

Informationspapier

ADDITIVE FERTIGUNG

3D-DRUCK, RAPID PROTOTYPING,
ADDITIVE MANUFACTURING

Mai 2016

Autoren: Till Zimmermann & Dirk Jepsen

Impressum:

ÖKOPOL GmbH
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34
D – 22765 Hamburg

www.oekopol.de
info@oekopol.de



++ 49-40-39 100 2 0



++ 49-40-39 100 2 33

Inhalt

1	EINFÜHRUNG	4
2	BEGRIFFE	4
3	GRUNDLAGEN	5
4	VORTEILE, POTENTIALE UND OFFENE FRAGEN	6
4.1	Fertigung konventioneller Bauteile	6
4.2	Fertigung von Produktionsmitteln.....	6
4.3	Fertigung neuer Geometrien	6
4.4	Qualität der Bauteile	7
4.5	Pulverherstellung und -transport	7
4.6	Reduzierter Materialeinsatz.....	8
5	ANWENDUNGSBEISPIELE	8
5.1	Ventilblöcke in der Luftfahrt.....	8
5.2	Integraler ALM Fuel-Connector.....	9
6	UMWELTASPEKTE	9
7	WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN	11
7.1	Akteure.....	11
7.2	Weiterführende Literatur und Links	13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gewichts- und Strömungsoptimierung von Ventilblöcken	9
Abbildung 2:	Optimiertes Design eines Fuel-Connectors	9

1 EINFÜHRUNG

Dieses Papier gibt eine kurze Einführung in die Additive Fertigung (engl.: additive manufacturing, AM), fasst aus Umweltperspektive Vorteile und Potenziale sowie offene Fragen der Technologie zusammen und nennt relevante Akteure in Hamburg und Norddeutschland.

Grundlage sind die Erkenntnisse aus der Veranstaltung der UmweltPartnerschaft „3D-Druck zum Frühstück“ vom 05.04.2016 beim Laserzentrum Nord in Hamburg und der „15. Fachtagung Rapid Prototyping“ vom 15.04.2016 in der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg sowie ergänzende eigene Recherchen der Autoren und Gespräche mit relevanten Akteuren und Experten.

Das Papier fokussiert primär auf die additive Fertigung von metallischen Bauteilen. Ausführungen, die sich auf Kunststoffe beziehen, sind entsprechend kenntlich gemacht.

2 BEGRIFFE

Additive Fertigung bezeichnet als Sammelbegriff alle Verfahren, bei denen ein Ausgangsstoff schichtweise zu einem Werkstück zusammengefügt wird. Im Gegensatz hierzu werden bei subtraktiven Verfahren wie Bohren und Fräsen Bauteile durch das Abtragen von Material hergestellt.

Neben der Additiven Fertigung bzw. dem Additive Manufacturing werden häufig auch die Begriffe des 3D-Druck und des Rapid Prototyping verwendet. Weitgehend werden diese Begriffe zwar synonym gebraucht, lassen sich jedoch zumindest teilweise voneinander abgrenzen.

Rapid Prototyping wird seit über 15 Jahren auch im deutschsprachigen Raum für die schnelle Fertigung von Anschauungs- und Funktionsprototypen verwendet und ist somit auf die Fertigung von Einzelstücken begrenzt. Material und Funktionalität können hierbei noch vom Serienteil abweichen. Die additive Fertigung ist als Begriff hingegen deutlich weiter gefasst und beinhaltet auch die (additive) Serienfertigung von Bauteilen.

Die additive Fertigung von Serienteilen wird auch als Rapid Manufacturing bezeichnet. Hiervon ist der Begriff des Rapid Tooling abzugrenzen, der im Gegensatz zur Fertigung von Endprodukten die additive Herstellung von Werkzeugen und Formen bezeichnet.

Die Bezeichnung 3D-Druck wird seit einigen Jahren zunehmend insbesondere im „umgangssprachlichen“ öffentlichen Diskurs verwendet und umfasst neben industrieller additiver Fertigung auch die zunehmend aufkommende Verfügbarkeit von kleinformatigen Anlagen für die additive Fertigung von Kunststoffteilen, die vergleichsweise kostengünstig verfügbar sind und auch private Anwender adressieren.

3 GRUNDLAGEN

Bei der additiven Fertigung wird ein pulverförmiges oder flüssiges Ausgangsmaterial schichtweise zu einem fertigen Bauteil verfestigt. Der Prozess erlaubt die Anfertigung auch komplexer Geometrien auf Grundlage eines CAD-Modells mit vergleichsweise geringem Aufwand im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren oder auch Gießen.

Grundsätzlich zu unterscheiden lässt sich die additive Fertigung nach dem verwendeten Werkstoff: Kunststoff oder Metall.

Zu den bislang typischerweise in der additiven Fertigung verwendeten Metallen zählen u.a. Eisen-, Titan- und Aluminiumlegierungen. Ausgangsstoff der Bauteilfertigung ist hier ein sphärisches Metallpulver, das durch Gas-Atomisierung hergestellt wird (für eine Illustration des Prozesses siehe: <https://www.youtube.com/watch?v=IdP1sQnjWcc>). Im Prozess wird das Pulver durch einen oder mehrere Laser schichtweise geschmolzen und verfestigt. Nach der Bearbeitung jeder Schicht (Schichtdicke bspw. 100 µm) wird die Plattform auf der sich das entstehende Bauteil befindet entsprechend der Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen (für eine Illustration siehe beispielsweise: <https://www.youtube.com/watch?v=RrkMsLul644>).

In der additiven Fertigung von Kunststoffen kommt es u.a. zum Einsatz von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polystyrol (PS), Polyamiden (PA), Polyethylenterephthalat (PET), Polycarbonat (PC), Thermoplastischen Elastomeren auf Urethanbasis (TPU), Polymethylmethacrylat (PMMA) und Epoxidharzen. Je nach Kunststoff kann sich das Fertigungsverfahren unterscheiden. So wird entweder ein flüssiges Photopolymer durch Bestrahlung mit einem Laser verhärtet (Stereolithographie, SLA), ein pulverförmiges Ausgangsmaterial wird durch einen Laser gesintert (Selektive Laser Sintering, SLS), pulverförmiges Material wird im Drucker geschmolzen, mit Düsen auf die Bauplattenform gespritzt und durch Erkalten vernetzt (Fused Deposition Modeling, FDM) oder ein pulverförmiges Ausgangsmaterial wird durch einen flüssigen Binder vernetzt (3-Dimensional Printing, 3DP).

4 VORTEILE, POTENTIALE UND OFFENE FRAGEN

4.1 Fertigung konventioneller Bauteile

In der additiven Fertigung können Bauteile allein auf Grundlage eines 3D-CAD-Modells gefertigt werden, ohne dass beispielsweise erst spezielle Gussformen oder Schneidwerkzeuge beschafft werden müssen. Allerdings wird bezüglich der Softwareverknüpfung von CAD/CAM Systemen mit Systemen zur additiven Fertigung noch Entwicklungsbedarf gesehen wird.

Für Einzelstücke ist die additive Fertigung bereits heute in einigen Fällen eine zu prüfende Alternative zu spanende, umformende und urformende Fertigungsverfahren. Zudem ist auch Jahre nach Produktionsende eine erneute Fertigung beispielsweise von Ersatzteilen auf Grundlage vorhandener CAD-Daten ohne großen Aufwand möglich.

Aktuelle Entwicklungen zielen u.a. auf eine Steigerung der Aufbauraten ab, welche beispielsweise durch den Einsatz mehrerer Laser erreicht werden kann. Hierdurch sollen die Prozesskosten mittelfristig deutlich (zumindest um eine 10er Potenz) reduziert werden um eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu den „konventionellen“ Fertigungsverfahren auch bei Serien zu erreichen.

4.2 Fertigung von Produktionsmitteln

Die Fertigung von Produktionsmitteln ist ein relevantes Einsatzgebiet insbesondere von Kunststoff 3D-Druck. Beispielsweise können hier durch additive Fertigung einzelne Montagevorrichtungen für bessere Ergonomie, Robotergreifer, oder verlorene Kerne für Faseranwendungen hergestellt werden, deren Fertigung mit konventionellen Verfahren zu aufwändig wäre. Mit relativ geringem Aufwand können so Produktionsmittel hergestellt werden, die bspw. den notwendigen Personaleinsatz oder Durchlaufzeiten reduzieren lassen.

4.3 Fertigung neuer Geometrien

Ein besonders Potential der additiven Fertigung besteht in der Fertigung von Bauteilen mit gänzlich neuen Geometrien, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit höherem Aufwand hergestellt werden können. Dies kann ggf. eine Reduktion der Anzahl von Komponenten bzw. Einzelteilen sowie eine Gewichtsreduktion mit entsprechender Reduktion des Materialeinsatzes ermöglichen. Gleichzeitig ist es z.T. möglich zusätzliche Funktionen in Bauteile zu integrieren (bspw., Kühlrippen o.ä.).

Insbesondere in der Kombination von additiver Fertigung und bionischer Gestaltung liegt ein großes Potential. Auf Basis der an das Bauteil gestellten Anforderungen werden geeignete bionische Strukturen ausgewählt und in eine techni-

sche Konstruktion überführt. Die so gestalteten Bauteile sind mit herkömmlichen Fertigungsverfahren häufig nicht oder nur sehr schwer realisierbar. Dabei sind sie z.T. deutlich leichter als herkömmliche Bauteile und gleichzeitig besonders belastbar.

Eine zentrale Herausforderung besteht in diesem Zusammenhang darin, dass für den Entwurf der bionischen Strukturen ein gänzlich anderes Vorgehen und Wissen notwendig ist, als es bis heute üblicherweise in der Konstrukteurs-Ausbildung vermittelt wird. Um die skizzierten Vorteile der neuen Fertigungsmöglichkeiten „heben“ zu können ist somit auch eine entsprechende Qualifizierung notwendig. .

Eine zusätzliche Anforderung bei den bionischen Konstruktionen ergibt sich daraus, dass für die Nachbearbeitung der Teile jeweils auch entsprechende Spannfläche vorzusehen sind.

4.4 Qualität der Bauteile

Ein grundsätzliches Herausforderung bei der Fertigung metallischer Bauteile durch additive Fertigung sind die in das Material eingebrachten Eigenspannungen. Die Eigenspannungen fallen umso höher aus, je größer die Fläche pro Schicht ist. Die Beherrschung und Reduktion der Eigenspannungen spielt eine wichtige Rolle in der Weiterentwicklung der Verfahren. Sowohl durch die Steuerung der in den Prozess eingebrachten Wärme als auch durch entsprechende Supportstrukturen, welche die Wärme ableiten, kann eine Reduktion der Eigenspannungen erreicht werden. Darüber hinaus kann eine entsprechende Nachbehandlung (bspw. spannungsarm Glühen) erfolgen.

Auch die Oberflächengüte erfordert bislang regelmäßig entsprechende Nachbearbeitungen, sobald hier entsprechende funktionale Anforderungen gestellt werden.

Auf der anderen Seite zeigen Werkstückanalysen am Laserzentrum Nord, dass mit der additiven Fertigung ein sehr feines Gefüge erreichbar ist. So können beispielsweise bei Titan Qualitäten von geschmiedetem Titan, bei anderen Werkstoffen von gewalztem Material erreicht werden.

4.5 Pulverherstellung und -transport

Wie Eingangs beschrieben erfolgt die Herstellung der sphärischen Metallpulver die als Ausgangsstoff für die additiven Fertigung benötigt werden, mit Hilfe einer Gas-Atomisierung. Das Rohmaterial für diesen Herstellungsprozess sind bislang ausschließlich hochreine, primäre Metallqualitäten.

Bisher gibt es nur wenige Hersteller, die Metallpulver für die additive Fertigung herstellen. Diese befinden sich in erster Linie in den USA, Japan und Kanada. In Deutschland gibt es lediglich Akteure, die eine weitere Veredelung von Pulvern vornehmen.

Das sehr feine und damit reaktive Pulver ist als Gefahrgut zu transportieren und entsprechend zu kennzeichnen. Der Transport findet unter Schutzgas (i.d.R. Argon) in speziellen Behältern statt. Bislang werden jeweils vergleichsweise kleine Chargen von wenigen Kilogramm transportiert.

4.6 Reduzierter Materialeinsatz

Wie vorstehend bereits skizziert, kann durch die additive Fertigung der Materialeinsatz gegenüber „klassischen“ spanabhebenden Fertigungsverfahren reduziert werden. Zum einen zeichnen sich die mit diesen Fertigungsverfahren realisierbaren neuen (bionischen) Geometrien durch ein geringeres Gewicht bei gleicher Festigkeit aus. Zum anderen wird im Prozess faktisch nur der Teil des Metallpulvers verfestigt, der später Bestandteil des Bauteils wird. Eine Ausnahme hiervon stellen allerdings die benötigten Supportstrukturen dar. Deren Masse kann bei komplizierten verzugsanfälligen Geometrien in vergleichbarer Größenordnung liegen wie das Bauteil selbst.

Überschüssiges Pulver wird gefiltert und kann weiterverwendet werden, Lediglich ca. 2-3% werden dabei dem Kreislauf entzogen.

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

Bisherige Anwendungsgebiete, in denen die additive Fertigung den Weg in die Praxis gefunden hat, umfassen den Werkzeug- und Maschinenbau, die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrttechnik und die Medizintechnik. Im Folgenden sollen zwei ausgewählte Anwendungsbeispiele kurz beschrieben werden, die Prof. Emmelmann bei der Veranstaltung „3D-Druck zum Frühstück“ am 05.04.2016 vorgestellt hat.

5.1 Ventilblöcke in der Luftfahrt

Durch das optimierte Design und die additive Fertigung von Ventilblöcken für den Einsatz in Flugzeugen konnte eine deutliche Gewichtsreduktion von 80% und eine Reduktion der Druckverluste von 50% erreicht werden. Gleichzeitig war es möglich zusätzliche Funktionen wie Sensoren und Kühlrippen in das Bauteil zu integrieren. Abbildung 1 veranschaulicht den Unterschied zwischen konventionellem Design und optimiertem Design.

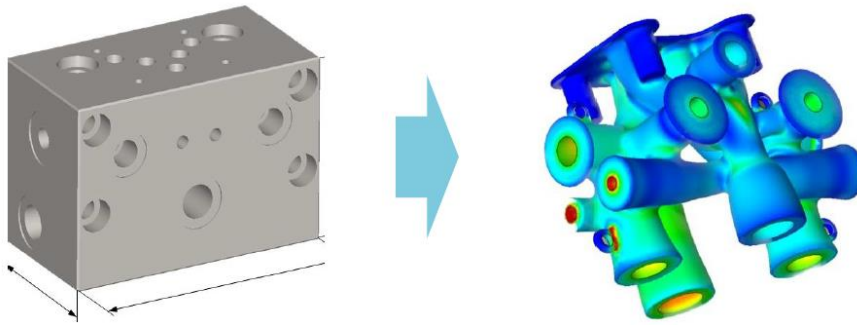


Abbildung 1: Gewichts- und Strömungsoptimierung von Ventilblöcken¹

5.2 Integraler ALM Fuel-Connector

Durch die Optimierung des Design eines Fuel-Connectors (ebenfalls für den Einsatz in Flugzeugen) konnte eine deutliche Komplexitätsreduzierung erreicht werden. So war es möglich, die Anzahl der benötigten Einzelteile von 14 auf 1 zu reduzieren und die Fertigungsschritte von 18 auf 5 zu reduzieren. Die Fertigungskosten konnten halbiert werden. Abbildung 2 veranschaulicht die Unterschiede zwischen konventionellem und optimiertem Design.

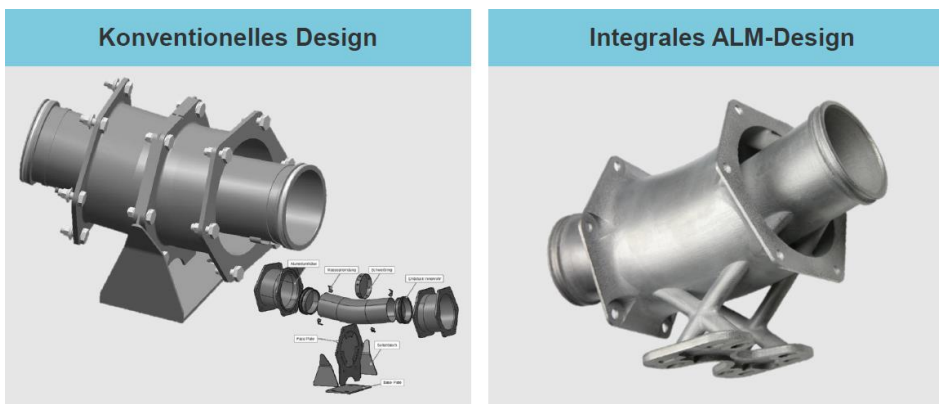


Abbildung 2: Optimiertes Design eines Fuel-Connectors²

6 UMWELTASPEKTE

Aus dem Blickwinkel der Ressourceneffizienzbemühungen der Unternehmen der Hamburger Umweltpartnerschaft ist neben den grundlegenden fertigungstechnischen und ökonomischen Fragenstellungen naturgemäß insbesondere auch der Aspekt einer umweltseitigen Bewertung der neuen Fertigungstechnik

¹ Quelle: Vortrag „3D-Druck zum Frühstück“, Prof. Emmelmann am 05.04.2016

² Quelle: Vortrag „3D-Druck zum Frühstück“, Prof. Emmelmann am 05.04.2016

von Bedeutung. Die additive Fertigung weist hier eine Reihe von prinzipiellen Umweltentlastungspotenzialen auf:

- Durch die mögliche Gewichtsreduktion von Bauteilen durch eine angepasste (bionische) kann Material eingespart werden. Dies verstärkt sich zusätzlich durch die bessere Materialausnutzung in der Fertigung im Vergleich zur spanenden Fertigung.
- Durch ein reduziertes Bauteilgewicht können die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase reduziert werden, soweit diese mit dem Gewicht zusammenhängen. Dies ist insbesondere im Bereich der Luftfahrt relevant aber auch in anderen Bereichen bewegter Massen (z.B. im Maschinenbau oder im KFZ-Bereich).
- Die Möglichkeit zur Fertigung einzelner (Ersatz)Teile ohne weiteren Form- oder Vorrichtungsbau eröffnet die Perspektive durch gezielte Ersatzteilherstellung die Lebensdauer von komplexen Maschinen und Anlagen substantiell zu verlängern.
- Durch die Fertigung von Produktionsmitteln mit optimiertem Design (in erster Linie relevant für Kunststoffteile) können z.T: effizientere Prozesse und reduzierte Durchlaufzeiten erreicht werden. Dies kann ein Beitrag zur Verringerung der Umweltwirkungen von Produktionsprozessen leisten

Diesen möglichen Umweltentlastungen, die sich insbesondere aus der Möglichkeit zur Produktion „anderer“ Bauteil-Geometrien und neuer Geschäftsprozesse ergeben, stehen (derzeit noch) eine Reihe von Umweltlasten gegenüber, die beim Vergleich mit „konventionellen“ Fertigungsverfahren zu berücksichtigen sind.

- Der spezifische Energieaufwand (benötigte Gesamtenergieeinsatz pro Bauteil) liegt relevant höher als bei konventionellen Fertigungsverfahren.
- Insbesondere die aufwändige Herstellung der sphärischen Metallpulver (vollständiges Aufschmelzen und Gas-Atomisierung) sowie der ebenfalls sehr aufwändige (Fern-)Transport in speziellen Schutzgasbehältern tragen relevant zu diese Lasten bei.
- Die bei der additiven Fertigung vielfach benötigten Supportstrukturen reduzieren die mögliche Materialeinsparung der Bauteile
- Bei der Handhabung der metallischen Pulver (Feinststaub) sind umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen (Schutzgasatmosphäre, Absaugung etc.) zu implementieren
- Bei der additiven Fertigung einiger Kunststoffe, bspw. ABS, können je nach Prozessgestaltung beim Erwärmen gefährliche Emissionen freigesetzt werden, was in solchen Fällen entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich macht.
- Der Einsatz von Recyclingmaterialien für die Herstellung des Ausgangsmaterials (Metall-Pulver) ist derzeit weder möglich noch in der konkreten Planung.

Derzeit stellt sich die Situation somit so dar, dass bei der Fertigung „traditioneller“ Bauteile, die additive Fertigung weder ökonomisch noch ökologisch mit konventionellen Fertigungsverfahren konkurrieren kann. Erst dort wo die neuartigen

Fertigungsmöglichkeiten z.B. in Bezug auf ein bionisches Bauteildesign ausgeschöpft werden und wo die erreichten Materialeinsparungen dann auch in der Nutzungsphase zu substantiellen Umweltentlastungen führen kann sich die ökologische Waage verschieben.

Allerdings ist unbedingt zu beachten, dass sich sowohl die Prozesstechnologien als auch die Zulieferstrukturen der additiven Fertigung in einem raschen Entwicklungsprozesse befinden.

Um klare Aussagen darüber machen zu können, an welchen Stellen diese Entwicklungspfad sich für welche Produktbereiche eine ökologische Vorteilhaftigkeit ergeben kann, müsste die Technologieentwicklung in transparenter Form auch ökobilanzierend begleitet werden. Derartige Bestrebungen sind bislang allerdings leider nicht erkennbar.

7 WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Akteure auf dem Gebiet der additiven Fertigung auf Hamburg und Region sowie weiterführende Lektüre und Links gegeben.

7.1 Akteure

Institution	LZN Laser Zentrum Nord GmbH
Adresse	Am Schleusengraben 14 21029 Hamburg-Bergedorf T: +49 40 484010-500 F: +49 40 484010-999 Web: http://www.lzn-hamburg.de/
Tätigkeitsfeld	Additive Fertigung: Forschung, Entwicklung, Beratung, Fabrikplanung, Schulung sowie Auftragsfertigung von Bauteilen für hochanspruchsvolle Funktionen
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Veranstaltung „3D-Druck zum Frühstück“ am 05.04.2016 im Rahmen der Umweltpartnerschaft • Kunden/ Referenzen: u.a. Airbus, VW, Lührsens, Blom und Voss, Windkraftanlagenhersteller • Kompetenzen und Ansprechpartner: http://www.lzn-hamburg.de/kompetenzen.html

Institution	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Institut für Produktionstechnik
Adresse	Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Gravel Fakultät Technik und Informatik Department Maschinenbau und Produktion Professor für Produktionstechnik Berliner Tor 21 20099 Hamburg

	T +49.40.428 75-8625 F +49.40.428 75 86 69 Web: https://www.haw-hamburg.de/ti-mp/ipt.html Email: quenther.gravel@haw-hamburg.de
Tätigkeitsfeld	Forschung und Lehre, u.a. zu „Digitaler Produktion“, was auch Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing umfasst
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Veranstaltung der Fachtagung Rapid Prototyping (2016 zum 15. Mal mit rund 200 Teilnehmern)

Institution	SLM Solutions Group AG
Adresse	Roggenhorster Strasse 9c 23556 Lübeck Deutschland T: +49-451-16082-0 F: +49-451-16082-250 Web: http://www.stage.slm-solutions.com/
Tätigkeitsfeld	Hersteller von Anlagen zur additiven Fertigung von Serienteilen und Prototypen; Beratung für Anwender

Institution	H & H Gesellschaft für Engineering und Prototypenbau mbH
Adresse	Gewerbestraße 11 D-33818 Leopoldshöhe T +49 5202 9876-0 F +49 5202 9876-510
Tätigkeitsfeld	Entwicklungsdienstleistungen für additive Fertigung, Prototypenbau, Fertigung von Kleinserien
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> Mitveranstalter der Rapid Prototyping Fachtagung an der HAW

Institution	Rapid Prototyping Zentrum e.V.
Adresse	Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Dirk Hennings Hochschule Bremen Fakultät 5 - Maschinenbau Neustadtswall 30 D - 28199 Bremen T: 0421 / 5905 - 3534 F: 0421 / 5905 - 3505 Mail: dirk.hennings@hs-bremen.de Web: http://homepages.hs-bremen.de/~rpz-nord/index.htm
Tätigkeitsfeld	Netzwerk im Norden Deutschlands für Entwickler, Dienstleister und Anwender rund um die Themengebiete der schnellen Prototypen-, Bauteil und Werkzeugherstellung mit Hilfe additiven Fertigungsverfahren (Rapid-Prototyping, Rapid-Tooling und Rapid-Manufacturing)

Institution	Fietkau Engineering & Consulting
Adresse	Kontakt: Stefan Fietkau Dorfstraße 31 23847 Westerau T: +49 4539 181564 F: +49 4539 181565 Mail: fietkau@fecon-engineering.de

	Web: http://www.fecon-engineering.de/
Tätigkeitsfeld	Ingenieurbüro für diverse Dienstleistungen, u.a. CAD Konstruktion, Rapid Prototyping , Musterentwicklung.

Institution	Elephant3D
Adresse	Kontakt: Elephant3D Marquardstraße 13 23554 Lübeck Mail: philip.kiefer@elephant3d.de Web: http://elephant3d.de/
Tätigkeitsfeld	Auftragsfertigung von Kunststoff (PLA) Teilen durch additive Fertigung.

Institution	Copynet Innovation GmbH
Adresse	Kontakt: Copynet INNOVATION GmbH Heidenkampsweg 45 20097 Hamburg T: +49 40 2385450 F: +49 40 23854515 Mail: info@kompetenzcenter-innovation.de Web: http://www.kompetenzcenter-innovation.de/
Tätigkeitsfeld	Vertrieb von 3D-Drucksystemen, Consulting und Service

7.2 Weiterführende Literatur und Links

- VDI Wissensforum / Seminar: *Additive Fertigungsverfahren – Was 3D-Druck möglich macht*
<https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-maschinenbau/additive-fertigungsverfahren/>
- VDI-Richtlinie 3404: *Additive Fertigung – Grundlagen. Begriffe. Verfahrensbeschreibungen*
https://www.vdi.de/richtlinie/entwurf_vdi_3404-additive_fertigung_grundlagen_begriffe_verfahrensbeschreibungen/
- Übersicht über Metall-Pulverwerkstoffe
<http://www.stage.slm-solutions.com/download.php?f=523617f5c97e5f4d54b9bf1a3b001e8>
<http://www.eos.info/werkstoffe-m>
<http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/additive-manufacturing/>
- Wissenschaftliche Artikel zu Umweltaspekten der Additiven Fertigung:
 - Faludi, J., C. Bayley, S. Bhogal, and M. Iribarne. 2015. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21(1): 14–33. doi: 10.1108/RPJ-07-2013-0067.
 - Gebler, M., Schoot Uiterkamp, Anton J.M., and C. Visser. 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies.

Energy Policy, Vol. 74: 158–67. doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.

- Le Bourhis, F., O. Kerbrat, J.-Y. Hascoet, and P. Mognol. 2013. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 69(9-12): 1927–39. doi: 10.1007/s00170-013-5151-2.