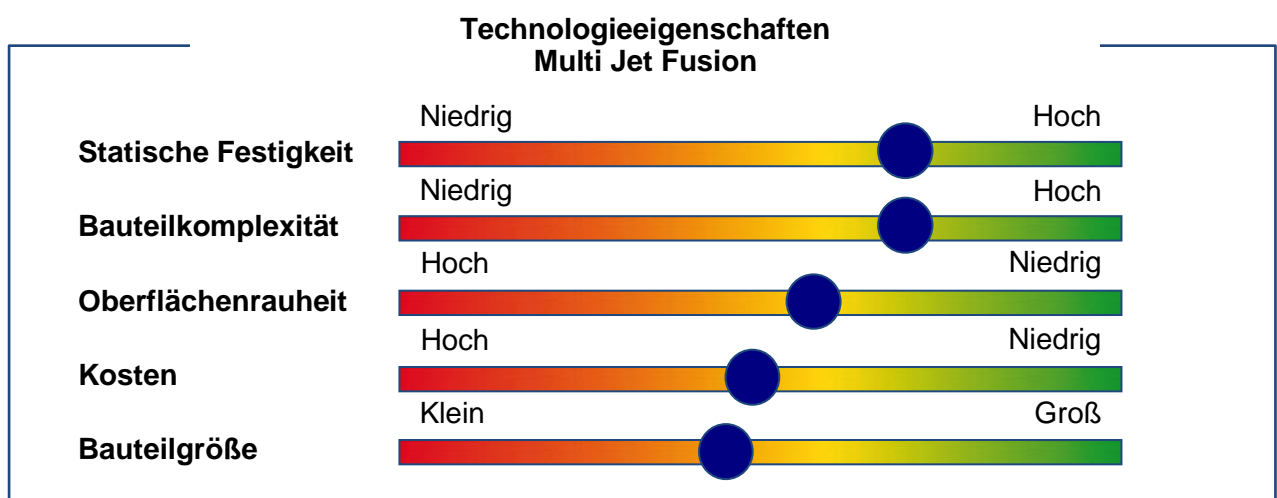
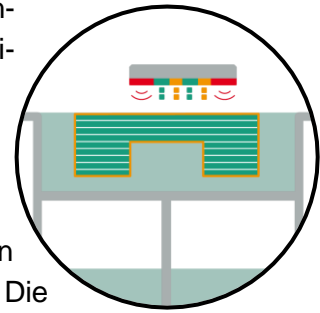
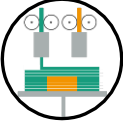
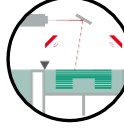



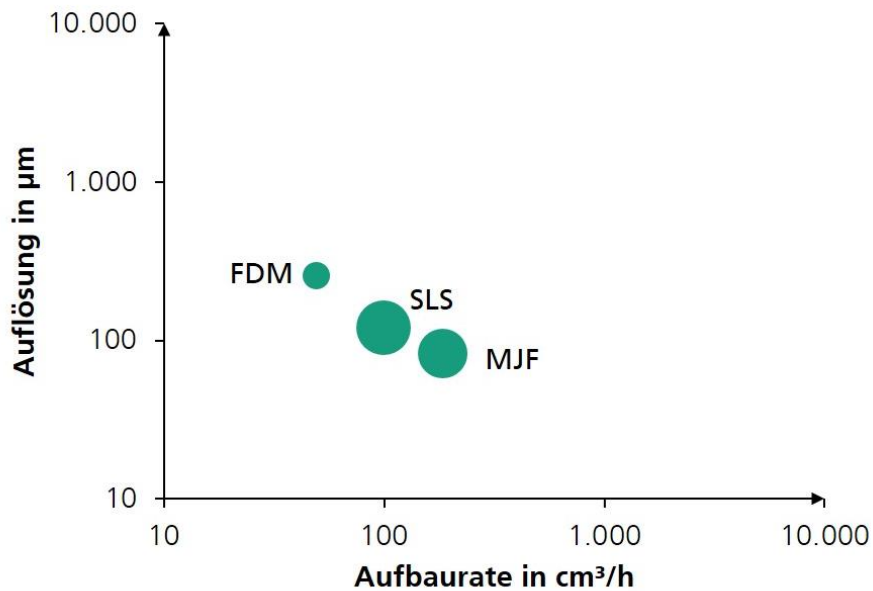
Abbildung 16: Überblick Multi Jet Fusion

³⁹ Vgl. Quellen auf Seite 1 für eine ausführliche Prozessbeschreibung dieses AMV

Tabelle 6: Benchmark additive Fertigungstechnologien Kunststoff

Technologie	Fused Deposition Modeling (FDM)	Selektives Lasersintern (SLS)	Multi Jet Fusion (MJF)
			
Statische Festigkeit	O	+	+
Bauteilkomplexität	O	++	+
Oberflächenrauheit	-	O	O
Kosten	+	O/-	O
Bauteilgröße	++	O	O

- ++ Sehr gute Charakteristika
- + Gute Charakteristika
- O Durchschnittliche Charakteristika
- Schlechte Charakteristika
- Sehr schlechte Charakteristika



Maschinenkosten:

-  > 250 k€
-  > 200 k€
-  > 100 k€
-  > 50 k€

Abbildung 17: Aufbauraten, Auflösung und Investitionskosten additiver Fertigungsverfahren (Kunststoff)

Fazit

Die additiven Fertigungsverfahren besitzen ein breites Spektrum an Prozessen, die es ermöglichen, unterschiedlichste Bauteile aus verschiedensten Materialien zu prozessieren. Jede Technologie hat Applikationen, in denen sie ihre Berechtigung hat. Die am weitesten verbreitete und reifste metallverarbeitende Technologie ist das Laserstrahlschmelzen, für die bereits zahlreiche Serien-Anwendungen demonstriert sind. Weiterhin etabliert ist die additive Fertigung von Kunststoffen als Einzelstücke, kleine Serien oder als Ersatzteile. Die Kunststoffverfahren Fused Deposition Modeling und das Selektive Lasersintern sind bereits heute wirtschaftliche, industriereife Alternativen zum Spritzguss.

Das laserbasierte Directed Energy Deposition (DED) zur Reparatur und Beschichtungsanwendung ist bereits Stand der Technik. Auf Grund der höheren Produktivität und der räumlichen Skalierbarkeit bergen die DED-Verfahren Zukunftspotential für die additive Herstellung von großen Metall-Strukturen, wie sie in maritimen Anwendungen häufig zu finden sind.

Ein weiterer Innovationssprung in den nächsten 2 bis 5 Jahren steht zudem durch den Einsatz des Binder Jetting (Metall) und des Multi Jet Fusion (Kunststoff) bevor. Diese binderbasierten Verfahren sind besser skalierbar als andere AMV und können zukünftig selbst bei großen Stückzahlen gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren wirtschaftlich sein.

1.2 Anwendungspotentiale für die additive Fertigung im maritimen Kontext

Als Vorgehensweise für die Ableitung von Anwendungspotentialen soll zunächst eine Kategorisierung der Unternehmen im maritimen Sektor erfolgen, um von der spezialisierten Ausrichtung der Unternehmen auf eine abstraktere Ebene zu gelangen. Dieser Kategorie sollen im Folgenden theoretische Anwendungsbeispiele, die aus Anwendungsgebieten, konkreten Bauteilen, Systemen oder Baugruppen bestehen können, zugeordnet werden. Diese Anwendungsbeispiele werden danach mit den generellen Potentialen der additiven Fertigung in der industriellen Anwendung je nach Erfüllungsgrad bewertet, bevor eine praktische Verifikation der Anwendung anhand einzelner Beispiele in Kapitel 1.3 erfolgt.

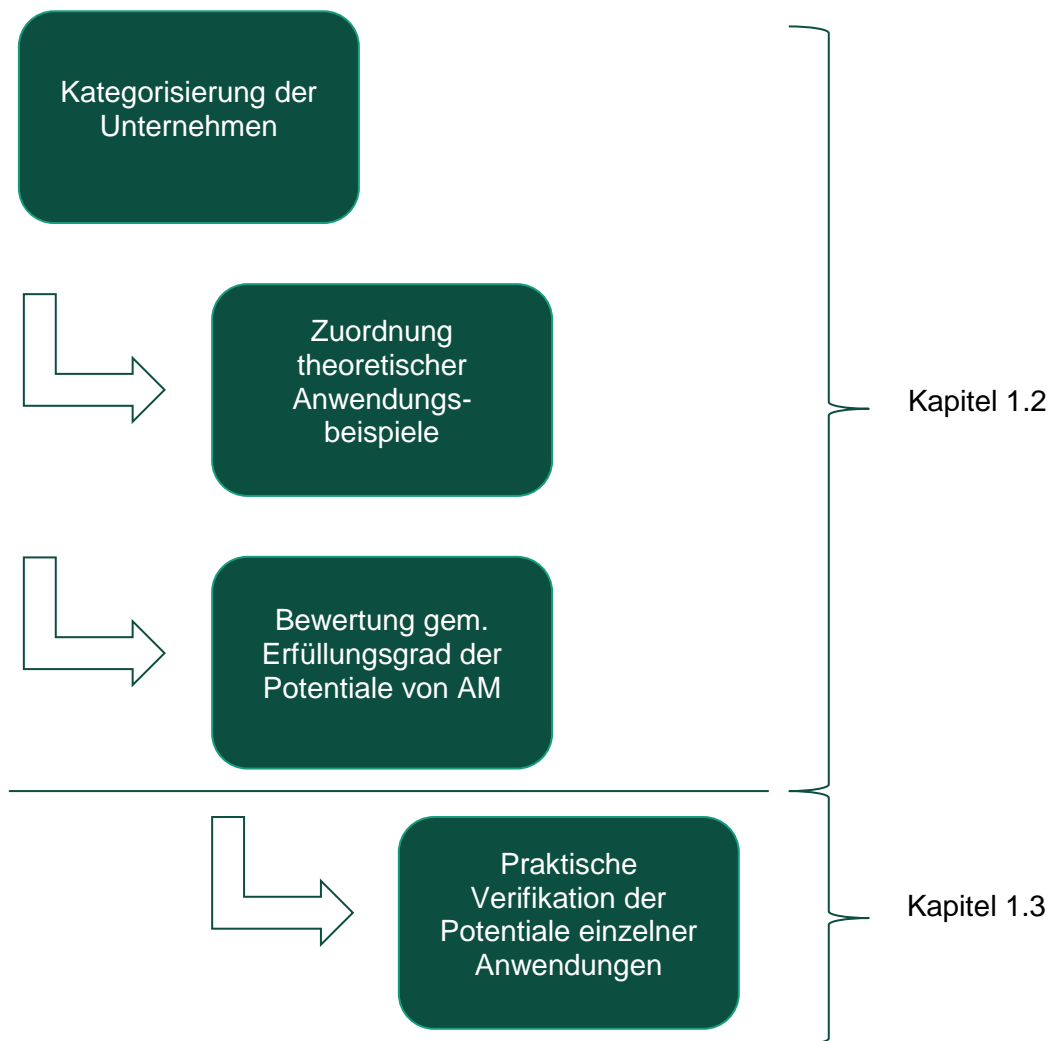


Abbildung 18: Vorgehensweise zur Identifikation von Anwendungspotentialen für die additive Fertigung im maritimen Kontext

1.2.1 Kategorisierung sämtlicher Unternehmen im maritimen Bereich

So vielfältig wie die Spezialdisziplinen, der im maritimen Umfeld agierenden Unternehmen sind, sind auch die Auswirkungen der additiven Fertigung auf die jeweiligen Disziplinen. Für die Durchführung der Bewertung der Anwendungspotentiale wird zunächst eine Kategorisierung der Unternehmen durchgeführt, die zur maritimen Branche gehören. Hierdurch wird gewährleistet, dass Unternehmen, welche mehrere Teilbereiche der gesamten Wertschöpfungskette abdecken, sich jedem Potentialbereich aus Tabelle 7 zuordnen können.

Tabelle 7: Kategorisierung von Unternehmen im maritimen Bereich nach Unternehmensfokus

Unternehmenskategorie	Unternehmensfokus
Werften	<ul style="list-style-type: none"> • Neubau, Reparatur und Instandhaltung von Schiffen jeder Art <ul style="list-style-type: none"> ○ Boote ○ Frachtschiffe ○ Fahrgastschiffe ○ Freizeitschiffe und Yachten ○ Fischereifahrzeuge ○ Traditionsschiffe ○ Sportfahrzeuge ○ Offshore-Servicefahrzeuge ○ Sonder- und Kleinfahrzeuge ○ Kriegsschiffe ○ etc. • Werftspezifische Anlagen und Infrastruktur <ul style="list-style-type: none"> ○ Dockanlagen ○ Hebeanlagen ○ etc. • Großstrukturen für den Offshore-Einsatz
Schiffsantriebstechnik und Stromerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigung, Reparatur und Instandhaltung von Teilen oder Gesamtsystemen in den Bereichen <ul style="list-style-type: none"> ○ Motoren ○ Getriebe ○ Turbinen ○ Turbolader ○ Wellen ○ Treibstoffsysteme ○ Stromerzeuger / Generatoren ○ Alternative Antriebe ○ etc.
Manövrier- und Antriebssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Fertigung, Reparatur und Instandhaltung von <ul style="list-style-type: none"> ○ Propellern ○ Ruderanlagen ○ Stabilisatoren ○ Manövriersystemen ○ etc.

Unternehmenskategorie	Unternehmensfokus
Schiffsbetriebsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmen mit Fokus in den Bereichen <ul style="list-style-type: none"> ○ Klimasysteme ○ Abgasreinigung ○ Ballastwasserhandling ○ Frischwasser ○ Recycling ○ Schiffsküchen ○ Elektrotechnik und Elektronik ○ Wärmetauscher ○ Kühlung ○ etc.
Schiffsausrüster	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht produzierende Unternehmen mit Fokus auf Vertrieb, Großhandel und Logistik in den Bereichen <ul style="list-style-type: none"> ○ Schiffsausrüstung ○ Ersatzteile ○ etc.
Meerestechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau, Instandhaltung und Reparatur von <ul style="list-style-type: none"> ○ Offshoretechnik jeglicher Art ○ Windenergie ○ Bohrtechnik ○ Unterwassertechnik ○ etc.
Hafentechnik und Marinas	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmen mit Fokus auf Bereiche wie <ul style="list-style-type: none"> ○ Umschlag- und Transportsysteme ○ Kai-Anlagen ○ etc.
Maritime Dienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> • Unternehmen wie <ul style="list-style-type: none"> ○ Ingenieurbüros ○ Beratungsdienstleister ○ Institute und Forschungseinrichtungen ○ Verbände ○ Klassifikationsgesellschaften ○ etc.

Die erste Kategorie stellen jegliche Arten von **Werften** dar, die sich mit dem Neubau sowie der Reparatur und Instandhaltung von Schiffen in allen Bereichen beschäftigen. Ebenfalls sind auch die Betreiber und Produzenten von spezifischen Anlagen für den Werftbetrieb (bspw. Docks, Hebeanlagen usw.) inkludiert.

In der Kategorie der **Schiffsantriebstechnik und Stromerzeugung** werden alle Unternehmen zusammengefasst, die Ihren Fokus in dem Bereich von Motoren und zugehörigen Systemen wie Turboladern, Getrieben, Generatoren etc. haben. Auch alternative Antriebsarten wie z.B. LNG oder Hybridantriebe sind hier einzuordnen.

Darauf aufbauend, aber getrennt von der Schiffsantriebstechnik, werden Betriebe betrachtet, die sich mit der Fertigung, Instandhaltung und Reparatur von **Manövrier- und Antriebssystemen** beschäftigen. Gemeint sind damit Schiffspropeller und dazugehörige Komponenten, Stabilisatoren, Ruderanlagen etc.

Unter der Kategorie **Schiffsbetriebsanlagen** werden Unternehmen zusammengefasst, welche Komponenten herstellen, die sich nicht mit dem Antrieb, dem Manövrieren sowie der Strom- und Fahrtgenerierung beschäftigen. Beispielhaft sind dies u.a. Klimasysteme, Wärmetauscher, Kühlsysteme aber auch Pumpen, Frischwasseranlagen und Abgasreinigungssysteme.

Die Kategorie **Schiffsausrüster** steht für Unternehmen, welche ihren Fokus auf den Großhandel mit Komponenten des maritimen Sektors legen. Das beinhaltet den Vertrieb und die Logistik für Ersatzteile und Schiffsausrüstung.

In der Kategorie mit der Bezeichnung **Meerestechnik** werden Unternehmen eingeordnet, die für die Bereiche Offshore-Technik, Windenergie, Bohrtechnik und Unterwassertechnik, wie U-Boote, Pipelines etc., stehen.

Der Bereich **Hafentechnik und Marinas** steht für Betreiber von Umschlag und Transportsystemen im Hafenbereich, Marinas, Kai- und Hafenanlagen. Ebenfalls können hier hafennahe Betriebe wie Öl- und Gasraffinerien, Bunkerbetriebe etc. integriert werden.

In der Kategorie **Maritime Dienstleistungen** werden alle Unternehmen einsortiert, die Serviceprovider außerhalb der vorher genannten Kategorien sind. U.a. können dies Ingenieurbüros, Beratungsdienstleister, aber auch Institute, Forschungseinrichtungen und Verbände sein.

1.2.2 Zuordnung theoretischer Anwendungsbeispiele und Bewertung gem. Erfüllungsgrad der Potentiale der additiven Fertigung

Nach dieser Kategorisierung der beteiligten Unternehmen im maritimen Kontext sollen im Folgenden Potentiale der additiven Fertigung aufgezeigt werden. Tabelle 8 zeigt hier eine erste Auswahl von Anwendungsbeispielen in den jeweiligen Kategorien und ordnet diesen Potentiale der additiven Fertigung zu.

Tabelle 8: Korrelation von Anwendungsbeispielen nach Kategorie und Potentialen der additiven Fertigung

Kategorie	Anwendungsbeispiel	Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorieübergreifend	Prototypen	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Ersatzteile und Instandhaltung	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Werften	Formenbau	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Aufbauten und Oberdeckstrukturen Sportschiffe und Rennsport	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Schiffsantriebstechnik und Stromerzeugung	Motoren	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Getriebe	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Turbolader	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Manövrier- und Antriebssysteme	Antriebsstrang	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Stabilisatoren	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Schiffspropeller	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Schiffsbetriebsanlagen	Öl-Wasser Separatoren	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Abgastechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Pumpentechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Wärmetauscher	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Hydrauliksysteme	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Filtertechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Schiffsausrüstung	Yachtzubehör	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Meerestechnik	Bohrtechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Unterwasserfahrzeuge	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Offshoretechnologie	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hafentechnik und Marinas	Bauteilsonderanfertigungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Maritime Dienstleistungen	Konstruktionsdienstleistungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Bewertungssystematik
 ■ = Hoher Erfüllungsgrad
 ■ = Mittlerer Erfüllungsgrad
 □ = Kein Erfüllungsgrad

Da sich einige Anwendungsmöglichkeiten der additiven Fertigung auf alle in Tabelle 8 gebildeten Kategorien niederschlagen, wurde für die Punkte Prototypen sowie Ersatzteile und Instandhaltung eine kategorieübergreifende Zeile eingeführt, um diese nochmals herauszustellen.

Kategorieübergreifend

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Kategorieübergreifend	Prototypen Ersatzteile und Instandhaltung	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

Im Prototypenbau liegt das Potential insbesondere in der konstruktiven Gestaltungsfreiheit, sowie den Designfreiheiten. Dabei können durch die additive Fertigung bereits filigrane und präzise Muster hergestellt werden, die dem Original bereits sehr nahekommen. Sie können als Anschauungsmaterial für Kunden dienen, die bereits ein sehr detailreiches Bild bekommen, wodurch das Potential der Designfreiheit erfüllt ist. Ebenfalls lassen sich relativ kostengünstig und schnell erste Varianten für einen Vergleich produzieren, weshalb auch die positiven Aspekte der Kostenreduktion, kundenindividuellen Produktion und Zeitreduzierung erfüllt sind.

Ein weiteres, kategorieübergreifendes Potential der additiven Fertigung liegt in der Ersatzteilfertigung. Einerseits sind durch eine bedarfsabhängige Fertigung Einsparungen von Lagerflächen und damit verbunden Kosteneinsparungen möglich, was den Bereich der Schiffsausrüster wohl am gravierendsten betrifft. Doch können auch Ersatzteile produziert werden, die bspw. nicht mehr am Markt verfügbar sind, sodass ein Austausch ganzer Systeme auf Grund von fehlenden Teilen nicht mehr notwendig ist.

Der Bereich der Ersatzteilfertigung betrifft weitergehend auch bspw. die Reparatur und Instandhaltung von defekten Großstrukturen mittels Laserauftragsschweißen. So müssen z.B. abgenutzte Turbinenschaufeln nicht mehr im Ganzen ersetzt werden, sondern können an den defekten Stellen aufbereitet werden. Diese Technologie bietet somit auch Potential für Strukturen des Schiffbaus wie z.B. Schiffspropeller und –wellen, wodurch neben einer Zeiterparnis und Kostenreduktion auch Materialeinsparungen erreicht werden können.

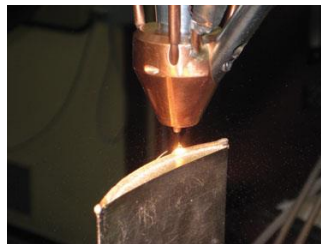
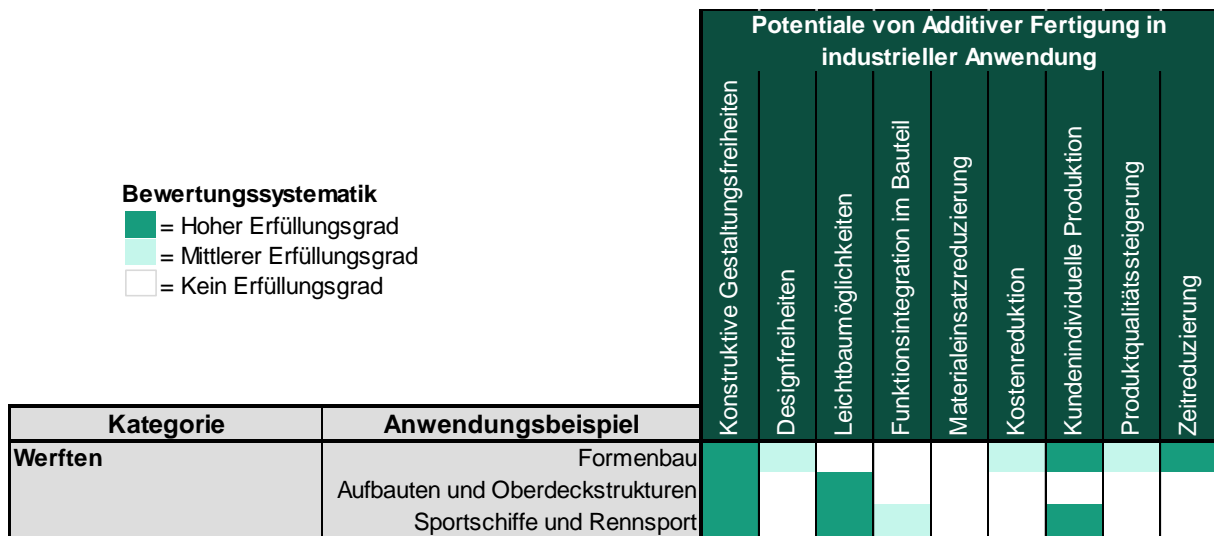


Abbildung 19: Laserauftragsschweißen einer Turbinenschaufel⁴⁰

⁴⁰ [Indu 19] - Industrial Laser Solutions For Manufacturing, 2019

Werften



Je nach Ausrichtung der Werften auf Neubauten oder Reparaturanwendungen sind auch die Potentiale hinsichtlich der Nutzung additiver Fertigungstechnologien zu unterscheiden. Die Möglichkeit additiv hergestellter Ersatzteile wurde bereits kategorieübergreifend erfasst. Sie besteht auch für den Einsatz im Bereich der Werftinfrastruktur. Im Neubausektor bietet die Stahl- oder Aluminiumstruktur von Schiffen dagegen derzeit kaum wirtschaftlich sinnvolle Ansatzpunkte für eine additive Fertigung von Konstruktionselementen. Die Kosten für massive, gedruckte Großstrukturen aus Metall sind aufgrund zu geringer Aufbauraten der verfügbaren Verfahren noch nicht darstellbar.

Im Anwendungsfeld von Bootswerften können jedoch vielversprechende Potentiale im Formenbau erschlossen werden. So gibt es erste Bestrebungen, ganze Rümpfe aus Kunststoff oder Rumpfformen für Sportyachten additiv zu fertigen, anstatt diese mit hohem manuellem Aufwand und hohen Kosten zu produzieren. Der Bootsbauer Livrea hat dieses Potential 2018 bereits unter Beweis gestellt und Segmente eines Bootsrumpfes additiv gefertigt. Dadurch kann die Variantenvielfalt steigen, da Rumpfformen zum einen günstiger und zum anderen auch mit kürzeren Lebenszyklen gefertigt werden können. Folglich sind die höchsten Potentiale in den Aspekten Gestaltungsfreiheit, kundenindividuelle Produktion und Zeitreduzierung zu erwarten.

Der schichtweise Aufbau ermöglicht zusätzlich die Nutzung von Leichtbaupotentialen. Aktuell wird dies vorwiegend für Luftfahrtanwendungen genutzt, doch bietet es auch im Schiffbau das Potential, durch neue konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten, Aufbauten und Strukturen des Oberdecks leichter zu konstruieren, um bspw. weitere Kabinen auf Kreuzfahrtschiffen zu realisieren. Das Leichtbaupotential schlägt sich auch in dem Segment der Sportschiffe und dem Rennsport nieder, da diese noch weiter optimiert und den Bedürfnissen angepasste Schiffe und Boote realisiert werden können.

Schiffsantriebstechnik und Stromerzeugung

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Material einsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Schiffsantriebstechnik und Stromerzeugung	Motoren	■	□	■	■	□	□	□	■	□
	Getriebe	■	□	■	■	□	□	□	■	□
	Turbolader	■	□	■	■	□	□	□	■	□

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- (hell) = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

In der Kategorie der Schiffsantriebstechnik und Generatoren bieten der Motor und der damit verbundene Turbolader das größte Potential. Neben den Reparaturanwendungen durch Laserauftragsschweißen bei Kolben für Großmotoren, wäre es denkbar, Bauteile wie etwa die Einspritzdüse zusammenzufassen und zu drucken. Geringe Stückzahlen im Sondermotorenbau beeinflussen die Anwendung von additiver Fertigung dort ebenfalls positiv. Da Anwendungen in diesem Bereich dauerhaft hohen Temperaturen und Kräften ausgesetzt sind, gelten hier besonders hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Laufzeit. So können durch neue konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten oder die Integration von Funktionen in ein Bauteil bspw. durch Zusammenfassen von mehreren Funktionsträgern einer Baugruppe zu einem Bauteil Leistungssteigerungen realisiert werden.



Abbildung 20: AM-gefertigte Jet-Einspritzdüsen⁴¹

Weiteres Potential im Motorensystem bietet der Turbolader. Auch dieser agiert in einem System, das durch hohe Temperaturen und Leistungsanforderungen gekennzeichnet ist. Somit bietet sich an, die Gestaltungsfreiheiten der additiven Fertigung als Ausgangspunkt für die Möglichkeit der Neukonzeption hinsichtlich Funktionsintegration, Strömungsoptimierung und

⁴¹ [Engi 19] – EngineeringSpot, 2019

somit Performancesteigerung zu nutzen. Ein Beispiel hier bietet der von Königsegg gedruckte, variable Turbolader. In Abhängigkeit von der Drehzahl des Motors wird der Ladedruck angepasst und optimal gestaltet. Dabei wurden alle Komponenten direkt gedruckt, sodass kein Zusammenbau mehr nötig war. Im Zusammenspiel von einem kürzeren Entwicklungszyklus sowie der geometrischen Freiheit, die für das Design notwendig war, konnten neben Leichtbau und Funktionsintegration weitere Potentiale genutzt werden.

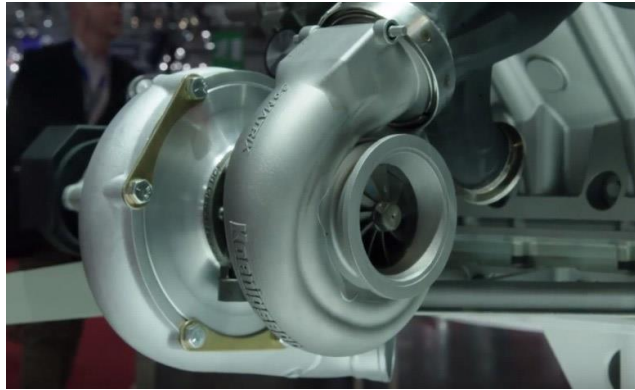


Abbildung 21: Additiv gefertigter Turbolader von Königsegg⁴²

⁴² [Turb 19] - Turbo Dynamics: Quality without Compromise, 2019

Manövrier- und Antriebssysteme

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheit	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Manövrier- und Antriebssysteme	Antriebsstrang	■	■	□	■	□	□	■	■	□
	Stabilisatoren	□	□	□	□	■	□	□	□	□
	Schiffspropeller	□	□	□	□	□	□	□	□	□

Bewertungssystematik
 ■ = Hoher Erfüllungsgrad
 ■ = Mittlerer Erfüllungsgrad
 □ = Kein Erfüllungsgrad

Durch die hohe Gestaltungsfreiheit bietet die additive Fertigung die Möglichkeit, Teile des Antriebsstrangs zu optimieren und Baugruppen zusammenzufassen, um die Leistung zu steigern. Denkbar sind hier integrierte Dämpfer für den Antriebsstrang, die exakt auf die Anforderungen des Schiffes ausgelegt sind. Auch sind optimierte Formen für Stabilisatoren denkbar, die sich an Strukturen aus der Natur orientieren. Ähnliche Ansätze konnten bereits bei optimierten Flügeln in der Luftfahrt erprobt werden.



Abbildung 22: Wabenstruktur eines optimierten Flügels, mittels AM hergestellt⁴³

Ein weiteres potentiell Bauteil ist der Schiffspropeller. Hier sind ebenfalls konstruktive Eingriffe möglich, um eine Leistungsoptimierung zu erzielen und den Materialeinsatz hierfür zu minimieren. Bereits 2017 wurde der erste additiv gefertigte Schiffspropeller in Kooperation zwischen dem Rotterdam Additive Manufacturing Lab und Autodesk erstellt, zugelassen und auf der Hannover Messe dem Publikum präsentiert.



Abbildung 23: Additiv gefertigter Schiffspropeller WAAMPeller⁴⁴

⁴³ [Form 19] - Form+Werkzeug, 2019

⁴⁴ [Raml 19] - Rotterdam Additive Manufacturing Fieldlab, 2019

Schiffsbetriebsanlagen

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Material einsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Schiffsbetriebsanlagen	Öl-Wasser Separatoren	■			■	■			■	
	Abgastechnik				■					
	Pumpentechnik									
	Wärmetauscher							■		
	Hydrauliksysteme							■		
	Filtertechnik								■	

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

Als weiteres Themenfeld mit Anwendungspotential in der additiven Fertigung können die Schiffsbetriebsanlagen gesehen werden. U.a. können komplexe Teile wie Öl-Wasser-Separatoren hinsichtlich des Zusammenfassens von Baugruppen Potentiale bieten. Ferner bietet es sich insbesondere bei Neuentwicklungen wie bspw. bei der Abgastechnik an, über die additive Fertigung die Bauteilfunktion zu optimieren. Bei Wärmetauschern bietet sich Potential über die Möglichkeit Bauteilstrukturen mittels Simulation so auszulegen, dass eine optimale Übertragung gewährleistet wird. Erste Beispiele hierfür finden bereits Anwendungen in anderen Industrien wie bspw. dem Automobilbau.

Schiffsausrüstung

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Material einsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Schiffsausrüstung	Yachtzubehör	■		■	■			■	■	

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

Für Schiffsausrüster, d.h. in diesem Fall vorwiegend Großhändler und Versorgungsbetriebe, bringt die additive Fertigung die Möglichkeit, das Produktangebot um additiv gefertigte Komponenten zu erweitern. Auch sind damit Individualanfertigungen kosteneffizient möglich, die ggf. auch einen performancesteigernden Charakter durch die Erfahrungen aus der Praxis mit sich bringen. Speziell wirkt sich in dieser Kategorie auch die Möglichkeit der additiven Er-

satzteulfertigung aus, wie bereits unter „Kategorieübergreifend“ erwähnt, da somit trotz steigender Variantenvielfalt eine höhere Verfügbarkeit bei den Versorgungsbetrieben zu erwarten ist.

Meerestechnik

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Meerestechnik	Bohrtechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Unterwasserfahrzeuge	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Offshoretechnologie	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

Im Themenfeld der Meerestechnik konnten Anwendungsbeispiele in den Bereichen der Bohrtechnik, Unterwasserfahrzeuge und Offshore-Technologie gefunden werden.

In der Bohrtechnik werden häufig Materialien eingesetzt, die besonders resistent gegen Ab- rasion sein müssen, zugleich allerdings die Möglichkeit bieten, Bauteile so zu konzipieren, dass auf kleinem Raum viele Funktionen vorhanden sind. Da durch die konstruktiven Gestaltungs-freiheiten genau diese Funktionsintegration erreicht werden kann, ist hier somit ein hoher Erfüllungsgrad gegeben. Auch müssen die Bauteile nicht mehr aufwendig zerspannt werden, sondern können nahe der Endgeometrie produziert werden. Ein effizienter Materialein-satz, bei einer Produktqualitätssteigerung durch ein optimiertes Bauteildesign, wird möglich. GE Oil & Gas nutzt diese Potentiale bereits um Kontrollventile additiv zu produzieren.

Bei Unterwasserfahrzeugen kann ebenfalls die konstruktive Gestaltungsfreiheit als großes Potential gesehen werden, da Funktionsintegrationen vorgenommen werden können, die den begrenzten Platz an Bord erweitern. Im Weiteren können Leichtbaupotentiale realisiert werden, die die Manövrierfähigkeit von Unterwasserfahrzeugen verbessern.

Hafentechnik und Marinas

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Hafentechnik und Marinas	Bauteilsonderanfertigungen	■	□	□	□	□	■	■	■	■

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

In den Bereichen Hafentechnik und maritime Dienstleistungen sind Anwendungspotentiale für die additive Fertigung neben dem kategorieübergreifenden Potential der Ersatzteilerfertigung insbesondere bei Neuentwicklungen zu sehen. Hierunter sind Sonderanfertigungen im Hafenbereich zu verstehen, die von in großer Stückzahl produzierten Standardbauteilen abweichen.

Maritime Dienstleistungen

		Potentiale von Additiver Fertigung in industrieller Anwendung								
		Konstruktive Gestaltungsfreiheiten	Designfreiheiten	Leichtbaumöglichkeiten	Funktionsintegration im Bauteil	Materialeinsatzreduzierung	Kostenreduktion	Kundenindividuelle Produktion	Produktqualitätssteigerung	Zeitreduzierung
Kategorie	Anwendungsbeispiel									
Maritime Dienstleistungen	Konstruktionsdienstleistungen	■	■	■	■	■	■	□	□	□

Bewertungssystematik

- = Hoher Erfüllungsgrad
- = Mittlerer Erfüllungsgrad
- = Kein Erfüllungsgrad

Prototypen, welche bspw. Konstruktionsdienstleister oder auch Hafenplaner nutzen, um ein erstes haptisches Bauteil unter Berücksichtigung von Kosten zu erstellen, können mittels der additiven Fertigung individuell und Kosteneffizient produziert werden. Neben dem Prototyping werden sich allerdings eben benannte Konstruktionsdienstleister auch zunehmend mit neuen Tools für Freiformflächen etc. auseinandersetzen müssen, welche Ihnen neue Möglichkeiten für Bauteilgeometrien, Designs, Leichtbau, Funktionsintegration und Materialreduzierung bieten und somit die Art zu konstruieren verändern.

1.2.3 Fazit

Basierend auf der Technologieübersicht in Kapitel 1.1.2 und den Anwendungsmöglichkeiten in Kapitel 1.1.1 lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für den maritimen Wirtschaftssektor ableiten:

- Die Ermittlung von unmittelbaren und zukünftigen Kosteneinsparpotentialen in der Kleinserienfertigung und Ersatzteulfertigung von Kunststoffen ist vorzunehmen.
- Ein kurzfristiger Einstieg in den Formen- und Werkzeugbau mit Hilfe Additiver Fertigung ist zu prüfen.
- Es sollten Reparaturanwendungen mit dem DED-Verfahren identifiziert werden.
- Identifikation von komplexen Metallbauteilen bei Produkten mit hoher Preistoleranz wie beispielsweise im Yachtbau.
- Die Potentiale der Ersatzteulfertigung mit Metall sind heute zu evaluieren. Hierbei ist zu beachten, dass für eine Implementierung ein Zeitrahmen von ein bis drei Jahren notwendig ist.
- Additiv gefertigte Bauteile können insbesondere bei Schiffsaggregaten, mittelfristig zu Produktverbesserung und Kostenreduktion führen. Anwendungsbauteile sind heute zu identifizieren, da mit einer Implementierungszeit von ein bis drei Jahren zu rechnen ist.
- Ein sehr hohes Zukunftspotential für die maritime Wirtschaft bieten Großstrukturanwendungen von mehreren Kubikmetern (vgl. Gefertec⁴⁵), die langfristig mit den Directed Energy Deposition Verfahren gefertigt werden können. Anwendungen sind heute zu identifizieren. Gegebenenfalls sind branchen- und anwendungsspezifische Materialien und Verfahrenssteuerungen zu entwickeln.
- Wann die Serienreife des Binder Jetting Verfahrens erreicht wird, ist derzeit schwer abschätzbar. Auf Grund des disruptiven Potentials, sollte die Entwicklung der Technologie beobachtet werden.

⁴⁵ [Gefe 19] - Gefertec: 3D Metal Printer für die industrielle Fertigung, 2019

Welche Potentiale, Technologien und Handlungsempfehlungen auszuwählen sind, ist unternehmensspezifisch zu entscheiden. Die Tabelle 9 unterstützt bei der Auswahl geeigneter Technologien und Anwendungspotentiale.

Tabelle 9: Handlungsempfehlungen zur kurz-, mittel- und langfristigen Auswahl von additiven Fertigungstechnologien

		Additive Fertigungstechnologien						
		Laserstrahl Schmelzen	Elektronenstrahlschmelzen	Binder Jetting	Directed Energy Deposition	Fused Deposition Modeling	Selektives Lasersintern	Multi Jet Fusion
Kurzfristige Potentiale								
Ersatzteulfertigung und Kleinserien aus Kunststoff								
Sonderanfertigung, High Price & Luxury Anwendungen								
Prototypenbau								
Reparaturanwendungen								
Formen- und Werkzeugbau								
Mittelfristige Potentiale (1-3 Jahre)								
Ersatzteulfertigung aus Metall								
Kleinserien von Funktionsintegrierten Bauteilen mit verbesserter Produktqualität (Metall)								
Serienfertigung mittlerer Stückzahlen aus Kunststoff								
Langfristige Potentiale (3-10 Jahre)								
Aufbau von Großstrukturen zur Optimierung der Funktion und Produktqualität								
Serienfertigung kleiner Metallbauteile in Gussqualität								
Fertigung mittlerer Stückzahlen von funktionsintegrierten Bauteilen mit verbesserter Produktqualität (Metall)								

Bewertungssystematik
 = Hoher Erfüllungsgrad
 = Mittlerer Erfüllungsgrad
 = Kein Erfüllungsgrad

1.3 Prüfung der AM-Potentiale bei Unternehmen der maritimen Wirtschaft

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 1.2 theoretisch analysierten AM-Anwendungspotentiale im maritimen Kontext anhand von praktischen Bauteilanalysen bei Unternehmen der maritimen Branche verifiziert.

1.3.1 Bauteilanalyse am Beispiel der Hamburg Port Authority

Die Hamburg Port Authority (HPA) ist Eigentümer des Großteils der Hafengrundstücke der Hansestadt Hamburg und betreibt mit rund 1.800 Mitarbeitern dessen Hafenmanagement. Ein zentrales Aufgabengebiet der HPA ist die Aufrechterhaltung des Hafenbetriebs. Die sogenannte Technical Division Maintenance & Operation (TDMO) ist in diesem Zusammenhang mit der Entwicklung und Unterhaltung der zugehörigen Infrastruktur betraut. Sie stellt als technischer Dienstleister täglich die Funktionsfähigkeit des Hafeninfrastrukturnetztes sicher, welches 72 Quadratkilometer umfasst. Die Hafeninfrastruktur beinhaltet neben wasserseitiger Infrastruktur wie beispielsweise Kaimauern, Schleusen, Fähranlegern und Pontons auch landseitige Infrastruktur wie beispielsweise Straßen, Brücken und Gleisanlagen. Bei diesen wasser- und landseitigen Bauwerken handelt es sich in der Regel um Unikate, welche überwiegend eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten erfüllen müssen. Die TDMO steht folglich vor der Herausforderung, ein sehr umfangreiches und variantenreiches Ersatzteilsortiment rund um die Uhr bereitstellen zu müssen, um den Hafenbetrieb vor dem Erliegen zu bewahren.

In Kapitel 1.2.1 sind Unternehmen mit einem maritimen Bezug kategorisiert worden. Die HPA ist der Kategorie Hafentechnik und Marinas zuzuordnen. Für diese Kategorie ist insbesondere das Potential der Ersatzteilmontage mittels AM analysiert worden. Darüber hinaus kann AM in dieser Unternehmenskategorie einen Beitrag dazu leisten, Bauteilsonderanfertigungen wirtschaftlicher als mit KF bereitzustellen. Diese beiden Potentiale werden anhand von vier ausgewählten Anwendungsfällen der HPA im Folgenden verifiziert:

Kugelkipplager

Das Kugelkipplager dient als flexibles Verbindungselement zwischen einem Fähranleger-Ponton und der zugehörigen Übergangstreppe. Die Kugel des Kipplagers hat einen Durchmesser von knapp 150 mm und wird bislang genauso wie die zugehörige Pfanne aus Edelstahl-Vollmaterial gedreht. Verschleißbedingt müssen jährlich etwa 5 bis 10 dieser Kugelkipplager getauscht werden. Angesichts der Material-, Genauigkeits-, Größen- und Festigkeitsanforderungen dieses Bauteils ist LBM das am besten geeignete AM-Verfahren zur Substitution der spanenden Fertigung (vgl. Kapitel 1.1.2).



Abbildung 24: Kugelkipplager (Kugel links und Pfanne rechts) ⁴⁶

Additiv ließen sich etwa 10% der Fertigungskosten sparen. Jedoch wäre der entscheidende Vorteil durch den Wechsel zu AM, dass sich durch die zusätzlichen Designfreiheiten bei gleichen Kosten ein Mehrwert im Hinblick auf die manuelle Endmontage am Ponton ergibt. Durch die Umsetzung von Leichtbau durch innere Hohlstrukturen (basierend auf Festigkeitssimulation) oder einen Materialwechsel von Edelstahl auf Titan ließen sich bis zu 25% Gewicht einsparen, was den Einbau des wichtigen Kipplagers für den Monteur wesentlich erleichtern könnte.

Lagerdichtring

Lagerdichtringe fallen in Größenordnungen von 40 bis 60 Stück pro Jahr als Verschleißteil an. Diese dichten beispielsweise bei Sperrwerken, Schleusen oder kippbaren Brücken verschiedenste Lagerschalen ab und variieren je nach Einsatzzweck in ihren Abmessungen. Die Lagerringe werden bislang aus Polyethylen vom HPA-internen Werkzeugbau gedreht, da es sich überwiegend nicht um Standarddichtringe handelt, welche sich von Lieferanten beziehen ließen.



Abbildung 25: Lagerdichtring ⁴⁷

Angesichts der Festigkeits-, Größen- und Genauigkeitsanforderungen ist das SLS-Verfahren für diesen Anwendungsfall prädestiniert (vgl. Kapitel 1.1.2). Nach aktuellem Stand der Technik lässt sich Polyethylen allerdings nicht mit dem SLS-Verfahren verarbeiten, weswegen im Einzelfall zu prüfen ist, ob ein Materialwechsel auf einen additiv zu verarbeitenden Kunststoff wie PA12 oder TPU im Hinblick auf die Verschleißanforderungen möglich wäre. In diesem

⁴⁶ Hamburg Port Authority

⁴⁷ Hamburg Port Authority

Anwendungsfall kommt das AM-Potential der kostengünstigen Kleinserienfertigung zum Tragen. Es gilt im Konstruktionsprozess nun nur noch die charakteristischen Parameter wie Innen- und Außendurchmesser anzupassen. Das entsprechende digitale Datenmodell lässt sich dann automatisch von der SLS-Anlage bedarfsgerecht fertigen. Konventionell wäre dies mit einer drehtringspezifischen NC-Programmierung oder mit manueller Zerspanung verbunden. Zusätzlich ermöglicht der AM-Prozess eine höhere Materialeffizienz im Gegensatz zum hohen Spanvolumen beim konventionellen Drehen. Die Bereitstellungskosten für die Lagerdichtringe würden sich durch einen Wechsel von KF auf AM um bis zu 40% senken lassen (unter der Voraussetzung das eine Volllast der AM-Anlage herrscht).

Gehäuse und Verkleidungen

Eine Beschädigung durch Kollision von Verkleidungen und Gehäusen von Motoren verschiedenster Art (bspw. die Lüftungshaube zum Schutz des Lüftungspropellers) hat bislang den Austausch des gesamten Motors erfordert, da sich solche Verkleidungen und Gehäuse nicht im Einzelnen als Ersatzteil beschaffen lassen. Diese Gehäuse weisen in der Regel organische Freiformflächen auf, welche sich konventionell in kleinen Stückzahlen nur sehr schwer vermessen und fertigen lassen, da es sich um gegossene Massenprodukte handelt.



Abbildung 26: Elektromotor (Lüftungshaube am rechten Bildrand)⁴⁸

Durch den kombinierten Einsatz von 3D-Scan und AM-Technologie würde dies wesentlich erleichtert werden. Mit Hilfe des 3D-Scans ließe sich in Minuten ein digitales Datenmodell vom ursprünglichen Gehäuse erstellen (ggf. mit Genehmigung des Herstellers) und dieses könnte mit geringfügiger konstruktiver Modifikation mittels AM gefertigt werden. So würde der Einsatz von AM die Investition in einen neuen Motor einsparen. Optional könnte das additiv gefertigte Ersatzgehäuse funktionsgetrieben optimiert werden, wie beispielsweise durch einen Materialwechsel von Kunststoff auf Metall zur Festigkeitssteigerung.

Entkopplungsfeder

Neben Ersatzteilen fertigt der HPA-interne Werkzeugbau auch Sondermaschinenbauprodukte, wie beispielsweise einen Messtorpedo für den Peil- und Messdienst. Die Fertigungsrestriktionen von KFV können die Realisierbarkeit von solchen Sondermaschinenbauprojekten einschränken. Eine Komponente des Messtorpedos ist die sogenannte Entkopplungsfeder, welche einen 1mm schmalen Verbindungssteg aufweist. Im Fräsverfahren ist dies eine anspruchsvoll zu fertigende Geometrie. Mit AM lassen sich nahezu beliebig komplexe Geometrien, wie auch diese Entkopplungsfeder, bei konstanten Kosten fertigen (vgl. Kapitel 1.1.1).

⁴⁸ Hamburg Port Authority



Abbildung 27: Entkopplungsfeder⁴⁹

Darüber hinaus besteht durch den Wechsel von KF zu AM die Möglichkeit, die anspruchsvolle Montage von Teilen mit Toleranzen im 0,1 mm Bereich zu umgehen, indem diese Bauteile als eine komplette Baugruppe gefertigt werden. Angesichts der Material-, Genauigkeits-, Größen- und Festigkeitsanforderungen dieses Bauteils ist LBM das geeignetste AM-Verfahren zur Substituierung der spanenden Fertigung (vgl. Kapitel 1.1.2). Bei marginal geringeren Kosten ließe sich so eine Funktionsoptimierung des Messtorpedos erzielen.

1.3.2 Bauteilanalyse am Beispiel von German Naval Yards

Die Werftengruppe German Naval Yards beschäftigt in Deutschland etwa 1.000 Mitarbeiter und betreibt Schiffbau an insgesamt drei Standorten in Schleswig-Holstein. Das 2009 gegründete Unternehmen ist insbesondere auf den Bau von Marineschiffen und Mega-Yachten sowie deren Reparatur ausgerichtet. Am Hauptsitz der Unternehmensgruppe plant und fertigt die German Naval Yards Kiel GmbH, die 2011 aus dem Überwasser-Schiffbau von HDW (Howaldtswerke-Deutsche Werft) hervorgegangen ist, vorwiegend komplexe und hochintegrierte Fregatten und Korvetten. Zum Verbund gehören auch die Lindenau Werft ebenfalls in Kiel sowie die Nobiskrug Werft in Rendsburg.

Bei der Potentialanalyse für diese Studie bietet die Schiffsstruktur selbst sowohl beim Neubau als auch bei der Reparatur kaum Ansatzmöglichkeiten zur Anwendung der AM-Technologie. Die vergleichsweise geringen Aufbauraten der additiven Fertigungsanlagen in Kombination mit den meist sehr großen Bauvolumina der Strukturelemente von Schiffen verhindern prinzipiell einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz. Im Bereich der Werftinfrastruktur zeigt sich jedoch eine andere Situation. Analog zum bereits beschriebenen Szenario bei der Hamburg Port Authority besteht auch für Werftanlagen aufgrund ihrer langen Lebens- und Einsatzdauer häufig Bedarf an Ersatzteilen. Da für diese Bauteile selten eine Lagerhaltung betrieben wird, sind im Bedarfsfall schnelle Fertigungslösungen gefragt. Zwar weisen auch hier die Komponenten oft große Abmessungen auf, aber höhere Kosten für eine additive Herstellung lassen sich durch eine schnellere Verfügbarkeit der Ersatzteile rechtfertigen, um die Betriebsbereitschaft der Infrastruktur wie z. B. Kran- und Dockanlagen zu sichern bzw.

⁴⁹ Hamburg Port Authority

schnellstmöglich wiederherzustellen. Wenn durch den Einsatz additiv nachgefertigter Komponenten Ausfallzeiten der Infrastruktursysteme verkürzt werden können, entsteht ein Mehrwert durch die Technologie, der sich im stetigen Fortgang der Produktion oder damit in Zusammenhang stehender Betriebsabläufe widerspiegelt.

Schienezange

So musste beispielsweise im Jahr 2016 eine Schienezange des 900-Tonnen-Portalkrans von German Naval Yards in Kiel komplett instandgesetzt werden. Die Schienezange ist verantwortlich dafür, die Portalbrücke des Krans außerhalb der Verriegelungsposition während des Hebens oder Absenkens einer Last an horizontalen Verfahrbewegungen zu hindern.



Abbildung 28: 900-Tonnen-Portalkran (links); Schienezange (Mitte und rechts)⁵⁰

In diesem konkreten Fall hätte die additive Fertigung einen Beitrag leisten können, um einzelne Komponenten der Schienezange zu ersetzen, sodass für diese und ähnliche Situationen hypothetisch ein Anwendungspotential für die in dieser Studie untersuchte alternative Herstellmethode attestiert wird. Allerdings ist die Sinnhaftigkeit der Anwendung grundsätzlich von der Geometrie des Bauteils abhängig. Das bedeutet, dass ein einfacher gebrochener Bolzen (wie in Abbildung 28 dargestellt) immer schneller und günstiger mit konventionellen Verfahren (also durch Drehen) reproduziert werden kann. Besitzt ein Bauteil hingegen Freiformflächen bzw. eine größere geometrische Komplexität, steigt der Fertigungsaufwand mit herkömmlichen Technologien, und die additive Fertigung gewinnt im Vergleich an Attraktivität. Demzufolge sind Guss- und Schmiedeteile prädestiniert für eine Substitution durch AM-Ersatzteile, insbesondere dann, wenn die Gussformen oder Gesenke der ursprünglichen Bauteile nicht mehr zur Verfügung stehen.

Sickerwasserpumpe

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist in diesem Zusammenhang die in Abbildung 29 gezeigte Sickerwasserpumpe. Sie wird bei Ausfall von stationären Pumpen im Sickerwassergraben von Dockanlagen verwendet. Derartige Pumpen sind bei den Anbietern keine Regalware. Je nach Größe der Pumpe kann die Lieferzeit mehrere Wochen oder sogar Monate betragen. Tritt ein Defekt dieser Pumpen auf, bietet die additive Fertigung die Möglichkeit zur Instandsetzung der Pumpe anstatt eines vollständigen Austausches und der damit verbundenen Wartezeit bis zur Lieferung.

⁵⁰ German Naval Yards Kiel GmbH



Abbildung 29: Sickerwasserpumpe (links); Klauenkupplung (Mitte); Bauteilabmessungen (rechts)⁵¹

Bei einer Entscheidung zur Reparatur wären schadhafte Gussteile des Pumpengehäuses oder die Klauenkupplung der Pumpe additiv herstellbar. Mit Abmessungen kleiner als 250 mm ließe sich dieses Bauteil auch mit einer Standardanlage im Pulverbettverfahren (LBM) drucken. Zu beachten ist dabei, dass CAD-Modelle der additiv zu fertigenden Bauteile erforderlich sind, die bei Bedarf z. B. mittels 3D-Scan-Verfahren erst erzeugt werden müssen (wie bereits in Kapitel 1.3.1 beschrieben).

1.3.3 Bauteilanalyse am Beispiel von Becker Marine Systems

Die Becker Marine Systems GmbH aus Hamburg ist der weltweit führende Anbieter von Manövrier- und Energiesparsystemen für die maritime Anwendung. Das Unternehmen wurde 1946 von Willi Becker gegründet und beschäftigt heute etwa 250 Mitarbeiter. Der große Erfolg des Unternehmens basiert auf mehreren bahnbrechenden Innovationen, insbesondere der Erfindung des Flossenruders. Nahezu alle Schiffstypen wie Supertanker, Containerschiffe, Fähren, Kreuzfahrtschiffe und Luxusyachten werden mit Rudersystemen von Becker ausgestattet.

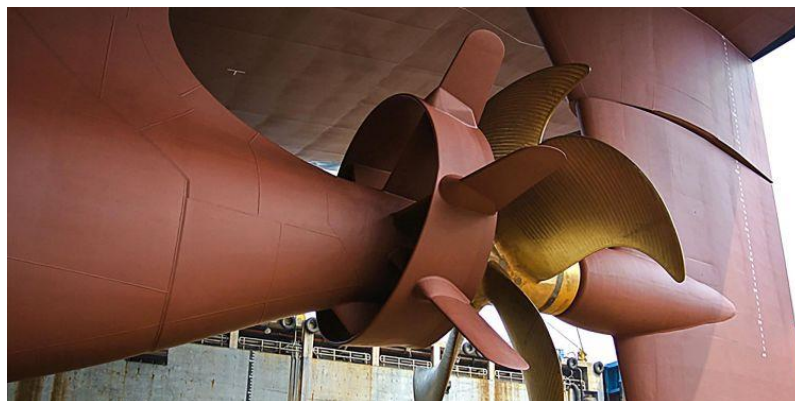


Abbildung 30: Becker Mewis Duct® Twisted⁵²

Im Jahr 2009 brachte Becker Marine Systems eine neuartige Düse (Becker Mewis Duct®) auf den Markt, mit der bei großen, langsam fahrenden Schiffen durchschnittlich 6% des

⁵¹ German Naval Yards Kiel GmbH

⁵² Becker Marine Systems GmbH

Brennstoffs eingespart werden können, drei Jahre später gefolgt von einer Version (Becker Mewis Duct® Twisted) für schnellere Schiffe (vgl. Abbildung 30). Die Mewis-Düse wird jeweils vor dem Schiffspropeller installiert (vgl. Abbildung 31) und erzeugt einen Vordrall in seiner Anströmung, sodass sich der Propulsionswirkungsgrad verbessert, was zu einer Steigerung der Energieeffizienz bzw. einer Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes führt. Ebenfalls der Vermeidung von Treibhausgasen dienen weitere Produkte wie eine schwimmende Stromversorgungsplattform (LNG Hybrid Barge) für Kreuzfahrtschiffe im Hafen und ein kompaktes Batteriesystem für den maritimen Einsatz.

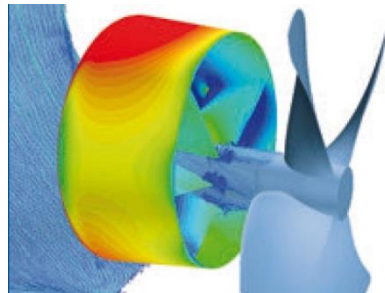


Abbildung 31: Verbesserung der Anströmung des Schiffspropellers durch die Mewis-Düse⁵³

Als besonders fortschrittliches Unternehmen forscht Becker Marine Systems auch an der Substitution von Stahl durch Faserverbundwerkstoffe und beschäftigt sich zudem bereits seit einigen Jahren mit den Möglichkeiten einer Nutzung der additiven Fertigungstechnologien, u. a. um Leichtbau zu betreiben.

Becker Mewis Duct®

Aufgrund ihrer Konturen eignet sich die Mewis-Düse grundsätzlich sehr gut für die Anwendung von AM-Verfahren. Bei konventioneller Herstellung bedeuten dagegen die vorhandenen Freiformflächen der Düse umfangreiche Fräsoperationen, entsprechenden Programmieraufwand und Materialverbrauch. Doch der erste Gedanke, eine Mewis-Düse komplett aus Metall zu drucken, lässt sich aus Kostengründen nicht verwirklichen. Stattdessen entstand der Plan, gemeinsam mit dem Fraunhofer IAPT ein Forschungsprojekt zu beantragen und einzelne Komponenten – und zwar die Fin Tips (d. h. die Flossenenden) – der Mewis-Düse im 3D-Druck aus Kunststoff aufzubauen. Die additive Fertigung der Teile aus Kunststoff ist deutlich günstiger als aus Metall und spart zusätzlich Gewicht, zumal die Festigkeitsanforderungen der Fin Tips prinzipiell auch von Kunststoffen erfüllt werden können.

Das Vorhaben wurde bewilligt (gefördert durch die Hamburgische Investitions- und Förderbank) und startete im Februar 2018. Ziel des Projektes ist es nun, einen anforderungsge rechten und druckbaren Werkstoff zu finden, den Druckprozess für eine Großstruktur zu entwickeln und das Design der Fin Tips zu optimieren. Da mit der AM-Technologie beinahe jegliche Fertigungsrestriktionen entfallen, kann die Geometrie der Fin Tips individuell derart gestaltet werden, dass die bestmögliche Anströmung des Schiffspropellers erreicht wird.

⁵³ Becker Marine Systems GmbH

Speziell die Version Mewis Duct® Twisted profitiert mutmaßlich von der geometrischen Freiheit der neuen AM-Methode, indem auch eine stärkere Verdrehung der Fin Tips einfach herstellbar wäre. Um diesen Vorteil zu nutzen, muss als eine der Projektaufgaben allerdings eine Schnittstelle entwickelt werden, mit der sich die Kunststoffbauteile mit der Metall-Grundstruktur der Mewis-Düse sicher verbinden lassen (vgl. Abbildung 32).

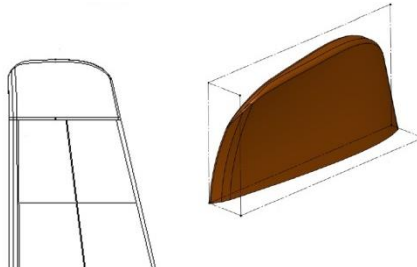


Abbildung 32: Fin Tip einer Mewis-Düse⁵⁴

Neben einer Verbesserung des Wirkungsgrades und weiterer Energieersparnis im Schiffsbetrieb strebt Becker Marine Systems mit dem Forschungsprojekt eine Verringerung des Gewichts sowie eine Kostensenkung in der Produktion an, sodass ein zusätzlicher Anreiz sowohl zur Erstausrüstung verschiedener Schiffstypen mit Mewis-Düsen als auch zur Nachrüstung bestehender Flotten geschaffen wird. Eine vollständige Antwort auf die Frage der Realisierbarkeit der ambitionierten Projektziele erwarten die Kooperationspartner Anfang des Jahres 2021.

1.3.4 Bauteilanalyse am Beispiel von Gebr. Potthast Kunststoffspritzguss

Die Gebr. Potthast Kunststoffspritzguss GmbH & Co. KG ist ein KMU mit 35 Mitarbeitern aus Dänischenhagen im Kreis Rendsburg-Eckernförde. Bereits 1945 begann die Unternehmensgeschichte mit der Fertigung von Füllfederhaltern, heute verfügt der Anbieter von Kunststoffbauteilen über 16 Spritzgussanlagen. Das Know-how umfasst die gesamte Produktionskette von der Entwicklung über die Konstruktion bis hin zur Herstellung und Montage der Komponenten. Dabei werden zahlreiche verschiedene Kunststoffe von PP bis PEEK in Klein- und auch in Großserien verarbeitet. Das 2-Komponenten-Spritzgießen gehört ebenso zum Portfolio wie das Insertverfahren (Umspritzen von Einlegeteilen z. B. aus Metall) und das individuelle Einfärben der Kunststoffe.

Eine zweite Sparte des Unternehmens bildet der Werkzeug- und Formenbau. Aufgrund der Erfahrung in der Kunststoffverarbeitung besitzt Gebr. Potthast die Expertise, um auch die für den Spritzguss benötigten Werkzeuge und Formen zu gestalten. Demzufolge entwickelt und fertigt Gebr. Potthast kundenspezifische Werkzeuglösungen, die optimal auf den Verarbeitungsprozess und das herzustellende Bauteil abgestimmt sind.

⁵⁴ Becker Marine Systems GmbH

Hauptgehäuse der Aufblasautomatik für Schwimmwesten

Im maritimen Sektor übernimmt Gebr. Potthast die Rolle als ein Zulieferer von Kunststoffteilen für die Schiffsausrüstung. Ein Teilebeispiel ist das Hauptgehäuse der Aufblasautomatik für Schwimmwesten (siehe Abbildung 33). Das Gehäuse wird mit einer Jahresproduktion von 20.000 Stück im Spritzgussverfahren hergestellt.



Abbildung 33: Hauptgehäuse der Aufblasautomatik für Schwimmwesten⁵⁵

Bei der Analyse der Potentiale für den Einsatz von AM-Technologien geriet dieses Gehäuse ins Blickfeld, jedoch nicht mit dem Ziel, das Gehäuse selbst aus Kunststoff zu drucken. Die Seriengröße von 20.000 Einheiten pro Jahr spricht eindeutig für eine Herstellung mittels Spritzgießen, aber die Vorteile der additiven Fertigung lassen sich in Bezug auf den Spritzgusswerkzeugbau nutzen. Das sehr komplexe Kunststoffgehäuse erfordert Spritzgusswerkzeuge (siehe Abbildung 34), die in mehreren Iterationsschritten entwickelt, aufgebaut, getestet und verbessert wurden.

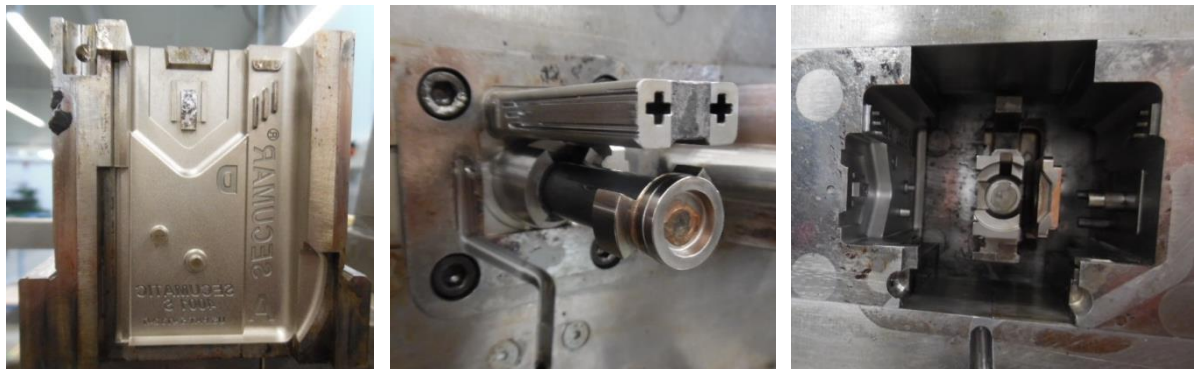


Abbildung 34: Spritzgusswerkzeuge für das Hauptgehäuse der Aufblasautomatik⁵⁶

Insbesondere der Kern des Werkzeugs (vgl. Abbildung 34: Bild in der Mitte) stellt dabei eine große Herausforderung dar. Er ist drehbar gelagert, um einen Hinterschnitt im Spritzgussteil erzeugen zu können, und er muss hohe Festigkeitsanforderungen erfüllen. Das Hauptproblem besteht jedoch in der Temperierung des Kerns, sodass für derartige Werkzeuge spezielle Werkstoffe wie Kupfer-Beryllium- oder Eisen-Kobalt-Nickel-Legierungen zur Verbesserung

⁵⁵ Gebr. Potthast Kunststoffspritzguss GmbH & Co. KG

⁵⁶ Gebr. Potthast Kunststoffspritzguss GmbH & Co. KG

der Wärmeleitfähigkeit gegenüber Stahl verwendet werden, die allerdings eine geringere Festigkeit als Werkzeugstahl aufweisen.

Durch Anwendung der additiven Fertigung und die damit verbundene Gestaltungsfreiheit ließen sich stattdessen oberflächennahe und demzufolge besonders wirksame Kühlstrukturen in den Kern einbringen, um dort mit Hilfe eines flüssigen Kühlmittels ein gezieltes Temperaturmanagement zu betreiben. Eine schnellere Abkühlung des Werkzeugs ermöglicht dann einen früheren Auswurf des Spritzgussbauteils und damit eine Verkürzung der Zykluszeiten. Das neue Spritzgusswerkzeug könnte im LBM-Verfahren aus Metall (z. B. Stahl oder Titan) additiv hergestellt werden, die mutmaßlich höheren Fertigungskosten für das Werkzeug amortisieren sich durch den Produktivitätsgewinn im Spritzgussprozess und auch durch eine höhere Bauteilqualität infolge einer homogenen Verteilung der Wandtemperaturen.

1.3.5 Bauteilanalyse am Beispiel von develogic subsea systems

Die develogic GmbH aus Hamburg besteht seit dem Jahr 2000 und ist ein international ausgerichtetes KMU, das sich auf die Realisierung von Projekten im Bereich der Meerestechnik spezialisiert hat. Das Hightech-Unternehmen entwickelt und fertigt Komponenten für Unterwasseranwendungen, wie sie beispielsweise im Rahmen ozeanographischer Untersuchungen oder der Offshore-Förderung von Rohstoffen notwendig sind. Das Produktportfolio von develogic beinhaltet kundenspezifische Komplettlösungen für die Datenerfassung sowie deren Übertragung und Auswertung im maritimen Umfeld. Ein typisches Beispiel sind akustische Unterwasser-Kommunikationssysteme. Aufgrund der Einsatzumgebung bestehen hohe Anforderungen an die Komponenten im Hinblick auf Temperatur-, Druck- und Seewasserbeständigkeit, sodass übertragen auf die Produktion dieser Komponenten hohe Qualitätsansprüche in Bezug auf die verwendeten Materialien und Prozesse gelten. Demzufolge verfügt develogic über eine eigene Fertigung, die sowohl die Montage der Elektronikbaugruppen als auch die Herstellung mechanischer Bauteile mit Hilfe moderner CNC-Bearbeitungszentren selbst übernimmt.

Auf der Suche nach potentiellen Bauteilen für den Einsatz von additiven Herstellungsverfahren ergaben sich bei develogic zahlreiche Ansatzpunkte. Die kundenindividuelle Fertigung des Unternehmens bewirkt in der Regel kleine Losgrößen, für die bei AM-Verfahren Kostenvorteile entstehen. Zudem zeigt die hier getroffene Auswahl Bauteile, die fräsend nur mit hohem Aufwand herstellbar sind. Eine mögliche AM-Anwendung ist der in Abbildung 35 dargestellte Pod-Antrieb für die Schiffbauversuchsanstalt, der dort im Einsatz getestet werden soll.

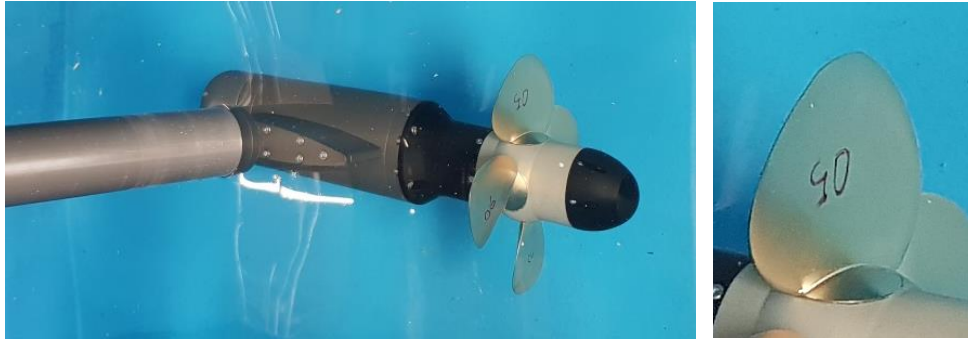


Abbildung 35: Pod-Antriebseinheit (links); Propellerblatt der Antriebseinheit (rechts)⁵⁷

Die Antriebseinheit besteht aus einem Gehäuse und vier Propellerblättern, die mit dem Gehäuse verschraubt werden. Die theoretische Alternative, einzelne Bauteile des Pod-Antriebs zu gießen, kommt bei den geringen Stückzahlen in Anbetracht der hohen Einmalkosten für eine Gussform nicht in Frage, folglich ist ein Vergleich zwischen additiver und subtraktiver (d. h. fräsender) Herstellung sinnvoll.

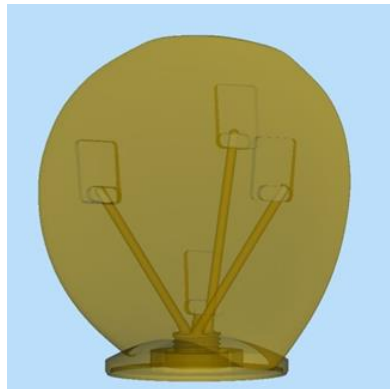
Propellerblatt

Jedes Propellerblatt bietet aufgrund seiner Freiformflächen ohnehin großes Potential zur Anwendung additiver Fertigungsmethoden. Da der Versuchsantrieb im Einsatz messtechnisch überwacht werden soll, müssen die hier gezeigten Propellerblätter mit Taschen zur Aufnahme von Dehnungsmessstreifen sowie innen liegenden Kanälen für die Zuführung der zugehörigen Sensorkabel versehen werden (vgl. Abbildung 36). Diese Aussparungen im Bauteil können beim additiven Aufbau der Komponente bereits realisiert werden, sodass die betreffenden nachgelagerten Bearbeitungsschritte, die konventionell erforderlich wären, wegfallen. Aktuell wird das Propellerblatt aus Messing gefräst, die Kosten betragen bei konventioneller Fräsfertigung etwa 440 Euro pro Stück. Für die additive Herstellung im Pulverbettverfahren empfiehlt sich die Verwendung von Titan (Legierung Ti-6Al-4V), das sowohl hinsichtlich der Festigkeit als auch der Korrosionsbeständigkeit die bestehenden Anforderungen problemlos erfüllt.

Das IAPT hat ein Softwaretool entwickelt und in diesem Beispiel zur Anwendung gebracht, mit dem eine Kostenabschätzung für AM-Bauteile durchgeführt werden kann. Die Analyse erfolgt auf Basis der CAD-Daten des Bauteils sowie weiterer individueller Vorgaben, die vom Benutzer abgefragt werden. Relevante Randbedingungen sind beispielsweise die Losgröße des Bauteils und die Aufbaurrate der AM-Anlage. In die Kalkulation fließen neben den Material- und Fertigungskosten für den 3D-Druck auch die Kostensätze für die Datenvorbereitung sowie die ggf. nötigen Nachbearbeitungsschritte ein. Im Falle des LBM-Verfahrens obligatorisch zu berücksichtigen sind diesbezüglich das Trennen der Bauteile von der Bauplattform (in der Regel mittels Drahterodieren) und das Entfernen der Supportstrukturen vom Bauteil. Optional hingegen, jedoch zu empfehlen, sind eine Wärmebehandlung und eine strahlende Oberflächennachbearbeitung. Je nach Rauheits- bzw. Toleranzvorgabe müssen evtl. vorhandene Funktionsflächen am Bauteil zusätzlich spanend nachbearbeitet werden.

⁵⁷ develogic GmbH

Tabelle 10: AM-Kalkulation für das Propellerblatt (Werkstoff: Titan, Losgröße: 4)




Propellerblatt	
Kosten je Stück	AM
Material	39,60 €
Datenvorbereitung	19,50 €
Anlagenrüstung	31,50 €
Fertigungsprozess AM	56,50 €
Wärmebehandlung	4,70 €
Erodieren, Supportentfernung	13,00 €
Endbearbeitung	102,10 €
Fertigungsgemeinkosten	56,50 €
Herstellung	323,40 €

Abbildung 36: Propellerblatt mit innen liegenden Kanälen⁵⁸

Bei einer Gesamtanzahl von vier Propellerblättern, die eine POD-Antriebseinheit benötigt, weist das Berechnungstool Herstellkosten in Höhe von 323,40 Euro pro Stück aus (vgl. Tabelle 10). Die optionale Wärmebehandlung und auch eine spanende Endbearbeitung sind in dieser Kalkulation bereits enthalten. Im Vergleich zur konventionellen, bisher angewandten Methode ergibt sich somit eine Ersparnis von 26,5% durch dem Einsatz von AM.

Rim Thruster

Einen ähnlichen Anwendungsfall bildet der in Abbildung 37 gezeigte Ringpropeller. Der sogenannte Rim Thruster ist der Läufer aus einer Schubeinheit für ein stabilisiertes Absetz- und Aufnahmesystem zur Installation von Datenerfassungsanlagen am Meeresboden. Mit Hilfe der Antriebseinheit lässt sich das Absetz- und Aufnahmesystem auch bei ungünstigen Strömungsverhältnissen sicher unter Wasser positionieren. Aktuell befindet sich dieses System noch in der Entwicklung und wird zur Erprobung konventionell aus Aluminium gefräst. Die reine Fräszeit beträgt 28 Stunden. Anschließend muss das Bauteil hartanodisiert werden, um die Abrieb- und Verschleißfestigkeit zu erhöhen. D. h. das Aluminium erhält eine sehr dicke und harte Beschichtung. Diese Methode ist sehr aufwändig und soll deshalb nicht die endgültige Lösung sein. Die Kosten für die konventionelle Fertigung betragen inkl. Material und Beschichtung in Summe ca. 5.200 Euro.

Tabelle 11: AM-Kalkulation für den Rim Thruster (Werkstoff: Titan, Losgröße: 1)




Rim Thruster	
Kosten je Stück	AM
Material	1.287,20 €
Datenvorbereitung	78,00 €
Anlagenrüstung	200,80 €
Fertigungsprozess AM	1.723,70 €
Wärmebehandlung	141,30 €
Erodieren, Supportentfernung	299,90 €
Endbearbeitung	32,20 €
Fertigungsgemeinkosten	719,40 €
Herstellung	4.482,50 €

Abbildung 37: Rim Thruster Quelle: develogic GmbH⁵⁹

⁵⁸ develogic GmbH

Mit einem Durchmesser von etwa 300 mm lässt sich der Rim Thruster auf einer mittelgroßen Anlage im AM-Pulverbettverfahren herstellen. Die entscheidenden Vorteile wären, dass erstens der Aufbau materialeffizient erfolgt, also ohne unnötig Material zu zerspanen, und zweitens mit Titan ein Werkstoff verwendet werden kann, der auch ohne eine zusätzliche Beschichtung hart und korrosionsbeständig genug ist. Die Berechnung des IAPT ergibt für die additive Fertigung des Rim Thrusters die in Tabelle 11 aufgeführten einzelnen Kostenpositionen sowie Gesamtherstellkosten von 4.482,50 Euro pro Stück. Dabei wird von der Herstellung nur eines Bauteils ausgegangen. Der Kostenvorteil von AM gegenüber der konventionellen Fertigung lässt sich in diesem Anwendungsfall auf 13,8% beziffern.

Auflager einer Piezokeramik-Halbschale

Für Anwendungen in der Unterwasserkommunikation fertigt develogic den in Abbildung 38 dargestellten piezoelektrischen Schallwandler. Dieser Wandler enthält als Auflager für eine Piezokeramik-Halbschale den ebenfalls in dieser Abbildung veranschaulichten ringförmigen Träger aus Aluminium. Bei konventionell zerspanender Bearbeitung betragen die Herstellkosten für den Träger ca. 170 Euro pro Stück.

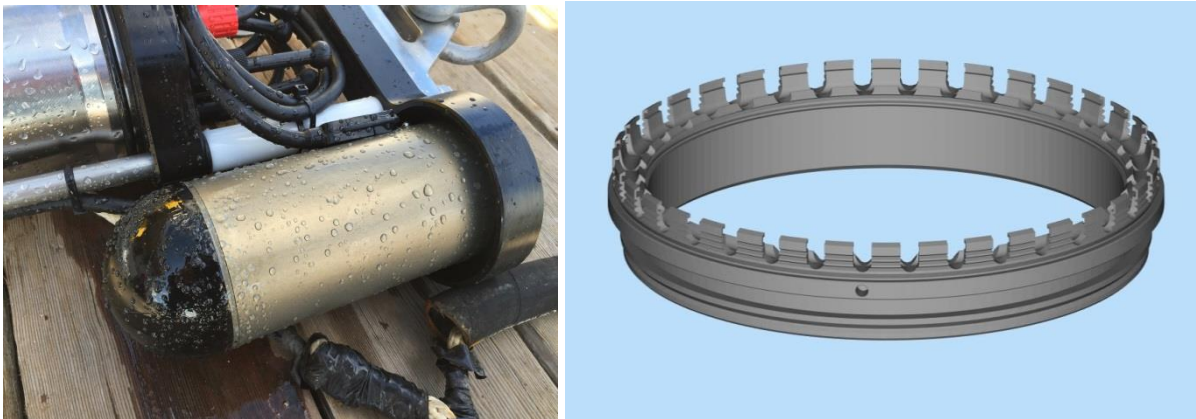


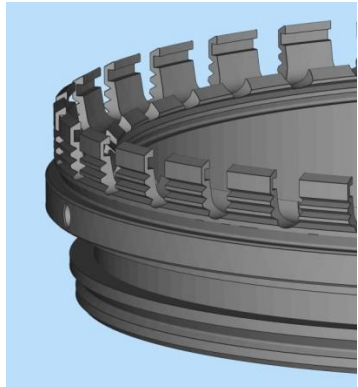
Abbildung 38: Schallwandler für den Unterwassereinsatz (links); Auflager für Piezokeramik (rechts)⁶⁰

Auch der Piezoträger besitzt AM-Potential, weil die Fräsoperationen zur Erzeugung der zahlreichen Aussparungen am Bauteil bei geänderter Fertigungsmethode entfallen könnten. Allerdings zeigt die Kalkulation mit Hilfe des IAPT-Softwaretools, dass die Herstellkosten für die additive Fertigung in diesem Beispiel mit 213,80 Euro rund ein Viertel höher sind als für die konventionelle Variante (vgl. Tabelle 12). Die Berechnung gilt auch hier für die Produktion nur eines Bauteils, bei veränderter Losgröße verteilen sich die auftragsbezogenen Kosten (wie z.B. für die Datenvorbereitung) auf eine größere Bauteilanzahl. Damit verringern sich die Stückkosten, sodass losgrößenabhängig ein neuer Vergleich von additiver und konventioneller Fertigung vorgenommen werden muss.

⁵⁹ develogic GmbH

⁶⁰ develogic GmbH

Tabelle 12: AM-Kalkulation für das Piezokeramik-Auflager (Werkstoff: Titan, Losgröße 1)




Auflager für Piezokeramik	
Kosten je Stück	AM
Material	25,30 €
Datenvorbereitung	78,00 €
Anlagenrüstung	25,00 €
Fertigungsprozess AM	41,60 €
Wärmebehandlung	3,40 €
Erodieren, Supportentfernung	13,60 €
Sandstrahlen	1,40 €
Fertigungsgemeinkosten	25,50 €
Herstellung	213,80 €

Abbildung 39: Auflager für Piezokeramik (vergrößert)⁶¹

Die Anwendungsbeispiele belegen qualitativ und anhand der IAPT-Kalkulation in den zwei demonstrierten Fällen der Propellerblätter und des Rim Thrusters auch quantitativ die Vorteile der additiven Fertigung für ein Unternehmen aus der Kategorie Meerestechnik. Die hohen Anforderungen an das Material und die geometrische Komplexität der Bauteile erlauben einen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der AM-Technologie für Neuteile.

1.3.6 Bauteilanalyse am Beispiel von Reintjes Power Train Solutions

Die Reintjes GmbH mit Hauptsitz in Hameln vertritt im Rahmen dieser Studie die Kategorie Schiffsantriebstechnik. Das mittelständische Unternehmen mit etwa 400 Mitarbeitern ist spezialisiert auf die Herstellung von Schiffsgetrieben im Leistungsspektrum von 250 bis 30.000 kW, die für Arbeits- und Spezialschiffe sowie insbesondere auch für schnelle Fähren eingesetzt werden. Seit dem Jahr 2011 gehören außerdem Getriebe für Gas- und Dampfturbinen im Kraftwerksbereich zum Produktportfolio. Die folgende Abbildung 40 zeigt eine Auswahl verschiedener Schiffsgetriebe, die in Anhängigkeit von ihrer Leistungsklasse eine Masse von bis zu 62 Tonnen erreichen und demnach auch sehr große Abmessungen aufweisen.

⁶¹ develogic GmbH



Getriebemasse: 62 t



Getriebemasse: 3,9 t



Getriebemasse: 3,1 t



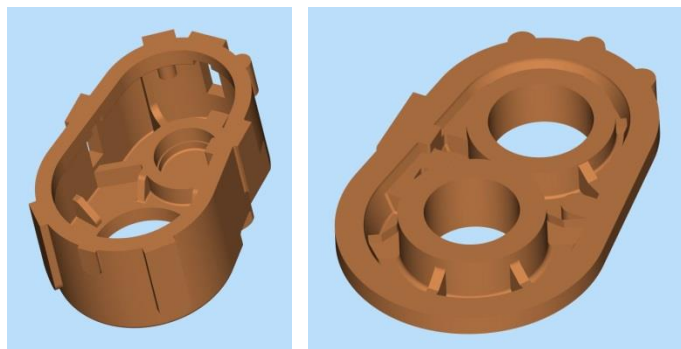
Getriebemasse: 2,3 t

**Abbildung 40: Getriebegrößen für verschiedene Schiffstypen⁶²**

Die Gehäuseteile der Getriebe werden weit überwiegend im Gussverfahren hergestellt. Obwohl die Produktion in sehr kleinen Losgrößen (d. h. nahezu in Einzelteilerfertigung) stattfindet, bilden die AM-Verfahren aufgrund der Baugröße der Getriebe keine realistische Fertigungsalternative zum Gießen.

Gehäuseteile von Nebenaggregaten

Aber die Gehäuse von Nebenaggregaten wie z. B. Hydraulikpumpen, die an das Getriebegehäuse angeflanscht werden, besitzen wesentlich geringere Abmessungen und wären durchaus im Pulverbettverfahren druckbar. Wirtschaftlich sinnvoll ist diese Methode, wenn die Lieferzeit für das originale Gussstück relativ lang ist und dringend ein adäquates Ersatzteil benötigt wird. Abbildung 41 veranschaulicht ein entsprechendes Beispiel eines kleinen Gussgehäuses aus Aluminium, dessen maximales Längenmaß nur 440 mm beträgt.

**Abbildung 41: Gehäuseteile für ein Nebenaggregat⁶³**

Weiteres AM-Potential besteht in der Reparaturanwendung. Da die Reintjes GmbH auch weltweiten Service für ihre Getriebe anbietet, ist das Unternehmen an Lösungen interessiert, die im Falle eines Getriebeschadens die schnelle und einfache Wiederherstellung der Betriebsfähigkeit eines Schiffes gewährleisten.

⁶² Reintjes GmbH

⁶³ Reintjes GmbH

Reparatur von Lagersitzen und Dichtflächen

Sollte ein großes Gehäusegussteil beschädigt sein, z. B. im Bereich eines Lagersitzes oder einer Dichtfläche, wäre eine Reparaturlösung erwünscht, wenn diese Aufwand einspart. In Anbetracht der zu erwartenden hohen Kosten für ein Neuteil ist daher stattdessen die Nutzung des LMD-Verfahrens denkbar, um durch Pulverauftrag den ursprünglichen Zustand des schadhafte Bauteils wiederherzustellen. Diese Maßnahme hätte einen besonderen Vorteil, falls dabei sogar auf den Ausbau des Getriebes verzichtet werden könnte, was jedoch voraussetzt, dass sich der LMD-Prozess inklusive erforderlicher Nacharbeit mit einem transportablen Gerät auch an Bord eines Schiffes einsetzen lässt.



Abbildung 42: Schadhafte Ritzelwelle (links und Mitte); Oberfläche nach der Reparatur (rechts)⁶⁴

Gebräuchlich ist diese Form der Reparatur in der Applikation auf große und damit teure Getriebewellen. In Abbildung 42 sind die durch Verschleiß entstandenen Schäden auf der Oberfläche einer Ritzelwelle im Bereich des Lager- und Dichtringsitzes erkennbar. Da das Ritzel (Zahnrad) hier untrennbar mit der Welle verbunden ist, besitzt das Bauteil einen hohen Wert, der eine Reparatur rechtfertigt. Die Ausbrüche von Material an der Bauteiloberfläche werden mit Hilfe des additiven Verfahrens aufgefüllt, anschließend muss das Maß der Welle durch Schleifen wieder auf den Solldurchmesser reduziert werden. Zu diesem Zweck ist die Welle allerdings unbedingt aus dem Getriebe auszubauen, da nur die Bearbeitung auf einer präzisen Werkzeugmaschine die Rundheit der Welle sicherstellen kann.

Reparatur von Zahnrädern

Auch die Zahnräder in den Schiffs- und Kraftwerksgetrieben unterliegen dem Verschleiß. Bei Herstellkosten von bis zu 200.000 Euro für ein Zahnrad lohnt sich prinzipiell eine Reparatur dieser Großbauteile (vgl. Abbildung 43). Mittels AM ließen sich theoretisch schadhafte Zähne ausbessern, das Problem besteht aber darin, die exakte Geometrie der Zähne nachzubilden, um nach der Reparatur wieder ein gleichmäßiges Tragbild an allen Zahnflanken zu erhalten. Des Weiteren stellt die notwendige Härte der Zähne eine Herausforderung dar. Das gesamte Zahnrad ist in der Regel einsatzgehärtet. Wird ein Zahn z. B. durch Pulverauftrag repariert, fehlt dort die Härte. Das bedeutet, es müsste ein geeigneter Werkstoff und ein Prinzip zur lokalen Aufhärtung (ggf. durch einen Laser) gefunden werden, damit alle Zähne auch nach der Reparatur vergleichbare mechanische Eigenschaften besitzen. AM-Potential ist demzu-

⁶⁴ Reintjes GmbH

folge vorhanden, im Fall einer möglichen Reparatur von Zahnrädern wird jedoch noch technologischer Entwicklungsbedarf konstatiert.



Abbildung 43: Zahnrad mit großem Durchmesser

1.3.7 Fazit der Bauteilanalysen

Die bei sechs Unternehmen durchgeführten Bauteilanalysen belegen das Vorhandensein eines breit gestreuten Anwendungspotentials für AM-Technologien insbesondere auch in der maritimen Wirtschaft. Jedes dieser Unternehmen entstammt einer anderen Kategorie, so dass verschiedene technische und geschäftliche Interessen in der Analyse abgebildet werden. Demzufolge sind auch die AM-Potentiale sehr unterschiedlich ausgeprägt.

Am häufigsten tritt ein Nutzen für die untersuchten Unternehmen durch 3D-gedruckte Ersatzteile auf. Die Hamburg Port Authority, German Naval Yards Kiel und auch Reintjes profitieren von einer kürzeren Beschaffungszeit, wenn Ersatzteile durch AM früher verfügbar sind. Dabei sollen die additiv gefertigten Bauteile meist Gussteile substituieren, da letztere speziell im Falle fehlender Gussformen sehr lange Lieferzeiten aufweisen können.

Sind die schadhaften Bauteile zu groß für eine additiv hergestellte Kopie, bietet sich eine AM-basierte Reparaturlösung an. Das LMD-Verfahren ist besonders geeignet, um die Lebensdauer von Bauteilen zu verlängern. Die im maritimen Bereich übliche Bauteilgröße, oft ein Hemmnis für den AM-Einsatz, wird in der Bewertung des Reparaturpotentials sogar zum Vorteil, da sich eine aufwändige Reparatur nur bei großen und wertvollen Bauteilen lohnt.

Aber auch große Bauteile besitzen unter bestimmten Randbedingungen AM-Potential, zumindest wenn sie aus Kunststoff bestehen (dürfen). Wie das Beispiel der Entwicklung von Becker Marine Systems zeigt, ermöglicht die AM-Fertigung eine Funktionsverbesserung des betrachteten Bauteils, die sich in einer Strömungsoptimierung bzw. Energieeinsparung äußert. Da zusätzlich materialeffizienter Leichtbau betrieben wird, verstärkt sich der ökologische Aspekt des Vorhabens, das im Erfolgsfalle einen wesentlichen Beitrag zum „Green Shipping“ leisten kann.

Das Anwendungsfeld der Meerestechnik liefert AM-Potentiale, die sich direkt ausschöpfen lassen. Anhand der Bauteilbeispiele von develogic werden auf Basis einer ersten Kalkulation Kostenvorteile durch eine additive Fertigung sichtbar, die bereits ohne ein Re-Design der Bauteile erreichbar sind. Das bedeutet, dass durch eine weitere Bauteiloptimierung wie z. B.

eine Volumenreduktion die AM-Herstellkosten weiter gesenkt werden können und die Vorteile noch prägnanter hervortreten. Die Gründe für die überdurchschnittliche AM-Eignung der meeresstechnischen Hightech-Applikationen sind in den hohen Anforderungen an die Komponenten und in deren vergleichsweise eher geringen Abmessungen zu sehen.

Auch der Werkzeugbau verfügt über sehr große Potentiale für die Anwendung additiver Fertigungsmethoden, da mit Hilfe dieser Technologie und der einhergehenden gestalterischen Freiheit eine entscheidende Funktionsverbesserung für Spritzgusswerkzeuge erzielbar ist, indem diese Werkzeuge mit innenliegenden und oberflächennahen Kühlstrukturen versehen werden. Diese AM-Anwendung ist zwar nicht direkt maritim, kann aber wie von Gebr. Pott-hast umgesetzt der maritimen Branche in Form der Zulieferung qualitativ hochwertiger Spitzgussteile dienen.

Schließlich sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass die Auswahl der hier untersuchten Unternehmen willkürlich erfolgt ist und die Darstellung der vorhandenen AM-Potentiale keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

2 Identifikation von AM-Dienstleistern in Deutschland entlang der AM-Prozesskette

In diesem Kapitel wird der Fokus von den AM-Anwendern auf die AM-Dienstleister verlagert. Dieses Kapitel wird Aufschluss darüber geben, an wen sich Unternehmen zur Umsetzung ihrer potentiellen AM-Anwendungen wenden können. Diejenigen Unternehmen, die im Einzugsgebiet des Maritimen Clusters Norddeutschland e. V. (MCN) (Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg Vorpommern) ansässig sind, weisen eine grün unterlegte Postleitzahl in Tabelle 13 auf.

Die additive Fertigung ist durch eine charakteristische Prozesskette gekennzeichnet, die sich in drei Abschnitte gliedert: **Pre-Processing, In-Process und Post-Processing**. Anhand dieser Oberkategorien werden die AM-Dienstleister im Folgenden eingeordnet, um einen Überblick darüber zu geben, welcher AM-Dienstleister in welchem konkreten Bereich seine Kompetenzen aufweist.

Tabelle 13 zeigt eine Liste von AM-Dienstleistungsunternehmen aus Deutschland. Es sind nur Unternehmen in die Liste aufgenommen, die Dienstleistungen rund um AM als eine ihrer Kernkompetenzen ausweisen. Der Großteil der aufgeführten Unternehmen agiert auf dem AM-Markt als Lohnfertiger. Demnach stellen sie AMA bereit und fertigen für den Kunden auftragsbezogen Bauteile (vgl. Kategorie „In-Process“ in Tabelle 13). Des Weiteren gibt es Unternehmen, die der eigentlichen additiven Fertigung vorgelagerte (Pre-Processing) oder nachgelagerte (Post-Processing) Dienstleistungen anbieten. Abgesehen davon sind die deutschen Anlagenhersteller mit Relevanz für industrielle Anwendungen in der Tabelle aufgeführt.

Das dem eigentlichen Fertigungsprozess vorgelagerte Pre-Processing ist in drei Kategorien unterteilt. Zunächst kann bei Bedarf ein **3D-Scan** durchgeführt werden, um aus einem physisch vorliegenden Bauteil ein digitales Datenmodell zu erstellen, welches im Nachgang modifiziert und additiv gefertigt werden kann. Die Kategorie **Design & Simulation** umfasst die Konstruktion eines Bauteils mit Hilfe einer CAD-Software unter Berücksichtigung der für AM typischen Designrestriktionen. Zusätzlich beinhaltet die Kategorie Simulationsprozeduren, um beispielsweise topologisch optimierte und bionisch inspirierte Bauteile zu konstruieren. Im nächsten Schritt folgt die **Datenvorbereitung**. Hierbei wird das digitale Datenmodell einer AM-spezifischen Fertigungsvorbereitung unterzogen im Hinblick auf Stützstrukturen oder Bauteilausrichtung. Auch die Simulation des Fertigungsprozesses zählt in diese Kategorie.

Die zweite Oberkategorie In-Process berücksichtigt die **kunststoffverarbeitenden (FDM, SLS, BJ) sowie metallverarbeitenden (LBM, EBM, BJ, DED) AMV**, die in Kapitel 1.1.2 vorgestellt werden. Außerdem sind die **Baumaterialien** berücksichtigt und in Kunststoff (Filament, Pulver) und Metall (Draht, Pulver) unterteilt.

Das Post-Processing umfasst die Nachbearbeitungsschritte am Bauteil, die sich an die AM anschließen. Hierzu zählen **Wärmebehandlung** wie das Härten, **Oberflächenveredelung** wie das Elektropolieren und **spanende Nachbearbeitung** wie das Fräsen.

Nach Abschluss der Nachbearbeitung können qualitätssichernde Maßnahmen am additiv gefertigten Bauteil vorgenommen werden. Die **Qualitätssicherung** bietet verschiedenste Möglichkeiten von In-Process Monitoring über optische Vermessungssysteme bis hin zu zerstörungsfreier Prüfung der mechanischen Bauteileigenschaften. Diese sind im Sinne der Komplexitätsreduzierung als Qualitätssicherung zusammengefasst.

Darüber hinaus gibt es noch weitere Services. Hierzu zählt zielgruppenorientiertes Training zur Vermittlung von AM-spezifischen Fähigkeiten, Beratung zur Identifikation von AM-relevanten Bauteilen sowie strategische Beratung, um beispielsweise eine Geschäftsfeldentwicklung im Bereich AM durchzuführen.

Anhand der erläuterten Kategorien werden die Unternehmen im Hinblick auf ihre AM-Kompetenzen eingeordnet. Bei der Einordnung wird eine Differenzierung zwischen „Produkt“ (blau), „Service“ (rot) und „Produkt & Service“ (violett) vorgenommen. Wenn beispielsweise ein Lohnfertiger im Auftrag eines Kunden mittels der LBM-Technologie ein Metallbauteil fertigt, so ist dies in der Tabelle als „Service“ (rot) vermerkt. Im Gegensatz dazu wird ein Unternehmen, das LBM-Anlagen entwickelt und verkauft in der Kategorie LBM als „Produkt“ (blau) gekennzeichnet. In einigen Fällen gibt es Unternehmen, die in einer Kategorie sowohl Services als auch Produkte (violett) anbieten. Ein Beispiel hierfür kann ein softwareentwickelndes Unternehmen sein, welches sowohl eine Software im Sinne eines Produktes für additives Design verkauft, aber auch parallel Konstruktionsdienstleistungen anbietet.

Etwa ein Viertel der knapp 40 identifizierten AM-Lohnfertiger in Deutschland, haben ihren Unternehmenssitz im Einzugsgebiet des MCN. Mit Rolf Lenk Werkzeug- und Maschinenbau GmbH ist bereits einer dieser AM-Lohnfertiger Mitglied im MCN. Das in Ahrensburg bei Hamburg ansässige Maschinebauunternehmen bietet Auftragsfertigung von Metallbauteilen mittels des LBM sowie DED (Lichtbogenauftragsschweißen). Auch die vor- und nachgelagerten Schritte der AM-Prozesskette deckt das Unternehmen durch ergänzende Dienstleistungen ab (vgl. Tabelle 13).

Einer der 12 identifizierten AM-Industrieanlagenhersteller in Deutschland, hat seinen Unternehmenssitz im Einzugsgebiet des MCN. Dieser Anlagenhersteller, SLM Solutions Group AG, produziert LBM-Anlagen am Unternehmensstandort in Lübeck.

Insgesamt wird nahezu die gesamte AM-Prozesskette durch Unternehmen im Einzugsgebiet des MCN abgebildet. In der Kategorie des Pre-Processings werden 3D-Scan, Design & Simulation und Datenvorbereitung vollständig von AM-Lohnfertigern und weiteren Dienstleistern wie Ingenieurbüros und Entwicklungsdienstleistern aus Norddeutschland durchgeführt. Im Einzugsgebiet des MCN sind zudem nahezu alle industriell eingesetzten AM-Technologien für Metall- und Kunststoffverarbeitung verfügbar. Lediglich die jungen Technologien Binder Jetting und Multi Jet Fusion sind nicht verfügbar, haben aber auch im gesamtdeutschen Vergleich einen sehr geringen Verbreitungsgrad.

Beim Post-Processing, wie Wärmebehandlung, Oberflächenveredelung und spanender Nachbearbeitung, handelt es sich um keine AM-spezifischen Dienstleistungen, sondern um auch bei konventioneller Fertigung etablierte Verfahren. Deswegen ist davon auszugehen, dass es neben den in der Tabelle gelisteten Post-Processing Dienstleistern noch zahlreiche weitere in Norddeutschland gibt.

Angesichts der Innovativität und Neuartigkeit von AM als Produktionstechnologie ist AM Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Der Großteil der deutschen Universitäten und Hochschulen mit ingenieurwissenschaftlicher Ausrichtung setzen sich mit dem Prozess der additiven Fertigung auseinander. Zudem wird an diesen Universitäten auch AM gelehrt.⁶⁵ Allerdings stellt AM in den wenigsten Fällen einen zentralen Forschungs- oder Lehreschwerpunkt dar. Das Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und das Helmholtz- Zentrum Geesthacht sind die beiden forschungsseitigen Mitglieder des MCN mit AM-Kompetenzen. Es gibt zusätzlich Forschungseinrichtungen, die schwerpunktmäßig Kompetenzen zum Thema AM aufgebaut haben. Im Einzugsgebiet des MCN sind in diesem Zusammenhang das Laser Zentrum Hannover sowie das Bremer Institut für angewandte Strahltechnik zu nennen, welche an laserbasierten AMV (bspw. LBM und DED) forschen. Zusätzlich weist das Fraunhofer IFAM in Bremen Kompetenzen in der pulverbettbasierten AM (bspw. LBM) auf. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt erforscht im Rahmen von Luftfahrtanwendungen ebenfalls den Einsatz von AMV. Das Fraunhofer IAPT ist das Forschungsinstitut, im Einzugsgebiet des MCN, welches sich explizit mit der industriellen Anwendung von additiver Fertigung beschäftigt. Dieses Institut deckt mit seinen Forschungsaktivitäten die gesamte AM-Prozesskette von Bauteildesign über umfassende eigene Anlagentechnologie bis hin zur Qualitätssicherung ab. Auch ein umfangreiches Trainingsportfolio sowie Beratung zur erfolgreichen Implementierung von AM in ein Unternehmen bietet das Institut an. Im Allgemeinen besteht die Möglichkeit im Rahmen von Forschungsprojekten eine Kooperation zwischen Industrieunternehmen und Forschungseinrichtung einzugehen und so einen Beitrag zur Weiterentwicklung sowie Etablierung von AM zu leisten.

Insgesamt gilt es zu berücksichtigen, dass die Tabelle 13 das Resultat einer Recherche und Expertenbefragungen ist. Demnach erhebt die Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist nur als eine Orientierungshilfe im Hinblick auf AM-Dienstleister in Deutschland zu verstehen.

⁶⁵ [Mars 16] - Marschall: Personal für die additive Fertigung. 2016

Tabelle 13: Einordnung der AM-Dienstleister in Deutschland entlang der AM-Prozesskette (1/4)

AM-Lohnfertiger	Pre Processing			Material		In-Process							Post-Processing			Weitere Services				
	3D-Scan	Design & Simulation	Datenvorbereitung	Polymer	Metall	LBM (Laser Beam Melting)	EBM (Electron Beam Melting)	BJ (Binder Jetting)	DED (Directed Energy Deposition)	FDM (Fused Deposition Modeling)	SLS (selective Laser Sintering)	MJF (Multi Jet Fusion)	Wärmebehandlung	Oberflächenveredelung	Spanende Nachbearbeitung	Qualitätssicherung	Training	Bauteilidentifikation	Strategieberatung	
PLZ Unternehmen																				
65203 3D ACTIVATION GmbH																				
07745 3Faktur GmbH																				
65326 Beta LAYOUT GmbH																				
21339 Bionic Production AG																				
65830 C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH																				
89160 CNC-Technik Mack GmbH & Co. KG																				
04229 Dick & Dick Laser- & Systemtechnik GmbH																				
79541 Fabb-It UG																				
92331 FIT GmbH																				
35216 FKM Sintertechnik GmbH																				
79318 Franken Guss GmbH & Co. KG																				
20457 Gall & Seitz Systems GmbH																				
42477 GKN Sinter Metals Engineering GmbH																				
75443 Hasenauer & Hesser GmbH																				
25421 Hoedtko GmbH & Co. KG																				
72072 Jomatik GmbH																				
63110 Kegelmann Technik GmbH																				
54578 KerCon GmbH & Co. KG																				
33649 Krause DiMa Tec GmbH																				
56651 LIGHTWAY GmbH & Co. KG																				

Einzugsgebiet des
Maritimen Clusters
Norddeutschland e.V.

Produkt
Service
Service & Produkt

Tabelle 13: Einordnung der AM-Dienstleister in Deutschland entlang der AM-Prozesskette (2/4)

AM-Lohntferiger	Pre Processing		Material		In-Process							Post-Processing			Weitere Services				
	3D-Scan	Design & Simulation	Datenvorbereitung	Polymer	Metall	LBM (Laser Beam Melting)	EBM (Electron Beam Melting)	BJ (Binder Jetting)	DED (Directed Energy Deposition)	FDM (Fused Deposition Modeling)	SLS (Selective Laser Sintering)	MJF (Multi Jet Fusion)	Wärmebehandlung	Oberflächenveredelung	Spanende Nachbearbeitung	Qualitätssicherung	Training	Bauteilidentifikation	Strategieberatung
PLZ Unternehmen																			
25436 Loll Feinmechanik GmbH																			
91166 MBEZ toolcraft GmbH																			
21079 MCB Additive Manufacturing GmbH																			
39179 Oerlikon AM Europe GmbH																			
86757 Ohnhäuser GmbH																			
56412 PK Prototyping																			
32825 PROTIQ GmbH																			
85622 Proto Labs GmbH																			
21129 Quast Praezisionstechnik GmbH																			
04229 Rapidobject GmbH																			
73249 Rioprinto UG																			
96215 Robert Hofmann GmbH																			
22926 Rolf Lenk Werkzeug- u. Maschinenbau GmbH																			
76327 Rosswag GmbH																			
55545 Schneider Prototyping GmbH																			
98529 Speedpart GmbH																			
16761 trinckle 3D GmbH																			
82152 Trindo Digitalmanufaktur GmbH																			
71229 VISIOTECH GmbH																			

Tabelle 13: Einordnung der AM-Dienstleister in Deutschland entlang der AM-Prozesskette (3/4)

Weitere AM-Dienstleister	Pre Processing		Material		In-Process Anlagentechnik						Post-Processing			Weitere Services					
	3D-Scan	Design & Simulation	Datenvorbereitung	Polymer	Metall	LBM (Laser Beam Melting)	EBM (Electron Beam Melting)	BJ (Binder Jetting)	DED (Directed Energy Deposition)	FDM (Fused Deposition Modeling)	SLS (Selective Laser Sintering)	MJF (Multi Jet Fusion)	Wärmebehandlung	Oberflächenveredelung	Spanende Nachbearbeitung	Qualitätssicherung	Training	Bauteilidentifikation	Strategieberatung
Einzugsgebiet des Maritimen Clusters Norddeutschland e.V.																			
Produkt																			
Service																			
Service & Produkt																			
Unternehmen																			
PLZ																			
21107 Ingenieurbüro FEM-Composites																			
24226 Ingenieurbüro S.M.I.L.E.-FEM GmbH																			
38889 Ingenieurbüro JUREC Juergen Reinemuth Consulting																			
21129 Unternehmensberatung AM Power																			
20354 Entwicklungsdienstleister H & H GmbH																			
84513 Entwicklungsdienstleister FORMRISE GmbH																			
57368 Entwicklungsdienstleister LMD GmbH Co. KG aA																			
20459 Entwicklungsdienstleister CompriseTec GmbH																			
82024 Entwicklungsdienstleister APWORKS GmbH																			
83233 Entwicklungsdienstleister JELL GmbH & Co. KG																			
28359 Softwareentwickler Materialise GmbH																			
21079 Softwareentwickler simufact engineering gmbh																			
10625 Softwareentwickler 3YOURMIND GmbH																			
80333 Technologiekonzern Siemens AG																			
80686 Technische Prüforg. TÜV SÜD AG																			
28865 Maschinenbauuntern. Nabertherm GmbH																			
40237 Rohmateriallieferant SMS group GmbH																			
40549 Rohmateriallieferant voestalpine AM Center GmbH																			
06733 Rohmateriallieferant TLS Technik GmbH & Co.																			
80339 Rohmateriallieferant H.C. Starck GmbH																			
41189 Rohmateriallieferant Erasteel GmbH																			
40880 Rohmateriallieferant Praxair Surface Technologies GmbH																			
81829 Oberflächenveredelung Poligrat GmbH																			
28359 Dentalunternehmen BEGO GmbH & Co. KG																			
38122 Optische Messtechnik GOM GmbH																			
22525 Qualitätssicherung GMA Werkstoffprüfung GmbH																			

Tabelle 13: Einordnung der AM-Dienstleister in Deutschland entlang der AM-Prozesskette (4/4)

AM-Anlagenhersteller	Pre Processing			Material		In-Process Anlagentechnik						Post-Processing			Weitere Services					
	3D-Scan	Design & Simulation	Datenvorbereitung	Polymer	Metall	LBM (Laser Beam Melting)	EBM (Electron Beam Melting)	BJ (Binder Jetting)	DED (Directed Energy Deposition)	FDM (Fused Deposition Modeling)	SLS (Selective Laser Sintering)	MJF (Multi Jet Fusion)	Wärmebehandlung	Oberflächenveredelung	Spanende Nachbearbeitung	Qualitätssicherung	Training	Bauteilidentifikation	Strategieberatung	
PLZ Unternehmen																				
72290 ARBURG GmbH&Co.KG																				
10961 BigRep GmbH																				
96215 Concept Laser																				
33689 DMG Mori AG																				
82152 EOS GmbH																				
86368 ExOne GmbH																				
12681 Gefertec GmbH																				
64807 O.R. Laser GmbH																				
73614 Oskar FRECH GmbH																				
72124 Renishaw GmbH																				
23560 SLM Solutions Group AG																				
71254 TRUMPF GmbH + Co. KG																				

3 Implementierung von Additiver Fertigung in KMU

In diesem Kapitel wird die Implementierung von AM in Industrieunternehmen mit Fokus auf KMU betrachtet. Hierzu werden zunächst in Kapitel 3.1 die Herausforderungen aufgezeigt, die eine Implementierung von AM in bestehende konventionelle Fertigungsprozesse mit sich bringt. Anschließend wird anhand zweier Best-Practice Beispiele in Kapitel 3.2 aufgezeigt, wie die erfolgreiche Implementierung von AM, den zuvor thematisierten Herausforderungen zum Trotz, in einem KMU gelingt.

3.1 Hemmnisse für die Implementierung von AM

In Kapitel 1.2 sind die Potentiale der AM-Technologien bzgl. Produkt- und Prozessverbesserung insbesondere im maritimen Bereich aufgezeigt worden. Bei der Implementierung von AM in die einzelnen Unternehmen treten zum aktuellen Zeitpunkt verschiedene Hemmnisse auf, die diesen Prozess verlangsamen. Um diese Hemmnisse näher zu betrachten wurden Interviews mit Experten, die einen industriellen AM-Hintergrund aufweisen, durchgeführt. Anschließend wurden die Interviewinhalte thematisch sortiert und verschiedenen Kategorien zugeordnet.

Die Einführung von AM hängt maßgeblich von den Bauteilen ab, die gefertigt werden sollen. Das bauteilorientierte Denken führt dazu, dass zuerst ein geeigneter Business Case identifiziert wird, bevor die Implementierung durchgeführt werden kann. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich von konventionellen Technologien. Ein Zusammenspiel aus Know-how, technologischen, wirtschaftlichen sowie regulatorischen Hemmnissen, wie in Abbildung 44 dargestellt, erschwert die Identifizierung eines für AM geeigneten Bauteils. Im Folgenden werden diese vier Kategorien jeweils im Detail betrachtet.

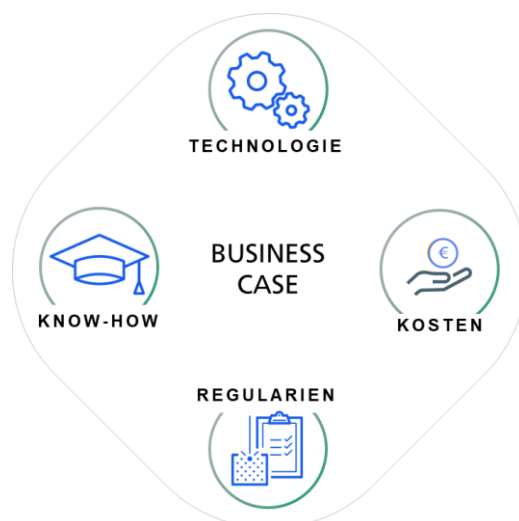


Abbildung 44: Kategorien der Hemmnisse für die Implementierung von AM

3.1.1 Know-how

Die Grundlage einer Technologieimplementierung stellt das Wissen über diese Technologie, inkl. aller Rahmenbedingungen wie regulatorischen Anforderungen, dar. Hierbei kann unterschieden werden zwischen Grundlagenwissen und Spezialwissen. Als Grundlagenwissen werden Kenntnisse in der Übersicht verschiedener additiver Fertigungsverfahren, den dazugehörigen Bauteileigenschaften sowie grundlegende Designkenntnisse verstanden. Diese Grundlagen sind notwendig für Einsteiger, um das für die Bauteilidentifizierung erforderliche Technologieverständnis aufzubauen. Hier erschwert die Unübersichtlichkeit der verschiedenen Fertigungstechnologien (im Bereich Metall: LBM, EBM, DED, BJ) mit unterschiedlichen Eigenschaften die Technologieauswahl (vgl. Kapitel 1.2.1).

Der Aufbau einer AM-Prozesskette ist sehr applikationsspezifisch und komplex. Das applikationsspezifische Wissen muss entwickelt werden, sodass Prozessschritte wie die passende Nachbearbeitung optimal auf die Applikation abgestimmt werden können. Über die gesamte Prozesskette können Wechselwirkungen auftreten, die zu berücksichtigen sind. Zur Beherrschung der gesamten Prozesskette ist daher Spezialwissen zu jedem Prozessschritt obligatorisch. Dies schließt die rechtlichen Richtlinien bzgl. IT-Rechten, den Plagiatsschutz und Urheberrecht ein.

Die Designkenntnisse sind von besonderer Bedeutung, da in der additiven Fertigung andere Konstruktionsprinzipien als bei KF gelten. Generell empfiehlt es sich das Wissen über die AM-Potentiale und grundlegende Konstruktionsrichtlinien in der gesamten Konstruktion und Entwicklung aufzubauen. Dies erlaubt es, bereits in der Produktentwicklung Anwendungsfälle für additive Fertigung zu identifizieren und die Design-Vorteile in die Konstruktion der Bauteile einfließen zu lassen.

Eine weitere Herausforderung für die Konstruktion ergibt sich daraus, dass im Designprozess der additiven Fertigung Kompetenzen aus Simulation, Design und Fertigungsvorbereitung gefragt sind, wodurch weitere Zusatzqualifikationen notwendig werden.

In der Produktion können Spezialisten ihr Wissen der Nachbehandlung sowie der Qualitätssicherung einbringen. Da hier viele verschiedene Disziplinen miteinander arbeiten, kann dieses Wissen meist nicht von einer Person abgefangen werden. Um Wissen im Unternehmen aufzubauen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- a) Wissen kann selbst erarbeitet werden.
- b) Durch das Einstellen von Spezialisten kann das unternehmensinterne Wissen erweitert werden. Auf dem Arbeitsmarkt herrscht allerdings im Bereich AM ein Fachkräftemangel.
- c) Zudem können externe Berater und Schulungen herangezogen werden.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind viele Konstrukteure noch unzureichend geschult. Außerdem übersteigt die Nachfrage nach Bedienern für die AM-Anlagen aktuell das Personalangebot. Dies liegt unter anderem daran, dass AM erst seit kurzem verpflichtend in den entsprechenden gewerblichen Ausbildungen integriert wird. An einigen Universitäten, wie der TU Hamburg können AM-Kurse belegt werden.

Die AM-Technologie stößt weiterhin auf Akzeptanzprobleme. Diese Akzeptanz kann mit steigenden Kenntnissen aufgebaut werden. Durch das Vertrauen und die Erfahrung von einzelnen Mitarbeitern wird die AM-Akzeptanz auf weitere Mitarbeiter und das Unternehmen übertragen. Dieses Vertrauen in die Technologie muss für eine erfolgreiche Implementierung über die gesamte Supply Chain disziplinübergreifend, somit auch beim Kunden oder den OEMs, aufgebaut werden.

3.1.2 Technologie

Hemmnisse zur Implementierung von AM treten auch aus technologischer Sicht auf. Die Basis der additiven Fertigung ist das verwendete Material. Die standardisierte, verfügbare Werkstoffpalette reicht vielen Unternehmen nicht aus. Daher sind individuelle Werkstoffe teilweise zu entwickeln. Hier gibt es jedoch bereits viele Anbieter, die sich auf die Entwicklung von Materialien für additive Verfahren spezialisiert haben.

Die Bauraumgröße stellt je nach Verfahren eine andere Begrenzung für die Bauteilgrößen dar. Zudem muss die Orientierung im Bauraum insbesondere für Funktionsflächen am Bauteil beachtet werden. Die verschiedenen AM-Verfahren haben unterschiedliche Reifegrade. So müssen ggf. die Herausforderungen des thermischen Prozesses, wie Eigenspannungen stärker kontrolliert werden. Die Reproduzierbarkeit des Prozesses ist insgesamt noch zu stabilisieren. Zudem unterscheiden sich die verschiedenen AM-Anlagen untereinander. Allgemein sind viele Standards in der Entwicklung aber noch nicht endgültig etabliert. Dies wird durch die anspruchsvolle Abstimmung der einzelnen Prozessparameter erschwert.

Bei der Einführung von AM ist die geringe Oberflächenqualität wie bei dem EBM- oder DED-Verfahren zu beachten. Generell stellt die Notwendigkeit der Nachbearbeitung durch die Stützstrukturentfernung, die Wärmebehandlung, das heißisostatische Pressen sowie die Oberflächenbearbeitung zusätzlichen Aufwand dar. Die meisten Dienstleister bieten daher die gesamte Prozesskette inklusive der nachgelagerten Nachbearbeitungsschritte an (vgl. Kapitel 2).

Eine ausgereifte, automatisierte, online Qualitätssicherung ist aktuell nicht vorhanden. Sensorsysteme und Datenauswertungssysteme werden hierfür momentan entwickelt. Bislang wurde keine einheitliche Prüfmethodik etabliert. Oftmals wird daher eine 100% Prüfung aller additiv gefertigten Bauteile vorgenommen.

Sicherheitsrisiken müssen bei der Implementierung von AM in die Fertigung Berücksichtigung finden. Ein Risiko geht von den Pulverwerkstoffen aus, sodass hier das gesamte Pulverhandling inklusive Pulverlagerung und -entsorgung zu kontrollieren ist. Des Weiteren setzt die Verwendung von Lasern einen Laserschutzbeauftragten voraus.

3.1.3 Regularien

Bei den Regularien herrscht an verschiedenen Stellen noch Unklarheit. Für ein einheitliches Verständnis und zur Schaffung von Standards sind bereits einige Normen von Institutionen, wie dem VDI oder dem DIN, für einzelne Branchen wie der Luftfahrt aufgestellt worden. Die Normen aus anderen Branchen sind teilweise übertragbar und dienen als Vorlage für die Entwicklung weiterer Normen in anderen Branchen.

Die Zulassung und Zertifizierung sind ebenfalls branchenabhängig. Je nach Branche wird zum Beispiel entschieden, ob ein Bauteil oder der gesamte AM Prozess qualifiziert wird. Im maritimen Bereich wird die Zulassung bspw. durch die Klassifizierungsgesellschaft DNV GL vorge-nommen. Die Zertifizierung des Prozesses wird zudem von OEMs vorgeschrieben. So kann ggf. gefordert werden, die gesamte Prozesskette zu zertifizieren, wie es z.B. in der Automobilindustrie üblich ist.

Bei den rechtlichen Aspekten herrscht eine hohe Unsicherheit in Unternehmen bzgl. Verträgen, Geheimhaltung und der Haftung entlang der gesamten Prozesskette. Dies bezieht sich auf die rechtlichen Richtlinien, wie IT-Rechte und den Plagiatsschutz, als auch die Vereinbarkeit mit dem Urheberrecht bei Änderungen und Anpassungen von Bauteilen. Diese Vorgaben müssen bei Herstellern und Anwendern bekannt sein. Letztlich ist hier der CAD-Datenaustausch vergleichbar mit anderen Technologien wie bspw. dem Fräsen, sodass die Unsicherheit häufig auf mangelnde Erfahrung, geringes Vertrauen und fehlende Akzeptanz zurückzuführen ist.

3.1.4 Kosten

Bei der Implementierung von AM können an verschiedenen Stellen hohe Kosten, insbesondere für KMU entstehen. Die Kosten unterscheiden sich in Aufwendungen die einmalig anfallen wie Investitionskosten und Zulassungskosten, sowie laufenden Kosten wie Fertigungskosten und die Kosten für das Qualitätsmanagement, die während des Betriebes entstehen. Aufgrund der komplexen Prozesskette ergibt sich auch eine komplexe AM-Kostenstruktur.

Einmalige Kosten fallen bei der Einführung von AM an, bei der Wissensaneignung, unabhängig davon, ob diese durch Schulungen, Consulting, eigene Erfahrung oder das Einstellen von Spezialisten erlangt wird (siehe Abschnitt Know-how). Wird in dem Unternehmen die Make-or-Buy-Entscheidung zugunsten der Eigenfertigung getroffen, fallen für die Anlagentechnik sowie die Folgeschritte und die Peripherie Investitionskosten an. Die Inbetriebnahme einer AM-Anlage nimmt je nach Technologie und Anbieter Zeit in Anspruch, was sich als Kostenfaktor darstellt. Zudem ist die Zulassung ein finanzieller Aufwand, der branchenabhängig auch durch eine OEM-Qualifizierung gefordert werden kann.

Zusätzlich fallen Kosten während der Produktion an. Die Materialkosten variieren sowohl für Metalle als auch Kunststoffe stark. Je nach eingesetztem Verfahren, spielen die Materialkosten bei der Implementierung additiver Fertigung eine geringe Rolle. Die Aufbauraten und die Produktivität sind im Vergleich zur konventionellen Fertigung gering, wodurch lange Prozess- und Durchlaufzeiten entstehen. Des Weiteren ist der gesamte Fertigungsprozess mit manuellem Aufwand verbunden, da Prozessschritte wie die Nachbearbeitung noch nicht vollständig automatisiert sind.

Zur Qualitätssicherung wird heute noch eine Prüfung anhand von Fertigungsbegleitproben mit entsprechenden Prüfkosten vorgenommen. Die Prüfrate kann mit steigender Erfahrung und dem damit entwickelten Vertrauen in die Technologie verringert werden. Zusätzlich wird an In-Process-Überwachungsmethoden gearbeitet. Die hohe Unsicherheit bzgl. der Prüfung kann teilweise auf Wissensmangel zurückgeführt werden. Durch die Anlageninvestitionskosten ergeben sich je nach Auslastung evtl. hohe Maschinenstundensätze. Bei der Implementierung ist daher darauf zu achten, dass eine ausreichend hohe Anlagenauslastung gewähr-

leistet ist. Einer geringen Auslastung der AM-Anlage sollte durch die vorgelagerte Identifizierung von Anwendungsfällen vorgebeugt werden.

3.1.5 Business Case

Der Business Case kristallisiert sich klar als zentrales Element bei der Implementierung von AM heraus. So empfiehlt es sich zuerst eine Anwendung zu identifizieren und auf dieser Basis eine Make-or-Buy-Entscheidung zu treffen. Die Aufstellung eines geeigneten Business Cases ermöglicht es zudem, die auf den ersten Blick hohen Fertigungskosten einzuordnen. Der Business Case baut zumeist auf einem deutlichen Produktmehrwert und einem Vorteil bei den Lebenszykluskosten (Total Cost of Ownership) des Produktes auf. Dies können eine technische Lösung, eine Zusatzfunktion oder eine Individualisierung sein. Um solche Vorteile beurteilen zu können ist ausreichendes AM-Wissen erforderlich. Zuerst muss daher in Wissen investiert werden, um einen Business Case identifizieren zu können. Um eine umfangreiche Total Cost of Ownership Rechnung durchzuführen, müssen vorab Entscheidungen getroffen werden, wie zum Beispiel die Wahl des Verfahrens. Die Gesamtheit der beschriebenen Herausforderungen bei der Implementierung additiver Fertigung zeigt die Komplexität bei der Erstellung eines Business Cases auf. Zudem besteht durch Weiterentwicklung der Technologien grundsätzlich die Chance, dass sich die Kostenstruktur verbessert. Die Dynamik des Marktes und die Komplexität der Technologie führen dazu, dass keine statische Implementierungsstrategie für AM möglich ist. Häufig ist ein dynamischer Business Case und eine agile Implementierungsstrategie auf Basis von einzelnen Anwendungsfällen zielführend. Grundsätzlich bietet sich eine Auslagerung der AM-Fertigung an externe Dienstleister zu Beginn an, um erste Erfahrungen zu sammeln und Investitionsrisiken zu mindern.

3.1.6 Fazit

Die Ausarbeitung zeigt, dass die Implementierung von AM ein komplexer Vorgang ist, bei der insbesondere die Aspekte Know-how, Technologie, Kosten und Regularien im einzelnen Business Case zu betrachten sind.

Häufig ist es zielführend mit der Identifizierung von Pilot-Anwendungsfällen zu beginnen und so eine erste Lernkurve hinsichtlich aller vier Aspekte zu erlangen. Darüber hinaus führen erste Anwendungen und Erfolgsgeschichten dazu, dass Anwender mehr Vertrauen in den Prozess fassen und Vorbehalte gegenüber AM abbauen.

Durch ein größer werdendes Angebot an Ausbildungsmöglichkeiten sowie die Entwicklung von Standards sinken die dem Know-how-Mangel geschuldeten Implementierungshürden kontinuierlich. Auf technologischer Seite zeigt sich ein Trend zur Industrialisierung sowie einer Produktivitätssteigerung mit geschlossenen Pulverkreisläufen, einer höheren Laseranzahl und größeren Bauräumen. Die Auswahl an Materialien steigt und die Materialkosten sinken stetig. So werden die Kosten für AM bereits mittelfristig signifikant sinken.

Erste Normen und Richtlinien für die additive Fertigung wurden aufgestellt und weitere sind in der Entwicklung. In ersten Branchen, wie der Luftfahrt oder der Medizintechnik, wurde die Herstellung von Komponenten mittels AM bereits zugelassen. Insgesamt sind damit die Weichen für eine erfolgreiche Implementierung additiver Fertigung gestellt. Außerdem sind in

Bezug auf die genannten Implementierungshemmnisse deutliche Verbesserungen in den nächsten ein bis fünf Jahren zu erwarten.

3.2 Best Practice Beispiele für die Implementierung von AM in KMU

In diesem Kapitel wird anhand von zwei konkreten Best-Practice Beispielen die erfolgreiche Implementierung von AM in einem KMU dargestellt. Es wird in beiden Fällen der Verlauf von der initialen Idee bis hin zur vollständigen Implementierung von AM in der Serie aufgezeigt.

3.2.1 Implementierung von AM am Beispiel der robomotion GmbH

Die 2003 gegründete robomotion GmbH mit Sitz bei Stuttgart ist ein Hersteller von maßgeschneiderten und automatisierten Komplettlösungen für die Verpackungs- und Produktionslogistik. Das Unternehmen entwickelt und baut mit über 20 Mitarbeitern automatisierte Handlingsysteme für Kunden aus der Lebensmittel- und Kunststoffindustrie sowie der Pharma- und Verpackungsbranche. Eine der zentralen Herausforderungen zur Sicherstellung einer zuverlässig funktionierenden Handlinglösung stellt die Greifertechnologie dar, denn ohne ein zuverlässiges Greifen des Produkts kommt der gesamte Verpackungsprozess zum Erliegen. Zusätzlich sind die Greifsysteme von einem hohen Maß an Produktindividualisierung gekennzeichnet und müssen stets optimal auf das zu greifende Produkt abgestimmt sein. Diese Greiferanforderungen kollidieren mit den fertigungsspezifischen Konstruktionsrestriktionen für KF. Darum hat die robomotion GmbH bereits 2004 die Potentiale von AM erstmals evaluiert. Die nachfolgende Tabelle 14 zeigt eine chronologische Abfolge an Aktivitäten, die seitens der robomotion GmbH bis hin zur erfolgreichen Implementierung von AM unternommen worden sind.

Tabelle 14: AM-Implementierungszeitstrahl der robomotion GmbH

2003	Gründung der robomotion GmbH als Hersteller maßgeschneiderter und automatisierter Komplettlösungen für die Verpackungs- und Produktionslogistik
Ab 2004	Einsatz eines kleinen Stereolithografie (SLA) Desktop Druckers zum Verstehen der AM-Technologie und zur Evaluierung der AM-Potentiale für die eigenen Geschäftsfelder mit Unterstützung von AM-Experten des Fraunhofer IPA als Entwicklungsdienstleister
2005	Initiierung des ersten Industrieprojekts mit dem Fraunhofer IPA als AM-Entwicklungsdienstleister zur Konzeptionierung und dem Design von additiv fertigen, funktions- und gewichtsoptimierten Greifern mittels SLA
2006	Die robomotion GmbH präsentiert erste Prototypen von additiv gefertigten Greifern auf der Automatica in München
Ab 2006	Einsatz von AM in der Produktentwicklung zur Kostenreduktion und Verkürzung der Bereitstellungszeit von Prototypen und Testgreifern
Ab 2007	Mitarbeiterqualifikation im Bereich des Designs für AM zur Ausschöpfung der AM-Potentiale nach dem Motto „learning by doing“ in Ermangelung von entsprechenden AM-Schulungsangeboten

- 2008 Beteiligung an einem öffentlich geförderten BMBF-Forschungsprojekt zur Untersuchung von Material- und Festigkeitseigenschaften additiv gefertigter Kunststoffbauteile wie bspw. Greifern
- 2008 Durch den AM-Verfahrenswechsel von SLA auf die SLS-Technologie lassen sich neue Kunststoffe verarbeiten (bspw. PA12) und auf diese Weise weitere Greiferoptimierungen (additive Integration von Pneumatikleitungen) realisieren. Fertigung der Greifer mittels SLS weiterhin durch externe Dienstleister (siehe Abbildung 45 links)
- 2009 Entwicklung einer Methodik zur parametrischen Konstruktion von additiv zu fertigenden Greifern unter Berücksichtigung der additiven Fertigungsrestriktionen im Rahmen einer Masterarbeit
- Ab 2010 Fertigung von additiven Greiferkomponenten im industriellen Maßstab durch einen festen, auf AM spezialisierten Lohnfertiger unter Einhaltung von Qualitätsstandards, weil eine eigene SLS Anlage nicht voll auslastbar wäre
- 2009 Überführung der additiv gefertigten Greifer Konzepte in die industrielle Serie im Rahmen eines Automatisierungsprojektes inklusive eines hybriden Fingergreifers, dessen Finger additiv mittels SLS gefertigt sind. Fingergreifer laufen im 3-Schichtbetrieb (siehe Abbildung 45 mittig)
- 2010 Wechsel vom hybriden Greiferkonzept (konventionelle Mechanik mit additiven Greiffingern) auf ein vollständig additives Greiferkonzept (funktionsintegrierte Kinematik) ohne konventionell gefertigte Greiferkomponenten (siehe Abbildung 45 rechts)
- 2011 Einführung von Qualitätssicherungsmaßnahmen für additiv gefertigte Greiferkomponenten in Form von Dauerfunktionstests, beispielsweise von funktionsintegrierten Filmscharnieren
- 2013 Ergänzung der Bauteilbeschaffung von externen Lohnfertigern durch die Anschaffung einer eigenen FDM-Industrieanlage zur internen Fertigung von Prototypen und Greiferkomponenten
- 2014 Automatisierungsprojekt, das über 300 additiv gefertigte Einzelteile beinhaltet
- 2018 Interne Untersuchung von Material- und Festigkeitseigenschaften additiv gefertigter Greiferkomponenten aus PA6 als weitere Materialoption

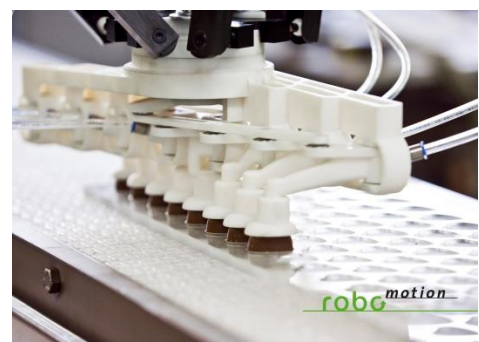
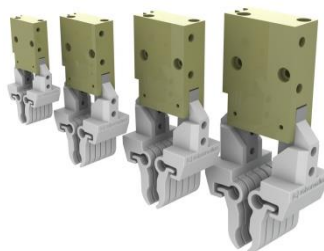


Abbildung 45: Additiv gefertigte Greifersysteme⁶⁶

⁶⁶ robomotion GmbH

Für die Anfänge der Implementierungsprozedur ist charakteristisch, dass die robomotion GmbH zum internen Know-How Aufbau mit externen Entwicklungsdienstleistern wie beispielsweise Forschungsinstituten kooperiert hat. Die eigenen Mitarbeiter, die in diesen bilateralen Entwicklungsprojekten und staatlich geförderten Forschungsprojekten unterstützt haben, haben sich auf diese Weise über 15 Jahre sukzessive AM-Expertise im Hinblick auf das Design und den Fertigungsprozess angeeignet. Ein interner langwieriger Know-How Aufbau war unumgänglich, da noch keine Schulungs- und Beratungsangebote existierten. Auch im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten wurde der AM-Designprozess bei der robomotion GmbH weiterentwickelt.

AM wurde zu Beginn in der Produktentwicklung zur Kostenreduktion und Steigerung der Bereitstellungszeit von Prototypen und Testgreifern herangezogen. Erst mit wachsender AM-Expertise der Mitarbeiter wurde AM ab 2009 auch zur Fertigung von Greifern herangezogen, die an den Kunden ausgeliefert worden sind. Die robomotion GmbH hat sich aber auch im weiteren Verlauf auf die Entwicklung und Konstruktion der neuartigen Greifersysteme beschränkt und die additive Produktion der AM-Greifer an Lohnfertiger ausgelagert, da sich eine eigene AM-Anlage nicht hätte auslasten lassen.

Die Komplexität der additiv gefertigten Greifer wurde im Laufe der Zeit kontinuierlich gesteigert. Zu Beginn wurden lediglich einzelne Greiferkomponenten mit dem Stereolithografie-Verfahren gefertigt. Durch den späteren Wechsel zum SLS-Verfahren wurde es möglich, nicht länger nur starre Komponenten, sondern dank der größeren Materialbandbreite auch elastische Greifersysteme mit integrierten Funktionalitäten additiv zu fertigen. Der Stellenwert von AM für die Herstellung von Greifern ist bis heute kontinuierlich gewachsen, sodass 2014 ein einzelnes Automatisierungsprojekt über 300 additiv gefertigte Einzelteile beinhaltet hat. Inzwischen sind bei der robomotion GmbH auch Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Überprüfung von Lebensdaueranforderungen von AM-Bauteilen etabliert. Zudem werden unternehmensintern neue Kunststoffe zur additiven Herstellung von Greifern untersucht, um die Leistungsfähigkeit der Greifersysteme auch in Zukunft zu optimieren und innovative Greiferanwendungen zu realisieren.

3.2.2 Implementierung von AM am Beispiel der JELL GmbH & Co. KG

Die JELL GmbH & Co. KG ist 1987 als Firma Gerhard Jell Werkzeugkonstrukteur geründet worden. Sie hat ihren Firmensitz in Bernau am Chiemsee und beschäftigt heute etwa 20 Mitarbeiter. Das Unternehmen hat sich in den Anfängen auf Konstruktionsdienstleistungen für den Werkzeug- und insbesondere den Formenbau fokussiert.

Die Entwicklung und Konstruktion von Spritzgusswerkzeugen gehört zu einer der zentralen Dienstleistungen, die JELL anbietet. Bei solchen Spritzgusswerkzeugen stellt sich die Herausforderung einer konturnahen und homogenen Temperierung oder Kühlung der Werkzeuge. Konventionelle Fertigungsverfahren stoßen hier an ihre Grenzen. Sie schränken die Designfreiheit ein, beispielsweise können Temperier- oder Kühlkanäle oft nur gebohrt werden. Durch die konstruktiven Freiheiten von AM gegenüber KF lässt sich die Anordnung dieser Kanäle optimieren. Auf diese Weise können Taktzeiten beim Spritzgießen reduziert und die Stückkosten der Spritzlinge gesenkt werden (vgl. Kapitel 1.1.1). Dieses Potential hat JELL 2008 identifiziert und sofort die Idee entwickelt AM zukünftig in die Konstruktion von Spritz-

gusswerkzeugen miteinzubeziehen. Am Anfang stand die Entscheidung für ein geeignetes AM-Verfahren. Angesichts der Material-, Genauigkeits-, Größen- und Festigkeitsanforderungen der Formeinsätze kristallisierte sich LBM als das geeignetste AM-Verfahren zur Substituierung von KF heraus (vgl. Kapitel 1.1.2). Um den unternehmensinternen Entwicklern und Konstrukteuren die neuen Designfreiheiten, aber auch prozesseitigen Restriktionen von AM zu vermitteln, hat JELL 2009 in eine LBM-Anlage investiert. Hierbei handelte es sich um eine Einsteigeranlage aus dem unteren Preissegment, mit der sich nur kleinere Bauteile (Bauraum von 90x90x200mm) fertigen lassen.

In den folgenden zwei Jahren lag der strategische Fokus noch nicht darauf, mit der eigenen AM-Anlage Bauteile gewinnbringend zu produzieren, sondern die Mitarbeiter im Design und dem Prozessverständnis für AM zu trainieren und grundsätzliche Akzeptanz für diese neuartige Fertigungstechnologie im Unternehmen zu schaffen. Den Mitarbeitern wurde der Einstieg in die AM-Technologie erleichtert, da neue Designentwürfe direkt auf der eigenen Anlage kurzfristig verifiziert werden konnten. Zusätzlich wurde durch den hohen Praxisbezug an der eigenen Anlage auch bei den Konstrukteuren ein tieferes Verständnis für den metallischen AM-Prozess und den damit verbunden konstruktionsseitigen Herausforderungen geschaffen. Um 2010 gab es noch keine Dienstleister, die Schulungs- und Beratungsdienstleistungen für AM angeboten haben, weswegen JELL ein internes Trainingskonzept entwickelte, um neue Mitarbeiter zukünftig systematisch und zeiteffizient im Bereich AM zu qualifizieren.



Abbildung 46: Spritzguss-Formeinsatz mit additiv gefertigten Kühlkanälen⁶⁷

Falls Spritzgusswerkzeuge im Rahmen von Projekten additiv gefertigt werden mussten, deren Abmessungen den maximalen Bauraum der eigenen LBM-Anlage überschritten oder deren Material von der Standardedelstahllegierung abwich, so hat JELL diese Fertigungsaufträge an externe Lohnfertiger vergeben. Mit steigender Zahl der Projekte, in denen AM-Bauteile zum Einsatz kamen, wurde der eigene LBM-Anlagenpark kontinuierlich erweitert. Heute umfasst der Anlagenpark vier LBM-Industrieanlagen für die Metallfertigung sowie eine FDM-Anlage für den Prototypenbau. Im Zuge der wachsenden eigenen AM-Produktionskapazität hat JELL die Abhängigkeit von AM-Lohnfertigern reduziert und kann seinen Kunden konstante Bauteilqualität garantieren. Um die eigenen AM-Anlagen stets voll auslasten zu können, hat JELL sein Dienstleistungsportfolio erweitert. Es wurden nicht länger nur Kunden aus dem Werkzeug- und Formenbau adressiert. Stattdessen wurde die eigene AM-Kompetenz in Bezug auf Design und Fertigung auf andere metallverarbeitende Branchen wie der Luftfahrtindustrie übertragen. Durch den systematischen Aufbau von AM-Kompetenzen

⁶⁷ JELL GmbH & Co. KG

und einer zugehörigen AM-Infrastruktur hat sich JELL folglich in wenigen Jahren einen branchenübergreifenden Zugang zu neuen Märkten, in denen AM nachgefragt wird, erschlossen.

Mit wachsender AM-Expertise bei JELL wurde ab 2013 damit begonnen, die LBM-Anlagen nach den eigenen Vorstellungen im Hinblick auf Bauraumheizung, Bauraumvolumen sowie Schutzgasstrom zu modifizieren, um die AM-Prozessstabilität und die Qualität der additiv gefertigten Bauteile zu steigern. Zusätzlich wurden Kooperationen mit lokal ansässigen Forschungsinstituten eingegangen, um den technologischen Reifegrad von AM weiterzuentwickeln. Auch hat JELL begonnen spezielle AM-Metalllegierungen für Kunden zu entwickeln und diese auf den eigenen LBM-Anlagen zu verarbeiten.

In 2016 hat JELL schließlich das Wissen über AM mit der langjährigen Kernkompetenz des Formenbaus in Form eines eigenen Produkts vereint.

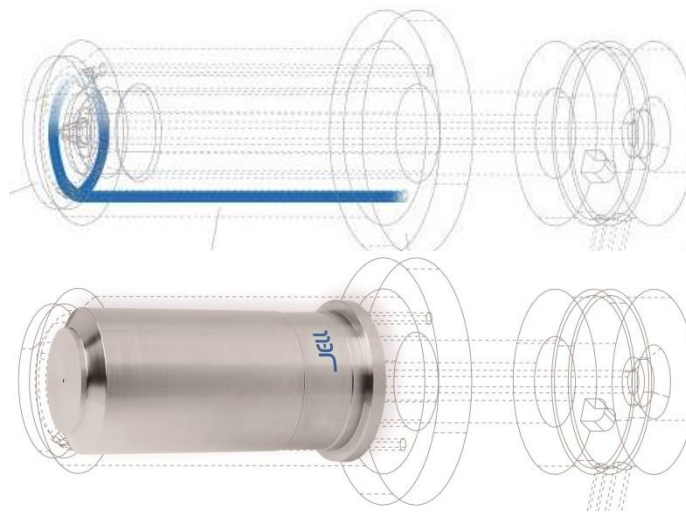


Abbildung 47: Vorkammerbuchse (unten) und mit Kühlkanalverlauf (oben)⁶⁸

Hierbei handelt es sich um eine Vorkammerbuchse, die bei einer Spritzgussanlage den Heißkanal thermisch vom Formeinsatz entkoppelt. Durch die additive Integration von Kühlkanälen in die Vorkammerbuchse gewinnt das Spritzgießen an Prozesssicherheit. Diese Buchse produziert JELL heute auf den eigenen LBM-Anlagen in Serie, neben weiteren branchenübergreifenden AM-Bauteilen und stellt damit die erfolgreiche Implementierung von AM in einem KMU unter Beweis.

⁶⁸ JELL GmbH & Co. KG

Literaturverzeichnis

- [3dgr 17d] 3d-grenzenlos.de: Britisches Krankenhaus spart bis zu 20.000 Euro pro Operation dank des 3D-Drucks unter: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/queen-elizabeth-hospital-setzt-auf-3d-druck-27261403/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [3dgr 17e] 3d-grenzenlos.de: Passgenaue Schultergelenke aus dem 3D-Drucker verbessern Patientenversorgung unter: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/passgenaues-schultergelenk-aus-3d-drucker-27262353/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [3dru 17] 3DRUCK - The AM Magazine: <https://3druck.com/case-studies/volkswagen-autoeuropa-setzt-auf-3d-druck-bei-werkzeugherstellung-fuer-montage-2659231/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [3trp 17a] 3T Building Success Layer by Layer: 3D Printing for Oil Rig model unter: <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/3d-printing-for-oil-rig-model/gallery/case-studies/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [3trp 17b] 3T Building Success Layer by Layer: Plastic AM gearbox prototype gives superb results unter: <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/plastic-am-gearbox-prototype-gives-superb-results/gallery/case-studies/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [3trp 17c] 3T Building Success Layer by Layer: Superior fixation for implant using AM unter: <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/superior-fixation-for-implant-using-am/gallery/case-studies/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Addi 18] Additive – Das Magazin für generative Fertigung: Montagehilfen direkt in der Fertigung drucken unter: <https://additive.industrie.de/news/montagehilfen-direkt-in-der-fertigung-drucken/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Alta 14] Altair Engineering: From the 3D Printer into Space unter: http://www.altair.com/newsdetail.aspx?news_id=11062&news_country=en-US (abgerufen am 28.01.2019).
- [Arbe 17] Arbeitsgemeinschaft Additive Manufacturing: Technology Scout 2017 Technologien, Anwendungen und Hersteller. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH 2017.

- [Auto 15] Automobilindustrie: BMW fertigt Wasserpumpenrad für DTM im 3D-Druck unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/bmw-fertigt-wasserpumpenrad-fuer-dtm-im-3d-druck-a-487685/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Autop 18] Automobilproduktion: GM setzt in Produktion verstärkt auf 3D-Druck unter <https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/gm-setzt-in-produktion-verstaerkt-auf-3d-druck-308.html> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Berg 16] Roland Berger: Additive Manufacturing – next generation AMnx unter: https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub_additive_manufacturing.html (abgerufen am 28.01.2019).
- [Berl 17] Berliner Zeitung: Berliner Chirurg Max Heiland entfernt Kiefertumoren unter: <http://www.berliner-zeitung.de/wissen/berliner-chirurg-max-heiland-entfernt-kiefertumoren--ohne-spuren-zu-hinterlassen-28167164> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Bone 17] BoneSmart.org: Total Hip Replacement Implants (abgerufen am 28.01.2019).
- [Daim 17] Daimler AG: Mercedes-Benz Lkw: Neu aus dem 3D-Drucker: erstes Lkw-Ersatzteil aus Metall unter: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Premiere-bei-Mercedes-Benz-Lkw-Neu-aus-dem-3D-Drucker-erstes-Lkw-Ersatzteil-aus-Metall.xhtml?oid=23666435> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Deut 15] Deutsches Ärzteblatt: 3D-Drucker hilft bei der OP-Planung unter: <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/61779/3D-Drucker-hilft-bei-der-OP-Planung> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Deut 17a] Deutsche Bahn: 3D-Druck: Neue Fertigungstechnik für Ersatzteile unter: <https://inside.bahn.de/3d-druck-interview/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Dmg 19] DMG Mori: „LASERTEC 65 3D hybrid - Hybride Komplettbearbeitung“ unter: <https://at.dmgmori.com/produkte/maschinen/additive-manufacturing/pulverdueseverfahren/lasertec-65-3d-hybrid> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Engi 19] EngineeringSpot: www.engineeringspot.de (abgerufen am 28.01.2019).
- [Eos 17] EOS GmbH: Powerful EOSINT M 280 supersedes hybrid solution of the tool insert unter: https://www.eos.info/press/customer_case_studies/fwb (abgerufen am 28.01.2019).

- [Eos 17a] EOS GmbH: Additive Manufacturing Enables Automation Specialist to Design its Bionic Assistance System unter: https://www.eos.info/press/customer_case_studies/festo (abgerufen am 28.01.2019).
- [Eos 17b] EOS GmbH: (Dental): Argen Corporation - EOS Technology allows daily turn-out of hundreds of units unter: https://www.eos.info/case-studies/digital_manufacturing_for_detal_labs (abgerufen am 28.01.2019).
- [Eos 17c] EOS GmbH: Additive Manufacturing Solutions for orthopedic applications unter: https://www.eos.info/industries_markets/medical/orthopaedic_technology (abgerufen am 28.01.2019).
- [Feld 16] Feldmann, Carsten; Pumpe, Andreas: 3D-Druck Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016.
- [Fest 17] Festo AG: Bionischer Handling-Assistent unter: <https://www.festo.com/group/de/cms/10241.htm> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Flug 16] Flug Revue: Flugzeugbau - 3D-Druck mit Metallen unter: <http://www.flugrevue.de/flugzeugbau/3d-druck-mit-metallen-fuer-den-flugzeugbau/679656> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Form 19] Form+Werkzeug: www.form-werkzeug.de (abgerufen am 28.01.2019).
- [Gefe 19] Gefertec - 3D Metal Printer für die industrielle Fertigung: <https://www.gefertec.de/3dmp-maschinen/#technik-technologie> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Hens 18] Hensoldt: „AM Suite – Die 3D-Druck Lösung“ unter: https://www.hensoldt.net/fileadmin/hensoldt/Datenbl%C3%A4tter/0361_18_1_AM_Suite_brochure_D_intranet.pdf (abgerufen am 28.01.2019).
- [Indu 19] Industrial Laser Solutions For Manufacturing: www.industrial-lasers.com (abgerufen am 28.01.2019).
- [Inge 16] Ingenieur.de: 3D-Drucker aus Franken checkt Haltbarkeit schon beim Drucken unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/3D-Druck/3D-Drucker-Franken-checkt-Haltbarkeit-Drucken> (abgerufen am 28.01.2019).

- [Kene 15] Ke-Next.de: Additive Fertigung für medizinische Implantate unter: <https://www.ke-next.de/specials/medizintechnik/additive-fertigung-fuer-medizinische-implantate-129.html> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Kons 16] Konstruktionspraxis.de: Laserschmelzen für den Airbus unter: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/laserschmelzen-fuer-den-airbus-a-527664/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Mars 16] Marschall, Herbert: Personal für die additive Fertigung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016.
- [Mate 17] Materialise NV: Materialise's 3D-Printed Maxillofacial Implants unter: <http://www.materialise.com/en/press-releases/materialises-3d-printed-maxillofacial-implants-titanium-are-first-to-get-green-light> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Öste 17] Österreichischer Rundfunk: Durch 3D-Technik in 20 Minuten zur Zahnkrone unter: <http://kaernten.orf.at/news/stories/2820563> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Plas 18] PLASTVERARBEITER: „3D-Drucker beschleunigen Beschaffung von Montagehilfen“ unter: <https://www.plastverarbeiter.de/74933/hauseigene-3d-drucker-beschleunigen-die-beschaffung-von-montagehilfen/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Por 18] Porsche Consulting: Erfolgreich in die Zukunft mit Additiver Fertigung unter https://www.porsche-consulting.com/fileadmin/docs/Startseite/News/SRX00349/Erfolgreich_in_die_Zukunft_mit_Additiver_Fertigung_Porsche_Consulting_C_2018.pdf (abgerufen am 28.01.2019).
- [Raml 19] Rotterdam Additive Manufacturing Fieldlab: www.ramlab.com (abgerufen am 28.01.2019).
- [Scit 16] Scitec-media: 3D-Druck – Evolution statt Revolution unter: <http://scitec-media.ch/2016/01/30/3-d-druck-evolution-statt-revolution/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Siem 17] Siemens AG: Additive Manufacturing für Gasturbinen unter: <https://www.siemens.com/customer-magazine/de/home/energie/strom-bringt-lebensqualitaet/additive-manufacturing-fuer-gasturbinen.html> (abgerufen am 28.01.2019).

- [Siem 17a] Siemens AG: Zahlen und Fakten zum Mehrwert von Additive Manufacturing unter: https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/services/industrial-applications/additive-manufacturing/infografik_additive_manufacturing_deutsch.pdf (abgerufen am 28.01.2019).
- [Stra 17] Stratasys: APEX Achieves Complete Digital Workflow With 3D Printing unter: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/dental/apex-dental-milling-center> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Turb 19] Turbo Dynamics – Quality without Compromise: www.turbodynamics.co.uk (abgerufen am 28.01.2019).
- [VDI 3404] VDI-Richtlinie 3404: Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure 2009.
- [Vdi 18] VDI-Nachrichten: „Bugatti - Schöner bremsen“ unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik/Schoener-bremsen> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Verb 17] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: AM für die Luftfahrt unter: <http://am.vdma.org/viewer/-/article/render/15565415> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Vere 17] Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigung von Ti-Bauteilen in der Luftfahrt unter: <https://www.vdi-wissensforum.de/news/additive-fertigung-von-ti-bauteilen-in-der-luftfahrt-vom-prototypen-in-die-serienfertigung/> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Verp 17] Verpackungsrundschau: Ersatzteile on demand im 3D-Metalldruck unter: <https://www.verpackungsrundschau.de/nachrichten/produkte/ersatzteile+fuer+getraenkefuel-ler+on+demand+im+3d+metalldruck+.168349.htm#.WbuLG7JJbRY> (abgerufen am 28.01.2019).
- [Vtt 17] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd: Case Study: Hydraulic valve block redesign for additive manufacturing unter: http://www.vttresearch.com/Documents/Factory%20of%20the%20future/ValveBlock_VTTInternetVersion.pdf (abgerufen am 28.01.2019).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Transportable additive Fertigungszelle	4
Abbildung 2: Additive Fertigung des Rohlings (links) und spanende Nachbearbeitung des Rohlings (rechts)	5
Abbildung 3: Spritzgusswerkzeug (links) und Kühlkanäle im Spritzgusswerkzeug (rechts)	6
Abbildung 4: Ventilblock konventionell gefertigt (links) und Ventilblock additiv gefertigt (rechts)	8
Abbildung 5: Dosenfüllventil konventionell gefertigt (links) und Dosenfüllventil additiv gefertigt (rechts)	8
Abbildung 6: Kabinenhalter konventionell gefertigt (oben) und Kabinenhalter additiv gefertigt (unten)	10
Abbildung 7: Additiv gefertigter Rohkrümmer	11
Abbildung 8: Antennenarm konventionell gefertigt (links) und Antennenarm additiv gefertigt (rechts)	11
Abbildung 9: Überblick Laserstrahlschmelzen	13
Abbildung 10: Überblick Elektronenstrahlschmelzen	14
Abbildung 11: Überblick Binder Jetting	16
Abbildung 12: Überblick Directed Energy Deposition	18
Abbildung 13: Aufbauraten, Auflösung und Investitionskosten additiver Fertigungsverfahren (Metall)	20
Abbildung 14: Überblick Fused Deposition Modeling	22
Abbildung 15: Überblick Selektives Lasersintern	23
Abbildung 16: Überblick Multi Jet Fusion	24
Abbildung 17: Aufbauraten, Auflösung und Investitionskosten additiver Fertigungsverfahren (Kunststoff)	25
Abbildung 18: Vorgehensweise zur Identifikation von Anwendungspotentialen für die additive Fertigung im maritimen Kontext	27
Abbildung 19: Laserauftragsschweißen einer Turbinenschaufel	32
Abbildung 20: AM-gefertigte Jet-Einspritzdüsen	34
Abbildung 21: Additiv gefertigter Turbolader von Königsegg	35
Abbildung 22: Wabenstruktur eines optimierten Flügels, mittels AM hergestellt	36
Abbildung 23: Additiv gefertigter Schiffspropeller WAAMPeller	36

Abbildung 24: Kugelkipplager (Kugel links und Pfanne rechts)	43
Abbildung 25: Lagerdichtring	43
Abbildung 26: Elektromotor (Lüftungshaube am rechten Bildrand).....	44
Abbildung 27: Entkopplungsfeder	45
Abbildung 28: 900-Tonnen-Portalkran (links); Schienenzange (Mitte und rechts)	46
Abbildung 29: Sickerwasserpumpe (links); Klauenkupplung (Mitte); Bauteilabmessungen (rechts).....	47
Abbildung 30: Becker Mewis Duct® Twisted	47
Abbildung 31: Verbesserung der Anströmung des Schiffspropellers durch die Mewis-Düse	48
Abbildung 32: Fin Tip einer Mewis-Düse.....	49
Abbildung 33: Hauptgehäuse der Aufblasautomatik für Schwimmwesten	50
Abbildung 34: Spritzgusswerkzeuge für das Hauptgehäuse der Aufblasautomatik	50
Abbildung 35: Pod-Antriebseinheit (links); Propellerblatt der Antriebseinheit (rechts).....	52
Abbildung 36: Propellerblatt mit innen liegenden Kanälen	53
Abbildung 37: Rim Thruster Quelle: develogic GmbH	53
Abbildung 38: Schallwandler für den Unterwassereinsatz (links); Auflager für Piezokeramik (rechts)	54
Abbildung 39: Auflager für Piezokeramik (vergrößert).....	55
Abbildung 40: Getriebegrößen für verschiedene Schiffstypen.....	56
Abbildung 41: Gehäuseteile für ein Nebenaggregat.....	56
Abbildung 42: Schadhafte Ritzelwelle (links und Mitte); Oberfläche nach der Reparatur (rechts).....	57
Abbildung 43: Zahnrad mit großem Durchmesser	58
Abbildung 44: Kategorien der Hemmnisse für die Implementierung von AM.....	67
Abbildung 45: Additiv gefertigte Greifersysteme.....	73
Abbildung 46: Spritzguss-Formeinsatz mit additiv gefertigten Kühlkanälen.....	75
Abbildung 47: Vorkammerbuchse (unten) und mit Kühlkanalverlauf (oben)	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Branchenübergreifende Potentialausprägungen von additiver Fertigung	6
Tabelle 2: Potentialausprägungen von additiver Fertigung in der Maschinen- und Anlagenbaubranche.....	9
Tabelle 3: Potentialausprägungen von additiver Fertigung in der Luft- und Raumfahrtbranche	12
Tabelle 4: Verfahrensbenchmark Directed Energy Deposition	19
Tabelle 5: Benchmark additive Fertigungstechnologien Metall.....	20
Tabelle 6: Benchmark additive Fertigungstechnologien Kunststoff.....	25
Tabelle 7: Kategorisierung von Unternehmen im maritimen Bereich nach Unternehmensfokus.....	28
Tabelle 8: Korrelation von Anwendungsbeispielen nach Kategorie und Potentialen der additiven Fertigung	31
Tabelle 9: Handlungsempfehlungen zur kurz-, mittel- und langfristigen Auswahl von additiven Fertigungstechnologien	41
Tabelle 10: AM-Kalkulation für das Propellerblatt (Werkstoff: Titan, Losgröße: 4).....	53
Tabelle 11: AM-Kalkulation für den Rim Thruster (Werkstoff: Titan, Losgröße: 1).....	53
Tabelle 12: AM-Kalkulation für das Piezokeramik-Auflager (Werkstoff: Titan, Losgröße 1).....	55
Tabelle 13: Einordnung der AM-Dienstleister in Deutschland entlang der AM-Prozesskette (1/4)	63
Tabelle 14: AM-Implementierungszeitstrahl der robomotion GmbH	72

Impressum

Herausgeber

Maritimes Cluster Norddeutschland e. V.

Geschäftsstelle Hamburg

Wexstraße 7

20355 Hamburg

+49 40 227019-492

hh@maritimes-cluster.de

www.maritimes-cluster.de

Studiendurchführung

Die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT

Am Schleusengraben 14

21029 Hamburg-Bergedorf

+49 40 484010-500

info@iapt.fraunhofer.de

www.iapt.fraunhofer.de

Autoren

Ina Ludwig, M.Sc.

Jochen Looock M.Sc.

Tobias Kosubek M.Sc.

Dipl.-Ing. Olaf Steinmeier

Christian Franke M.Sc.

Stand

Hamburg am 18.04.2019

Copyright

Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Eine Vervielfältigung oder Übernahme, auch auszugsweise, bedarf der Zustimmung des Rechteinhabers. Diese Studie wurde mit der gebotenen Sorgfalt erstellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben kann jedoch nicht übernommen werden.

STUDIENDURCHFÜHRUNG

Die Fraunhofer-Einrichtung für
Additive Produktionstechnologien IAPT

Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg-Bergedorf

+49 40 484010-500
info@iapt.fraunhofer.de
www.iapt.fraunhofer.de

HERAUSGEBER

Maritimes Cluster Norddeutschland e. V.
Geschäftsstelle Hamburg

Wexstraße 7
20355 Hamburg

+49 40 227019-492
hh@maritimes-cluster.de
www.maritimes-cluster.de