



D.1.3.1 Bericht zum Nachhaltigkeitspotenzial von AM- Technologien

Kontakt

Projektkoordinator:

Adresse:

Details zum Projekt

Projekt-ID	SIAT00036
Projekt-Akronym	ADDCIRCLES
Name des Projekts	Förderung der nachhaltigen regionalen Entwicklung durch additive Fertigung: Eine grenzüberschreitende Initiative für eine widerstandsfähige und zirkuläre Wirtschaft
Datum des Beginns	1. November 2023
Dauer in Monaten	36
Aufruf (Teil) Kennung	Open Call for proposals for standard projects
Priorität des Programms	P1-A - Eine widerstandsfähigere und nachhaltigere Region
Spezifisches Ziel	1.2 - Förderung des Übergangs zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

Details zum Dokument

Arbeitspaket	Gemeinsame Entwicklung innovativer Lösungen und Methoden für Green AM
Aktivität	Analyse des Nachhaltigkeitspotenzials von AM-Technologien
Ergebnis Nummer	D.1.3.1
Version	1
Dateiname	
Ergebnis-Art	Bericht
Verbreitungsgrad	Öffentlich
Leiter des Arbeitspakets	Janez Slapnik (FTPO)
Aktivitätsleitung	Branka Mušič (ZAG)
AutorIn(nen)	Branka Mušič (ZAG), Davor Kvočka (ZAG)
Fälligkeitsdatum	31 October 2024
Datum der Einreichung	

Versionsverwaltung

Revisionshistorie und Qualitätskontrolle			
Version	Name	Datum	Kommentar
V0.1			
V0.2			
V1			

Inhaltsübersicht

Tabelle der Abkürzungen	2
Abbildungsverzeichnis	4
1. Einleitung.....	5
1.1 Verständnis, Klassifizierung und korrekte Verwendung der Terminologie der additiven Fertigung in Übereinstimmung mit den internationalen Normen	6
1.2 Verschiedene Techniken der additiven Fertigung	9
1.3 Verwendung von Materialien in der additiven Fertigung	12
2. Die Grundlagen der Lebenszyklusanalyse (LCA) und ihre Bedeutung für die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle	19
3. Stärkung regionaler Unternehmen: die Rolle von AddCircles bei der Förderung der additiven Fertigung und der Kreislaufwirtschaft	23
3.1 Überblick über wissenschaftliche Erkenntnisse zur additiven Fertigung und zur Lebenszyklusanalyse	30
4 Bewährte Verfahren in der additiven Fertigung und Empfehlungen für KMU.....	39
4.1 Beispiele für bewährte Verfahren in der additiven Fertigung.....	39
1.2 Empfehlungen für KMU.....	44
5. Schlussfolgerung.....	49
6. Zusätzliche Informationen	50
6.1. Anhang 1.....	50
6.2 Anhang 2.....	52
7. Literatur	54

Tabelle der Abkürzungen

In diesem Abschnitt sind in alphabetischer Reihenfolge die Abkürzungen (Akronyme) aufgeführt, die für das Verständnis des Textes erforderlich sind. Diese Abkürzungen sind nicht nur im Zusammenhang mit diesem Bericht relevant, sondern werden auch allgemein in der wissenschaftlichen und fachlichen Literatur und auf Websites verwendet.

Angeichts der unterschiedlichen Verwendung von Abkürzungen in verschiedenen Quellen kann es vorkommen, dass die nachstehende Liste mehrere Abkürzungen für den gleichen Begriff enthält.

AM - Additive Fertigung

ASTM - Amerikanische Gesellschaft für Tests und Materialien

BJ - Bindemittelstrahlverfahren

CFF - Kontinuierliche Faserproduktion

CLIP - Kontinuierliche Herstellung von flüssigen Schnittstellen

CM - Konventionelle Produktion

CNC - Computer Numerische Steuerung

DED - Gerichtete Energieabscheidung

DLP - Digitale Lichtverarbeitung

DMLS - Direktes Metall-Laser-Sintern

EBM - Elektronenstrahlschmelzen

FDM - Modellierung durch Schmelzabscheidung

FFF - Herstellung von Schmelzfilamenten

GWP - Globales Erwärmungspotenzial

ISO - Internationale Organisation für Normung

LCA - Lebenszyklusanalyse

LCCA - Bewertung der Lebenszykluskosten

LOM - Laminiertes Material

ME - Materialextusion

MEX - Extrudieren von Material

MJ - Material-Spritzgießen

MJT - Material-Spritzguss

MJM - MultiJet-Modellierung

PBF - Pulverbettsschmelzen

**Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung
AddCircles, Interreg SLO - AT**

SETAC - Verein für Umwelttoxikologie und -chemie (Institut für Umwelttoxikologie und -chemie)

SHL - Folienkaschierung

SIST EN ISO - Slowenisches Institut für Normung (angeglichen an ISO-Normen)

DE - Blechkaschierung

SLA - Stereolithographie

SLCA - Soziale Lebenszyklusanalyse

SLM - Selektives Laserschmelzen

SLS - Selektives Laser-Sintern

TRL - Technologische Bereitschaftsstufe

USEPA - US-Umweltschutzbehörde (US-Umweltministerium)

VP - Badbasierte Photopolymerisation

VVP - Badbasierte Photopolymerisation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die sieben Prozesskategorien der additiven Fertigungsverfahren, wie sie in den ISO- und ASTM-Normen definiert sind

Abbildung 2: Beispiele für Verbundwerkstoffe auf der Grundlage biologisch abbaubarer und nicht abbaubarer Polymere, die für die additive Fertigung verwendet werden

Abbildung 3: Auswahl des Polymers je nach Wahl der additiven Fertigung

Abbildung 4: Additive Produktion und mögliche Rohstoffzustände/-formen

Abbildung 5: Die wichtigsten Phasen von LCA

Abbildung 6: Tabellarische Aufzeichnung von SLS-, ME-, DMLS- und FDM-Bauteilen

Abbildung 6a: Schematische Darstellung von SLS, SLM und DMLS

Abbildung 7: Tabellarische Erfassung der ME- und FDM-Komponenten

Abbildung 7a: Schematische Darstellung der Extrusion/des Ausstoßes von Material für die schraubenadditive Fertigung

Abbildung 7b: Schematische Darstellung der Extrusion/Extrusion von Material für die kolbenbasierte additive Fertigung

Abbildung 7c: Flussdiagramm für die Extrusion/Extrusion von Material für die filamentbasierte additive Fertigung

Abbildung 8: Geschätzter Lebenszyklus der Wertschöpfungskette für die additive Fertigung

1. Einleitung

Begriffe wie Digitalisierung, Industrie 4.0, Lebenszyklusanalyse (LCA), Lebenszykluskostenanalyse (LCCA), Recycling, Umweltauswirkungen, grüne Technologien, Nachhaltigkeit usw. sind heutzutage oft miteinander verwoben.

Nachhaltigkeit ist ein Grundprinzip, das die moderne industrielle Praxis lenkt. Es umfasst die Befriedigung der Bedürfnisse der Gegenwart, ohne dabei die künftigen Generationen zu gefährden. Das Erreichen von Nachhaltigkeit erfordert daher die Minimierung schädlicher Auswirkungen auf die Umwelt.

Industrie 4.0 hingegen zeichnet sich durch die Integration digitaler Technologien, Automatisierung und Datenaustausch in Produktionsprozesse aus und trägt durch die Optimierung des Ressourcenverbrauchs, die Verringerung von Abfall und die Steigerung der Effizienz durch intelligente Technologien und datengesteuerte Entscheidungsfindung zur Nachhaltigkeit bei. Die additive Fertigung (AM) ist eine Schlüsselkomponente der Industrie 4.0 und ermöglicht die Herstellung komplexer, kundenspezifischer Komponenten mit weniger Materialabfall im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsmethoden, fördert die Flexibilität, die Produktion auf Abruf und dezentralisierte (lokale) Produktionsprozesse, die transportbedingte Emissionen reduzieren, und fördert nachhaltige Lieferkettenpraktiken, die zu einer besseren Lebenszyklusanalyse (LCA) und Nachhaltigkeit führen. Nachhaltigkeitsbemühungen profitieren von der Lebenszyklusanalyse (LCA), da sie ein umfassendes Verständnis des ökologischen Fußabdrucks eines Produkts vermittelt und dazu beiträgt, Verbesserungsbereiche zu ermitteln, die den gesellschaftlichen Fortschritt unterstützen.

Im Wesentlichen spiegeln die Verschmelzung oder strenge Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, die Einführung von Industrie 4.0, einschließlich AM, und LCA einen ganzheitlichen Ansatz für moderne industrielle Praktiken wider. Ziel dieser Integration ist nicht nur die Steigerung von Rentabilität, Effizienz und Innovation, sondern auch die Sicherstellung, dass industrielle Prozesse mit akzeptablen und langfristigen Umweltzielen in Einklang gebracht werden.

1.1 Verständnis, Klassifizierung und korrekte Verwendung der Terminologie der additiven Fertigung in Übereinstimmung mit den internationalen Normen

Es gibt viele Variationen von AM (oft auch als 3D-Druck oder 3D-Print bezeichnet), und mit der Weiterentwicklung des Bereichs entstehen neue und/oder angepasste Technologien, was zu einer gewissen Verwirrung beim Verständnis von AM-Techniken führen kann. Darüber hinaus wurden während der Entwicklung von AM viele verschiedene Begriffe und Definitionen verwendet, oft in Bezug auf bestimmte Anwendungen und Marken. ¹AM-Verfahren sind genormt, und die Klassifizierung von AM durch die International Organisation for Standardisation/American Society for Testing and Materials (ISO/ASTM) ist nachstehend aufgeführt.

ISO/ASTM 52900:2022, *Additive Manufacturing - General Principles - Fundamentals and Vocabulary* (*Additive Fertigung - Allgemeine Grundsätze - Grundlagen und Vokabular*), besagt, dass AM ein Oberbegriff für Technologien ist, bei denen Materialien sequentiell kombiniert werden, um physische Objekte zu erzeugen, die durch 3D-Modelldaten definiert sind. Diese Technologien werden derzeit für eine Vielzahl von Anwendungen in der Maschinenbauindustrie und in anderen gesellschaftlichen Bereichen wie Medizin, Bildung, Architektur, Kartografie, Spielzeugherstellung und anderen Freizeitverhalten eingesetzt.

²Nach der Norm 52900:2022 der International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM) wird AM in sieben Kategorien unterteilt (Abbildung 1):

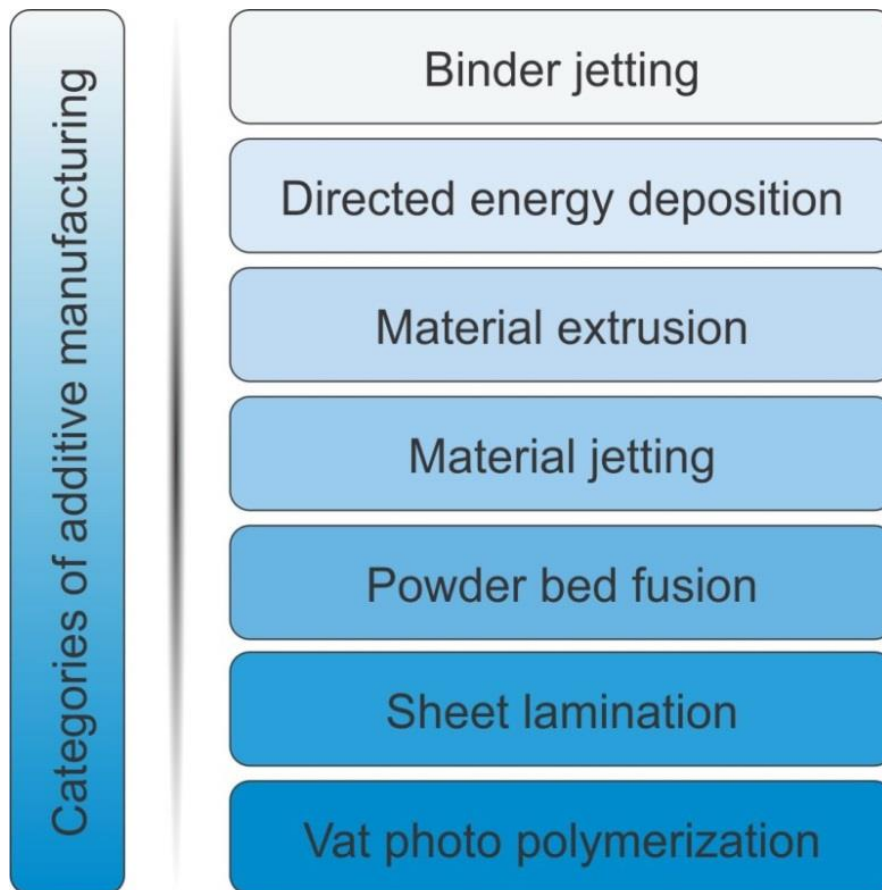


Abbildung 1: Die sieben Prozesskategorien der additiven Fertigung, wie sie in den ISO- und ASTM-Normen definiert sind.

(1) Binder Jetting ist definiert als ein AM-Verfahren, bei dem ein flüssiges Bindemittel selektiv aufgetragen wird, um pulverförmige Materialien zu verbinden.

(2) Gezielte Energieabscheidung (DED) ist definiert als ein AM-Verfahren, bei dem gerichtete thermische Energie verwendet wird, um Materialien durch Schmelzen während der Abscheidung zu verschmelzen.

(3) Materialextrusion (ME/MEX) ist definiert als ein AM-Verfahren, bei dem das Material selektiv durch eine Düse oder eine Öffnung abgegeben wird.

(4) Material-Jetting (MJ/MJM/MJT) ist das selektive Aufsprühen oder Auftragen von Tropfen eines Materials, in der Regel eines flüssigen Fotopolymers, auf eine Bauplattform, die dann ausgehärtet wird. Beispiele für Verfahren dieser Kategorie sind PolyJet- und MultiJet-Modellierung.

**Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung
AddCircles, Interreg SLO - AT**

(5) Die Pulverbettsschmelze (Powder Bed Fusion, PBF) ist definiert als ein Prozess, bei dem thermische Energie selektiv Teile eines Pulverbettes verschmilzt.

(6) Die Blechlaminierung (SL/SHL) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem Bleche miteinander verbunden werden, um ein Objekt zu bilden.

³(7) Die Bottich-Photopolymerisation (VP/VPP) ist derzeit eine weit verbreitete Methode für den schnellen 3D-Druck.

Ziel dieses Dokuments ist es, ein grundlegendes Verständnis für die Prinzipien der additiven Fertigungsverfahren zu vermitteln und auf dieser Grundlage klare Definitionen von Begriffen und Nomenklatur im Zusammenhang mit der additiven Fertigungstechnologie bereitzustellen. Ziel dieser Standardisierung der Terminologie für die additive Fertigung ist es, die Kommunikation zwischen allen an diesem Technologiebereich beteiligten Akteuren zu erleichtern. Das Dokument zielt ferner darauf ab, die Grundlagen der Lebenszyklusanalyse (LCA) als wirksames Instrument zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten darzustellen, eine Zusammenfassung der Literaturübersicht über die Umweltauswirkungen der additiven Fertigung vorzulegen, eine Liste der Produktgruppen mit dem größten Optimierungspotenzial zu erstellen, Beispiele für bewährte Verfahren zu geben und Empfehlungen aus der Literatur für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der Einführung der additiven Fertigung zusammenzustellen.

1.2 Verschiedene Techniken der additiven Fertigung

AM ermöglicht die Erstellung komplexer Modelle direkt aus digitalen Modellen. Diese Umwandlung von der digitalen in die physische Form vereinfacht nicht nur den Fertigungsprozess, sondern erleichtert auch die Umsetzung intelligenter Fertigungsverfahren, einschließlich Echtzeitüberwachung, vorausschauender Wartung und Qualitätskontrolle. Aus diesem Grund wurden in der Praxis so viele verschiedene Methoden entwickelt, die sich weiter auf die Effizienz der AM-Produktion auswirken.

Zur Einführung stellen wir hier einige der wichtigsten AM-Techniken vor, auf die wir bei unserer Bestandsaufnahme gestoßen sind. Jede von ihnen hat ihre eigenen Vorteile. Die Entscheidung, welche Technik zum Einsatz kommt, hängt von Faktoren wie Materialanforderungen, Genauigkeit, Druckgeschwindigkeit und der spezifischen Anwendung des gedruckten Objekts ab.

Es ist wichtig zu betonen, dass im Zuge des raschen Fortschritts ständig neue oder angepasste Methoden entwickelt werden. Es ist wichtig, mit diesen Innovationen Schritt zu halten, um mit den neuen Entwicklungen in diesem Bereich auf dem Laufenden zu bleiben.

Das Pulverbettsschmelzen (Powder Bed Fusion, PBF) ist eine breite Kategorie von additiven Fertigungsverfahren, bei denen eine Schicht aus Pulvermaterial selektiv geschmolzen wird, um ein 3D-Objekt zu erzeugen.

Beim PBF-Verfahren, das oft auch als Pulverbettfusion bezeichnet wird, wird eine Schicht aus pulverförmigem Material, häufig Metall- oder Polymerpulver, verwendet.

Zu dieser Kategorie gehören verschiedene Verfahren wie das Selektive Lasersintern (SLS), das Selektive Laserschmelzen (SLM) und das Elektronenstrahlschmelzen (EBM), bei denen ein Laser- oder Elektronenstrahl das Pulvermaterial selektiv Schicht für Schicht zu dem fertigen Objekt verschmilzt.

a) Beim selektiven Lasersintern (SLS) wird ein Hochleistungslaser zum Sintern (Erhitzen und Verschmelzen) von pulverförmigen Materialien, in der Regel Nylon oder andere Polymere, verwendet. Mit diesem Verfahren können starke und haltbare Teile hergestellt werden, weshalb es in der Industrie weit verbreitet ist.

b) Selektives Laserschmelzen (SLM) ist eine 3D-Drucktechnologie für Metalle, die mehrere Vorteile aufweist und daher in verschiedenen Branchen für die Herstellung von Metallteilen beliebt ist.

Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung
AddCircles, Interreg SLO - AT

c) Electron Beam Melting (EBM) wird für den 3D-Druck von Metallteilen verwendet. Dabei wird ein Elektronenstrahl verwendet, um Metallpulver Schicht für Schicht in einem Vakuum zu schmelzen, wodurch starke und dichte Metallteile entstehen.

2) Materialextrusion (ME/MEX) AM ist bekannt für seine Einfachheit, Kosteneffizienz und Vielseitigkeit bei der Arbeit mit verschiedenen Materialien. Es ist eine gängige Technik in der AM und beinhaltet die Herstellung von 3D-Objekten durch Extrudieren von Material durch eine Düse oder düsenähnliche Ausrüstung. Es wird üblicherweise in Desktop-3D-Druckern und industriellen additiven Fertigungssystemen eingesetzt. Einige beliebte Methoden und Technologien innerhalb der additiven Fertigung, die die Materialextrusion nutzen, sind:

a) Fused Deposition Modelling (FDM) ist eine der bekanntesten und am häufigsten verwendeten Materialextrusionstechniken. Bei diesem Verfahren wird ein thermoplastisches Filament erhitzt und durch eine Düse extrudiert, wobei Schicht für Schicht ein fertiges Objekt entsteht. Die FDM-Technologie wird von beliebten 3D-Druckern wie dem MakerBot und dem Ultimaker verwendet. Fused Filament Fabrication (FFF) ist ein Begriff, der austauschbar mit FDM verwendet wird und sich im Wesentlichen auf denselben Materialextrusionsprozess bezieht. FFF/FDM hat mehrere Vorteile, z. B. sind die Drucker im Vergleich zu anderen additiven Fertigungstechnologien in der Regel erschwinglicher, sie können eine Vielzahl von thermoplastischen Materialien wie PLA, ABS, PETG und andere verwenden und sie sind einfach zu bedienen, was sie zu einer weithin akzeptierten 3D-Drucktechnologie sowohl für den professionellen als auch den Hobbygebrauch macht.

b) Schmelzextrusionsdruck. Dieses Verfahren ähnelt dem FDM-Verfahren, kann aber eine breitere Palette von Materialien verwenden, die nicht auf Thermoplaste beschränkt sind. Es umfasst die Verwendung von Materialien wie Wachs, Schokolade oder Keramik in geschmolzenem Zustand zur Herstellung von Objekten.

c) Pellet-Extrusion. Bei dieser Variante der Materialextrusion werden anstelle von Filamenten Kunststoffgranulate als Rohmaterial verwendet. Das Granulat wird geschmolzen und durch eine Düse extrudiert, um ein 3D-Objekt zu erzeugen.

d) Continuous Fiber Fabrication (CFF) ist eine fortschrittliche Form der AM, bei der der herkömmliche 3D-Druck mit Endlosfasern, in der Regel Kohlenstoff- oder Glasfasern, kombiniert wird. Diese Technologie bietet mehrere Vorteile für die Herstellung starker und leichter Verbundwerkstoffteile.

3. Badbasierte Photopolymerisation: Das flüssige Photopolymerharz wird mit einer Lichtquelle, in der Regel einem Laser oder UV-Licht, selektiv gehärtet oder polymerisiert. Beispiele für Verfahren in dieser Gruppe sind:

Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung AddCircles, Interreg SLO - AT

a) Bei der Stereolithografie (SLA) wird ein UV-Laser verwendet, um das flüssige Harz Schicht für Schicht auszuhärten. Mit dieser Technik werden hochdetaillierte und präzise Abdrücke hergestellt, die häufig bei Anwendungen verwendet werden, die Präzision erfordern, wie z. B. bei Zahnmodellen und Schmuck.

b) Die digitale Lichtverarbeitung (DLP) ähnelt dem SLA-Verfahren, verwendet jedoch einen digitalen Lichtprojektor, um die gesamte Harzschicht gleichzeitig auszuhärten. Das Verfahren ist für seine Schnelligkeit bekannt und wird in einer Vielzahl von Branchen eingesetzt, darunter in der Zahnmedizin und der Schmuckherstellung.

Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS) ist ein 3D-Druckverfahren für Metall, bei dem ein Hochleistungslaser zum Sintern von Metallpulver verwendet wird. Es wird häufig in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Medizintechnik eingesetzt, um komplexe Metallteile herzustellen.

(5) Beim Binder-Jetting wird ein flüssiges Bindemittel selektiv Schicht für Schicht auf ein Pulvermaterial (Metall, Sand, Keramik usw.) aufgetragen. Diese Technik wird häufig zur Herstellung von Metallteilen und Sandformen für den Guss verwendet.

6) Material Jetting (MJ) 3D-Drucker funktionieren ähnlich wie Tintenstrahldrucker, tragen aber Tröpfchen aus flüssigem Fotopolymer auf die Bauplattform auf. Diese Tröpfchen werden dann durch UV-Licht ausgehärtet und bilden das endgültige Objekt. Durch Einspritzen des Materials ist es möglich, hochauflösende 3D-Drucke aus verschiedenen Materialien zu erstellen.

Laminated Object Manufacturing (LOM) ermöglicht die Herstellung von Objekten durch Aufeinanderlegen und Verkleben von Materialschichten, häufig Papier oder Kunststoff, die dann mit Hilfe von Lasern oder anderen Verfahren geschnitten oder verschmolzen werden. Die LOM-Technik ist weniger weit verbreitet.

8 Die Continuous Liquid Interface Production (CLIP) ist eine patentierte 3D-Drucktechnologie, bei der Licht und Sauerstoff zur kontinuierlichen Aushärtung von flüssigem Harz eingesetzt werden, was einen schnelleren und effizienteren Druck ermöglicht.

Die AM-Technologie wurde in den frühen 1980er und 1990er Jahren intensiv entwickelt und eingesetzt. Wie wir heute sehen können, gibt es viele AM-Technologien, die später entstanden sind. Seitdem haben Unternehmen und Industrien viele AM-Verfahren übernommen, um ihre Produktionsziele besser zu

erreichen. Es ist daher nur natürlich, dass es in diesem Bereich weitere Entwicklungen und Wachstum gibt.

1.3 Verwendung von Materialien in der additiven Fertigung

Die beim 3D-Druck verwendeten Materialien sind ebenso wichtig wie die Drucker selbst.

⁴Der Markt für AM-Materialien wird nach Typ in Kunststoffe, Keramik und andere unterteilt, zu denen Wachs, Holz, Biomaterialien und verschiedene Metalle gehören. Im Jahr 2022 wurde festgestellt, dass das Metallsegment mit fast 56 % den größten Anteil hat, während das Kunststoffsegment den zweitgrößten Anteil am Markt für 3D-Druckmaterialien hält.

Die Fähigkeit von AM, eine Vielzahl von Materialien zu verwenden, darunter auch recycelte, steht im Einklang mit der zunehmenden Betonung von Kreislaufwirtschaftspraktiken, wie sie vom AddCircles-Projekt unterstützt wird. Durch die Förderung der Wiederverwendung von Materialien und die Verringerung von Abfällen trägt die additive Technologie zu einem nachhaltigeren und umweltfreundlicheren Produktionsökosystem bei. Zahlreiche Artikel über die "Kreislaufwirtschaft des 3D-Drucks" werden von verschiedenen Quellen gestützt⁵⁶⁷⁸, , , , .

Es kann auch ausdrücklich festgestellt werden, dass das Recycling von Metallpulvern in additiven Fertigungsverfahren wie dem Laser-Pulverbett-Fusionsverfahren (LPBF) durch die Verringerung von Abfall und Umweltauswirkungen erhebliche Vorteile für die Nachhaltigkeit mit sich bringt. ⁹¹⁰Es erfordert jedoch ein sorgfältiges Management, um sicherzustellen, dass das recycelte Pulver eine gleichbleibende Qualität und gleichbleibende Eigenschaften aufweist, da Staubverunreinigungen während der Produktion die Qualität des Pulvers beeinträchtigen können und sich folglich auf kritische Parameter wie Schichtdicke und Dichte beim LPBF auswirken, was wiederum die Trennbarkeit der Teile und die mechanischen Eigenschaften beeinflusst¹¹. Labortests zur Qualitätssicherung führen zu Verzögerungen, und die Hersteller verwerfen das brauchbare Pulver oft aus Sicherheitsgründen. Dabei kann die Wiederverwendung und das Recycling von Metallpulvern den CO2-Fußabdruck drastisch reduzieren und eine Kreislaufwirtschaft fördern. Bei einer typischen LPBF-Anwendung können nur 20 % des verfügbaren Pulvers verwendet werden, so dass das Recycling der verbleibenden 80 % den Abfall reduziert. Die in LPBF verwendeten Metallpulver sind oft teuer, so dass sich das Recycling auch finanziell lohnt.

Es gibt auch mehrere andere wissenschaftliche Arbeiten zum AM-Recycling, die sehr gut in *Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in Integrating 3D Printing and Distributed Recycling*

for a Circular Economy zusammengefasst sind: ¹²*Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy (Herausforderungen und Chancen bei der Integration von 3D-Druck und dezentralem Recycling für eine Kreislaufwirtschaft)*, das unter anderem eine umfassende Zusammenfassung veröffentlichter Übersichtsartikel und aktueller Studien enthält, die die Phasen und Herausforderungen des Kunststoffrecyclings untersuchen, sowie eine Aufschlüsselung der Betriebskosten pro Recyclingzentrum usw. In diesem Übersichtsartikel wird eine Reihe von Quellen (etwa 250) zitiert, die diese Forschung unterstützen.

Bekanntlich werden Polymere und ihre Verbundwerkstoffe aufgrund ihrer Flexibilität bei der Entwicklung maßgeschneiderter Produkte heute in vielen Industriezweigen eingesetzt. Der enorme Anstieg der Verwendung von Kunststoffen hat zu einer ernsthaften Herausforderung bei der Bewirtschaftung von Kunststoffabfällen am Ende ihrer Lebensdauer geführt. In der Studie *Additive Manufacturing for sustainability, circularity and zero-waste: 3DP products from waste plastic bottles (Additive Fertigung für Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft und Zero-Waste: ¹³3DP products from waste plastic bottles)* wird ein nachhaltiger Weg zur Umwandlung von Kunststoffabfällen in Rohstoffe für die additive Fertigung vorgestellt, bei dem Kunststoffabfallflaschen (hauptsächlich Polyethylenterephthalat, PET) mithilfe eines proprietären 3D-gedruckten Filamentextrusionssystems recycelt werden, um Filamente für das Fused Filament Fabrication (FFF)-Verfahren herzustellen. Neben recyceltem PET (rPET) wurden auch kohlenstofffaserverstärkte Polyamid-6-Polymer-Verbundwerkstoffe (PA6-CF) für die Herstellung von Hybrid-Filamenten verwendet. Die rPET- und rPET/PA6-CF-Verbundfasern wurden mit einem Faserextruder extrudiert. Es wurde festgestellt, dass rPET eine bessere Bruchdehnung und ein besseres Elastizitätsmodul aufweist, was zeigt, dass recycelte Materialien für Industrie- und Verbraucheranwendungen geeignet sein können. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen vielversprechende Resultate für die Förderung einer nachhaltigen Produktion und eines nachhaltigen Verbrauchs und ergänzen die Praktiken der Kreislaufwirtschaft durch einen einfachen Produktionsweg zur Umwandlung von Kunststoffabfällen in Rohstoffe für AM.

Einige Herausforderungen bei der Herstellung mit AM-Technologien sind noch ungelöst¹⁴. Es gibt eine Reihe von Durchbrüchen bei der Entwicklung neuer Materialien, die speziell für den 3D-Druck bestimmt sind, wie z. B. die Extrusion von Verbundwerkstoffen, bei der einige fortschrittliche Materialeextrusionssysteme verschiedene Arten von Materialien mischen oder Verstärkungen in den Druck einarbeiten können, und das Bioprinting, bei dem extrudierte Materialien auch zur Herstellung von 3D-Strukturen mit lebenden Zellen und Biomaterialien verwendet werden, die in der Medizin und im Tissue Engineering eingesetzt werden.

Laut Bromberger und anderen gehören zu den Herausforderungen die Verbesserung der Geschwindigkeit, die nahtlose Automatisierung und die Integration in bestehende Produktionssysteme,

die Bewältigung von Problemen im Zusammenhang mit der Zertifizierung, der Verfügbarkeit und den Kosten von Materialien sowie der Aufbau von Fähigkeiten und Prozessen für die Nutzung dieser sich schnell entwickelnden Technologien¹⁵. Darüber hinaus müssen die bei der additiven Fertigung verwendeten Materialien Anforderungen wie die Fähigkeit, mehrfach zu schmelzen und zu erstarren, eine einheitliche Partikelgröße und einen reibungslosen Fluss durch die Druckerdüse erfüllen. ¹⁶Zu diesen Materialproblemen bei additiven Fertigungstechnologien gehören daher eine begrenzte Auswahl an Materialien im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren und weniger etablierte Materialstandards, was insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen wie in der Luft- und Raumfahrt und bei medizinischen Geräten eine Herausforderung darstellen kann. Darüber hinaus können Unterschiede in der Qualität der Teile aufgrund von Faktoren wie der chemischen Zusammensetzung des Materials entstehen, so dass mehrere Materialien mit identischen Eigenschaften erforderlich sind. ¹⁷Die Lösung dieser Materialprobleme ist der Schlüssel zur Beschleunigung des Einsatzes von AM in der Fertigung und zur Gewährleistung der Wettbewerbsfähigkeit der Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsmethoden.

Guggenbiller et al¹⁸. haben auch über die Fortschritte in der 3D-Drucktechnologie im Hinblick auf Nachhaltigkeit und umweltfreundliche Fertigung geschrieben, wobei sie sich insbesondere auf die Verwendung natürlicher und erneuerbarer Materialien konzentrieren. Die additive Fertigung von Naturprodukten gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei der Schwerpunkt auf chemischen Verfahren oder Modifikationen von Naturprodukten liegt. Zu den angewandten Strategien gehören die Umwandlung natürlicher oder biobasierter Polymere in AM-Filamente durch Extrusion, die Formulierung von Photopolymerharzen und Tinten für verschiedene Druckverfahren und die Verwendung von Pulvern für das selektive Lasersintern. In der Übersicht werden die für AM geeigneten Materialien, ihre physikalischen Eigenschaften und die sich daraus ergebenden Anwendungen, einschließlich der Vorteile und Grenzen, erörtert. In mehreren Tabellen werden grüne Materialien aufgelistet, die für VP-, SLA-, DLP-, SLS- und FFF-Druckverfahren verwendet werden können, und die verschiedenen Vorteile in Bezug auf Umweltverträglichkeit, Recyclingaspekte oder den Vergleich von nicht-grünen mit grünen Materialien hervorgehoben. Künftige Möglichkeiten liegen in den Bereichen Biomaterialien und medizinische Geräte, Elektronik und Batterien, Umweltsanierung und Wasseraufbereitung. Verwandte Studien über nachhaltige Energiespeicherung und UV-auslöschende biobasierte Duroplaste werden ebenfalls erwähnt.

Mehrere AM-Materialien-Unternehmen konzentrieren sich auf die Entwicklung neuer Materialien, wie BASF¹⁹ und Evonik Industries²⁰. AM-Materialien-Unternehmen wie General Electric, Sandvik, Höganäs und Carpenter Technology bedienen nur den AM-Metallmarkt, konzentrieren sich aber auf High-End-Industrien wie die Luft- und Raumfahrt und Industrieprodukte. Andere AM-Materialienhersteller wie Materialise, Henkel, Proto Labs, Formlabs, Arkema und Markforged (PEKK

und Verbundwerkstoffe für High-End-Anwendungen) bieten ebenfalls eine breite Produktpalette an, die Metalle, Kunststoffe und Keramiken für den AM-Markt umfasst.

Es wird erwartet, dass die Entwicklung neuer AM-Materialien dazu beitragen wird, die Anwendungen von AM-Methoden in Nischenbereichen wie gedruckter Elektronik und der Energiewirtschaft zu erweitern. So hat Stratasys beispielsweise 2023 einen neuen, von der FDA zugelassenen Kunststoff für AM in der Zahnmedizin auf den Markt gebracht. ²¹Der TrueDent-Kunststoff ist eine monolithische, vollfarbige AM-Lösung für dauerhaften Zahnersatz, mit der mehrere Hindernisse in der Dentalbranche beseitigt werden sollen, wie z. B. Anpassung und Personalisierung, verbesserte Ästhetik und verbesserte Patientenerfahrung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verwendung von Materialien in der AM ein sich schnell entwickelnder Bereich ist, der viele Möglichkeiten für die Herstellung einer breiten Palette von Produkten aus verschiedenen Materialien bietet, z. B. aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Ressourcen, auf biologischer Basis, biologisch abbaubar, aus Sekundärrohstoffen, recycelt, aus Verbundwerkstoffen (eine weitere sich schnell entwickelnde Klasse) usw. (Abbildung 2).

Composites	Biodegradable	Polymer blends	Polylactic acid, Polycaprolactone, Polyhydroxybutyrate, Polybutylene succinate, Poly(lactic-co-glycolic acid)
		Polymer ceramic composites	Beta-tricalcium phosphate, Zirconia, Alumina, Hydroxyapatite
		Natural fillers in composites	Wood and Wood flour, Bamboo wood and powder, Sugarcane, Kenaf, Cork, Pinus radiata wood chips, Cocoa shell
		Natural fibres in composites	Harakeke, Hemp, Jute fibre, (Continuous) flax fibre, Thermomechanical pulp, Natural cellulose fibre
	Non-biodegradable	Polymer blends	Polyethylene, Polyethylene terephthalate, High-density polyethylene, Polypropylene, Polystyrene
		Polymer metal composites	Iron, Magnetic iron, Aluminium, Brass copper
		Fibre reinforced composites	Short fibre: Carbon fibre Long fibre: Glass fibre, Kevlar fibre
		Nano composites	(Multi-walled) carbon nanotubes, Nano clay, Barium titanate

Abbildung 2: Beispiele für Verbundwerkstoffe auf der Grundlage biologisch abbaubarer und nicht abbaubarer Polymere, die für die additive Fertigung verwendet werden

Es ist offensichtlich, dass die Wahl des Bindemittels (Polymer) als Trägermedium für das Material in hohem Maße von dem verfügbaren oder bevorzugten AM-Prozess abhängt und umgekehrt. ²²Die folgende Abbildung 3 beschreibt einige der verschiedenen Optionen für die Polymerauswahl in Abhängigkeit vom spezifischen AM-Verfahren und deren Kompatibilität mit den Materialbindereaktionen und Abbildung 4 zeigt die Optionen für die Materialauswahl in Abhängigkeit vom Rohstoffstatus.

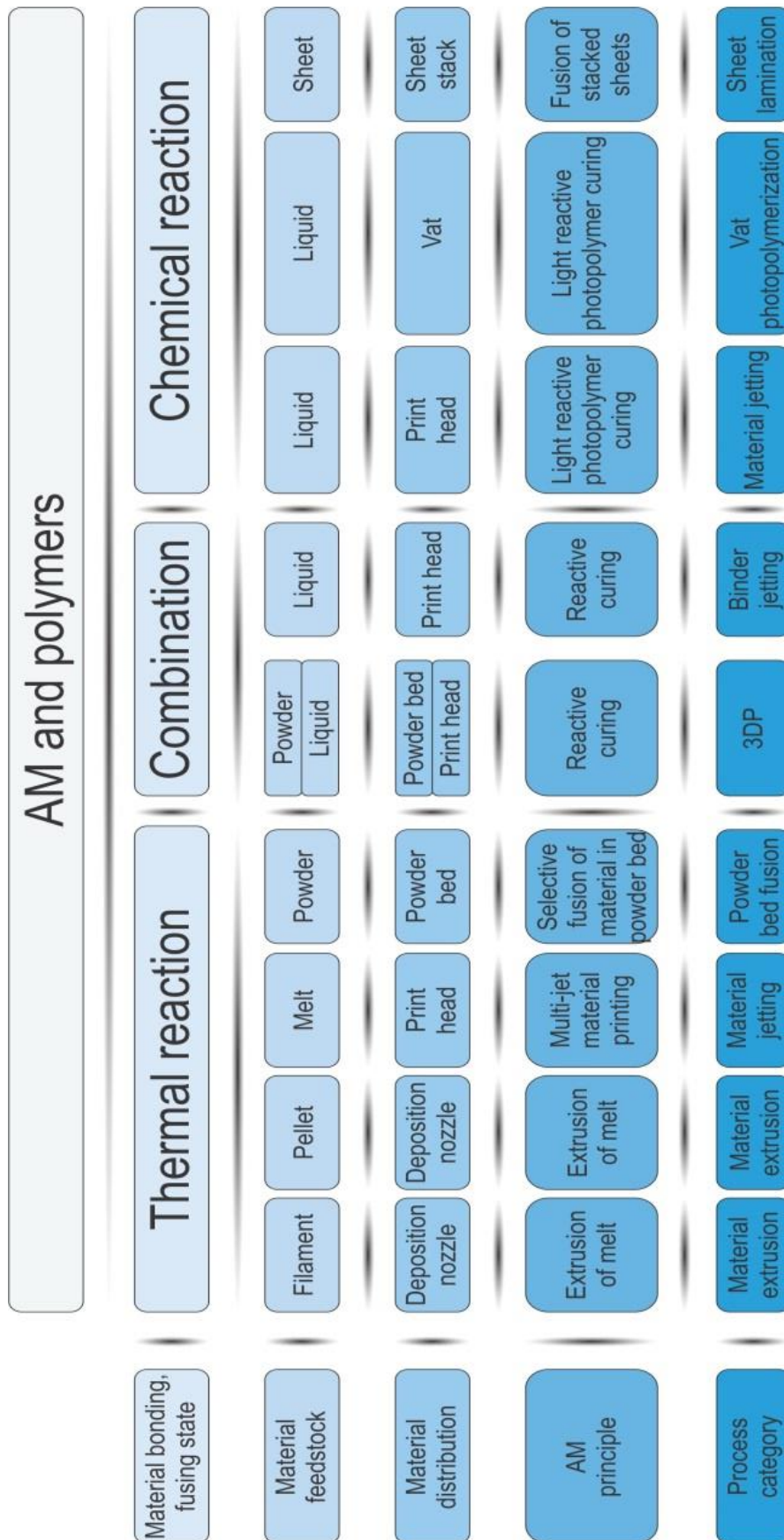


Abbildung 3: Auswahl des Polymers je nach Art des gewählten additiven Fertigungsverfahrens

**Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung
AddCircles, Interreg SLO - AT**

AM of polymers			Feedstock state		
Process category	AM technique	Abbreviation	Solid-bulk	Solid-powder	Liquid
Material extrusion	Fused filament fabrication	FFF	x		
	Fused granular fabrication	FGF	x	x	
	Robocasting	/	x		x
Material jetting: thermal bonding of the material	Multijet modelling	MJM			x
	Ballistic particle manufacturing	BPM			x
	Thermojet	/			x
Powder bed fusion	Selective laser sintering	SLS		x	
Binder jetting	3D printing	3DP		x	x
	Binder jetting	/			x
Material jetting: chemical bonding of the material	Stereolithography	SLA			x
	Digital light processing	DLP			x
	Continuous liquid interface production	CLIP			x
Vat photo-polymerization	Multi-photon polymerization	MPP			x
	Two-photon polymerization	2PP			x
Vat photo-polymerization	Laminated object manufacturing	LOM	x		
	Solid foil polymerization	SFP	x		

Abbildung 4: Additive Fertigung und Rohstoffoptionen

2. Die Grundlagen der Lebenszyklusanalyse (LCA) und ihre Bedeutung für die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Methode, mit der die Umweltauswirkungen in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Produkts untersucht werden. Diese Phasen umfassen die Gewinnung von Rohstoffen, die Lieferung der gewonnenen Ressourcen an die Fabrik, die Verarbeitung von Materialien und die Herstellung des Produkts, die Nutzung des Produkts, Reparatur und Wartung sowie die endgültige Wiederverwendung, das Recycling oder die endgültige Entsorgung des Produkts. Aufgrund ihres ganzheitlichen Ansatzes vermeidet die Lebenszyklusanalyse (LCA) problematische Übergänge zwischen Umweltwirkungskategorien und Lebenszyklusphasen. Dies macht die Lebenszyklusanalyse (LCA) zu einem wertvollen Instrument in verschiedenen Bereichen wie Produkt- oder Prozessdesign, industrielle und politische Entscheidungsfindung und Marketing.

Die Grundsätze und Rahmenbedingungen für Lebenszyklusanalysen sind in den internationalen Normen ISO 14040²³ und ISO 14044²⁴ festgelegt.

Die LCA-Studie besteht aus vier Phasen:

- **In der Phase der Ziel- und Umfangsdefinition wird der Kontext** der Studie **festgelegt**, indem die funktionalen oder deklarierten Einheiten, die Systemgrenzen und alle Annahmen und Einschränkungen der Studie definiert werden.
- **In der Phase der Bestandsanalyse** wird ein Inventar der Inputs und Outputs in das und aus dem untersuchten System erstellt, z. B. der Input von Wasser, Energie und Rohstoffen sowie der Output in Luft, Boden und Wasser.
- Ziel der **Folgenabschätzungsphase** ist es, die Bedeutung und das Ausmaß potenzieller Umweltauswirkungen auf der Grundlage der Ergebnisse der Analyse der Bestandsströme zu bewerten.
- **In der Interpretationsphase werden** die Ergebnisse der Phase der Bestandsanalyse und/oder der Phase der Folgenabschätzung in Bezug auf das definierte Ziel und den Umfang der Studie **zusammengefasst** und bewertet.

Alle Phasen sind voneinander abhängig, z. B. müssen die gesammelten Lebenszyklusinventare für das Ziel und den Umfang in Zeit und Raum relevant sein. In der Praxis macht diese Interdependenz die Lebenszyklusanalyse zu einem iterativen Ansatz, da die Verfügbarkeit von Daten zu Beginn einer Lebenszyklusanalysestudie oft nicht vollständig bekannt ist. ²⁵Darüber hinaus wird der gesamte LCA-Rahmen durch die angenommene direkte Verwendung beeinflusst und umgekehrt.

Umfangreicher Überblick für Anwender der additiven Fertigung AddCircles, Interreg SLO - AT

Abbildung 5 zeigt die wichtigsten Phasen der Lebenszyklusanalyse und die ökologischen Parameter, für die Informationen über die Umweltauswirkungen gesammelt werden müssen, die dann mithilfe der Lebenszyklusanalysemethode untersucht und bewertet werden.

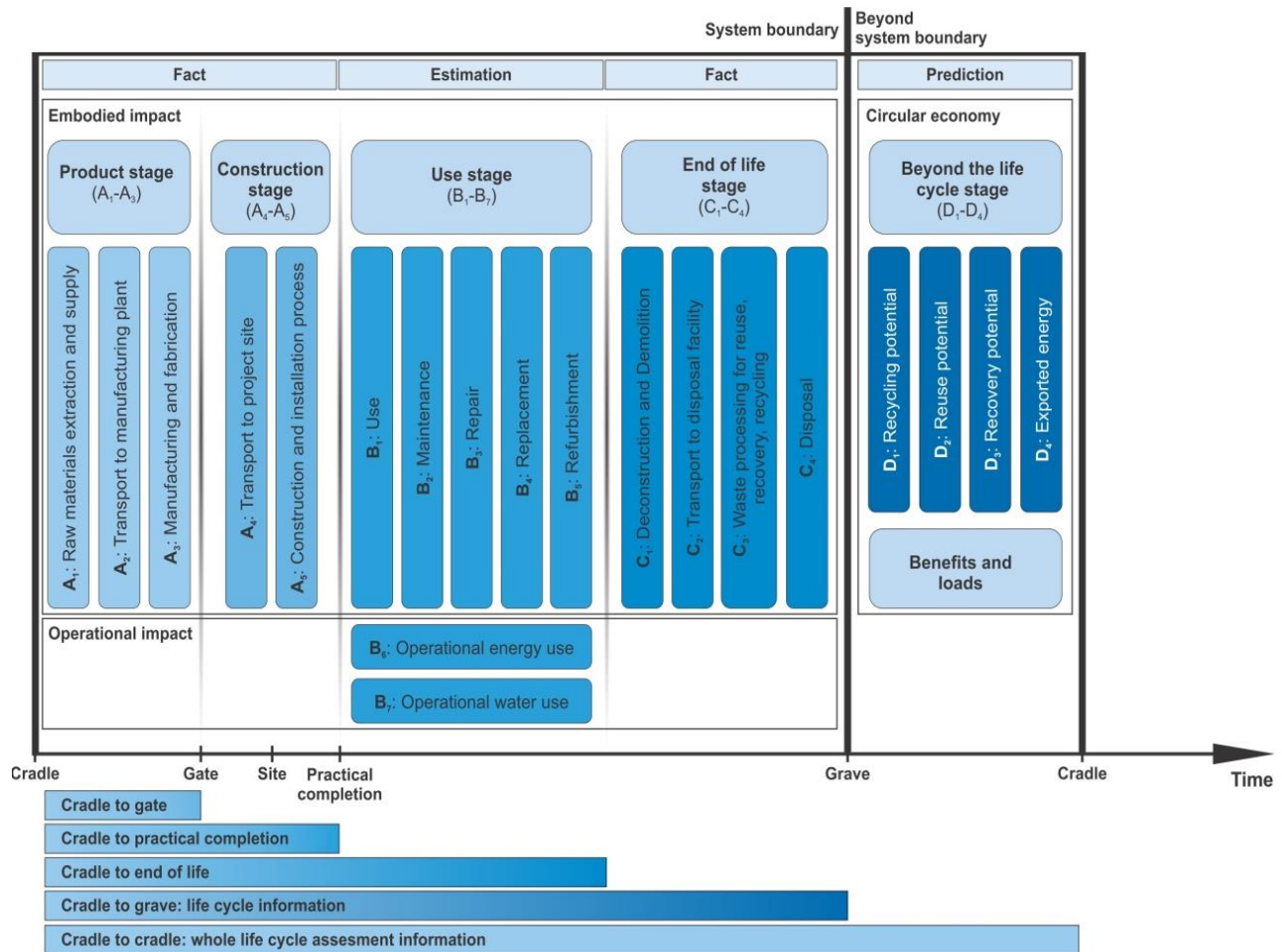


Abbildung 5: Die wichtigsten Phasen der Lebenszyklusanalyse

Im Allgemeinen beginnt eine LCA-Studie mit einer ausdrücklichen Erklärung des Ziels der Studie, die den Kontext der Studie festlegt, die Gründe für die Durchführung der Studie beschreibt und erläutert, wie die Ergebnisse zu kommunizieren sind. Im Anschluss an die Zielsetzung sollte der Umfang definiert werden, indem die qualitativen und quantitativen Informationen beschrieben werden, die in die Studie einfließen, wie z. B. die Definition der Funktionen des Produktsystems und der funktionalen oder deklarierten Einheit, die Systemgrenzen und Zuordnungsverfahren sowie die UVP-Methodik, der Interpretationsprozess, alle Annahmen und Einschränkungen und die Anforderungen an die Datenqualität.

Es können verschiedene Arten von Lebenszyklusanalysen durchgeführt werden:

- (i) **von Tür zu Tür**, wobei die Umweltauswirkungen jedes einzelnen Produktionsschritts oder -prozesses bewertet werden,
- (ii) **Cradle-to-Gate**, bei dem der Teillebenszyklus eines Produkts von der Beschaffung ("Cradle") bis zum Werkstor (d. h. bevor das Produkt zum Verbraucher transportiert wird) bewertet wird,
- (iii) **Cradle-to-Completion (von der Wiege bis zur Fertigstellung)**, bei dem der gesamte Lebenszyklus eines Produkts von der Beschaffung über die Produktion und den Transport der Materialien bis zur Baustelle sowie die während des Baus entstehenden Emissionen bewertet werden,
- (iii) **von der Wiege bis zur Bahre**, wobei der gesamte Lebenszyklus von der Ressourcengewinnung ("Wiege") bis zur Nutzungs- und Entsorgungsphase ("Bahre") bewertet wird; und
- (iv) **Cradle-to-Cradle**, eine spezielle Art der Cradle-to-Grave-Bewertung, bei der die Entsorgungsphase des Produkts am Ende seines Lebenszyklus ein Recyclingprozess ist, d. h. der Recyclingprozess wird zur Wiederverwendung von Materialien oder Komponenten für ein anderes Produkt genutzt ("Kreislaufschließung").

Die Art und Strategie der Datenerhebung sollten bereits in den frühesten Stadien der LCA-Studie geplant werden. Je nach dem neuen und grundlegenden Studiendesign kann entschieden werden, ob standortspezifische Daten für wichtige Prozesse und/oder gemittelte Daten für weniger kritische Aspekte der Lebenszyklusanalyse erhoben werden sollen. Die Erhebung von Durchschnittsdaten kann direkt aus den Lebenszyklusanalysedatenbanken erfolgen. Die Sammlung standortspezifischer Daten nimmt jedoch in der Regel mehr Zeit in Anspruch, da sie viele verschiedene Maßnahmen wie Messungen, Kontaktaufnahme mit verschiedenen Interessengruppen, Organisation und Teilnahme an Sitzungen, um Unternehmen, Experten und andere Partner zu erreichen, usw. umfasst. Die Lebenszyklusanalyse ist wichtig für die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle durch die Bewertung des Produktlebenszyklus. ²⁶Es wird möglich sein, potenzielle Umweltverbesserungen zu antizipieren, da sie dazu beiträgt, die Verlagerung von Umweltbelastungen zu erkennen und zu verhindern, und die Nutzer in die Lage versetzt, die besten Methoden zur Verringerung der Umweltbelastungen zu ermitteln.

Die Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Produkts sollte nicht nur als Verstärkung des Wunsches von Herstellern und Nutzern gesehen werden, nachhaltiger zu handeln, sondern auch als wichtiger Marktvorteil. Es wird dringend empfohlen, LCA in Verbindung mit LCCA^{27,28}, zu verwenden, da dieser Ansatz eine fundiertere Entscheidungsfindung im Einklang mit langfristigen ökologischen und wirtschaftlichen Zielen unterstützt²⁹.

Die LCCA berücksichtigt alle Kosten, die mit einem Projekt oder Produkt verbunden sind, einschließlich der Kosten für Anschaffung, Produktion, Betrieb, Wartung und Entsorgung. Die LCCA zielt darauf ab, ein umfassendes Bild der finanziellen Auswirkungen eines Projekts über seinen

gesamten Lebenszyklus hinweg zu vermitteln, wobei sowohl direkte Kosten (oder "private Kosten") als auch sekundäre (oder "externe") Kosten berücksichtigt werden.

Die direkten Kosten umfassen die Kosten, die direkt mit der Herstellung der einzelnen Produkte verbunden sind, einschließlich des Transports von Waren, der Montage und Demontage von Produkten sowie der Wartung und des Recyclings. Diese Kosten können in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

1. Zu den Kosten für die Herstellung und Aufbereitung von Rohstoffen gehören die Kosten, die mit der Herstellung und Aufbereitung von Rohstoffen verbunden sind, die ein integraler Bestandteil des Produktionsprozesses eines bestimmten Produkts sind. Beispiele hierfür sind Strom, Brennstoff, Mitarbeitergehälter und Abschreibungen.
2. Zu den Transportkosten gehören Treibstoffkosten, Löhne und Gehälter der Transportunternehmer und die Abschreibung der Transportmittel. Diese Kosten beziehen sich auf die Logistik der Beförderung von Waren von einem Ort zum anderen.
3. Zu den Montagekosten gehören Löhne und Gehälter, der Einsatz von Ausrüstungen für Arbeiten in großer Höhe und Strom. Die Montagekosten umfassen die Ausgaben für den Zusammenbau der Komponenten des Produkts.
4. Zu den Instandhaltungskosten gehören die Kosten für Energie und Reproduktionsmaterial, die für die routinemäßige Instandhaltung der Produktionsanlagen und -einrichtungen benötigt werden.
5. Die Kosten für die Entsorgung oder das Recycling umfassen den Einsatz von Lastwagen, die Löhne der an der Entsorgung oder dem Recycling beteiligten Arbeitnehmer und die Nutzung von Deponien oder Verbrennungsanlagen. Diese Kosten sind mit der ordnungsgemäßen Entsorgung oder dem Recycling von Produkten verbunden.

Sekundärkosten entstehen in Produktionsprozessen als unerwünschte Effekte, die sich auf wirtschaftliche, soziale und ökologische Systeme sowie auf die Beziehungen zwischen Wirtschaftssektoren, Produktion und Umwelt sowie Produzenten und Verbrauchern auswirken. Diese Kosten äußern sich sowohl in monetärer als auch in technologischer Hinsicht. Sie berücksichtigen insbesondere nicht die negativen Folgen, die die Energieerzeugung für die menschliche Gesundheit und die Umwelt haben kann. Beispiele für Sekundärkosten sind die Entstehung von CO₂- und SO₄-Emissionen in Abgasen bei der Verbrennung von Motoren oder bei der Stromerzeugung. Außerdem gehören zu diesen Kosten die Folgen der Abfallerzeugung und die durch Lärmbelästigung verursachten Schäden.

LCA und LCCA sind wertvolle Instrumente zur Förderung der Nachhaltigkeit und zur Ausrichtung der Entscheidungsfindung auf umweltfreundlichere Verfahren.

3. Stärkung regionaler Unternehmen: die Rolle von AddCircles bei der Förderung der additiven Fertigung und der Kreislaufwirtschaft

Die direkten Anwendungen der Lebenszyklusanalyse für regionale Unternehmen und AM-Nutzer sind:

1. Produktentwicklung und -verbesserung,
2. Strategische Planung,
3. Leitlinien für politische Entscheidungsträger (Umwelt- und andere Entscheidungsträger); und
4. Marketing.

Die Rolle des AddCircles-Projekts bei der Förderung der regionalen Wirtschaft sowohl der Kreislaufwirtschaft als auch der AM spiegelt seinen hochmodernen Ansatz zur Förderung der Nachhaltigkeit wider, der eine Überprüfung der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Ergebnisse und somit auch eine TRL-Überprüfung der verschiedenen AM-Technologien, Engpässe und offenen Fragen in diesem Bereich erfordert.

AddCircles konzentriert sich hauptsächlich auf die unten aufgeführten AM-Techniken:

1. die PBF, mit Schwerpunkt auf dem selektiven Lasersintern (SLS),
2. die Materialextrusion (MEX) AM, mit Schwerpunkt auf der kontinuierlichen Faserherstellung (CFF)
3. direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS)

Nachfolgend werden die Komponenten und schematischen Darstellungen der additiven Fertigungstechnologien SLS, SLM, DMLS (Abbildung 6 und Abbildung 6a), MEX und FDM (Abbildung 7, Abbildung 7a, Abbildung 7b und Abbildung 7c) tabellarisch dargestellt.

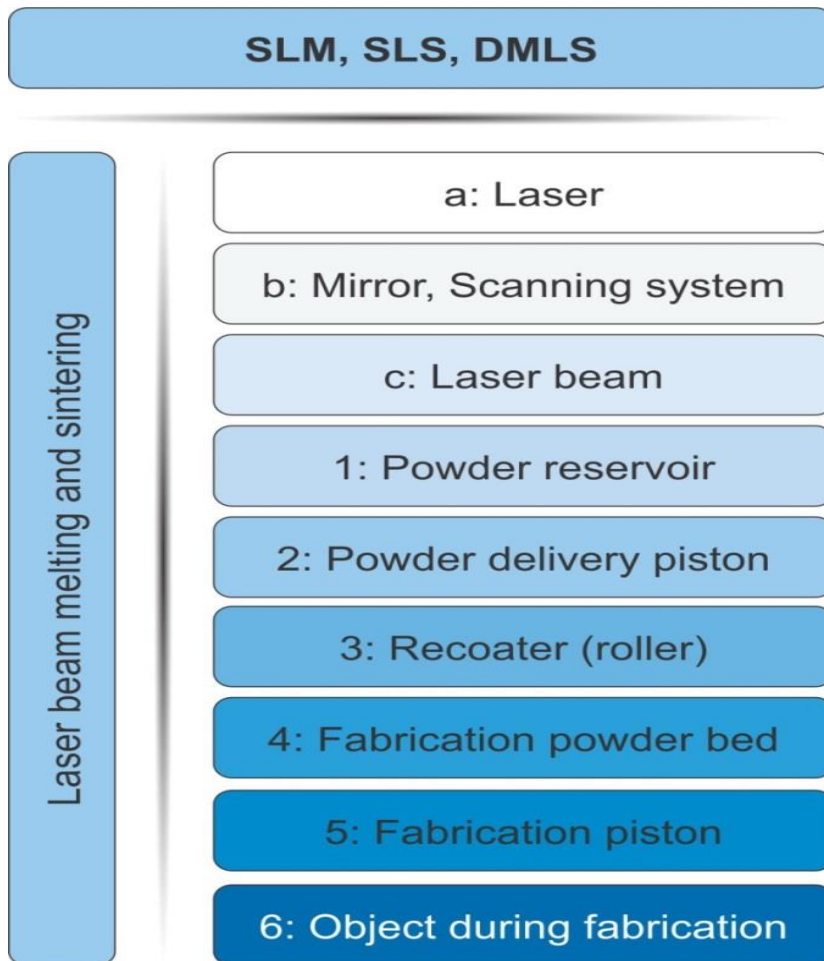


Abbildung 6: Tabellarische Darstellung von SLS-, ME-, DMLS- und FDM-Bauteilen

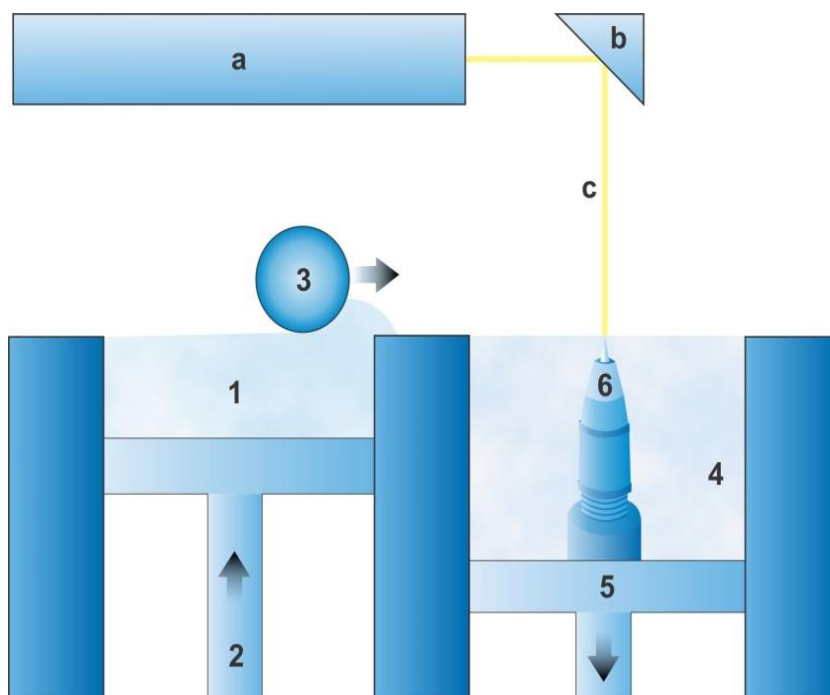


Abbildung 6a: Schematische Darstellung von SLS, SLM und DMLS

Spezifische Energieverbrauchsdaten für einzelne AM-Verfahren sind online nicht frei verfügbar, aber es wird davon ausgegangen, dass additive Metallfertigungsverfahren wie DMLS in der Regel einen höheren Energiebedarf haben als SLS-Verfahren, die Materialien auf Kunststoffbasis drucken.

Das SLM-Verfahren ist ideal für reine Metalle wie Titan oder Aluminium und erfordert eine höhere Temperatur als andere 3D-Druckverfahren für Metalle wie DMLS. DMLS ist in der Lage, hochfeste funktionale Metallteile zu drucken, ist aber aufgrund des höheren Energiebedarfs und der teureren Rohstoffe³⁰ deutlich teurer als SLS. Ein Energieeffizienzkriterium zur Bewertung der Energieeffizienz von selektiven Laserschmelzverfahren wurde in einer Studie von Hu et al. (2023) ³¹ erörtert. Darüber hinaus wird in der Norm ISO/ASTM 52910:2018 die Energieeffizienz berücksichtigt, indem die Optimierung des Materialverbrauchs, des Gewichts und der Spannungskonzentration in den Konstruktionen angesprochen wird³².

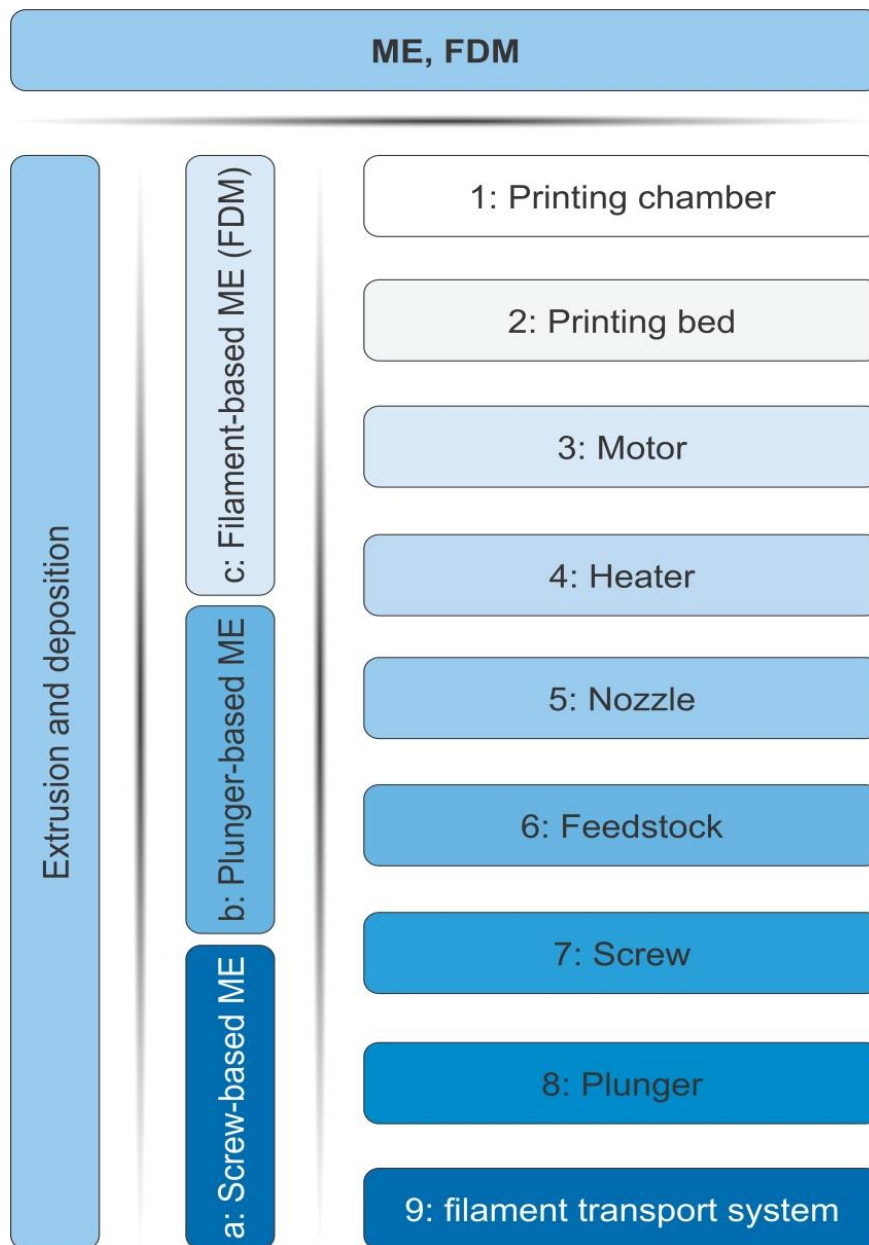


Abbildung 7: Tabellarische Darstellung der ME- und FDM-Komponenten

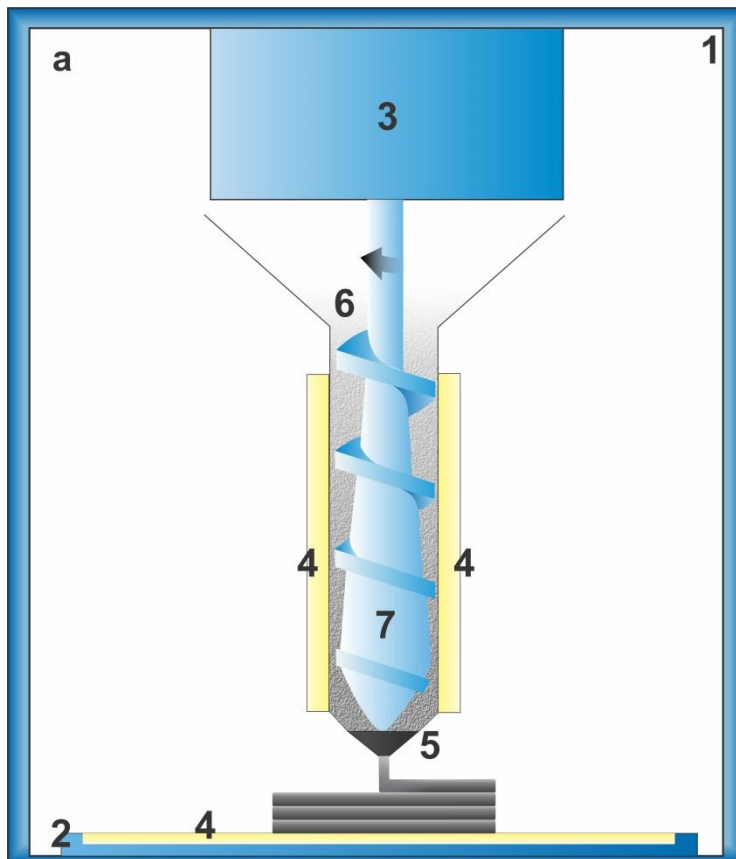


Abbildung 7a: Schematische Darstellung der additiven Fertigung der Materialextrusion mittels Schnecke

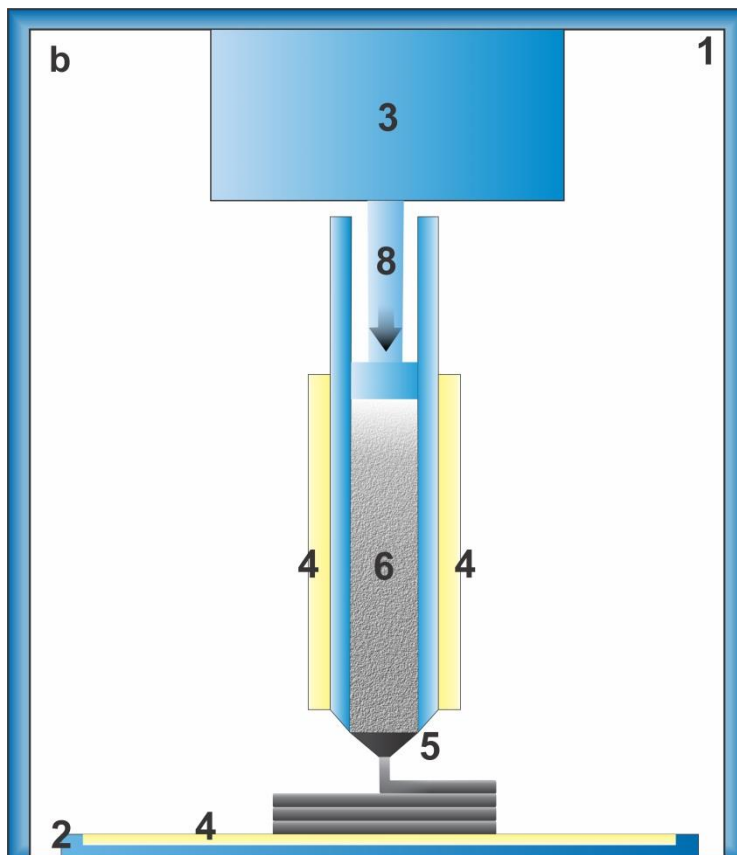


Abbildung 7b: Schematische Darstellung der additiven Fertigung von Kolbenstrangpressmaterial

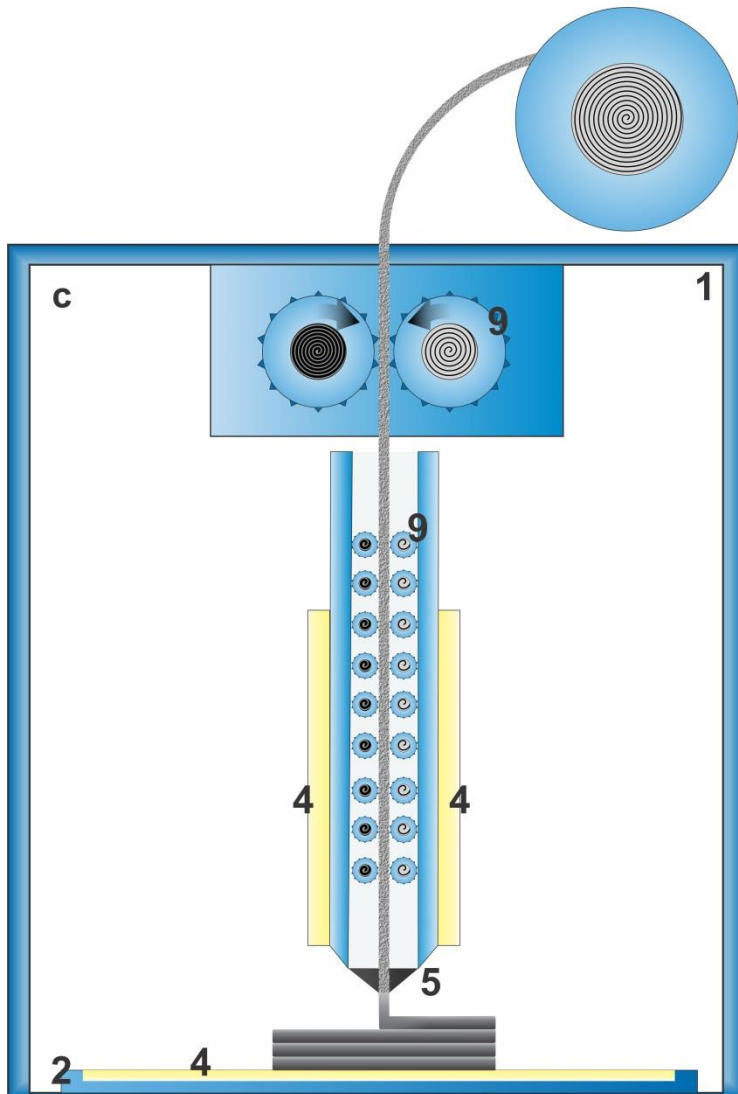


Abbildung 7c: Schematische Darstellung der Filamentextrusion durch additive Fertigung

Obwohl ME im Vergleich zu herkömmlichen FDM-Produktionsmethoden und -prozessen einen geringeren Energieverbrauch aufweisen kann, müssen die spezifischen Materialien, die verwendeten Einstellungen und die Produktionsraten³³ berücksichtigt werden, um den Gesamtenergiebedarf jeder additiven Fertigungsmethode genau zu schätzen. Eine Studie, in der der Energieverbrauch und die Zugfestigkeit von Poly(methylmethacrylat) im ME-Verfahren analysiert wurden, zeigte den Einfluss verschiedener Steuerungseinstellungen auf den Energiebedarf und die mechanischen Eigenschaften der Teile.³⁴ Faktoren wie Extrusionstemperatur, Bauplattenheizung, Druckgeschwindigkeit und Motor/Motorsysteme spielen eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung des Energieverbrauchs in ME-

Prozessen.³⁵ So wird beispielsweise bei Verfahren wie FDM ein erheblicher Teil der Energie für die Erwärmung der Umgebung während der Produktion verwendet³⁶.

Um die Auswirkungen der innovativen Lösungen des AddCircles-Projekts auf die Umwelt beurteilen zu können, planen wir eine umfassende Bewertung des AddCircles-Business-Case mithilfe der Lebenszyklusanalyse. Daher wird im folgenden Abschnitt 3.1 die einschlägige veröffentlichte wissenschaftliche Forschung im Zusammenhang mit AM und LCA näher betrachtet. Kapitel 4 gibt einen grundlegenden Überblick über die Prinzipien der Lebenszyklusanalyse.

3.1 Überblick über wissenschaftliche Erkenntnisse zur additiven Fertigung und zur Lebenszyklusanalyse

Neben den rasanten Fortschritten in verschiedenen Bereichen unterstreichen die neu aufkommenden 3D-Druckverfahren und -technologien, wie wichtig es ist, sich mit wissenschaftlichen Veröffentlichungen vertraut zu machen. Trotz der Fortschritte auf dem Markt bleiben die Herausforderungen der umweltfreundlichen additiven Fertigung bestehen und erfordern wissenschaftliche Forschung und Fachwissen in den Bereichen technisches Design, Materialauswahl, Verarbeitung, Simulation von AM-Prozessen, Bauteilsimulation, Lebenszyklusanalyse und Grundsätze der Kreislaufwirtschaft.

Der Aufschwung der 3D-Drucktechniken ist zum Teil auch auf das wachsende Umweltbewusstsein zurückzuführen. Infolgedessen gibt es eine wachsende Zahl von Forschungsarbeiten und Artikeln, die sich mit der Ökobilanz in diesem Bereich befassen.

AM hat sich als eine wichtige digitale Technologie zur Verbesserung der Produktionseffizienz erwiesen. Daher wurde in der Studie *Towards Sustainable Production for Transition to Additive Manufacturing: A Case Study in the Manufacturing Industry*³⁷ untersucht, welche Auswirkungen die Umgestaltung von Produkten für den Übergang zu AM-Technologien auf nachhaltige Produktionsprozesse hat. In dieser Studie wurde ein Produkt in industriellem Maßstab nach AM-Prinzipien umgestaltet und mit FDM-Techniken hergestellt. Die Umweltauswirkungen der Produktionsmethoden wurden anhand des Materialverbrauchs und das Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen mit Hilfe von LCA bewertet. Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass die Verwendung eines einzigen Materialtyps und einer einzigen Produktionsmethode für das neu gestaltete Produkt sowie die Verringerung des Materialverbrauchs durch den Verzicht auf Verbindungselemente zu einer Verringerung des Materialverbrauchs um 60,45 % und der CO₂-Emissionen um 85,59 % im Vergleich zur konventionellen Produktion führten. Obwohl die Produktionszeit bei der konventionellen Herstellung kürzer ist als beim FDM-Verfahren, hat sich die Lieferzeit durch die Notwendigkeit der Formkonstruktion und Vorbearbeitung verlängert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Materialstückkosten für beide Herstellungsverfahren sehr ähnlich sind.

Der Artikel *Comparative LCA of Conventional Manufacturing vs. Additive Manufacturing: The Case of Injection Moulding for Recycled Polymers*³⁸ wurde ebenfalls als Forschungspapier veröffentlicht. Es wurde eine vergleichende Analyse zwischen zwei Herstellungsverfahren unter Verwendung von schwarzem Acrylnitril-Butadien-Styrol-Granulat durchgeführt, um die potenziellen Umweltauswirkungen des Spritzgießens als CM (konventionelle Herstellung) und des FDM-3D-Druckers als AM zu bewerten. Es wurden eine LCA-Methode und eine einheitliche Lebenszyklusinventur angewandt. Die Studie konzentrierte sich hauptsächlich auf den Vergleich des

Treibhauspotenzials (GWP), des kumulativen Energiebedarfs und der mechanischen Zugfestigkeit von Teilen, die mit CM und AM hergestellt wurden. Das GWP sowohl von CM- als auch von AM-Systemen wurde mit zwei verschiedenen Methoden geschätzt, Impact 2002+ (Anhang 1) und ReCiPe 2016 (Anhang 2). Es wurde festgestellt, dass das GWP der AM-Teile mit unterschiedlichen Füllstoffanteilen variiert. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Erhöhung des Füllstoffanteils in den AM-Teilen zu einem Anstieg des kumulativen Energiebedarfs führte. Im Gegensatz dazu sank das GWP von CM, wenn die Chargengröße erhöht wurde. Als die CM-Batchgröße von 7 auf 14 Teile erhöht wurde, sank das GWP um bis zu 40 %. Außerdem verringerte sich das GWP bei einer CM-Chargengröße von 50 Teilen um 56 % im Vergleich zu 14 Teilen. Diese Verringerung wurde auf den geringeren Stromverbrauch pro Teil zurückgeführt, wenn die Chargengröße erhöht wurde. Es wurde eine positive Korrelation zwischen diesen beiden Faktoren nachgewiesen.

Nachhaltigkeit ist das Konzept, die gegenwärtigen Bedürfnisse der Gesellschaft zu befriedigen und gleichzeitig die Bedürfnisse künftiger Generationen zu schützen. Ziel der Studie "*Environmental life cycle assessment of an automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing*"³⁹ ist es, den ökologischen Fußabdruck von Komponenten zu bewerten, die mit AM- und CM-Verfahren hergestellt wurden. In dieser Studie wird speziell ein Schwenkarm, eine Automobilkomponente, hinsichtlich ihres Designs, des Rohstoffeinsatzes, der Herstellungsprozesse und ihrer Auswirkungen auf den Lebenszyklus von AM- und CM-Prozessen bewertet. Das Bauteil wurde mit Hilfe der Topologieoptimierung und des Design for Additive Manufacturing (DfAM)-Ansatzes neu entworfen. Für dieses Bauteil wurde eine Cradle-to-Gate-LCA-Studie durchgeführt. Die Informationen für die Lebenszyklusinventur wurden aus der Literatur, aus einschlägigen Datenbanken und aus Experimenten entnommen. Die Ergebnisse zeigen, dass der mit CM hergestellte Schwenkarm im Vergleich zu AM ohne Topologieoptimierung eine um 14,53 % geringere Umweltbelastung aufweist. AM mit Topologieoptimierung verursacht im Vergleich zu CM 21,31 % weniger Umweltschäden. Die für die Herstellung von Produkten durch das selektive Laserschmelzen (SLM) verbrauchte Energie ist die Hauptursache für den ökologischen Fußabdruck. Durch die Einbeziehung der Optimierung wird die Umweltbelastung aufgrund des geringeren Strom- und Materialverbrauchs reduziert.

Im Artikel *Environmental Assessment of Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering*⁴⁰ bewerteten Kellens et al. die SLM- und SLS-Fertigungsverfahren als geeignet für die Herstellung komplexer, nahezu netzförmiger Werkstücke, die das Potenzial für minimalen Abfall und eine nachhaltige Produktion bieten. Sie erfassten den Strom- und Materialverbrauch. Auf der Grundlage der durchgeführten Lebenszyklusanalyse beschreibt das Dokument Verbesserungsmöglichkeiten für SLM/SLS-Maschinen durch selektives Zu- und Abschalten von Teilsystemen, die Einführung externer Kühlzyklen, die Verringerung der Gesamtmaschinenzeit (Standby) und die Verringerung der Produktionszeit (z. B. Verschachtelungseffizienz, Bauhöhe). Es wurde festgestellt, dass der Materialeinsatz, insbesondere für SLS, aufgrund der großen Menge an Abfallstaub eine hohe

Umweltbelastung darstellt. Neben Maßnahmen, die die Verschachtelungseffizienz erhöhen (z. B. Verringerung der Bauhöhe), könnten optimalere Recyclingverfahren den Abfall reduzieren.

Dotchev et al.⁴¹ stellen eine praktische Methode für die Sammlung und Abscheidung von ungeschwefeltem Staub vor. Sie schlagen die Verwendung unterschiedlicher Raten in Abhängigkeit vom Schmelzfluss des rezyklierten Pulvers vor, um die Qualität des eingehenden Materials zu kontrollieren und das frische Pulver effizienter zu nutzen. Das Wichtigste ist eine gut durchdachte Auswahl der SLM/SLS-Ausrüstung (z. B. optimale Prozesskammergröße und Behälterstruktur), da flexible Prozesskammern die Herstellung einer Vielzahl von Produkten (Chargen) auf derselben Werkzeugmaschine ermöglichen und die Umweltbelastung begrenzen.

Nagarajan und Haapala⁴² haben mit Hilfe von Energie- und Lebenszyklusanalysen in einem großen Produktionsmaßstab ermittelt, wie das DMLS-Verfahren zur Umweltbelastung (Material- und Energieverluste) beiträgt. Die Umweltauswirkungen von DMLS-Eisenmetallpulvern wurden durch thermodynamische Analysen, Energieverbrauch und Cradle-to-Gate-Bewertungen charakterisiert. Es wurde festgestellt, dass nur 6 % des gesamten Prozessinputs beim DMLS zur Materialverarbeitung beitragen, während 94 % als großer Abfall, Wärme und Arbeit verloren gehen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Stromverbrauch ein wichtiger Faktor für den zentralen Prozess und die damit verbundenen Skalierungsprozesse ist. Die GWP-Auswirkung des Systems für DMLS wurde mit 7,2 kg CO₂-Äq. bestimmt. Der allgemeine Indikator ReCiPe 2008 (eine Methode zur Bewertung und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen in mehreren Kategorien wie menschliche Gesundheit, Qualität des Ökosystems und Ressourcenerschöpfung) zeigt, dass die Schädigung der menschlichen Gesundheit größer ist als die Schädigung der Qualität des Ökosystems (Qualität des Ökosystems = 84 %, menschliche Gesundheit = 58 %, Ressourcenerschöpfung = 51 %) und der Ressourcenverfügbarkeit (Qualität des Ökosystems = 74 %, menschliche Gesundheit = 29 %, Ressourcenerschöpfung = 19 %) für den DMLS-Prozess.

Auch wenn Beispiele und Forschungsergebnisse die Vorteile der additiven Fertigung für die Umwelt belegen, muss man sich darüber im Klaren sein, dass diese Technologie nicht überall umweltfreundlicher ist als herkömmliche Produktionsverfahren. In bestimmten Szenarien können sich konventionelle Produktionsmethoden als nachhaltiger erweisen, insbesondere wenn es um bestimmte Materialien, Produktionsmengen oder betriebliche Effizienz geht. Darüber hinaus kann die Lebenszyklusanalyse von Produkten, die mit additiven Verfahren hergestellt wurden, versteckte Umweltkosten aufzeigen, wie z. B. die Kosten, die mit der Entsorgung von nicht verwendeten oder defekten Materialien verbunden sind, oder die energieintensive Natur einiger additiver Verfahren. Eine Reihe von Beispielen und Studien verdeutlichen den subtilen Charakter dieses Vergleichs, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Eine Studie, in der AM-Daten aus der LCA-Literatur mit konventionellen Fertigungsdaten aus der Granta-EduPack-Datenbank⁴³ verglichen wurden, zeigte, dass Metall-AM im Allgemeinen einen höheren Kohlenstoff-Fußabdruck pro kg verarbeitetes Material aufweist als CM-Verfahren wie Gießen,

Strangpressen, Walzen, Schmieden und Drahtziehen. Zu den Faktoren, die sich auf die Haltbarkeit auswirken, gehören die Teilegeometrie, wobei AM für hohle Schalen oder Gitter vorteilhafter ist, sowie Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, wo leichte Teile Stöße reduzieren können. Daher wird empfohlen, für Vergleiche geeignetere funktionale Einheiten zu verwenden, wie z. B. Standard-Referenzteile, die typische Anwendungen im metallischen AM und CM repräsentieren. Eine umfassende Ökobilanz sollte Auswirkungen berücksichtigen, die über die Prozessenergie hinausgehen, einschließlich Verbrauchsmaterialien wie Argon für AM und Werkzeuge für CM, sowie Materialauswirkungen und Überlegungen zum Ende der Nutzungsdauer. Auch die Fallstudie zum Spritzgießen von recycelten Polymeren⁴⁴ zeigt, dass die Umweltauswirkungen von FDM bei Losgrößen von weniger als 14 Teilen geringer sind. Bei größeren Losgrößen kann jedoch die konventionelle Produktion umweltfreundlicher sein. In einigen Fällen kann AM im Vergleich zur konventionellen Produktion eine höhere toxische Wirkung auf den Menschen haben, was aber nicht unbedingt bedeutet, dass AM in jeder Hinsicht schlechter ist.⁴⁵ Ein Übersichtsartikel über die Ökobilanz von AM-Prozessen erörtert Ökobilanzanalysen von AM-Prozessen, gibt aber keine endgültige Antwort darauf, ob AM schlechter oder besser ist als die konventionelle Produktion.⁴⁶ Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Suchergebnisse nicht immer schlüssig beweisen, dass AM in allen Szenarien schlechtere oder bessere Umweltauswirkungen als die konventionelle Produktion hat. Forschungsarbeiten zu verschiedenen Aspekten und Werkzeugen der additiven Fertigung, darunter *EcoPrintAnalyzer: Assessing Sustainability in Material Extrusion Additive Manufacturing for Informed Decision-Making*⁴⁷, zeigen das Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit auf, indem sie das Bewusstsein für die Umweltvorteile der additiven Fertigung stärken. Die wichtigsten Triebkräfte sind die Optimierung des Designs und ein stärkeres Bewusstsein, das es den Ingenieuren ermöglicht, effizientere Designs zu entwickeln. Das Tool EcoPrintAnalyzer, ein Plug-in für UltiMaker Cura, hilft bei der Bewertung der Umweltauswirkungen von AM, indem es Daten zum Kohlenstoff-Fußabdruck und Energieverbrauch liefert. Es fördert fundierte Entscheidungen über Materialien und Designs, reduziert Abfall und verbessert die Energieeffizienz. Eine Fallstudie anhand des 3DBenchy-Modells zeigt die Wirksamkeit und Benutzerfreundlichkeit des Tools bei der Optimierung von AM-Prozessen im Hinblick auf Nachhaltigkeit.

Da ein erheblicher Energiebedarf auch systematisch als einer der Hauptgründe für ökologische Schäden bei der FFF angesehen wird, beruhen Abhilfestrategien häufig auf der Verkürzung der Druckzeit (z. B. Verwendung dickerer Schichten) oder der Verringerung des Energieverbrauchs pro Teil (z. B. durch Verschachtelung, d. h. Druck mehrerer Teile zur gleichen Zeit).⁴⁸ Auch die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien dürfte die Nachhaltigkeit der dezentralen Produktion durch FFF erhöhen.

Eine wichtige wissenschaftliche Arbeit, die sich mit der additiven Herstellung von Leichtbaustrukturen durch *Material extrusion* (MEX) und deren Umweltauswirkungen durch LCA befasst, trägt den Titel *Material extrusion additive manufacturing of novel lightweight collinear stayed polymer lattices (AM)*.

Die Studie *Comparative Life Cycle Assessment Analysis of SLS and mFFF Additive Manufacturing Techniques for the Production of a Metal Specimen (Vergleichende Lebenszyklusanalyse von SLS- und mFFF-Additive-Fertigungsverfahren für die Herstellung von Metallproben)*⁵⁰ stellt eine detaillierte Lebenszyklusanalyse vor, in der SLS mit Modified Fused Filament Fabrication (mFFF) verglichen wird. Sie hebt hervor, dass SLS im Vergleich zu mFFF einen deutlich geringeren Energieverbrauch und geringere Umweltauswirkungen hat, was es zu einer nachhaltigeren Option für die Herstellung von Metallproben macht. Die Bewertung umfasst verschiedene Wirkungskategorien, darunter das Erderwärmungspotenzial und die Erschöpfung der Ressourcen.

In der Literatur ist der Vergleich von LCA-Berichten aufgrund der unterschiedlichen Daten in Forschungsartikeln und LCA-Methoden eine Herausforderung. Die einzelnen Lebenszyklusanalysen enthalten oder präsentieren nicht immer dieselben Daten auf einheitliche Weise. Darüber hinaus hängt das Ergebnis einer Lebenszyklusanalyse oft von der definierten Wertschöpfungskette für ein bestimmtes Produkt (siehe Abbildung 8) sowie vom Umfang und Zweck der Lebenszyklusanalyse ab, die wir im Abschnitt über die Grundlagen der Ökobilanzanalyse näher beschreiben.^{51,52,53}

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die additive Fertigung die traditionellen Lieferketten verändert hat, indem sie vom Push- zum Pull-Verfahren übergegangen ist. Mehr darüber, was diese Art von Lieferkette mit sich bringt, erfahren Sie in dem Artikel *Implications of Additive Manufacturing on Supply Chain Management*⁵⁴, in dem die Risiken, Chancen und Strategien untersucht werden, die Unternehmen zur Anpassung nutzen. Zu den wichtigsten Veränderungen gehören die Verbesserung von Zeit, Qualität, Geschwindigkeit und Umweltverträglichkeit, was zu einem besseren Ressourcenmanagement, niedrigeren Kosten, kürzeren Lieferzeiten und einer höheren Kundenzufriedenheit durch Individualisierung führt. Die gewonnene Flexibilität und Effizienz stehen im Einklang mit den Zielen für nachhaltige Entwicklung und sind ein Indikator für künftige Trends in der Branche.⁵⁵

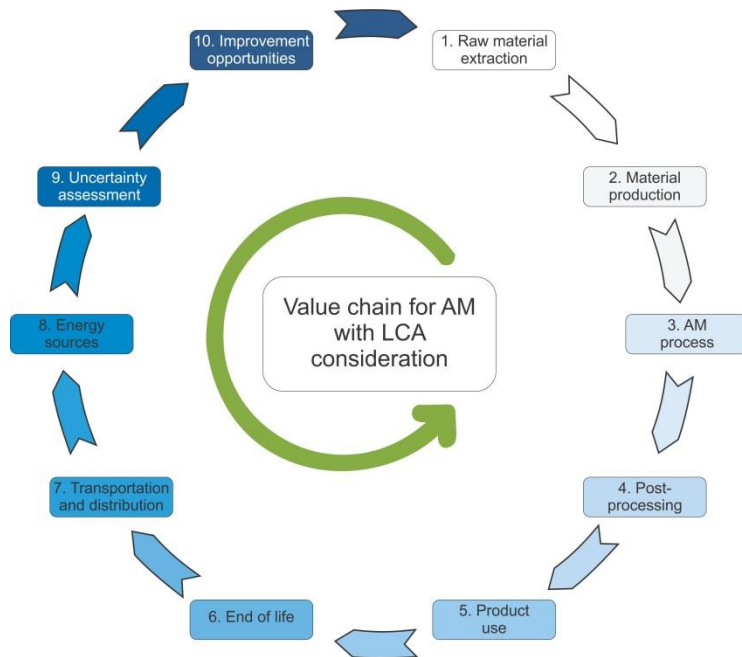


Abbildung 8: Wertschöpfungskette der Lebenszyklusanalyse für die additive Fertigung

Vereinfachte generische Wertschöpfungskette für AM mit LCA:

Ad.1: Bewertung der Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung (Energieverbrauch, Emissionen, etc.).

Zu 2: Verarbeitung von Rohstoffen in eine für den Druck geeignete Form (Filamente, Pulver usw.);
Bewertung des Energieverbrauchs, der Emissionen und des Abfalls bei der Herstellung.

Zu 3: Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs, der Emissionen und der beim Drucken entstehenden Abfälle.

Zu 4: Analyse der Umweltauswirkungen von Nachbearbeitungsschritten, z. B. Entfernung der Trägerstruktur, Reinigung und Nachbearbeitung des gedruckten Objekts.

Zu 5: Schätzung des Energieverbrauchs während der Lebensdauer des Produkts. Unter Berücksichtigung von Faktoren wie Wartung, Reparaturen und Energieeffizienz.

Zu 6: Bewertung der Entsorgungsmöglichkeiten (Recycling, Entsorgung usw.) am Ende des Lebenszyklus. Quantifizierung der Umweltauswirkungen der Entsorgung.

Zu 7: Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs und der Emissionen im Zusammenhang mit dem Transport und der Verteilung von Rohstoffen und Fertigerzeugnissen.

Zu 8: Überblick über alle verwendeten Energieträger während ihres gesamten Lebenszyklus (erneuerbar oder nicht erneuerbar). Normalisierung und Umweltverträglichkeitsprüfung auf der Grundlage der Berücksichtigung aller Energieträger.

Zu 9: Bewertung der Unsicherheit von Daten und Annahmen zum Verständnis des Konfidenzniveaus der LCA-Ergebnisse.

Zu 10: Ermittlung von Optimierungsmöglichkeiten (z. B. Materialauswahl, energieeffizientes Drucken, Abfallreduzierung) und Erforschung von Möglichkeiten für bessere Modelle und LCA-Daten.

Obwohl der geringe Materialabfall von AM umweltfreundlich ist, müssen die Umweltauswirkungen mithilfe der Lebenszyklusanalyse bewertet werden. Die Einführung von AM-Verfahren sollte auch wirtschaftlich bewertet werden, um ihre wirtschaftliche Tragfähigkeit zu gewährleisten. Die Studie *Life Cycle Assessment and Economics of Additive Manufacturing Processes (Lebenszyklusbewertung und Wirtschaftlichkeit additiver Fertigungsverfahren)*⁵⁶ gibt einen Überblick über bestehende Studien zur Lebenszyklusbewertung und wirtschaftlichen Bewertung von AM-Verfahren. Die Leistung von AM-Prozessen wurde auch mit traditionellen Fertigungstechnologien verglichen und die Umstände, unter denen AM im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren umweltfreundlicher und kostengünstiger ist. AM-Praktiker können diese Übersicht nutzen, um ein wirtschaftlicheres und umweltfreundlicheres Herstellungsverfahren für ihre Produkte auszuwählen und Emissionen und Produktionskosten zu senken.

Nachfolgend finden Sie auch eine Zusammenfassung des Berichts *Ex-ante ecological performance of additive manufacturing technologies*⁵⁷, der 2023 von Wood K plus (Dr. Franziska Hesser, Julia Velkovski) und Fraunhofer Austria (Dr. Arko Steinwender) erstellt wurde. Um das ökologische Potenzial von AM-Fertigungstechnologien besser auszuschöpfen, war es ihr Ziel, die Umweltaspekte und potenziellen Auswirkungen während der Entwicklung für die industrielle Anwendung systematisch zu untersuchen und Handlungsempfehlungen abzuleiten:

Ziel der Studie war es, mit Hilfe eines Bottom-up-Ansatzes (Technologie- oder Anwendungsperspektive) und eines Top-down-Ansatzes (Lebenszyklusanalyse-Perspektive) zu ermitteln, wo der ökologische Nutzen von AM lokalisiert werden kann und wie er quantifiziert wird. Ein weiteres Ziel war es, herauszufinden, wie diese ökologischen Vorteile genutzt werden können, um den Wandel zu einer nachhaltigeren Produktion und Wirtschaft zu unterstützen. Zum einen wurden in der Studie die ersten Vorteile von AM in Bezug auf die Umweltauswirkungen identifiziert, nämlich geringer Rohstoffbedarf, flexibles Produktdesign, Dezentralisierung und damit verbundene Transportreduzierung, weniger Einzelteile, Automatisierung, Reparaturmöglichkeiten durch AM und Leichtbau. Andererseits wurden auch der Energie- und der Materialverbrauch als kritische Schwerpunktbereiche identifiziert. Die größten Energieverbraucher sind die Rohstoffgewinnung, die Materialproduktion und der Druckprozess. Der Energieverbrauch hängt von den Nutzungsmustern, dem Einsatz der Geräte, dem gewählten Material, dem AM-Prozess und der Komplexität der Bauteile ab. Einsparungen können jedoch durch eine optimierte Anordnung der Bauteile, eine Optimierung des Herstellungsprozesses und eine geeignete Prozess- und Bauteilgestaltung erzielt werden. Während die

Verwendung von Materialien wegen ihrer mangelnden Wiederverwertbarkeit kritisiert wird, wird die Vielfalt und Effizienz der Materialien als Vorteil gesehen.

Zweitens wurden in der Studie auch die Herausforderungen und Potenziale von AM im Vergleich zu konventionellen Verfahren ermittelt. Zu diesen Herausforderungen gehören die Steigerung der Effizienz des Pulvereinsatzes, die Steigerung der Effizienz des Produktionsprozesses, der hohe Energieverbrauch bei der Produktion, die geringe Oberflächenqualität, der hohe Energieverbrauch bei der Pulverproduktion, das Recycling von Abfällen und die umweltfreundliche Nutzung größerer Mengen. Als Potenziale werden Materialeinsparungen, Leichtbau, verbesserte Umweltleistung bei hoher Kapazitätsauslastung, die Möglichkeit des Einsatzes hybrider Verfahren, hohe Effizienz bei kleinen Chargen, die Möglichkeit der umweltfreundlichen Produktion geometrisch komplexer Teile und flexibles Design, Abfallminimierung, die Möglichkeit der werkzeuglosen Produktion, Energieeinsparungen während des gesamten Produktlebenszyklus und die Möglichkeit der individualisierten Großserienproduktion benutzerdefinierter Komponenten genannt.

In Bezug auf die Lebenszyklusanalyse stellen die Autoren der Studie fest, dass der Vergleich vorhandener Umweltdaten eine Herausforderung darstellt, da die Studien unterschiedliche funktionale Einheiten und Systemgrenzen wählen. Außerdem beziehen sich die Daten in der Regel auf eine bestimmte Anwendung, ohne dass die Möglichkeit der Übertragbarkeit auf andere Anwendungen berücksichtigt wird. Die wissenschaftliche Gemeinschaft fordert daher standardisierte Methoden und Modelle.

Die Autoren der Studie führten auch eine Reihe von multiperspektivischen Expertengesprächen auf Workshops durch, um in Zusammenarbeit mit den relevanten Interessengruppen der Branche die Herausforderungen und Auswirkungen auf AM zu ermitteln. Auf der Grundlage dieser Befragungen wurden als wichtigste Herausforderungen Energieeffizienz, Ressourceneinsparung und Abfallverringerung, Recycling und Kreislaufwirtschaft, Umweltschutz durch Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe, CO₂-Einsparungen und Verlängerung der Lebensdauer von Produkten genannt. AM hat tendenziell einen positiven Einfluss auf die Ressourcenschonung, die CO₂-Einsparung und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten.

Schließlich werden in der Studie Handlungsempfehlungen für die ökologische Erzeugung durch AM auf der Grundlage einer Literaturübersicht, von Interviews mit Branchenexperten und einer Lebenszyklusanalyse vorgeschlagen. Die Handlungsempfehlungen wurden in drei Gruppen unterteilt: Industrie, Forschung und Öffentlichkeit. Für die Industrie empfiehlt die Studie den Einsatz von Ökodesign auf der Grundlage einer intelligenten Produktnutzung und -herstellung, die Verlängerung der Produktlebensdauer und das Recycling von Materialien sowie die Verwendung von biobasierten Materialien und Sekundärmaterialien, die Verwendung von Abfallmaterialien sowohl innerhalb als auch außerhalb des AM-Sektors, die Optimierung und Automatisierung von Prozessen und die Stärkung des

Erfahrungsaustauschs zwischen Unternehmen. Für die Forschung und Entwicklung empfehlen die Autoren die Entwicklung von Lösungen zur Erleichterung der Ökobilanzierung, die systematische Behandlung verschiedener Nutzungskonzepte und Anwendungen, die Steigerung der Effizienz von Materialien und Produktion sowie die Entwicklung neuer oder verbesserter Simulationswerkzeuge auf der Grundlage von Ökodesign-Prinzipien. Schließlich empfiehlt die Studie der Politik und des öffentlichen Sektors eine Aufstockung der Mittel für Forschungs- und Ausbildungsprogramme, Anreize zur Berücksichtigung der Lebenszyklen auf der Ebene des Endprodukts, den Informationsaustausch und die Entwicklung gemeinsamer Strategien für eine umweltfreundlichere Produktion, einen verstärkten Dialog mit dem AM-Sektor, die Schaffung von mehr Recycling-Infrastrukturen und die Förderung der Verwendung von Sekundärmaterialien, die Schaffung von Normen für Qualitätsanforderungen und Benchmarks für die verschiedenen Anwendungen und AM-Industrien sowie die Schaffung von Anreizen in anderen Branchen.

Um das Verständnis der Umweltauswirkungen zu verbessern, ist es notwendig, gründliche LCA-Studien für jede der oben erwähnten Phasen des AM-Prozesses durchzuführen und jeden Fall für sich zu betrachten.

4 Bewährte Verfahren in der additiven Fertigung und Empfehlungen für KMU

AM hat sich schnell entwickelt und bietet verschiedene Möglichkeiten für Innovation und Effizienz. Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) kann die Einführung von AM die Produktivität und Produktqualität erheblich steigern. Nach Durchsicht der Literatur stellen wir fest, dass AM in verschiedenen Bereichen erfolgreich eingesetzt wurde, z. B. bei Automobilteilen, medizinischen und Sportgeräten, verschiedenen komplexen Industrieprodukten usw. Im Folgenden stellen wir einige Erfolgsgeschichten der AM-Implementierung vor, die ihren Platz auf dem Markt und in der Endanwendung gefunden haben.

4.1 Beispiele für bewährte Verfahren in der additiven Fertigung

GE Aviation druckt seit 2015 aktiv 3D-Kraftstoffdüsen für Flugzeuge und hat 2018 in seinem additiven Fertigungszentrum in Auburn, Alabama, insgesamt 30.000 3D-gedruckte Kraftstoffdüsen hergestellt. GE nutzte die additive Fertigung, um eine einteilige Treibstoffdüse herzustellen, die zuvor aus 20 verschiedenen Teilen gefertigt wurde. Dadurch wurde die Leistung verbessert, das Gewicht um 25 % reduziert und die Haltbarkeit erhöht.

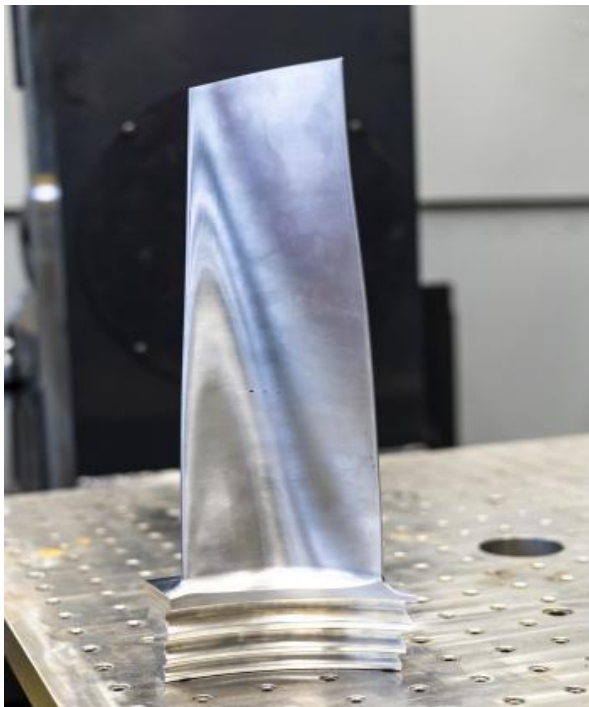


Quelle: LEAP fuel nozzle <https://3dprint.com/284243/ge-aviation-announces-100000th-3d-printed-fuel-nozzle-shipped-from-auburn-plant/>

Ein wissenschaftlicher Aufsatz mit dem Titel *Simulation-Based Analysis of Additive Manufacturing Systems for Fuel Nozzles*⁵⁸ befasst sich mit dem Einsatz der additiven Fertigungstechnologie für die Herstellung von Treibstoffdüsen für Flugzeuge. Im Mittelpunkt dieser Studie steht die Herstellung von Gasturbinentreibstoffdüsen mittels additiver Fertigungstechnologie. Sie verwendet diskrete

Ereignismodelle und einen Simulationsansatz zur Bewertung der Produktionsleistung unter Berücksichtigung verschiedener Produktionsparameter wie Ressourcenauslastung und Durchlaufzeit. Die Studie zeigt Fortschritte in der additiven Fertigung auf, insbesondere im Zusammenhang mit einer neuen GE-Brennstoffdüse für das CFM International LEAP-Triebwerk, die deutlich leichter und effizienter ist als herkömmliche Konstruktionen.

Das Oak Ridge National Laboratory (ORNL)⁵⁹ hat in Zusammenarbeit mit Siemens Technology große, drehbare Dampfturbinenschaufeln für Kraftwerke (Gasturbinenschaufeln) im 3D-Metalldruckverfahren hergestellt. Diese Leistung, bei der die additive Fertigung von Drahtbögen (WAAM) zum Einsatz kommt, stellt einen bedeutenden Meilenstein in der Produktion großer Metallteile dar, insbesondere für den Bereich der Energieerzeugung. Siemens hat Gasturbinenschaufeln mit Hilfe der additiven Fertigung hergestellt, die komplexe interne Kühlkanäle ermöglicht, die die Effizienz und Leistung verbessern.



Die konturierten Schaufeln einer Dampfturbine erfordern eine sehr präzise Form mit konturierten Kurven, die sich zur Spitze hin verjüngen. 3D-Druck mit einem Drahtbogen wurde bisher noch nicht zur Herstellung eines rotierenden Bauteils dieser Größenordnung verwendet (Carlos Jones/ORNL).

Quelle: <https://3dprint.com/305846/siemens-and-ornl-3d-print-25-pound-turbine-blade-with-waam/>

Zu den wichtigsten Herausforderungen bei der Herstellung von Turbinenschaufeln mit AM gehören die Optimierung der Parameter der additiven Fertigungsverfahren, die Nachbearbeitung der gedruckten Teile und die Gewährleistung, dass die mechanischen Eigenschaften den strengen Anforderungen für Turbinenschaufeln entsprechen. Eine Reihe von Unternehmen und Forschungsgruppen befassen sich bereits mit diesen Herausforderungen, und auch in der wissenschaftlichen Literatur ist eine umfangreiche Literatur zu diesem Thema zu finden.⁶⁰⁶¹

Ayush Sinha et al. haben Methoden zur Bearbeitung von 3D-gedruckten Schaufeln für Flugzeugturbinen untersucht und präsentieren experimentelle Ergebnisse von Tests dieser Schaufeln an

einer 13-MW-Industriegasturbine vom Typ SGT-400. Sie stellten fest, dass die 3D-gedruckten Schaufeln extremen Betriebsbedingungen standhalten können.⁶²

Einige der komplexesten Herstellungsverfahren, die routinemäßig durchgeführt werden, dienen der Produktion von implantierbaren orthopädischen Geräten. Um Implantate herzustellen, die nicht nur geometrisch präzise sind, sondern auch aus einem Material bestehen, das die poröse Struktur des Knochens nachahmt, z. B. bei Wirbelsäulen Anwendungen, hat Stryker nicht nur ein eigenes Materialherstellungsverfahren entwickelt, sondern auch eine eigene Hard- und Software für die additive Fertigung von Komponenten.⁶³ Stryker arbeitet seit mehr als 10 Jahren auf dem Gebiet der additiven Fertigung und sagt, dass das von ihm entwickelte Verfahren zur Herstellung von chirurgischen Implantaten "bisher schwierige oder unmögliche Produktdesigns ermöglicht". Einer der grundlegenden Unterschiede, die Stryker für additive Anwendungen entwickelt hat, ist die so genannte "Titanium In-Growth Technology". Die Titanlegierung erzeugt Teile, die stark, steif und vor allem biokompatibel sind. Stryker nutzt die additive Fertigung, um maßgeschneiderte, patientenspezifische Implantate mit komplexen Geometrien herzustellen, die eine bessere Knochenintegration fördern.



Das Stryker Monterey AL Interbody System wird mit einem patentierten Pulverfusionssystem namens "AMagine" hergestellt. Stryker stellt Implantate mit einer porösen Matrix her, die den Knochen nachahmt. Während der Operation setzt der Chirurg einen Cage ein, der mit einem Zubehörteil versehen ist, das die Nocken (Goldelemente) hält. Drei Schrauben werden durch den Cage und in die Wirbelkörper eingesetzt. Die Clips werden dann gedreht, um sie zu fixieren. Foto: Stryker

Quelle: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/stryker-using-additive-for-implants>

Der Übersichtsartikel Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgery (Dreidimensionaler Druck in der orthopädischen Chirurgie) hebt die transformative Rolle des 3D-Drucks in der orthopädischen Chirurgie hervor und unterstreicht dessen Fähigkeit, patientenspezifische Implantate und Instrumente zu erstellen. Er erörtert die Vorteile des 3D-Drucks, einschließlich der individuellen Anpassung, der Produktionseffizienz und der Vorteile personalisierter Implantate, die die Osseointegration verbessern und die Operationszeit verkürzen. Außerdem wird das künftige Potenzial des 3D-Biodrucks bei der Knochen- und Knorpelreparatur erörtert und auf Einschränkungen eingegangen, darunter die Notwendigkeit fortschrittlicher Modellierungssoftware und behördlicher Richtlinien, die eine breitere Anwendung im klinischen Bereich behindern könnten.⁶⁴⁶⁵

Mehrere Hersteller, darunter auch Adidas, sind daran interessiert, die 3D-Drucktechnologie im Schuhdesign einzusetzen. Sie wissen, dass sich damit komplexe Formen aus verschiedenen Materialmischungen herstellen lassen. Adidas wollte mit Hilfe des 3D-Drucks das Potenzial der Technologie nutzen, um unglaublich komplexe Netzstrukturen zu schaffen, die auf eine optimale Dämpfung und Leistung zugeschnitten sind. In Zusammenarbeit mit Carbon wurde das Design der 3D-gedruckten Futurecraft-Zwischensohle auf der Grundlage von optimierten Daten (Druckpunkte beim Tragen der Schuhe) entwickelt, die von Sportlern aus aller Welt gesammelt wurden. Dadurch wird die komplizierte Gitterstruktur der Zwischensohle in bestimmten Bereichen dichter, härter oder weicher. Die Zwischensohle wurde mit [dem M2 3D-Drucker von Carbon](#) (Carbon Digital Light Synthesis Technologie) aus UV-Harz und Polyurethan gedruckt. Genau dieser Materialmix absorbiert auch mehr Energie als eine Standard-Zwischensohle, was die Laufleistung verbessern soll. Die Zwischensohlen sind außerdem recht glatt, was sie leicht zu reinigen macht.



Quelle: <https://all3dp.com/2/adidas-3d-printed-shoes/>

Auch andere Forschungsarbeiten zu komplexen Netzstrukturen für (Sport-)Schuhe finden aufgrund der Fortschritte im Bereich AM große Beachtung. So untersuchte die Studie "*Efficacy of Auxetic Lattice Structured Shoe Sole*"⁶⁶ die Auswirkungen von Schuhsohlen auf die Plantar-Biomechanik und den Komfort. Der Schwerpunkt liegt auf dreidimensionalen, reversiblen Gitterstrukturen, die die Druckverteilung am Fuß optimieren und den Komfort erhöhen können. Die Forschung vergleicht verschiedene durch 3D-Druck hergestellte Gitterstrukturen und zeigt, dass diese Strukturen einzigartige mechanische Eigenschaften haben, die für Schuhe von Vorteil sind. Ein ähnliches wissenschaftliches Papier über das Design von Schuhsohlen mit Maschenstrukturen, die mit AM hergestellt wurden, erörtert die Möglichkeiten der individuellen Gestaltung von Schuhsohlen unter Verwendung verschiedener Maschentopologien, darunter Diamant, Netz, X-Form.⁶⁷ Die Studie zeigt auf, wie unterschiedliche Gittermuster die mechanischen Eigenschaften von Schuhsohlen beeinflussen können. Die AM-Technologie ist sehr eng mit der Digitalisierung verbunden. Eine maßgeschneiderte poröse Gittersohle kann ein datengesteuertes Design haben, was durch die Untersuchung einer Methode zur Erzeugung einer vollständig maßgeschneiderten porösen Schuhsohle unter Verwendung eines

datengesteuerten Designoptimierungsalgorithmus demonstriert wurde. Der Ansatz ermöglicht die Anpassung der Durchmesser der Querschnitte innerhalb der Netzstruktur, um den maximalen Plantardruck zu minimieren, was auf das Potenzial für maßgeschneiderte Schuhwerkklösungen hinweist, die Erkrankungen wie diabetische Geschwüre verhindern oder behandeln können.⁶⁸

Die bahnbrechenden Informationen beziehen sich auf die Tatsache, dass Unternehmen aus der Medizin-, Dental-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie bereits FDA-Zulassungen für den Einsatz der additiven Fertigung erhalten haben. Eines dieser Unternehmen ist Align Technology. Cubicure (im Besitz von Align Technology) hält Patente im Zusammenhang mit der Heißlithografie-Technologie und nutzt hochpräzise 3D-Druckverfahren, die auf einem Wärme- und Beschichtungsmechanismus basieren, um starke, temperaturbeständige Polymere aus hochviskosen Harzen herzustellen. Align erhielt im Dezember 2023 die FDA-Zulassung für sein erstes kieferorthopädisches Gerät, das direkt mit einem 3D-Drucker gedruckt wurde, das Invisalign Palatal Expander System, das die skelettale und dentale Expansion bei jüngeren Patienten behandelt.⁶⁹ Align Technology nutzt den 3D-Druck zur Herstellung individueller Invisalign-Schienen für die kieferorthopädische Behandlung und revolutioniert die Dentalbranche mit personalisierten Produkten.



Weniger schmerzhaft als herkömmliche Gaumenspanner.
Klinisch erwiesenermaßen sicher und wirksam.
Revolutionäres neues Design ohne Metallschrauben.

Quelle: <https://www.invisalign.com/palatal-expander>

Die Technologie der additiven Fertigung hat sich in verschiedenen Industriezweigen durchgesetzt, und 3D-gedruckte Produkte erscheinen nun zunehmend auf dem Markt. Unternehmen und Branchen passen AM an ihre spezifischen Bedürfnisse an. Wie aus der Literatur hervorgeht, arbeiten sie häufig mit Herstellern von 3D-Druckgeräten, IT-Designern und anderen Experten zusammen, um die AM-Prozesse so zu verbessern, dass die Vorteile/Effizienz/Einfachheit der Herstellung komplexer Produkte für ihre Produkte und Fertigungsprozesse erhöht werden.

Unternehmen, die AM bereits in ihre Prozesse integriert haben, veröffentlichen auch die Ergebnisse, oft zusammen mit Leitlinien, die für KMU nützlich sein können. Im Folgenden haben wir einige Empfehlungen gesammelt und formuliert, die in der Literatur häufig vorkommen.

1.2 Empfehlungen für KMU

Im Folgenden werden einige Ratschläge für KMU zur hybriden (AM-konventionellen) Fertigung gegeben. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die hybride Fertigung zwar langfristig die Wettbewerbsfähigkeit steigern könnte, die KMU jedoch die finanziellen und betrieblichen Kosten sowie andere Fragen zum Zeitpunkt der Entscheidung für ein hybrides Modell sorgfältig abwägen müssen.

Derzeit sind die Kosten für neue AM-Ausrüstung hoch, insbesondere in fortgeschrittenen Industrien (z. B. Luft- und Raumfahrt, Gesundheitswesen). Obwohl die hybride Fertigung Prozesse rationalisieren kann, erfordert die Anschaffung neuer AM-Maschinen parallel zu herkömmlichen Maschinen erhebliche Anfangsinvestitionen. Die Kapitalrendite (ROI) der hybriden Fertigung kann länger auf sich warten lassen. Darüber hinaus sind für den Betrieb und die Wartung der neuen Maschinen qualifizierte Arbeitskräfte erforderlich. Zu Beginn können alternative Lösungen für KMU zur Senkung dieser Kosten in der Auslagerung/Miete oder in der modularen Aufrüstung bestehender konventioneller Maschinen bestehen, die manchmal ohne vollständigen Austausch mit grundlegenden AM-Funktionen nachgerüstet werden können.

- Beginnen Sie mit dem Prototyping, um die Zeit und die Kosten für die Entwicklung neuer Produkte zu reduzieren. Zu diesem Zweck wäre es eine gute Idee, in Desktop-3D-Drucker für das interne Prototyping zu investieren, die eine schnelle Designvalidierung ermöglichen.

Zum Beispiel:

<https://formlabs.com/applications/rapid-prototyping/>

<https://www.3dsourced.com/rankings/best-3d-printer-for-small-business/>

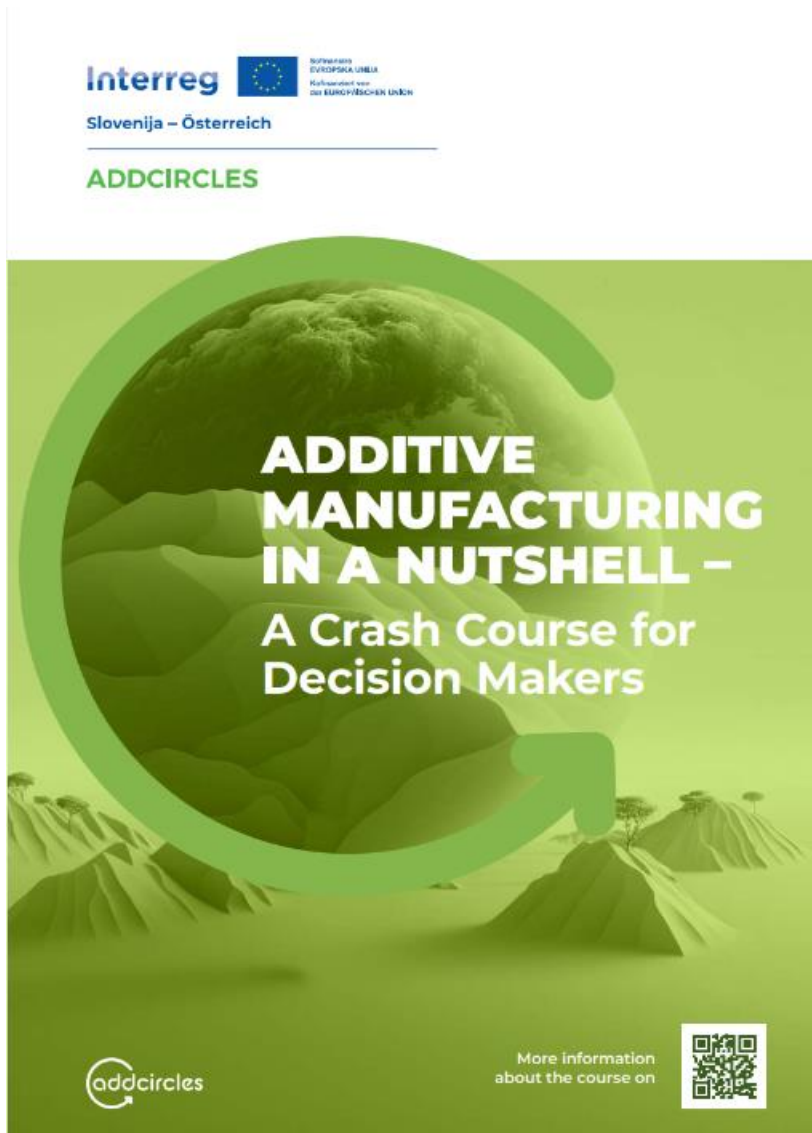
- Nutzen Sie die Vorteile der Individualisierung und bieten Sie einzigartige Produkte an, die auf die Bedürfnisse der einzelnen Kunden zugeschnitten sind. Durch die Erkundung des Marktes und der Nischen, in denen die Individualisierung einen erheblichen Mehrwert schafft (z. B. medizinische Geräte und Sportprodukte), können wichtige Feinheiten geschaffen/entwickelt/bearbeitet werden. Dies kann einen Vorteil gegenüber der Konkurrenz schaffen.
- Setzen Sie auf eine hybride Produktion, indem Sie traditionelle und additive Fertigung kombinieren, um die Produktion zu optimieren. Nutzen Sie den 3D-Druck für die Herstellung komplexer oder kleiner Komponenten, während Sie für einfachere Teile mit höheren Stückzahlen herkömmliche Verfahren einsetzen. Die Forschung hat gezeigt, dass die Effizienz und Rentabilität eines Fertigungsverfahrens (AM oder traditionell) von der Komplexität des Produkts und der Massenproduktion (Anzahl der produzierten Teile) abhängt.

- Konzentration auf Materialinnovationen zur Verbesserung der Produktfunktionalität und -leistung. Erforschung und Verwendung fortschrittlicher Materialien wie Hochleistungspolymere, Metalle und Verbundwerkstoffe, die für die additive Fertigung geeignet sind. Die Entwicklung neuer Materialien wird immer eine der Variablen sein, die es ermöglichen, sowohl den 3D-Druck (Prozess) als auch die Leistung des 3D-gedruckten Produkts zu verbessern.
- Verbesserung der Flexibilität der Lieferkette, um die Abhängigkeit von externen Lieferanten zu verringern und die Lieferzeiten zu verkürzen. Nutzung der additiven Fertigung zur bedarfsgerechten Herstellung von Ersatzteilen und Werkzeugen, um die Lagerkosten zu senken und die Flexibilität des Unternehmens zu erhöhen.⁷⁰
- Schulung und Weiterbildung der Arbeitskräfte, um Fachwissen über die neuesten AM-Technologien und -Methoden zu vermitteln. Investitionen in Schulungsprogramme und Workshops, um die Mitarbeiter in den Grundsätzen des Design for Additive Manufacturing (DfAM) und in der Bedienung von AM-Maschinen zu schulen.

Im Jahr 2024 werden mehrere Kurse und Programme zur Aus- und Weiterbildung in AM-Technologien angeboten:

- a) MIT xPRO, Additive Manufacturing for Innovative Design and Production (Additive Fertigung für innovatives Design und Produktion): Dieses professionelle Zertifikatsprogramm vermittelt ein umfassendes Verständnis der AM-Technologien mit Schwerpunkt auf innovativen Design- und Fertigungsmethoden. Es umfasst praktische Übungen, Fallstudien und Interaktion mit Industrieexperten (<https://learn-xpro.mit.edu/additive-manufacturing>).
- b) In Europa, Italien, Rom: 4th International Conference on 3D Printing and Additive Technologies (iC3DPAM-2025) 20-22 Februar 2025. Die Konferenzen bieten ein Forum für Forscher, die an allen Aspekten des 3D-Drucks und der additiven Fertigung arbeiten.
- c) Europa, Frankreich, Paris: Inovine Meetings LLC bietet eine außergewöhnliche Gelegenheit, mit Wissenschaftlern, Astronauten und Experten von Weltrang auf dem World 3D Printing Summit vom 4. bis 5. Juni 2025 in Paris, Frankreich, in Kontakt zu treten. Ziel dieser Konferenz ist es, die neuesten Entwicklungen, Trends und Anwendungen in diesem Bereich vorzustellen und den Teilnehmern ein umfassendes Verständnis für das Potenzial und die Auswirkungen des 3D-Drucks zu vermitteln.

- d) Europa, Österreich, Wien: Die 7. M3d+it CONFERENCE wird am 29. und 30. November 2024 in Wien stattfinden. Neben wissenschaftlichen Herausforderungen wie innovativen Materialien für 3D-druckbare Implantate, Fortschritten im Mikro-/Nano-3D-Druck und neuen Methoden für das Design von Medizinprodukten werden auf dieser Konferenz auch praktische Fragen wie regulatorische Hindernisse und die Kostenerstattung für den 3D-Druck am Point-of-Care behandelt.
Die Veranstaltung umfasst internationale Sitzungen mit Vertretern der nationalen 3D-Druck-Netzwerke in ganz Europa und Einblicke in laufende europäische Forschungsprojekte. Darüber hinaus wird auf der Konferenz das jährliche Treffen der "European Special Interest Group on 3D Technologies in Hospitals" stattfinden.
- e) UC San Diego, Additive Manufacturing Technologies: Dieser Kurs behandelt eine Reihe von 3D-Drucktechnologien wie Fused Deposition Modelling (FDM), Küvettenpolymerisation, Binder-Jetting und Pulverbettfusion. Er legt den Schwerpunkt auf die Integration von AM in die Industrie 4.0 und umfasst Schulungen zu unterstützender Software, Materialien und Nachbearbeitung (<https://extendedstudies.ucsd.edu/courses-and-programs/additive-manufacturing-technologies>).
- f) University of Illinois in Urbana-Champaign, mit Spezialisierung auf 3D-Druck und additive Fertigung. Diese Spezialisierung besteht aus fünf Kursen, die sich mit den Hardware- und Softwareaspekten des 3D-Drucks befassen. Er umfasst praktische Projekte, die es den Studenten ermöglichen, 3D-gedruckte Objekte zu entwerfen, herzustellen und mit anderen zu teilen (<https://www.coursera.org/specializations/3d-printing-additive-manufacturing>).
- g) Das ADDCIRCLES Interreg SLO-AUT Projekt bietet auch verschiedene Workshops und Präsentationen an, um das Wissen über die AM-Technologie zu erweitern.



- Zusammenarbeit mit AM-Dienstleistern, um ohne größere Investitionen Zugang zu fortschrittlichen Technologien zu erhalten. Zusammenarbeit mit spezialisierten AM-Dienstleistungsbüros, um die Anforderungen der High-End-Fertigung zu erfüllen oder um neue Materialien und Techniken zu erforschen. Die Zusammenarbeit mit Experten für Digitalisierung und künstliche Intelligenz hat sich ebenfalls als gute Idee erwiesen.
- Erstellung von Prüf- und Qualitätssicherungsprotokollen speziell für additive Fertigungsverfahren, einschließlich Materialprüfung und Inspektion gedruckter Teile. Überwachung und Prüfung zur Gewährleistung einer gleichbleibenden und zuverlässigen Produktqualität sind der Schlüssel zur Einführung neuer Prozesstechnologien.

- Vor der Einführung neuer Prozesse ist es ratsam, neue Geschäftsmodelle zu untersuchen, um neue Einnahmequellen zu erschließen und sich vom Wettbewerb abzuheben. So können neue Ideen entwickelt und der derzeitige Stand der besten Praktiken untersucht werden. Erwägen Sie die Produktion auf Abruf, digitale Bestände und Abonnementdienste für maßgeschneiderte Produkte.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-7071-9_5

<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-mainstreaming-of-additive-manufacturing>

- Schließlich ist ein nachhaltiger Ansatz heute unverzichtbar, um die Umweltauswirkungen zu verringern und die wachsende Nachfrage nach nachhaltigen Verfahren und Produkten zu befriedigen. Nutzen Sie AM, um Materialabfälle zu reduzieren, leichte Komponenten herzustellen und biologisch abbaubare oder recycelte Materialien zu erforschen.⁷¹⁷²
- Denken Sie daran, dass Innovation eine konstante Variable bei der Herstellung eines jeden Produkts ist, da sie die Wettbewerbsfähigkeit immer verbessern kann. Um die Bedeutung der Innovation für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit zu verdeutlichen, betrachten Sie das Muster der Innovations-S-Kurve, die zeigt, wie sich Branchen, Produkte oder Geschäftsmodelle im Laufe der Zeit entwickeln. Kontinuierliche Innovation ist der Schlüssel, um auf dem Markt wettbewerbsfähig zu bleiben (Future Business Tech; Quelle: <https://www.futurebusinesstech.com/blog/the-s-curve-pattern-of-innovation-a-full-analysis>).

5. Schlussfolgerung

Einer der wichtigsten Vorteile von AM-Technologien im Kontext von Industrie 4.0 ist ihre Fähigkeit, agile und flexible Produktionsprozesse zu ermöglichen. Die herkömmliche Fertigung beruht häufig auf Massenproduktionsverfahren, die einen hohen Rüst- und Werkzeugaufwand erfordern, was zu höheren Kosten und längeren Vorlaufzeiten führt. Im Gegensatz dazu ermöglicht die additive Fertigung die Produktion komplexer, kundenspezifischer Kleinserien mit kürzeren Vorlaufzeiten und bietet so eine beispiellose Flexibilität, um die Anforderungen dynamischer Märkte zu erfüllen.

Der 3D-Druck wird am häufigsten mit Umweltfragen und Lebenszyklusanalysen in Verbindung gebracht.

(i) Verringerung des Materialabfalls, da der 3D-Druck, insbesondere bei Verwendung von Techniken wie Extrusion oder Pulverschmelzen, effizienter sein kann, da die Objekte Schicht für Schicht aufgebaut werden; (ii) der 3D-Druck kann für einige Anwendungen energieeffizienter sein, wenn er wenig Energie verbraucht und nur dann, wenn es notwendig ist, das Material zu schmelzen oder zu verschmelzen. Traditionelle subtraktive Fertigungsverfahren wie die CNC-Bearbeitung können mehr Energie erfordern, um überschüssiges Material zu entfernen; (iii) lokale und bedarfsgerechte Produktion, was besonders für die Kleinserienfertigung wichtig ist; (iv) die Optimierung des 3D-Drucks ermöglicht die Herstellung komplexer, leichter Strukturen, die mit herkömmlichen Methoden nur schwer oder gar nicht herzustellen wären. Dies kann zu einer Verringerung des Materialverbrauchs und der Transportkosten führen; (v) einige 3D-Druckverfahren, wie z. B. das selektive Laserschmelzen für Metallteile, ermöglichen die Verwendung von recycelten Materialien.

All dies steht im Einklang mit den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft, bei der die Produkte unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit entwickelt werden.

6. Zusätzliche Informationen

Nachhaltigkeit steht in letzter Zeit im Mittelpunkt des Interesses von Unternehmen und Verbrauchern. Daher gewinnt AM als nachhaltige Alternative zur herkömmlichen Fertigung in einigen Fällen wie Rapid Prototyping, Ersatzteile und kundenspezifische Massenfertigung zunehmend an Bedeutung.

AddCircles wird auch eine eingehende Analyse von drei AM-Geschäftsfällen durchführen und einen Bericht auf der Grundlage der LCA- und LCCA-Analysen erstellen.

6.1. Anhang 1

Kapitel 5.1 enthält zusätzliche Erläuterungen zu bestimmten Begriffen und Ausdrücken, die im Bericht verwendet werden, um das Verständnis des Inhalts zu verbessern.

Nr. 1: Impact 2002+: Die neue IMPACT 2002+-Methodik für die Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus sieht die Einführung eines kombinierten Mittelwert-/Schadensansatzes vor, der alle Arten von Lebenszyklusinventarisierungsergebnissen (Basisströme und andere Interventionen) durch 14 Mittelwert-/Wertkategorien mit vier Schadenskategorien verbindet. Für IMPACT 2002+ wurden neue Konzepte und Methoden entwickelt, insbesondere für die vergleichende Bewertung der Humantoxizität und der Ökotoxizität. Die Schadensfaktoren für den Menschen werden für Karzinogene und Nicht-Karzinogene unter Verwendung von Aufnahmebraktionen, besten Schätzungen der Dosis-Wirkungs-Steigungsfaktoren und des Schweregrads berechnet. Die Übertragung von Schadstoffen auf die menschliche Nahrung basiert nicht mehr auf Erhebungen über den Verzehr, sondern auf Daten über die Produktionsmengen in der Landwirtschaft und in der Viehzucht. Innen- und Außenluftemissionen können miteinander verglichen werden, und der intermittierende Charakter von Niederschlägen wird berücksichtigt. Die Wirkungsfaktoren für Humantoxizität und Ökotoxizität beruhen auf Durchschnittswerten und nicht auf konservativen Annahmen. Die anderen Kategorien von Mittelwerten sind an bestehende Charakterisierungsmethoden angepasst (Ecoindicator 99 und CML 2002). Alle Schätzungen der Mittelwerte sind in Einheiten der Referenzsubstanz ausgedrückt und beziehen sich auf vier Schadenskategorien: menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität, Klimawandel und Ressourcen. Die Normalisierung kann in der Mitte oder auf der Ebene der Schädigung erfolgen.

Die Methode IMPACT 2002+ liefert derzeit Charakterisierungsfaktoren für fast 1500 verschiedene AKI-Ergebnisse, die unter <http://www.epfl.ch/impact> heruntergeladen werden können.⁷³

Nr. 2: ReCiPe 2016: ReCiPe 2016 ist eine verbesserte Version der ursprünglich 2008 eingeführten ReCiPe-Methode. ReCiPe 2016 wurde vom niederländischen Nationalen Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt (RIVM), der Radboud Universität Nijmegen, der Norwegischen Universität für Wissenschaft und Technologie und PRé Sustainability entwickelt und dient dazu, die Ergebnisse der Sachbilanz in eine begrenzte Anzahl von Indikatorwerten umzuwandeln, die Kategorien von Umweltauswirkungen darstellen. Die Methode umfasst 18 Mid-Point-Indikatoren und 3 End-Point-Indikatoren, die die menschliche Gesundheit, die Qualität der Ökosysteme und die Ressourcenknappheit als Schutzbereiche abdecken. ReCiPe 2016 aktualisiert frühere Versionen, indem es neue Daten und Forschungsergebnisse einbezieht, charakteristische Faktoren für verschiedene Wirkungskategorien bereitstellt und gegebenenfalls länderspezifische Faktoren bietet.⁷⁴

Nr. 3: Das globale Erwärmungspotenzial (GWP) ist ein Schlüsselthema für die Klimawissenschaft und -politik, da es Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern ermöglicht, den kumulativen Beitrag verschiedener Treibhausgase zur globalen Erwärmung zu verstehen.

Das GWP ist eine Kennzahl, mit der die Wirksamkeit verschiedener Treibhausgase in Bezug auf ihren Beitrag zur globalen Erwärmung über einen bestimmten Zeitraum im Vergleich zu Kohlendioxid (CO₂) verglichen wird, das ein GWP von 1 hat. Das GWP berücksichtigt zwei Hauptmerkmale von Treibhausgasen: (i) ihre Fähigkeit, Infrarotstrahlung zu absorbieren (Strahlungsantrieb genannt), und (ii) ihre Verweildauer in der Atmosphäre (atmosphärische Lebensdauer).

Ein höherer GWP bedeutet, dass das Gas im Vergleich zu CO₂ über den gewählten Zeitraum eine stärkere globale Erwärmung pro Masseneinheit verursacht. So beträgt das GWP von Methan über einen Zeitraum von 100 Jahren etwa das 25-fache des GWP von CO₂, und das GWP von Distickstoffoxid beträgt etwa das 273-fache des GWP von CO₂.⁷⁵

Neben den hier aufgeführten Techniken der Umweltverträglichkeitsprüfung sind die folgenden Techniken in der Literatur am häufigsten zu finden, wobei sie sich z. B. in Umfang, Methodik und Schwerpunkt unterscheiden:

Nr. 4: Die Analyse des ökologischen Fußabdrucks bewertet die menschliche Nachfrage nach der Natur, indem sie den menschlichen Verbrauch natürlicher Ressourcen mit der ökologischen Kapazität der Erde vergleicht, diese wieder aufzufüllen.

Nr. 5: Die Analyse des CO₂-Fußabdrucks konzentriert sich insbesondere auf die Messung und Reduzierung der mit einem Produkt, einer Dienstleistung oder einer Tätigkeit verbundenen Treibhausgasemissionen.

Nr. 6: Die Materialflussanalyse (MFA) überwacht die Materialflüsse und -bestände in einem System, um den Ressourcenverbrauch, das Abfallaufkommen und die Umweltauswirkungen zu verstehen.

Nr. 7: Bei der Bewertung des Wasserfußabdrucks wird die Menge an Wasser geschätzt, die direkt und indirekt durch ein Produkt oder einen Prozess verbraucht wird, wobei sowohl Verbrauchs- als auch Verschmutzungsaspekte berücksichtigt werden.

6.2 Anhang 2

Andere häufig verwendete Begriffe für AM, die in der Literatur zu finden sind:

- Schnelles Prototyping (RP)
- Direkte CAD-Produktion
- Desktop-Produktion
- Sofortige oder sofortige Produktion
- Mehrschichtige Produktion
- Produktion mit Materialentsorgung
- Additive Fertigung
- Freiformbare Feststoffe

News:

USA: Die größte Neuigkeit im Bereich der additiven Fertigung ist derzeit das RAMPT-Projekt (Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology) der Nasa, bei dem die additive Fertigung in großem Maßstab zur Herstellung komplexer, leistungsstarker Raketenkomponenten eingesetzt wird. Das Projekt zielt darauf ab, die Kosten und die Produktionszeit für wichtige Teile wie das RS-25-Triebwerk, eine Schlüsselkomponente für Missionen zur Erforschung des Weltraums, zu senken. Die additive Fertigung ist auch der Schlüssel zur Verkürzung der Markteinführungszeit und zur Verbesserung der Effizienz in der Halbleiterfertigung, wo sie zunehmend zum Einsatz kommt, insbesondere bei der Herstellung komplexer Komponenten mit hoher Dichte wie Halbleiterspeicher und Hochleistungsprozessoren.

Eine besonders wichtige jüngste Entwicklung bei der Regulierung von AM ist die US Federal Aviation Administration (FAA), die einen umfassenden Achtjahresplan zur Integration von AM in die Luft- und Raumfahrtindustrie aufgelegt hat. Dieser Plan ist von entscheidender Bedeutung, da er einen strategischen Ansatz zur Gewährleistung von Sicherheit und Konsistenz bei der Herstellung von Teilen mit AM-Technologien festlegt. Er deckt Schlüsselbereiche wie die Zertifizierung von Teilen, die Wartung von Maschinen sowie Forschung und Entwicklung ab und enthält wichtige Beiträge der NASA, des US-Militärs und anderer wichtiger Branchenakteure.

Darüber hinaus haben auch andere Regierungsbehörden, darunter die General Services Administration (GSA), die aktiv mit AM-Anbietern zusammenarbeitet, um die Möglichkeiten der Bundesbehörden zu erweitern, ihre Aufmerksamkeit auf den weiter gefassten Bereich der Regulierung gelenkt. Diese Initiative spiegelt die zunehmenden Bemühungen der Regierung wider, AM-Technologien sektorübergreifend zu standardisieren und zu regulieren (US General Services Administration). Die Entwicklung von AM-Regelungen wird zunehmend in kritische Branchen integriert, insbesondere in solchen, in denen Sicherheit und Zuverlässigkeit an erster Stelle stehen.

EU: Das regulatorische Umfeld für AM in der Europäischen Union entwickelt sich weiter, insbesondere im Bereich der Medizinprodukte und Arzneimittel. Die Einführung der EU-Medizinprodukte-Verordnung im Jahr 2017, die im Mai 2021 in Kraft trat, hatte einen erheblichen Einfluss auf die Klassifizierung und Regulierung von 3D-gedruckten Medizinprodukten. Die Medizinprodukteverordnung (MDR) hat neu definiert, was ein individuell angefertigtes Medizinprodukt ist. Nach den neuen Vorschriften handelt es sich um ein maßgeschneidertes Produkt, das aufgrund einer schriftlichen Verordnung eines qualifizierten Angehörigen der Gesundheitsberufe über spezifische Konstruktionsmerkmale verfügt, die ausschließlich auf die Verwendung durch einen bestimmten Patienten zugeschnitten sind. Die MDR schließt jedoch Massenprodukte, die lediglich auf einzelne Patienten zugeschnitten sind, von der Einstufung als Sonderanfertigung aus.⁷⁶⁷⁷

7. Literatur

Im Abschnitt Literatur haben wir eine Auswahl an wissenschaftlichen Artikeln und frei zugänglichen Veröffentlichungen im Internet zusammengestellt, die jeweils in direktem Zusammenhang mit einem bestimmten Thema in diesem Bericht stehen. Erkunden Sie diese Quellen, um einen tieferen Einblick in die Details zu erhalten, die Ihr Interesse an diesem Text wecken.

¹ SIST EN ISO/ASTM 52900:2022 Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021) = Aditivna proizvodnja – Splošna načela – Osnove in terminologija (ISO/ASTM 52900:2021)

² Tofail, S.A.M., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., Donoghue, L.O., Charitidis, C.: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater. Today 21, 22–37 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

³ Heng Deng, Jian Lin, Chapter 8 – 4D Printing: 3D Printing of Responsive and Programmable Materials,

Editor(s): Lijie Grace Zhang, John P. Fisher, Kam W. Leong, 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine (Second Edition), Academic Press, 2022, Pages 213-237, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824552-1.00012-8>.

⁴ About Additive Manufacturing. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/materials/>. (Accessed 23.1.2024)

⁵ Ans Al Rashid, Muammer Koç, Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste, Materials Today Sustainability, Volume 24, 2023, 100529, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100529>.

⁶ Matthew A. Olawumi, Bankole I. Oladapo, Omolayo M. Ikumapayi, John O. Akinyoola, Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing, Science of The Total Environment, Volume 905, 2023, 167109, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167109>.

- ⁷ Ruiz, L.E.; Pinho, A.C.; Resende, D.N. 3D Printing as a Disruptive Technology for the Circular Economy of Plastic Components of End-of-Life Vehicles: A Systematic Review. *Sustainability* 2022, *14*, 13256. <https://doi.org/10.3390/su142013256>
- ⁸ Hayley Everett, CIRCULAR ECONOMY 3D PRINTING: OPPORTUNITIES TO IMPROVE SUSTAINABILITY IN AM, 2021 (Accessed 23.1.2024)
- ⁹ John Duffy, PowderCleanse: Solving powder-bed fusion's waste problem. 2023 (Assessed on 10.9.2024)
- ¹⁰ HE, Xing, et al. Powder recycling effects on porosity development and mechanical properties of Hastelloy X alloy during laser powder bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 2022, *55*: 102840.
- ¹¹ Prima Additive S.r.l., Material Reuse in Additive Manufacturing: Prima Additive's Sustainable Approach. 2024 (Assessed on 10.9.2024)
- ¹² Kassab, A.; Al Nabhani, D.; Mohanty, P.; Pannier, C.; Ayoub, G.Y. Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy. *Polymers* 2023, *15*, 3881. <https://doi.org/10.3390/polym15193881>
- ¹³ Ans Al Rashid, Muammer Koç. Additive manufacturing for sustainability, circularity and zero-waste: 3DP products from waste plastic bottles, *Composites Part C*. 2024. Vol. 14, 100463. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100463>.
- ¹⁴ Manu Srivastava, Sandeep Rathee, Vivek Patel, Atul Kumar, Praveennath G. Koppad, A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 21, 2022, 2612-2641, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>.
- ¹⁵ Jörg Bromberger, Julian Ilg, and Ana Maria Miranda. The mainstreaming of additive manufacturing. McKinsey & Company. 2022 (Accessed 1.2.2024)
- ¹⁶ The Top Challenges in Additive Manufacturing and How to Overcome Them. SyBridge Technologies. October 26, 2022 (Accessed 1.2.2024)

¹⁷ 10 of the Biggest Challenges in Scaling Additive Manufacturing for Production in 2020 [Expert Roundup]. AMFG Autonomous Manufacturing. 2022 (Accessed 1.2.2024)

¹⁸ Grant Guggenbiller, Scott Brooks, Olivia King, Eric Constant, David Merckle, Andrew C Weems. 3D Printing of Green and Renewable Polymeric Materials: Toward Greener Additive Manufacturing. ACS Appl. Polym. Mater. 2023. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c02171>

¹⁹ <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2018/04/p-18-161.html> (Accessed 1.2.2024)

²⁰ <https://www.infinam.com/en/3d-printing-materials> (Accessed 1.2.2024)

²¹ Oliver Johnson Stratasys launches new FDA-cleared resin for dental 3D printing TrueDent resin is Stratasys' first FDA-cleared medical device. 2023 (Accessed 1.2.2024)

²² Fabio A. Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo, Joshua M. Pearce. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy, Journal of Cleaner Production 2020, 264, 121602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>.

²³ ISO 14040:2006. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

²⁴ ISO 14044:2006. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

²⁵ Müller Leonard Jan , Kätelhön Arne , Bachmann Marvin , Zimmermann Arno , Sternberg André , Bardow André. A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. Frontiers in Energy Research. 2020, Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00015>

²⁶ Adisa Azapagic, Roland Clift, Allocation of environmental burdens in multiple-function systems, Journal of Cleaner Production, Volume 7, Issue 2, 1999, 101-119, [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00046-8).

²⁷ Simon Fowell, LCA and LCCA – Are you sure you know the difference? 2021 (Accessed 23.1.2024)

²⁸ Marcella Ruschi Mendes Saade, Ammar Yahia, Ben Amor, How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies, Journal

of Cleaner Production, Volume 244, 2020, 118803, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118803>.

²⁹ Samruddha Kokare, J.P. Oliveira, Radu Godina, Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 68, 2023, 536-559, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.007>.

³⁰ SLS vs. DMLS: Differences and Comparison. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/sls-vs-dmls-3d-printing/> (Assessed 11.3.2024)

³¹ Fidan, Ismail, Vivekanand Naikwadi, Suhas Alkunte, Roshan Mishra, and Khalid Tantawi. 2024. "Energy Efficiency in Additive Manufacturing: Condensed Review" *Technologies* 12, no. 2: 21. <https://doi.org/10.3390/technologies12020021>

³² ISO/ASTM 52910:2018. Additive manufacturing—Design—Requirements, guidelines and recommendations.

³³ P. Ramesh and Sekar Vinodh. Analysis of factors influencing energy consumption of material extrusion-based additive manufacturing using interpretive structural modelling, *Rapid Prototyping Journal*, 2021, 27, (7), 1363-1377. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0100>

³⁴ Vidakis, Nectarios, Markos Petousis, Nikolaos Mountakis, Amalia Moutsopoulou, and Emmanuel Karapidakis. 2023. "Energy Consumption vs. Tensile Strength of Poly[methyl methacrylate] in Material Extrusion 3D Printing: The Impact of Six Control Settings" *Polymers* 15, no. 4: 845. <https://doi.org/10.3390/polym15040845>

³⁵ Fidan, Ismail, Vivekanand Naikwadi, Suhas Alkunte, Roshan Mishra, and Khalid Tantawi. 2024. "Energy Efficiency in Additive Manufacturing: Condensed Review" *Technologies* 12, no. 2: 21. <https://doi.org/10.3390/technologies12020021>

³⁶ JIANG, Sheng. Processing rate and energy consumption analysis for additive manufacturing processes: Material extrusion and powder bed fusion. 2017. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.

-
- ³⁷ Top, N., Sahin, I., Mangla, S. K., Sezer, M. D., & Kazancoglu, Y. (2023). Towards sustainable production for transition to additive manufacturing: a case study in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 61(13), 4450-4471.
- ³⁸ Garcia, F. L., Nunes, A. O., Martins, M. G., Belli, M. C., Saavedra, Y. M., Silva, D. A. L., & Moris, V. A. D. S. (2021). Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1604-1622.
- ³⁹ Ramadugu, S., Ledella, S., Gaduturi, J. et al. Environmental life cycle assessment of an automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing. *Int J Interact Des Manuf* 18, 847–858 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01532-0>
- ⁴⁰ KELLENS, Karel; Yasa, Evren; Dewulf, Wim; Duflou, Joost R. Environmental assessment of selective laser melting and selective laser sintering. *methodology*, 2010, 4(5).
- ⁴¹ Dotchev, K. and Yusoff, W. (2009), "Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15 No. 3, pp. 192-203.
- ⁴² Hari P.N. Nagarajan, Karl R. Haapala. Environmental Performance Evaluation of Direct Metal Laser Sintering through Exergy Analysis, *Procedia Manufacturing*, 2017, 10, 957-967. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.087>.
- ⁴³ van Sice, C., & Faludi, J. (2021). Comparing environmental impacts of metal additive manufacturing to conventional manufacturing. *Proceedings of the Design Society*, 1, 671-680. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.67>
- ⁴⁴ Fabricio Leon Garcia, Andréa Oliveira Nunes, Mariane Guerra Martins, Maria Cristina Belli, Yovana M.B. Saavedra, Diogo Aparecido Lopes Silva & Virgínia Aparecida da Silva Moris (2021) Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers, *International Journal of Sustainable Engineering*, 14:6, 1604-1622, DOI: [10.1080/19397038.2021.1990435](https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1990435)
- ⁴⁵ Jung S, Kara LB, Nie Z, Simpson TW, Whitefoot KS. Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production? *Environ Sci Technol*. 2023 Apr 25;57(16):6373-6386. doi: 10.1021/acs.est.2c04927. Epub 2023 Apr 17. PMID: 37066969; PMCID: PMC10134501.

⁴⁶ Samruddha Kokare, J.P. Oliveira, Radu Godina, Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 68, 536-559. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.007>.

⁴⁷ Aruanno, Beatrice. 2024. "EcoPrintAnalyzer: Assessing Sustainability in Material Extrusion Additive Manufacturing for Informed Decision-Making" *Sustainability* 16, no. 2: 615. <https://doi.org/10.3390/su16020615>

⁴⁸ Sola, A.; Rosa, R.; Ferrari, A.M. Environmental Impact of Fused Filament Fabrication: What Is Known from Life Cycle Assessment? *Polymers* 2024, 16, 1986. <https://doi.org/10.3390/polym16141986>

⁴⁹ OU, Yating, et al. Material extrusion additive manufacturing of novel lightweight collinear stayed polymer lattices. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2024, 1-17.

⁵⁰ Presciutti A, Gebennini E, Liberti F, Nanni F, Bragaglia M. Comparative Life Cycle Assessment of SLS and mFFF Additive Manufacturing Techniques for the Production of a Metal Specimen. *Materials (Basel)*. 2023 Dec 23;17(1):78. doi: 10.3390/ma17010078. PMID: 38203933; PMCID: PMC10779992.

⁵¹ Charlotte Roux, Kateryna Kuzmenko, Nicolas Roussel, Romain Mesnil, **Adélaïde** Feraille. Life cycle assessment of a concrete 3D printing process. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2023, 28, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02111-3>

⁵² Li, Jujube. 2015. A Comparative Meta-Life Cycle Inventory Analysis: Energy and Water Consumption of 3D Printing Methods vs. Conventional Manufacturing in Clothing Production. Master's thesis, Harvard Extension School. <https://dash.harvard.edu/handle/1/24078377> (Assessed 13.3.2024)

⁵³ Beth McGrath, Jaymes Hanna, Runze Huang, Amar Shivdasani. 3D opportunity for life cycle assessments Additive manufacturing branches out. Deloitte University Press, an imprint of Deloitte Development LLC.

https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-in-lca-analysis/DUP_719-3D-opportunity-life-cycle_MASTER.pdf (Assessed 13.3.2024).

⁵⁴ Bhasin, Shallu; Singari, Ranganath M.; Arora, Pawan Kumar; Kumar, Harish. Implications of Additive Manufacturing on Supply Chain Management. 2024. Journal of Industrial Integration and Management. Vol.9, 117-131. DOI: 10.1142/S2424862221500299

⁵⁵ Woldesilassiea, Tekalign Lemma, Hirpa G. Lemu, and Endalkachew Mosisa Gutema. 2024. "Impacts of Adopting Additive Manufacturing Process on Supply Chain: Systematic Literature Review" Logistics 8, no. 1: 3. <https://doi.org/10.3390/logistics8010003>

⁵⁶ Samruddha Kokare, João Pedro Oliveira, Radu Godina. 18 - Life cycle assessment and economics of additive manufacturing processes, Editor(s): Sanjay Mavinkere Rangappa, Vinod Ayyappan, Suchart Siengchin. In Additive Manufacturing Materials and Technologies, Additive Manufacturing Materials and Technology, Elsevier. 2024, 445-473. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18462-8.00018-0>.

⁵⁷ file:///C:/Users/music_b/Downloads/%C3%96ko_Performance_Fertigungstechnologien.pdf (assessed on 13.9.2024)

⁵⁸ <https://www.scielo.br/j/jatm/a/rrW5H7FGWtpDrbJSPtZTJ7d/?format=pdf&lang=en>

⁵⁹ <https://3dprint.com/305846/siemens-and-ornl-3d-print-25-pound-turbine-blade-with-waam/>

⁶⁰ Liu, Xuan, Xingguo Han, Guofu Yin, Xiaohui Song, and Lixiu Cui. 2023. "Design and Processing of Gas Turbine Blades Based on Additive Manufacturing Technology" *Micromachines* 14, no. 9: 1675. <https://doi.org/10.3390/mi14091675>

⁶¹ https://www.researchgate.net/publication/327326826_Additive_Manufacturing_for_the_Manufacture_of_Gas_Turbine_Engine_Components_Literature_Review_and_Future_Perspectives

⁶² <https://www.mdpi.com/2504-4494/6/1/16>

⁶³ <https://www.additivemanufacturing.media/articles/stryker-using-additive-for-implants> (Accessed 31.7.2024)

⁶⁴ Meng Meng, Jinzuo Wang, Huagui Huang, Xin Liu, Jing Zhang, Zhonghai Li. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects, Journal of Orthopaedic Translation, 2023, Vol. 42, 94-112, <https://doi.org/10.1016/j.jot.2023.08.004>.

⁶⁵ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8059996/>

⁶⁶ Zhang Jifa , Lu Shizhu , Yang Yadie , Liu Yiwen , Guo Yuqing , Wang Hongrui. Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort—From the perspective of plantar pressure and contact area. Frontiers in Public Health, 2024, Vol. 12. DOI=10.3389/fpubh.2024.1412518 doi: [10.3389/fpubh.2024.1412518](https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518)

⁶⁷ <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.76>

⁶⁸ <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.035>

⁶⁹ <https://www.dental-tribune.com/c/align-technology-switzerland-gmbh/news/3d-printing-acquisition-may-help-align-technology-to-break-the-mould/>

⁷⁰ <https://www.wilhelmsen.com/ships-service/digital-ventures-mp/3d-printing-Offering-A-Stronger-and-More-Resilient-Supply-Chain-for-Spare-Parts/>

⁷¹ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32280-8_27

⁷² <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/15081>

⁷³ Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2003, 8, 324–330.<https://doi.org/10.1007/BF02978505>

⁷⁴ Mark A. J. Huijbregts, Zoran J. N. Steinmann, Pieter M. F. Elshout, Gea Stam, Francesca Verones, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, Rosalie van Zelm. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017, 22, 138–147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

⁷⁵ Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs (MC-6207A), U.S. Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Ave NW, Washington, DC 20460. Understanding Global Warming Potentials. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. 2023. (accessed 27/2/2024)

⁷⁶ Pettersson, Ante B. V., Rosa Maria Ballardini, Marc Mimler, Phoebe Li, Mika Salmi, Timo Minssen, Ian Gibson, and Antti Mäkitie. 2024. "Core Legal Challenges for Medical 3D Printing in the EU" *Healthcare* 12, no. 11: 1114. <https://doi.org/10.3390/healthcare12111114>

⁷⁷ <https://slcontrols.com/en/where-do-we-stand-with-the-new-eu-mdr-additive-manufacturing-and-customised-medical-devices/> (assessed at 30.8.2024)

