

EX-ANTE ÖKOLOGISCHE PERFORMANCE VON ADDITIVEN FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN

Wien, 2023

WOOD
KPLUS

 **Fraunhofer**
AUSTRIA

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren:

Dr. Franziska Hesser, Julia Velkovski (Wood K plus),

Dr. Arko Steinwender (Fraunhofer Austria)

Wien, 2023. Stand: 31. August 2023

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind
ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger
Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der
Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche
Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen
Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
alexander.pogany@bmk.gv.at.

Abstract

Die additive Fertigung bündelt heute eine Vielzahl von Schichtbauverfahren, die eine flexible, werkzeugfreie und end-abmessungsnaher Herstellung von Bauteilen und Produkten mit zum Teil hoher Designfreiheit ermöglichen. Um die ökologischen Potenziale dieser Fertigungstechnologien besser ausschöpfen zu können, war es Ziel, die Umweltaspekte und möglichen Wirkungen jetzt, während der Entwicklung für die industrielle Anwendung systematisch zu untersuchen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Um dies zu ermöglichen wurden Ergebnisse aus Literaturrecherchen, zur ökologischen Bewertung additiver Fertigung und Ergebnisse der Ökobilanzierung ausgewählter Prozessketten zusammengetragen. Dies geschah unter regelmäßiger Absprache mit Expertinnen und Experten der AM-Branche in Österreich. Insgesamt konnten so diverse Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung und Entwicklung sowie die Politik und öffentliche Hand zusammengetragen werden. Es stellte sich heraus, dass die additive Fertigung Potenziale birgt, welche die Möglichkeit bieten die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft zu unterstützen. Jedoch ist hierzu die Zusammenarbeit aller Akteurinnen und Akteure sowie weitere Forschung in den Bereichen Design, Technologie, Material, Energieeffizienz und Recycling notwendig.

Today, additive manufacturing bundles a large number of processes that enable flexible, tool-free and near-net-shape production of components and products with sometimes high geometric complexity. In order to better exploit the ecological potential of these manufacturing technologies, the aim was to systematically investigate the environmental aspects and possible effects now, during development for industrial application, and to derive recommendations for action. To make this possible, results from literature research on the ecological evaluation of additive manufacturing and results from the life cycle assessment of selected process chains were compiled. This was done in regular consultation with experts of the Austrian AM industry. Overall, various recommendations for action for companies, research and development as well as politics and the public sector could be compiled. It turned out that additive manufacturing holds potentials that offer the possibility to support the transformation towards a sustainable economy. However, this requires the cooperation of all stakeholders and further research in the areas of design, technology, materials, energy efficiency and recycling.

Inhalt

Abstract.....	3
Executive Summary	6
1 Einleitung und Ziel der Studie	12
2 Hintergrund	15
2.1 Additive Fertigung – Klassifizierung und Beschreibung der wichtigsten Verfahren	16
2.2 Ökobilanzierung.....	17
2.2.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	18
2.2.2 Sachbilanz	19
2.2.3 Wirkungsabschätzung.....	20
2.2.4 Auswertung.....	21
3 Material und Methoden	23
3.1 Überblicks-Studien der ökologischen Performance von AM	23
3.2 Expertinnen- und Expertenworkshop – ökologische Herausforderungen und Potenziale von AM	23
3.3 Vergleichende Literaturrecherche – ökologische Aspekte von AM und konventionellen Fertigungsverfahren	24
3.4 Morphologie für generische Prozessketten	26
3.5 Ex-ante Ökobilanzierung von Prozessketten	28
3.6 Ableiten robuster Handlungsempfehlungen	30
4 Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen	31
4.1 Stand des Wissens über ökologische Herausforderungen und Potenziale von AM	31
4.1.1 Potenziale additiver Fertigung für ökologischere Produktion.....	31
4.1.2 Potenziale in Bezug auf den Energieverbrauch von additiver Fertigung	33
4.1.3 Potenziale in Bezug auf den Materialeinsatz bei additiver Fertigung.....	34
4.1.4 Verallgemeinerung ökologischer Aussagen.....	35
4.2 Wahrnehmung ökologischer Herausforderungen.....	39
4.2.1 Herausforderung Energieeffizienz	39
4.2.2 Herausforderung Ressourcenschonung und Einsparung von Abfallmengen.....	39
4.2.3 Herausforderung Recycling und Kreislaufwirtschaft.....	40
4.2.4 Herausforderung Umweltschonung durch Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe	40
4.2.5 Herausforderung CO2-Einsparung.....	41
4.2.6 Herausforderung Verlängerung der Lebensdauer von Produkten.....	41
4.2.7 Anmerkungen zur Interpretation	44
4.3 Ökologischer Vergleich von AM und konventionellen Fertigungstechnologien	45

4.3.1	Stand des Wissens zum ökologischen Vergleich von AM und konventionellen Technologien.....	45
4.3.2	Vergleichbarkeit von additiver und konventioneller Fertigung in Ökobilanzstudien	51
4.4	Auswahl und Beschreibung der Prozessketten	55
4.5	Ex-ante Ökobilanzierung.....	57
4.5.1	Prozesskette 1: Anwendung von Powder Bed Fusion am Beispiel einer Gurtschnalle für Passagierflugzeuge	58
4.5.2	Prozesskette 2: Anwendung von Fused Filament Fabrication am Beispiel einer Montageschablone für die Erleichterung der Automobilfertigung	66
4.5.3	Prozesskette 3: Anwendung von Stereolithographie am Beispiel eines keramischen Herzpumpenrads.....	74
4.5.4	Prozesskette 4: Anwendung von Direct Energy Deposition am Beispiel der Reparatur einer Baggerschaufel	79
4.5.5	Zusammenfassende Darstellung der Prozessketten 1-4	84
4.6	Stellhebel und Hotspots - Abhängigkeiten der ökologischen Potenziale.....	91
4.6.1	Abhängigkeit von der Losgröße	93
4.6.2	Abhängigkeit von der Energiequelle.....	93
4.6.3	Abhängigkeit von Material und Branche	94
4.6.4	Abhängigkeit des Betrachtungsumfangs	95
4.6.5	Abhängigkeit von der Komplexität des Bauteils.....	95
4.6.6	Übertragbarkeit über Morphologie	96
5	Handlungsfelder und Handlungsempfehlungen für eine ökologischere Produktion durch AM	100
5.1	Unternehmen	101
5.2	Forschung und Entwicklung.....	104
5.3	Politik und öffentliche Hand	107
6	Ausblick und Forschungsbedarf	110
	Tabellenverzeichnis	112
	Abbildungsverzeichnis	113
	Literaturverzeichnis	116
	Abkürzungen	123

Executive Summary

Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing, AM) ist eine aufstrebende Fertigungstechnologie, die es ermöglicht komplexe Bauteile im Schichtbauverfahren herzustellen. Der Technologie werden viele Vorteile zugesprochen, wie beispielsweise die Dezentralisierung, der Leichtbau oder auch der verringerte Rohmaterialaufwand gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren. Die Untersuchung hatte zum Ziel durch einen bottom-up (aus Technologie- beziehungsweise Anwendungssicht) und einen top-down Ansatz (aus Sicht der Ökobilanzierung) herauszufinden, in welchen Bereichen der AM ökologische Vorteile verortet werden können und wie sich diese quantitativ äußern. Darüber hinaus galt es herauszufinden, wie diese ökologischen Vorteile genutzt werden können, um die Transformation hin zu einer nachhaltigeren Produktion sowie Wirtschaft zu unterstützen.

Im Rahmen der Studie wurden zwei Literaturrecherchen durchgeführt, die Auskunft über die in der Literatur behandelten Thematiken, betreffend der ökologischen Bewertung von AM-Technologien, geben. Diese Informationen wurden genutzt, um eine ex-ante Ökobilanzierung durchzuführen. Die für die Ökobilanzierung herangezogenen generischen Prozessketten wurden dabei von Expertinnen- und Experten der österreichischen AM-Branche ausgewählt. Die Bilanzierung erfolgte auf Basis von Literaturdaten und der Verwendung einer Datenbank sowie aufgrund von Informationen von Branchenvertreterinnen und -vertretern.

Die erste Literaturrecherche diente dazu, für die Wissenschaft relevante Themenfelder zu identifizieren und zu beschreiben. Hierbei kristallisierten sich erste Vorteile hinsichtlich ökologischer Wirkung der additiven Fertigung heraus. Dazu zählen: geringer Rohmaterialaufwand, flexibles Produktdesign, Dezentralisierung und damit einhergehende Transportreduktionen, eine geringere Anzahl an Einzelteilen, Automatisierung, Reparaturmöglichkeiten durch AM und der Leichtbau. Zusätzlich wurden der Energieverbrauch und der Materialeinsatz als kritische Hotspots identifiziert. Die großen Energieverbraucher sind die Rohmaterialgewinnung, die Materialherstellung und der Druckprozess. Der Energieverbrauch ist dabei abhängig von den Anwendungsmustern, der Geräteauslastung, dem gewählten Material, dem AM-Verfahren sowie der Komplexität des Bauteils. Einsparungsmöglichkeiten ergeben sich durch die optimierte Anordnung der Bauteile, Optimierung des Produktionsprozesses und ein geeignetes Prozess- und Bauteildesign. Beim Materialeinsatz wird der Mangel an Recyclingfähigkeit kritisiert. Die Materialvielfalt und -effizienz hingegen als Vorteil gesehen.

Insgesamt stellt der Vergleich von vorhandenen ökologischen Daten eine große Herausforderung dar, da die Studien unterschiedliche funktionelle Einheiten und Systemgrenzen wählen. Darüber hinaus beziehen sich die Daten meist auf eine spezifische Anwendung, ohne die Möglichkeit einer Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle zu berücksichtigen. Daher werden standardisierte Methoden und Modelle von der Wissenschaft gefordert.

Die zweite Literaturrecherche diente dazu, Potenziale und Herausforderungen der Technologie im Vergleich zu konventionellen Verfahren zu konsolidieren. Identifizierte Herausforderungen sind die Effizienzsteigerung des Pulvereinsatzes, die Effizienzerhöhung des Herstellungsverfahrens, der hohe Energieverbrauch in der Herstellung, die geringe Oberflächenqualität, der hohe Energieverbrauch bei der Pulverherstellung, das Recycling von Abfällen und der umweltfreundliche Einsatz für größere Stückzahlen. Potenziale sind hingegen die Materialeinsparung, der Leichtbau, die bessere Umweltperformance bei hoher Auslastung, die Möglichkeit der Anwendung von Hybridprozessen, die hohe Effizienz für Kleinserien, die Möglichkeit der umweltfreundlichen Herstellung von geometrisch komplexen Teilen und das flexible Design, die Reduktion von Abfall, die Möglichkeit zur werkzeuglosen Fertigung, die Energieeinsparung über den gesamten Produktlebenszyklus und die Möglichkeit der individualisierten Großserienproduktion von benutzerdefinierten Bauteilen.

Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten in Form von Workshop-basierten Multiperspective Expert Panels Herausforderungen und die Auswirkungen auf AM identifiziert. Dabei wurden die Energieeffizienz, die Ressourcenschonung und Einsparung von Abfallmengen, Recycling und Kreislaufwirtschaft, die Umweltschonung durch die Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe, die CO₂-Einsparung und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten als die relevantesten Herausforderungen identifiziert. Tendenziell begünstigend wirkt sich AM auf die Ressourcenschonung, die CO₂-Einsparung und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten aus. Tendenziell hemmend wirkt sich AM auf die Energieeffizienz sowie das Recycling und die Kreislaufwirtschaft aus.

Für die anschließende Ökobilanzierung wurden in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten aus der österreichischen AM-Branche vier, für die österreichische Industrie repräsentative Prozessketten gewählt. Die Prozessketten sind dabei Kombinationen aus Material, Technologie, Branche, industriellem Anwendungsfeld und Nutzung von AM. Tabelle 1 zeigt die gewählten Prozessketten für die Ökobilanzierung. Insgesamt wurden 19

Umweltwirkungskategorien je Prozesskette berechnet. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse normalisiert und gewichtet, wodurch sich die Umweltwirkungskategorien mit dem höchsten Umwelteinfluss herauskristallisierten und entsprechend ausgewiesen wurde.

Tabelle 1: Übersicht der für die ex-ante Ökobilanzierung ausgewählte generische AM-Prozessketten

Prozesskette	Technologie	Material	Branche	Anwendung	Nutzung
1	Powder bed fusion (PBF)	Metall	Luft- & Raumfahrt	Serienfertigung	Leichtbau
2	Fused Filament Fabrication (FFF)	Kunststoff	Werkzeugbau	Hilfswerkzeug	Reduktion der Prozessschritte
3	Strereolithographie (SLA)	Keramik	Medizintechnik	Serienfertigung	Funktionsintegration, Reduktion der Bauteile
4	Direct Energy Deposition (DED)	Metall	Maschinen- und Anlagenbau	Serienfertigung	Reparatur (Neu- & Ersatzteile)

Als konkrete Bauteile wurden in der Prozesskette 1 Gurtschnallen für ein Passagierflugzeug gewählt. Berechnet wurden die Umwelteinflüsse durch die Rohstoffgewinnung, die Rohstoffaufbereitung, die Produktion, etwaige Transporte, die Nutzungsphase und das End of Life (EoL) des überschüssigen Pulvers. Es stellte sich dabei heraus, dass die Einsparungen in der Nutzungsphase über den gesamten Lebenszyklus die Umwelteinflüsse der anderen betrachteten Lebenszyklusphasen um ein Vielfaches überwiegen, was sehr stark auch mit der Branche (Luft- und Raumfahrt) und dem damit in Verbindung stehenden Nutzungsszenario (Leichtbau) zusammenhängt.

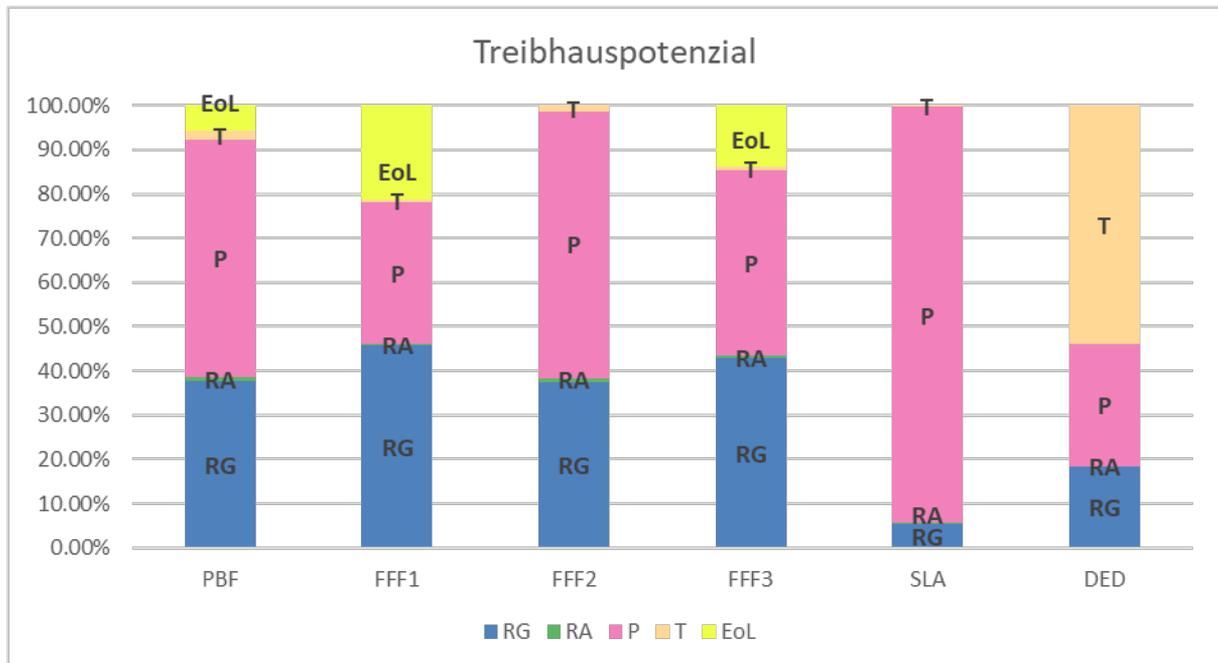
In Prozesskette 2 wurde eine Montageschablone für die Automobilfertigung betrachtet. Hierbei wurde ABS als Material gewählt, wobei unterschiedliche Szenarien herangezogen wurden. In Szenario 1 wurde 100% Primärmaterial betrachtet, in Szenario 2 100% Sekundärmaterial und in Szenario 3 ein 50:50 Mischung. Berechnet wurden die Umwelteinflüsse durch die Rohstoffgewinnung, die Rohstoffaufbereitung, die Produktion, etwaige Transporte und das EoL. Dabei stellte sich heraus, dass der Umwelteinfluss des Materials bei steigender Sekundärmaterialquote sinkt. Gleiches gilt für die EoL Phase. Die Nutzungsphase hat in dieser Prozesskette, aufgrund des statischen Bauteileinsatzes keine ökologische Wirkung.

In Prozesskette 3 wurde ein Herzpumpenrad aus keramischem Material betrachtet. Zur Berechnung wurde die Rohstoffgewinnung, die Rohstoffaufbereitung, die Produktion und etwaige Transporte berücksichtigt. In dieser Prozesskette ist deutlich zu erkennen, dass die Produktion den größten Umwelteinfluss darstellt, was vor allem auf den energieintensiven Sinterprozess zurückzuführen ist.

In Prozesskette 4 wurde die Reparatur von Baggerschaufelzähnen mittels DED betrachtet. Für die Berechnung wurde die Rohstoffgewinnung, Rohstoffaufbereitung, die Produktion und die Transporte berücksichtigt. Es lässt sich erkennen, dass die Umwelteinflüsse durch die Transporte im Vergleich zu den anderen Lebenszyklusphasen am höchsten sind. Dies ist auf den Transport der 900 kg schweren mobilen DED-Anlage zurückzuführen.

Über alle Prozessketten hinweg werden in Abbildung 1 die prozentuellen Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen an der Gesamtumweltauswirkung für Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial dargestellt. Die Nutzungsphase wurde in dieser Darstellung aufgrund der überproportional positiven ökologischen Wirkung nicht berücksichtigt, um die Anteile der anderen Lebenszyklusphasen zueinander sichtbar zu machen.

Abbildung 1: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen für die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (eigene Berechnung)



Aus allen erlangten Erkenntnissen wurden schlussendlich Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese sind in die drei wichtigsten Akteursgruppen dieser Studie eingeteilt: Unternehmen, Forschung & Entwicklung sowie Politik und öffentliche Hand. Sie sollen zur Transformation der Wirtschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit und Klima- sowie Umweltschutz beitragen und die Zielerreichung in Sachen Kreislaufwirtschaft unterstützen. Im Bereich der Unternehmen ist eine Anwendung für ökologisches Design empfehlenswert. Hierzu gehört eine intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten, eine Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und das Wiederverwerten von Materialien. Weitere Handlungsempfehlungen sind:

- Entwicklung von smarten, digitalen, ökologischen Anwendungen
- Einsatz von biobasierten Materialien und Sekundärmaterialien
- Verwertung von Abfallmaterialien unternehmens- bzw. AM-Branchenintern
- Verwertung von Abfallmaterialien über die AM Branche hinaus
- Optimierung der Prozessparameter
- Erhöhung des Automatisierungsgrades in der Produktentwicklung und Konstruktion
- Berücksichtigung ökologischer Faktoren im Geschäftsmodell
- Erweiterung der Lehrlingsausbildungs- und Weiterbildungsprogramme
- Stärkung des unternehmensübergreifenden Erfahrungsaustausches

Im Bereich der Forschung und Entwicklung sollen die folgenden Handlungsempfehlungen zu einer ökologischeren Lösung in der AM-Branche beitragen:

- Entwicklung von Lösungen zur Erleichterung der ökologischen Bewertung
- Systematische Aufarbeitung verschiedener Nutzungskonzepte und Anwendungen
- Systemische Betrachtungen in der Produktionswirtschaft
- Materialentwicklung für AM-Technologien spezialisiert für Anwendungen, für Funktionalitäten, für Recycling, biobasiert: Effizienzerhöhung in der Materialherstellung, Entwicklung universeller Materialien
- Entwicklung von Simulationstools: unter Berücksichtigung von Ökodesign Kriterien führt zu Prozessoptimierung, Materialeinsparung und Energieeinsparung

Im Bereich der Politik und öffentlichen Hand werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet:

- Forschungsförderung und Ausbildungsangebote
- Anreize zur Betrachtung von Lebenszyklen auf Ebene des Endproduktes
- Wille und Druck für Transformation: Belohnungssysteme für ökologisches Handeln
- Austausch von Informationen und das Entwickeln gemeinsamer Strategien für eine ökologischere Produktion: Verstärkter Dialog mit der AM-Branche, Produktkategorieregeln, Normen und Richtlinien (Produktpass), Information und Bildungsangebote
- Schaffung von mehr Infrastruktur für Recycling und Anreize für Verwendung von Sekundärmaterial
- Verfügbarkeit von biobasiertem und biologisch abbaubarem Granulat für AM forcieren
- Normen für Qualitätsanforderungen und -kriterien für verschiedenen AM Anwendungen und Branchen schaffen
- Abbau von Barrieren für neue Designlösungen
- Schaffung von Anreizen in anderen Branchen, um traditionelle Designs (Produktlösungen) aufzubrechen

1 Einleitung und Ziel der Studie

Im Zeitalter des Klimawandels und des hohen Verbrauchs an Ressourcen, gewinnen grüne Technologien immer mehr an Bedeutung. Diese sollen dazu beitragen unsere Umweltprobleme zu reduzieren und unsere Zielvorgaben in Sachen Klimawandelmitigation und Kreislaufwirtschaft zu erreichen. So beschreibt das EU-Kreislaufwirtschaftspaket diverse Ziele in dessen Rahmen Produkte recyclingfähiger und Produktionsprozesse ressourceneffizienter gestaltet, Recyclingquoten erhöht und der Markt für Sekundärrohstoffe gestärkt werden soll (Europäische Kommission, 2020). Außerdem sollen Ressourcen im Sinne der sogenannten R-Strategien (refuse, rethink, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture, repurpose, recycle, recover) angewendet werden, deren Ziel es ist, Ressourcen und Produkte einzusparen beziehungsweise im ökologischen Sinne klüger zu nutzen und herzustellen, die Lebensdauer von Produkten zu erhöhen und die Ressourcen wiederzuverwenden.

All diese Vorgaben werden durch Ausschreibungen wie Green Tech und Tech for Green unterstützt, welche die Erforschung digitaler Technologien für die Transformation der Wirtschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit und Klima- sowie Umweltschutz fördert, was auch Teil des europäischen Green Deal ist. Inwieweit additive Fertigung die Möglichkeit bietet die Wende hin zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zu unterstützen (enabling technology), soll in dieser Studie erarbeitet werden.

Die Technologie bündelt heute eine Vielzahl von Verfahren, die eine flexible, werkzeugfreie und end-abmessungsnahe Herstellung von Bauteilen und Produkten mit zum Teil hoher Geometriekomplexität ermöglichen. So gelingt es, viele Fertigungsschritte aus der klassischen Produktion einzusparen, was mit einer generellen Reduktion von Energie- und Materialeinsatz verbunden ist. Additive Fertigung verringert den Ressourcenverbrauch, was der Vermeidung in der Abfallhierarchie entspricht, die an erster Stelle steht. Darüber hinaus können Geometrien produziert werden, die mit klassischen Verfahren nur schwer oder nicht umsetzbar sind. Das Ignorieren kritischer Hotspots, wie ein sehr hoher Energiebedarf bei der Verarbeitung oder mangelnde Kreislauffähigkeit der Materialien kann zu erheblichen Umwelt- und Investitionsrisiken in der Zukunft dieser Technologie führen. Mögliche Chancen durch diese Technologien, einen positiven Beitrag zur Reduktion von Umweltbelastungen über verschiedene Lebenszyklen von AM-Anwendungen hinweg beizutragen, bleiben

unerkannt. Um die ökologischen und in Folge ökonomischen Potenziale dieser Fertigungstechnologien besser ausschöpfen zu können, wird angeraten die Umweltaspekte und möglichen Wirkungen jetzt, während der Entwicklung für die industrielle Anwendung systematisch zu untersuchen und Handlungsempfehlungen und Maßnahmenfelder abzuleiten. Bei rudimentären Nachhaltigkeitsbetrachtungen im Kontext der AM werden häufig die Ressourcen- und Energieverbräuche im Produktionsprozess miteinander verglichen, weitere Vergleichsfaktoren im Wertschöpfungssystem (wie ökologische Einflüsse im logistischen Bereich, Effizienzunterschiede in der Produktnutzung, im Recycling etc.) bleiben dabei häufig völlig unberücksichtigt. Die unzureichende Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (engl. Life Cycle, LC) bei der Analyse beziehungsweise dem Vergleich des Einflusses der Nachhaltigkeit wird hierbei auch explizit genannt. Wegen der weitläufigen Effekte, Aus- und Wechselwirkungen additiver Fertigungstechnologien auf das gesamte Wertschöpfungssystem gilt es, alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen und auch speziell im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbetrachtung entsprechend zu definieren beziehungsweise zu beschreiben. Relevant dafür sind primär jene Bereiche (sowohl auf Seite des Produktionsunternehmens wie auch auf Kundenseite), in denen Potenziale durch additive Fertigung entstehen. In der bekannten Literatur sind hierzu Ansätze beschrieben, die zwar unterschiedliche, jedoch meist nur eine eingeschränkte Anzahl von Perspektiven betrachten beziehungsweise keine klare Abgrenzung treffen. Das zweifelsohne viele, aber fragmentarische und auf Einzelfallstudien basierende Wissen erlaubt es nicht, generelle Handlungsfelder und Empfehlungen für eine nachhaltigere, industrielle Produktion mit AM Technologien abzuleiten. Das Wissen muss (1) konsolidiert und für Akteurinnen und Akteure verfügbar gemacht, (2) für das Erkennen genereller Schlüsselfaktoren abstrahiert und von (3) Akteurinnen und Akteuren validiert werden. Mit der Systematisierung und Charakterisierung von AM Technologien in Form einer Morphologie, um generische AM-Prozessketten zu definieren, wird erstmals eine Grundlage geschaffen für allgemeingültige Aussagen zur ökologischen Performance über verschiedene Lebenszyklen von AM-Anwendungen hinweg. Die Ökobilanzierung (Englisch: Life Cycle Assessment; LCA) ist eine weltweit anerkannte und standardisierte Methode (siehe ISO 14040) zur Bewertung von Umweltaspekten und potenziellen Umweltwirkungen etablierter industrieller Produktsysteme. Die sogenannte ex-ante Ökobilanz zur Generierung von Wissen über kritische Umweltaspekte von Technologien während der F&E ist besonders effektiv, um Investitionsrisiken zu reduzieren und den Innovationsvorsprung zu realisieren, kommt aber nicht standardmäßig zu Einsatz. Die so gewonnenen Erkenntnisse dienen in weiteren Entwicklungsschritten zur ökologischen Verbesserung noch vor dem industriellen up-scaling. Häufig werden heute aber mehr ex-post Ökobilanzen durchgeführt, d.h. bei bereits etablierten Produktsystemen. Großer Nachteil ist dabei, dass die ökologische Verbesserung im Nachhinein mit größeren Hürden

(Kosten, Lock in Effekte, Akzeptanz, ...) verbunden ist oder sich gar nicht realisieren lässt. Für die additive Fertigung bietet die Ökobilanzierung die Möglichkeit die ökologische Performance hinsichtlich des kumulierten Energiebedarfs, Ressourceneffizienz, Klimawandel und einigen anderen Umweltwirkungen systematisch zu erarbeiten und dieses Wissen für die weitere Entwicklung dieser Technologie zu nutzen.

Das Ziel dieser Studie ist es, die ökologische Performance der heute gängigen additiven Verfahren in Abhängigkeit der möglichen Anwendungen zu erarbeiten, mögliche Verbesserungspotenziale bei der Entwicklung, Produktion, beim Einsatz beziehungsweise der Nutzung sowie beim Recycling additiv gefertigter Produkte oder Betriebsmittel (wie beispielweise nicht verwendetes Pulver) aufzuzeigen. Damit soll ein nachhaltiges Technologieportfolio für eine ökologischere Produktion mit additiver Fertigung geschaffen werden. Darüber hinaus soll dies in Form von Handlungsempfehlungen für die unterschiedlichen Akteure und Akteurinnen der additiven Fertigung erfolgen, die unmittelbare Ansätze zur Umsetzung in der Praxis darstellen.

2 Hintergrund

Als Hintergrund für diese Studie wird in den folgenden Kapiteln eine Einführung in die Technologiefamilie der additiven Fertigung mit der Beschreibung der wichtigsten Verfahren und in die Ökobilanzmethodik und den vier grundlegenden Phasen gegeben. Expertise aus beiden Bereichen bilden die Grundlage für diese interdisziplinäre Studie.

Um den Anforderungen der österreichischen Industrie gerecht zu werden, wird in dieser Studie zur Ex-Ante-Betrachtung additiver Fertigung ein Top-Down (Ökobilanz) und Bottom-Up (Technologie und Prozess) -Ansatz gewählt. Um die negativen ökologischen Auswirkungen zu vermeiden und die ökonomischen Potenziale von AM Fertigungstechnologien besser ausschöpfen zu können, erscheint eine Ökobilanzierung sinnvoll und notwendig, um die Umweltaspekte und mögliche Wirkungen bereits während der Entwicklung für die industrielle Anwendung systematisch zu untersuchen, zu erkennen und diesen in weiterer Folge entgegenzuwirken. Das Ignorieren von kritischen Aspekten in der Entwicklung, wie hoher Energiebedarf bei der Verarbeitung oder mangelnde Kreislaufwirtschaftsfähigkeit der Materialien kann zu erheblichen Umwelt- und Investitionsrisiken in der Zukunft dieser Technologie führen. Im Gegenzug dazu, bleiben der positive Beitrag zur Reduktion von Umweltbelastungen und Vorteile durch diese Technologie unerkannt.

Für die additive Fertigung bietet die Ökobilanzierung die Chance, die ökologische Performance im Hinblick auf den kumulierten Energiebedarf, die Ressourceneffizienz, den Beitrag zum Klimawandel und einigen anderen Umweltwirkungen systematisch zu erarbeiten und zu beschreiben. Dieses Wissen wird allerdings bereits zum Zeitpunkt der Entwicklung bereitgestellt, sodass somit auch ein mögliches Verbesserungspotenzial in Hinblick auf die Umweltrelevanz aufgezeigt werden kann und Innovationen im Bereich AM in die gewünschte Richtung geleitet werden.

2.1 Additive Fertigung – Klassifizierung und Beschreibung der wichtigsten Verfahren

Bei additiver Fertigung handelt es sich um einen Überbegriff, der diverse Produktionstechnologien, welche im Schichtaufbau arbeiten, zusammenfasst. Hierbei wird anhand eines digitalen CAD-Modells ein 3D-Objekt erstellt. Im Gegensatz zu subtraktiven und formativen Verfahren wird das Material nicht abgetragen oder umgeformt, sondern schichtweise aufgetragen. Je nach verwendeter Technologie lassen sich die Verfahren in mehrere Gruppen einteilen. Man unterscheidet nach DIN EN ISO 17296-2 folgende, in Tabelle 2 angeführten, Hauptkategorien.

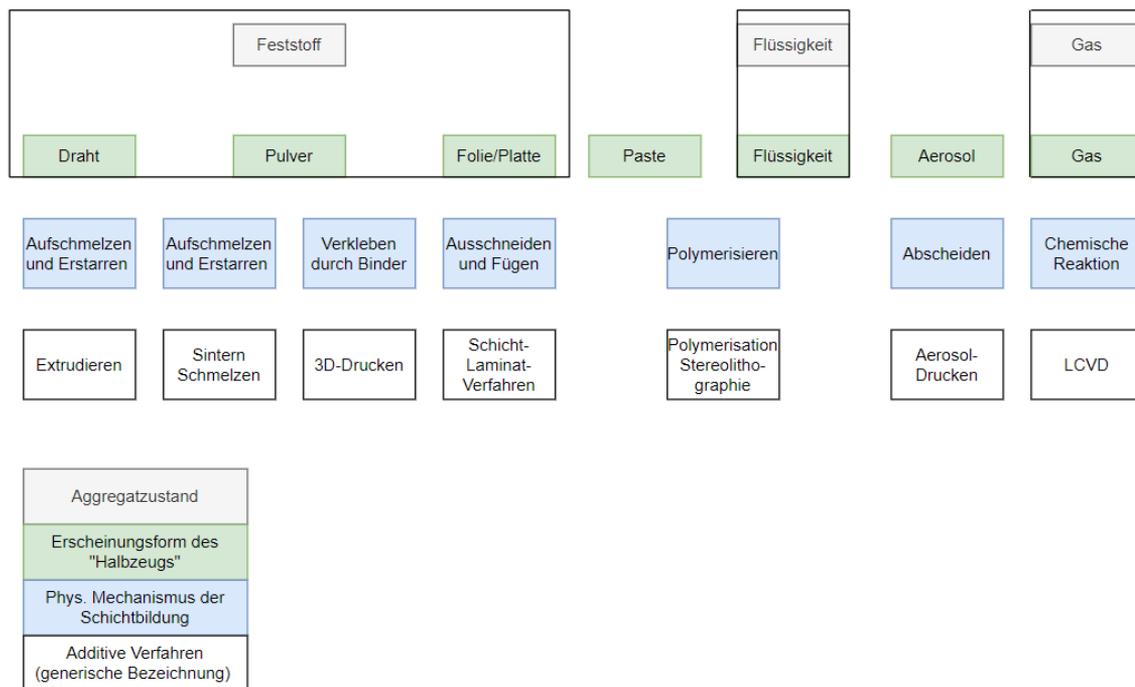
Tabelle 2: Hauptkategorien der additiven Fertigung (Quelle: DIN EN ISO 17296-2)

Kategorie	Beschreibung	Technologien	Materialien
Pulverbettbasiertes Schmelzen (Powder Bed Fusion)	Bereiche eines Pulverbetts werden gezielt durch Wärmeenergie aufgeschmolzen	EBM, SLS, SLM, DMLS	Metalle, Polymere
Gerichtete Energieeinbringung (Direct Energy Deposition)	Fokussierte Wärmeenergie wird genutzt, um Materialien durch Schmelzen zu binden, während das Material aufgebracht wird	LMD, DALM, DMD, LDD, LENS	Metalle
Werkstoffextrusion (Material extrusion)	Material wird gezielt durch eine Düse extrudiert	FDM	Polymerbasierte Materialien
Photopolymerisation (Vat Photopolymerization)	Flüssiges Photopolymer wird in einem Bad durch lichtaktivierte oder UV-Polymerisation selektiv gehärtet	SLA, DLP	Photopolymere, Keramiken, Metalle
Bindemittelauftrag (Binder Jetting, 3D-printing)	Flüssiges Bindemittel wird gezielt aufgebracht, um Pulvermaterial zu verbinden, gefolgt von einem anschließenden Härtingsprozess	BJ, PBIH, PP	Polymere, Metalle, Sand, Polymere
Werkstoffauftrag (Material Jetting)	Tropfen von Baumaterial werden selektiv aufgetragen	MJM, Polyjet, Multijet	Polymere, Wachse
Schichtlaminierung (Sheet Lamination)	Schichten eines Materials werden verbunden, um ein Bauteil zu formen	LOM, UC	Metalle, Papier, Polymere, Keramiken

Weiters ist eine Klassifizierung nach Erscheinungsform des Halbzeugs (Produkte aus Rohmaterialien in einfachster Form, bei AM u.a. Pulver, Flüssigkeiten, Drähte) möglich (siehe

Abbildung 2). Nicht alle hier angeführten Verfahren sind technisch relevant und Teil der Hauptkategorien (Tabelle 2).

Abbildung 2: Klassifizierung nach Erscheinungsform des Halbzeugs, modifiziert nach Gebhard 2013



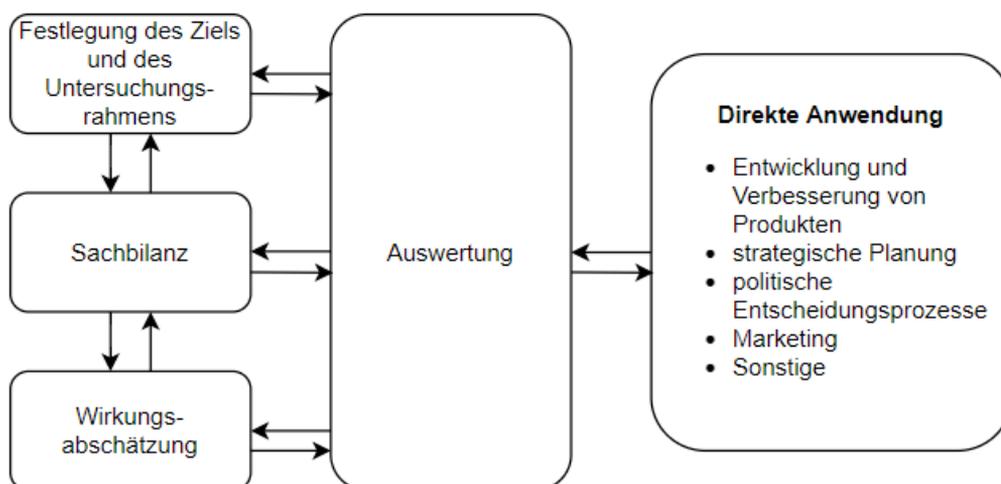
2.2 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung, auch bekannt als Life Cycle Assessment (LCA) oder Lebenszyklusanalyse, ist eine Methode, die die Analyse und Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts, eines Prozesses oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg ermöglicht. Der Lebensweg erstreckt sich hierbei von der Wiege bis zur Bahre und schließt somit alle Teilschritte, die ein Produkt durchlebt, ein: von der Rohstoffgewinnung, über den Herstellungsprozess, die Nutzung und die Beseitigung, er berücksichtigt auch etwaige Transportwege. Der Begriff Ökobilanz wurde erstmals vom damaligen Schweizer Bundesamt für Umweltschutz im Jahr 1984 im Rahmen einer Packstoffstudie verwendet (Klöpffer und Grahl 2007).

Die Methode beruht auf der 2006 veröffentlichten Normenreihe ISO EN 14040ff, welche die vier Phasen einer Ökobilanz vorgibt. Zunächst werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert, anschließend werden Sachbilanz und Wirkungsabschätzung vollzogen, um im letzten Schritt eine Auswertung zu ermöglichen (Klöpffer und Grahl 2007). Diese Methodik soll die Erstellung von Ökobilanzierungen vereinheitlichen, was jedoch nicht zwangsläufig dazu führt, dass die Ergebnisse von Ökobilanzen direkt vergleichbar sind. Die Vergleichbarkeit ist u.a. abhängig von den Systemgrenzen und der funktionellen Einheit. Aufgrund dessen sind Publikationen, die innerhalb ihrer Untersuchung einen Vergleich aufstellen von besonderem Interesse.

Diese Vorgangsweise führt zu einer direkten Anwendungsmöglichkeit bei der Entwicklung und Verbesserung von Produkten, der strategischen Planung in Unternehmen, in politischen Entscheidungsprozessen, im Marketing und sonstigen weiteren Anwendungsfeldern (siehe Abbildung 3). Dabei ist festzuhalten, dass eine Ökobilanzstudie einen iterativen Charakter hat (Klöpffer und Grahl 2007). Die vorliegende Arbeit zieht bereits vorhandene Ökobilanzierungen heran, um Wissen für die Erstellung der Ökobilanzen der AM Prozessketten zusammenzutragen.

Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz nach ISO EN 14040:2006, (Darstellung nach ISO EN 14040:2006)



2.2.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Bei der Zielfestlegung wird geklärt, was untersucht werden soll, warum eine Ökobilanz durchgeführt wird, wer Teil der Zielgruppe ist und ob die Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden und im Zuge dessen Vergleiche vorgesehen sind. Weiters muss

die Systemgrenze bestimmt werden, welche Auskunft über den Umfang der Studie gibt und festlegt, welche Teilschritte in der Bilanzierung berücksichtigt werden. Hierfür wird häufig ein Systemfließbild der Prozesse des Lebenszyklus erstellt (Klöpffer und Grahl 2007). Die Systemgrenzen können unterschiedlich angelegt werden. Ansätze hierfür sind von der Wiege zur Bahre (englisch: cradle-to-grave), von der Wiege zur Wiege (englisch: cradle-to-cradle) oder Werkstor zu Werkstor (englisch: gate-to-gate). Wobei mit der Wiege die Gewinnung der Rohstoffe, mit der Bahre die Entsorgung (englisch: End-of-Life) des Endprodukts und mit dem Werkstor eine Analyse zwischen bestimmten Verarbeitungsstätten gemeint ist. So kann eine Ökobilanz für den gesamten Lebenszyklus inklusive Recyclingprozess oder aber auch für Teilbereiche des Lebenszyklus erstellt werden.

Auch die Definition einer funktionellen Einheit ist Teil der ersten Phase einer Ökobilanz. Diese stellt die Bezugsgröße der Umweltwirkungen dar und beschreibt die Funktion, die das untersuchte Produkt erfüllen soll. Ein Beispiel aus der AM-Branche ist die Erleichterung von Montagevorgängen in der Automobilfertigung durch die Verwendung von maßgeschneiderten Schablonen. Weitere Parameter, die unter die Festlegung des Untersuchungsrahmens fallen, sind die Festlegung von Methoden zur Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen, Annahmen und Anforderungen an Daten (Klöpffer und Grahl 2007).

2.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz inventarisiert qualitativ und quantitativ alle Inputs und Outputs, die während des gesamten Lebensweges des Produkts in allen Teilschritten des festgelegten Systems anfallen. Hierbei ist vor allem die Methode der Datenerfassung, sowie die Datenherkunft und die Qualität der Daten von Bedeutung (Klöpffer und Grahl 2007).

Daten können primär sein, also durch eine direkte Messung erhoben werden, sie können aus Datenbanken (spezielle LCA oder Material-, Handels- Emissionsdatenbanken, und so weiter) Branchenberichten oder akademischer Literatur stammen oder auch auf Expertenschätzungen und Annahmen beruhen (Klöpffer und Grahl 2007).

Bei den Inputs handelt es sich um Rohstoffe und Energie, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie weitere Inputs wie Fläche. Die Outputs sind neben dem Produkt und etwaigen Nebenprodukten, Abfälle, Abwässer, Abwärme und Emissionen in Boden, Wasser und Luft. Die Inputs und Outputs werden den jeweiligen Prozessmodulen zugeordnet und auf die funktionelle Einheit bezogen. Hierbei kommt es häufig zur Notwendigkeit der Allokation, also einer Zuordnung der

Ressourcen und damit Umweltbelastungen zu dem Produkt und seinen Nebenprodukten (Klöpffer und Grahl 2007).

2.2.3 Wirkungsabschätzung

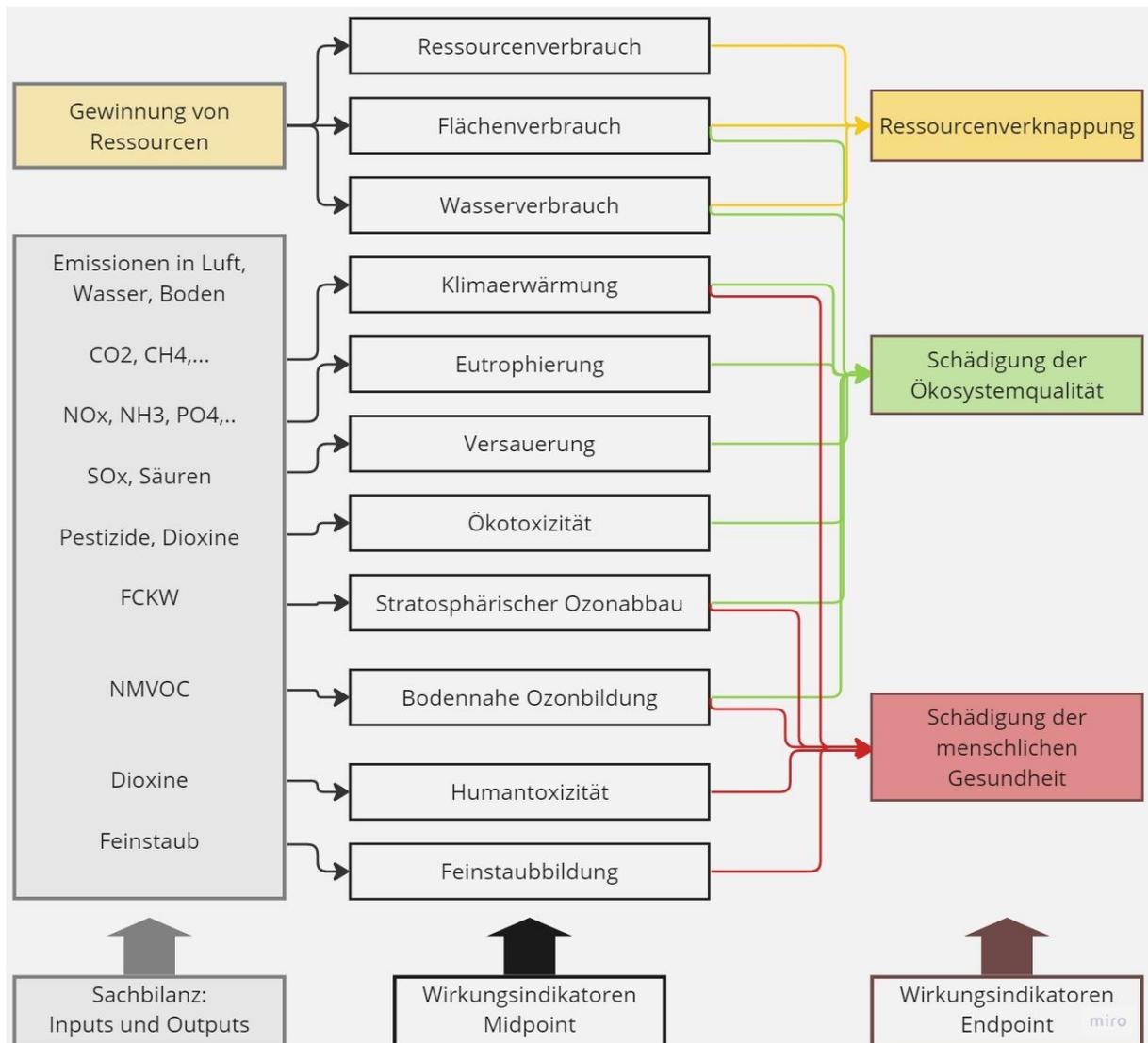
In dieser Phase der Ökobilanzierung werden potentielle Umweltauswirkungen, die im Zusammenhang mit dem untersuchten Produktsystem stehen, bewertet. Hierbei werden die in der Sachbilanz erfassten Input- und Output Ströme herangezogen und deren Auswirkungen auf die Umwelt mittels verschiedener Methoden (ILCD, PEF, CML, Recipe, IPCC, unter anderen) bestimmt, wofür zunächst Wirkungskategorien (sowie Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle) festgelegt werden (Klöpffer und Grahl 2007).

Es wird zwischen ressourcenbezogenen (inputbezogenen) und emissionsbezogenen (Output bezogenen) Wirkungskategorien unterschieden. Zu den ressourcenbezogenen Wirkungskategorien zählen Ressourcenverbrauch, Wasserverbrauch, Landnutzungen und Naturraumbeanspruchung. Zu den emissionsbezogenen Wirkungskategorien zählen Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung, Bodennahe Ozonbildung und Ozonzerstörung unter anderen (Klöpffer und Grahl 2007). Der kumulierte Energieaufwand wird in LCA Studien oft betrachtet, wobei es sich nicht um eine Bewertung potentieller Umweltwirkungen handelt.

Weitere verbindliche Bestandteile sind nach ISO 14040ff die Klassifizierung, also die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse und die Charakterisierung, also die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte. Diese Schritte können mit Hilfe einer Ökobilanzsoftware durchgeführt werden (Klöpffer und Grahl 2007).

Optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung sind die Normalisierung und Gewichtung. Bei der Normalisierung werden die unterschiedlichen Wirkungskategorien durch die Verwendung von Normalisierungsfaktoren vergleichbar gemacht. Die Normalisierungsfaktoren beziehen sich hierbei beispielsweise auf den nationalen Ausstoß bestimmter Emissionen pro Jahr oder pro Kopf. Bei der Gewichtung werden die Werte mit Hilfe von numerischen Faktoren umgewandelt. Diese helfen dabei den einzelnen Werten eine gewisse Priorität zuzuordnen. Anschließend besteht noch die Möglichkeit der Umwandlung der Ergebnisse aus den sogenannten Midpoint-Kategorien in Endpoint-Kategorien (Schutzgüter) und in Single Scores (Einzelwert). Drei typisch verwendete Endpoint-Kategorien sind menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcenknappheit. Der Single Score ist die Möglichkeit alle Ergebnisse in einen gemeinsamen Wert anzugeben. Abbildung 4 zeigt den Ablauf der Wirkungsabschätzung von der Sachbilanz bis zu den Endpoint-Kategorien

Abbildung 4: Darstellung des Ablaufs der Wirkungsabschätzung von der Sachbilanz bis zu den Endpoint-Kategorien, (Quelle: modifiziert mit Miro nach Fischer et al. 2014)



2.2.4 Auswertung

Der Schritt der Auswertung dient dazu die quantitativen Ökobilanzergebnisse angesichts der getroffenen Modellannahmen zu interpretieren und Schlussfolgerungen zur Entscheidungsunterstützung und für Entscheidungen und Empfehlungen zur Reduktion von Umweltwirkungen abzugeben. Hierbei sollte stets Bezug auf die definierte Zielsetzung und den Untersuchungsrahmen der Ökobilanz genommen werden. In dieser Phase werden alle Annahmen nochmals hinterfragt und geprüft, Nichtkonformitäten und Lücken werden aufgezeigt (Klöpffer und Grahl 2007) und in etwaigen Iterationen der Ökobilanz

berücksichtigt. Für die Studie relevante inhaltlichen Punkte sollten nochmals herausgearbeitet und kritisch hinterfragt werden. Möglichkeiten zur Verbesserung des Ökobilanzmodelles können im Rahmen der Darstellung der Limitation explizit gemacht werden (Klöpffer und Grahl 2007) für etwaige Iterationen der Ökobilanz.

3 Material und Methoden

Zur Zielerreichung werden (1) mittels generischer AM-Prozessketten die ökologische Performance von additiven Fertigungstechnologien dargestellt, (2) mittels ex-ante Ökobilanzen von praxisrelevanten Anwendungen Schlüsselfaktoren zur Reduktion von Umweltwirkungen identifiziert und (3) gemeinsam mit Akteurinnen und Akteuren der AM-Branche robuste Handlungsempfehlungen und Maßnahmenfelder für eine ökologischere industrielle Produktion mit additiver Fertigung entwickelt. Das aufgearbeitete Material und die verwendeten Methoden zur Umsetzung dieser Studie wird in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

3.1 Überblicks-Studien der ökologischen Performance von AM

In einem ersten Schritt wurde eine qualitative Literaturrecherche mit Hilfe einer Datenbank (SCOPUS) wissenschaftlicher Literatur durchgeführt. Hierbei wurde nach Überblicks-Studien gesucht, welche sich mit Nachhaltigkeit additiver Fertigungsverfahren (AM) befassen. Die Suche erfolgte mittels des Schneeballsystems, wobei zunächst nach Schlagworten (LCA, AM, additive manufacturing, Life cycle a*) gesucht und anschließend durch Quellenangaben in den Suchergebnissen und weitere Vorschläge der Datenbank fortgefahren wurde.

Dieser Schritt diente dazu, mögliche Nachhaltigkeitspotenziale und aus Sicht der Wissenschaft relevante Themen zur Umweltperformance von AM zu erfassen. Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse wurden zunächst in einer Liste zusammengefasst und anschließend in Form einer Mindmap dargestellt, um eine möglichst übersichtliche graphische Darstellung darzubieten (siehe Kapitel 4.1).

3.2 Expertinnen- und Expertenworkshop – ökologische Herausforderungen und Potenziale von AM

In einem weiteren Schritt wurden mit Hilfe eines Expertinnen- und Experten-Workshops gemeinsam ökologische Herausforderungen erfasst. Hierbei wurde auch bewertet, ob AM auf die verschiedenen ökologischen Herausforderungen tendenziell eine verstärkende oder

abschwächende Wirkung hat. Dies geschah in Kleingruppen zu jeweils vier Personen unter der Moderation des Projektteams dieser Studie. Der Begriff ökologische Herausforderung bezieht sich in diesem Zusammenhang auf ökologische Aspekte der Produktionswirtschaft, die zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts von den Expertinnen und Experten und deren Betrieben als solche wahrgenommen wurden. Beispiele hierfür sind die Herausforderungen der „Ressourcenschonung“ und der „Energieeffizienz“.

3.3 Vergleichende Literaturrecherche – ökologische Aspekte von AM und konventionellen Fertigungsverfahren

In weiterer Folge wurde eine vergleichende Literaturrecherche auf Basis der durch die erste Recherche erlangten Erkenntnisse durchgeführt. Ziel dieser Recherche war es, den Wissensstand zur potentiellen Umweltauswirkungen additiver Fertigungsverfahren systematisch zu erfassen und zusätzlich zu den unter 4.1 qualitativ erfassten Themenbereichen, konkrete Stellhebel zur Verringerung der Umweltauswirkungen zu identifizieren. Die Literatursuche erfolgte in der Datenbank „Scopus“ unter der Suchkategorie „Article title, Abstract, Keywords“. Hierbei wurden zwei Suchanfragen durchgeführt:

- Suche 1: „additive manufacturing“ und „lca“
- Suche 2: “additive manufacturing” und “life cycle a*“

Für die Suche wurden immer zweierlei Suchkriterien angewendet, wobei es sich immer um eine Kombination aus den Keywords „additive manufacturing“ mit einem ökobilanztypischen Begriff handelte. Die so gefundenen Fallstudien wurden anschließend nach „Relevanz“ (unter anderem Berücksichtigung der Häufigkeit des Suchbegriffs in einem Dokument, Position des Suchbegriffs in einem Dokument, Vorkommen aller Suchbegriffe einer Suchanfrage in einem Dokument) sortiert.

Folgende fünf Kriterien musste eine Publikation zunächst erfüllen, um für die weitere Auswertung berücksichtigt zu werden:

- Die Publikation erfolgte in einem wissenschaftlichen Magazin /Journal oder im Rahmen einer wissenschaftlichen Konferenz;
- Die Publikation adressiert die Themen Ökobilanzierung und additive Fertigung;
- Die Publikation ist vergleichender Natur, sie stellt ein additives Fertigungsverfahren einem konventionellen gegenüber;
- Die Publikation inkludiert mindestens eine der vier Phasen nach ISO14040 -14044;

- Die Publikation wurde nicht vor dem Jahr 2006 veröffentlicht, der Veröffentlichung der ISO14040 Norm.

Im Rahmen dieser Studie wurden nur Publikationen gewählt, welche in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht wurden, da diese einem Begutachtungsprozess unterlaufen sein müssen. Durch die Anwendung der Ökobilanzierung nach ISO 14040-14044 in den Fallstudien, kann eine ähnliche Vorgehensweise angenommen werden, was die Herausarbeitung von Handlungsempfehlungen unterstützt. Ähnliches gilt auch für das Kriterium der Gegenüberstellung von additiven und konventionellen Fertigungsverfahren. Durch die Anwendung einer identen Methodik innerhalb einer Studie ist ein direkter Vergleich und die Ableitung von Handlungsempfehlungen möglich.

In einem weiteren Schritt wurden Publikationen, welche dem Titel und/oder Abstract nach zu urteilen, nicht dieser Untersuchung entsprechen, ausgeschlossen. Nach dieser Selektierung wurden die relevanten Inhalte in einer Matrix erfasst:

- Allgemeine Informationen: Titel, Publikationsjahr, Autoren, Art der Datenquellen, Anzahl der Zitierungen (laut Scopus), Herausgeber (zum Beispiel Elsevier), Art der Literatur (zum Beispiel Artikel), Ort der Veröffentlichung (zum Beispiel Rapid Prototyping Journal), Betrachtung (zum Beispiel Vergleich von FDM zu CNC), Keywords
- LCA spezifische Informationen: Software und Methoden, Systemgrenzen, betrachtete Lebenszyklusphasen, funktionelle Einheit, betrachte Wirkungskategorien, Anzahl der betrachteten Wirkungskategorien, beschriebene Hotspots
- AM-spezifische Informationen: Technologie, Material, Branche, Anwendung/Nutzung, Post-Processing
- Gesammelte Daten: Design, Rohstoffgewinnung, Rohstoffverarbeitung, Herstellung/Druck, Post-Processing, Transport, Nutzung, End-of-Life
- Zusammenfassung: Kernaussage, Potenziale, Herausforderungen

Dabei gilt es zu beachten, dass je nach Umfang der Fallstudien möglicherweise nicht alle Bereiche der Matrix gefüllt werden konnten, wodurch eine Gegenüberstellung der Dimensionen der Matrix nicht immer unter Berücksichtigung aller ausgewählten Studien erfolgen konnte. Anhand dieser Matrix wurden anschließend die Inhalte der Studien analysiert und ausgewertet.

Die durch die Literaturrecherche und den Expertinnen- und Expertenworkshop erlangten Erkenntnisse wurden anschließend gegenübergestellt. Dadurch konnten Bereiche identifiziert werden, denen sowohl in der Literatur als auch in der Praxis Bedeutung zugesprochen wird.

3.4 Morphologie für generische Prozessketten

Als Basis für eine generalisierbare Betrachtungsmöglichkeit der ökologischen Performance additiver Fertigung wurde eine Morphologie (siehe Tabelle 3) erstellt. Die Morphologie dient dazu, systematisch technologieabhängige Profile zu charakterisieren und Anwendungen abzuleiten. Die Betrachtungsdimensionen stellen AM-Technologien, Materialien, die Branche (Maschinen- und Anlagenbau, Luft- und Raumfahrt etc.), industrieller Anwendungsbereich (Prototyp, Werkzeug, Serienteil, Ersatzteil etc.) sowie die Nutzung des additiv gefertigten Produktes dar. Im Rahmen der Studie wurden beim Experten- und Expertinnen Workshop, für die österreichische Industrie relevante, generische AM-Prozessketten inklusive Nutzung des gedruckten Produktes identifiziert, ergänzt und priorisiert, welche die Grundlage für die durchgeführten Ökobilanzen darstellte. Der Einbindung von Experten wurde von Seite des Studienauftraggebers eine hohe Bedeutung zugemessen, da die Studienergebnisse auch die AM-Anwendungen in der österreichischen Industrie repräsentieren sollten.

Die Morphologie stellt einen wesentlichen Eckpfeiler auch für zukünftige Betrachtungen im Sinne einer „ex-ante“-Bilanzierung dar, da der Hintergrund der durchgeführten Ökobilanzen unter anderem auch die Möglichkeit zur Gegenüberstellung ökologischer Auswirkungen über die Ausprägungen in den einzelnen Dimensionen der Morphologie über den Anwendungs-Lebenszyklus sowie die Übertragung auf weitere mögliche Prozessketten bietet.

Tabelle 3: AM-Morphologie als Basis für die generischen Prozessketten und deren Ökobilanzierung. (Quelle: eigene Darstellung)

Kategorie											
AM-Techn.	Powder bed fusion	Material extrusion	Vat photopolymerization	Binder Jetting	Material Jetting	Direct energy deposition	Sheet lamination				
Material	Metal	Kunststoff	Keramik	Sand	Wachs	Composit Materialien					
Branche	Luft- & Raumfahrt	Automobil-industrie	Maschinen- & Anlagenbau	Bahn-industrie	Fahrrad-industrie	Werkzeugbau	Medizin-technik	Konsumgüterprodukte	Design- & Lifestyleprodukte	Schmuck-industrie	Lebensmittel
Industrielles Anwendungsfeld	Prototypenbau	Hilfswerkzeuge und Schablonen	Formen- und Werkzeugbau	Serienfertigung	Ersatzteile						
Nutzung AM	Leichtbau	Effizienzsteigerung in der Nutzung	Funktionsintegration – weniger Bauteile	Werkzeuglose Fertigung	Reduktion der Prozessschritte	Effizienzsteigerung in der Produktion	Verkürzte Transportwege - Dezentralisierung	Alternative Lieferketten	Bedarfsorientierte Produktion	Reparatur	

3.5 Ex-ante Ökobilanzierung von Prozessketten

Die ex-ante Ökobilanz verfolgt das Ziel, die Technologieentwicklung zu unterstützen, indem schon während der F&E ökologische Aspekte berücksichtigt werden. So können entlang der Entwicklung der technologischen Reife Informationen zu Umweltwirkungen erhoben und antizipiert werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse dienen in weiteren Entwicklungsschritten zur ökologischen Verbesserung noch vor dem industriellen up-scaling. Klassischerweise werden heute aber mehr ex-post Ökobilanzen durchgeführt, d.h. bei bereits etablierten Produktsystemen. Großer Nachteil ist dabei, dass die ökologische Verbesserung im Nachhinein mit größeren Hürden (Kosten, Lock in Effekte, Akzeptanz, ...) verbunden ist oder sich gar nicht mehr realisieren lässt. Im Rahmen dieser Studie liegt das Ziel der ex-ante Ökobilanzierung generischer Prozessketten in der Identifikation von Stellhebeln additiver Fertigungstechnologien einen Beitrag zur ökologischeren Produktionswirtschaft zu leisten.

Zur Ökobilanzierung der ausgewählten Prozessketten wurde zunächst wissenschaftliche Literatur herangezogen, um etwaige prozessspezifische Daten wie den Energiebedarf in Erfahrung zu bringen. Datenlücken wurden durch Interviews mit Vertretern der Branche geschlossen. Hierbei wurden auch durch die Literatur erlangte Daten validiert und gegebenenfalls durch Praxiswerte spezifiziert. Außerdem wurde die Software OpenLCA 1.11 und die Datenbank ecoinvent 3.8 unter Anwendung der Methode ILCD2.0 2018 Midpoint eingesetzt, um die potentiellen Umweltauswirkungen der einzelnen Lebenszyklusabschnitte zu erfassen.

Insgesamt wurden 19 Umweltwirkungskategorien bewertet (siehe Anhang für kurze Beschreibung): Süßwassereutrophierungspotenzial, Ozonabbaupotenzial, bodennahes Ozonbildungspotenzial, Ionisierende Strahlung, Treibhauspotenzial gesamt, Wasserverbrauch, Treibhauspotenzial fossil, kanzerogene Effekte, Süßwasser Ökotoxizität, nicht-kanzerogene Effekte, Treibhauspotenzial Landnutzung und Landnutzungsveränderung, Treibhauspotenzial biogen, Süßwasser- und Bodenversauerungspotenzial, Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe, Bodeneutrophierungspotenzial, Meereseutrophierungspotenzial, Schädigung der Atemwege, Ressourcenverbrauch Mineralien und Metalle, Flächenverbrauch. Diese wurden anschließend nach der Product Environmental Footprint (PEF) Guidance v6.3 normiert und gewichtet, um diejenigen Wirkungskategorien zu erkennen, die die größte Bedeutung für die ökologische Bewertung der jeweiligen Prozesskette haben. Hierbei wurden jedoch die sogenannten Tox-Kategorien nicht berücksichtigt, da sie eine sehr hohe Unsicherheit in der Berechnung aufweisen. Außerdem wurde bei der Kategorie Treibhauspotenzial nur der Gesamtausstoß und keine der Teilkategorien (zum Beispiel biogen, fossil) einzeln betrachtet. Die Kategorien Wasserverbrauch und Ionisierende Strahlung konnten ebenfalls nicht berücksichtigt werden,

da sie in der PEF-Berechnung eine andere Einheit als in der hier angewandten Wirkungsabschätzmethode aufweisen - die Gewichtungsfaktoren wurden entsprechend angepasst. Hierzu wurde die Summe aller Emissionen innerhalb der jeweiligen Umweltwirkungskategorie durch den jeweiligen Normalisierungsfaktor dividiert. Anschließend wurde das so normierte Ergebnis mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor multipliziert. Nun wurden die prozentuellen Anteile der einzelnen Umweltwirkungskategorien am Gesamtumwelteinfluss berechnet. Ausgewertet wurden schlussendlich jene Kategorien, die nach Normalisierung und Gewichtung in Summe 80% der Umweltauswirkungen ausmachen. Tabelle 4 zeigt die angewendeten Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren. Die Umrechnungen auf die spezifischen Prozessketten erfolgten mit Hilfe von Excel. Daten, welche nicht auf einem der angeführten Wege erfasst werden konnten, wurden durch Recherche bei Herstellern oder Vertriebsunternehmen erhoben. Transportdistanzen wurden mithilfe von Internetrecherche abgeschätzt.

Tabelle 4: Angewendete Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren. (Quelle: eigene Darstellung)

Wirkungskategorie	Einheit	Normalisierungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren
Süßwassereutrophierungspotenzial	kg P-Eq	2,55E+00	3,45E+00
Ozonabbaupotenzial	kg CFC-11-Eq	2,34E-02	7,89E+00
Bodennahe Ozonbildungspotenzial	kg NMVOC-Eq	1,06E+01	5,96E+00
Treibhauspotenzial gesamt	kg CO ₂ -Eq	7,76E+03	2,59E+01
Süßwasser- und Bodenversauerungspotenzial	mol H ⁺ -Eq	5,55E+01	7,76E+00
Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe	MJ	6,53E+04	1,04E+01
Bodeneutrophierungspotenzial	mol N-Eq	1,77E+02	4,57E+00
Meereseutrophierungspotenzial	kg N-Eq	2,83E+01	3,64E+00
Schädigung der Atemwege	Erkrankungshäufigkeit	6,37E-04	1,11E+01
Ressourcenverbrauch Mineralien und Metalle	kg Sb-Eq	5,79E-02	9,44E+00
Flächenverbrauch	Punkte	1,33E+06	9,84E+00

3.6 Ableiten robuster Handlungsempfehlungen

Die Ableitung der Handlungsempfehlungen für eine ökologischer Produktion durch AM stützt sich auf die Kombination der Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen sowie der Workshop-Beiträge der Expertinnen und Experten aus der österreichischen AM-Branche und der Ökobilanzen. Empfehlungen, die sich aus der Literatur ableiten lassen und Empfehlungen, die aus der Ökobilanzierung der Prozessketten folgen, wurden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern im Rahmen eines weiteren Workshops präsentiert und diskutiert. Außerdem wurden weitere Handlungsempfehlungen, welche aus Sicht der Akteurinnen und Akteure der AM-Branche für eine ökologische Produktion durch AM notwendig sind, ergänzt. Alle Handlungsempfehlungen wurden in drei Stakeholdergruppen aufgegliedert: Unternehmen, F&E und Politik, wobei es hier zu Überschneidungen kommen kann.

4 Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen

Im ersten Teil der Ergebnispräsentation wird das vorhandene Wissen bezüglich der Potenziale von AM für eine ökologischere Produktion für Akteurinnen und Akteure konsolidiert (4.1) und deren Wahrnehmung zu ökologischen Herausforderungen und der Umsetzung von AM für eine ökologischere Produktion dargelegt (4.2). Der Stand des Wissens zum ökologischen Vergleich von AM und konventionellen Fertigungstechnologien und ökobilanzielle Vergleichbarkeit werden unter 4.3 behandelt. Die für die ex-ante Ökobilanz ausgewählten generischen Prozessketten werden unter 4.4 beschrieben und unter 4.5 quantifiziert. Unter 4.6 werden schließlich die Stellhebel und Hotspots für eine ökologischere Produktion durch AM dargestellt.

4.1 Stand des Wissens über ökologische Herausforderungen und Potenziale von AM

Eine erste Untersuchung diente dazu, aus Sicht der Wissenschaft relevante Themen im Gebiet der ökologischen Bewertung additiver Fertigung zu identifizieren. Insgesamt wurden 17 Studien ausgewertet. Die folgenden Potenziale additiver Fertigung für eine ökologischer Produktionswirtschaft sind aus der Literaturstudie zusammengefasst und gliedert sich nach den Hotspots Produktion, Energie und Material sowie Vergleichbarkeit.

4.1.1 Potenziale additiver Fertigung für ökologischere Produktion

Im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien ermöglicht AM eine dezentrale Produktion, wodurch Transportwege und Lieferketten verkürzt werden können (Peng et al. 2018, Rejeski et al. 2018, Daraban et al. 2019, Suarez und Domínguez 2020). Dies hat neben dem geringeren Emissionsausstoß den Vorteil, dass die Dauer vom Design eines Bauteils bis zur Produktion verkürzt werden kann. Diese Zeiteinsparung steht auch im Zusammenhang mit der Tatsache, dass durch den Einsatz von AM der Werkzeugeinsatz eliminiert wird. So braucht es bei AM beispielsweise keine Werkzeuge (Formen), wie sie aus dem Spritzguss

bekannt sind (Javaid et al. 2021). Die Temperierung dieser Werkzeuge beim Spritzguss ist wiederum mit hohem Energieeinsatz assoziiert. Außerdem können Bauteile vollkommen automatisiert auf Grundlage eines zuvor erstellten CAD-Modells erstellt werden (Javaid et al. 2021).

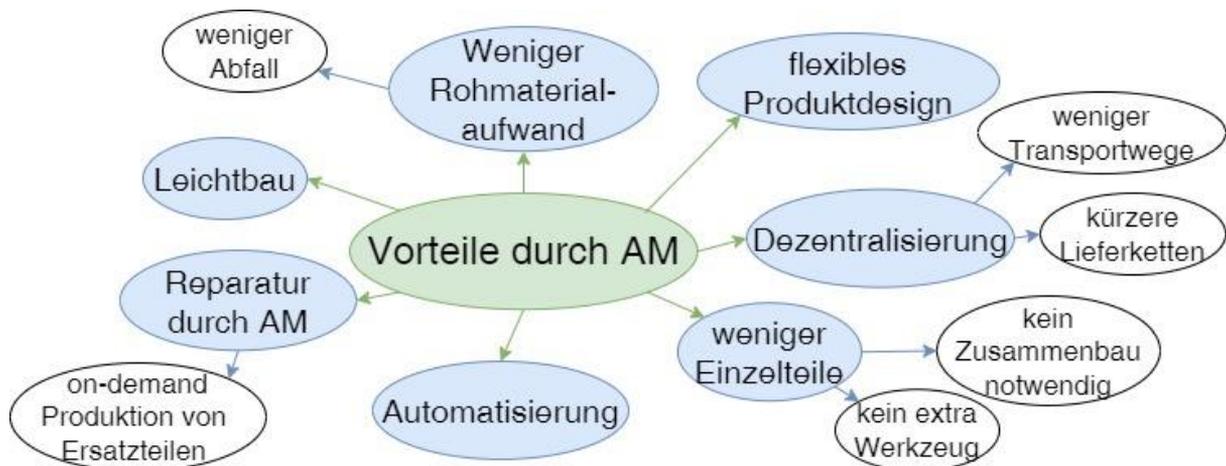
Weiters hat AM den Vorteil, dass das gedruckte Bauteil aus weniger Einzelteilen besteht (Ahn 2016) und in bereits vollständiger Form gedruckt werden kann. Dies verringert die Zahl der Einzelteile und eliminiert die Notwendigkeit eines Zusammenbaus (Ahn 2016, Javaid et al. 2021). Generell bietet AM die Möglichkeit eines sehr flexiblen Produktdesigns (Ribeiro et al. 2020, Peng et al. 2018). Hierdurch können Lösungen für Problemstellungen gefunden werden, die durch CM (conventional manufacturing) nicht möglich wären.

Ein weiteres als relevant identifiziertes Thema ist die Reparatur durch AM. AM ermöglicht es Bauteile bei Bedarf zu produzieren und hat somit eine wichtige Rolle in der Ersatzteilproduktion eingenommen (Daraban et al. 2019). Damit ergibt sich durch AM die Möglichkeit einer Verlängerung der Lebensdauer von Gütern. AM scheint eine ideale und effiziente Technologie für Produktion von Einzelteilen und Kleinserien zu sein. Dies ist vor allem vorteilhaft, da immer mehr Gesetze fordern, dass Ersatzteile länger verfügbar sein müssen, um eine Reparatur zu ermöglichen und Ressourcen zu schonen.

Ein anderer Vorteil, der direkten Einfluss auf die Umweltperformance nimmt, ist die Verringerung des Rohmaterialaufwandes und das geringere Abfallaufkommen (Ahn 2016, Peng et al. 2018, Rejeski et al., Daraban et al. 2019). Da es sich bei AM nicht um ein subtraktives Verfahren handelt, wird kein überschüssiges Material abgetragen, sondern die für ein Bauteil benötigte Menge an Material verbunden, wodurch nur sehr geringe Abfallmengen entstehen. Eine Ausnahme bilden Stützkonstruktionen und Fehldrucke, sowie Pulverbettverfahren mit hohen Qualitätsanforderungen an das Schüttgut.

Der Vorteil, der wohl am häufigsten Erwähnung findet, ist der Einsatz von AM zur Umsetzung von Leichtbaukonzepten. Durch den Schichtbau und den Einsatz von Computersoftware zur Topologieoptimierung sowie durch spezielle Materialien entstehen besonders leichte Bauteile, welche vor allem in der Luftfahrt zu hohen Emissionseinsparungen führen (Suarez und Domínguez 2020, Ahn 2016, Rejeski et al. 2018, Ribeiro et al. 2020). Abbildung 5 zeigt eine graphische Zusammenstellung aller während der Recherche dokumentierten Potenziale für ökologische Vorteile durch den Einsatz von AM Technologien.

Abbildung 5: Potenziale für ökologische Vorteile durch den Einsatz von AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung)



4.1.2 Potenziale in Bezug auf den Energieverbrauch von additiver Fertigung

In den untersuchten Studien werden auch häufig die Thematiken Material und Energie im Zusammenhang mit der ökologischen Performance, behandelt. Der Energieverbrauch sollte in der Produktion nicht nur während der Druckphase betrachtet werden, sondern auch beim Aufheizen des Geräts, im Leerlauf und Stand-by-Modus sowie beim Übergang zwischen den Drucken (Peng et al. 2018). Neben dem Druck selbst, verbraucht das Vorheizen, die Herstellung der Inertgasatmosphäre, das Kühlen des Bauteils sowie die Reinigung des Bauteils von Pulverresten Energie (Gao et al. 2021). Auch die Rohmaterialgewinnung und die Aufbereitung der Materialien (zum Beispiel Zerstäubung) sowie die Nachbearbeitung (Postprocessing) sollte nicht außer Acht gelassen werden (Gao et al. 2021).

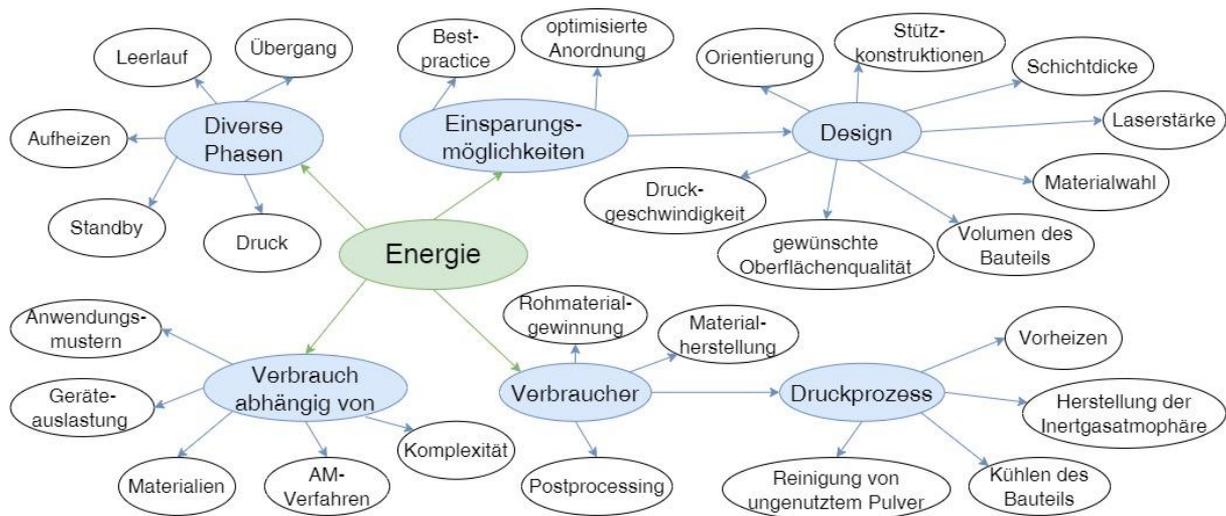
Prinzipiell ist der Energieverbrauch aber abhängig von den Anwendungsmustern, der Geräteauslastung, dem gewählten Material sowie dem AM-Verfahren (Rejeski et al. 2018). Aufgrund des hohen Energiebedarfs und der vielen Abhängigkeiten des Energieverbrauchs sind Einsparungsmöglichkeiten von Interesse. Hierbei wird empfohlen, den Bauraum optimal auszunutzen und auf die Anordnung der Bauteile zu achten sowie eine Erstellung von Bestpractice Beispielen gefordert (Rejeski et al. 2018).

Weiters sind Einsparungen durch Anpassungen des Prozess- und Bauteildesigns möglich. Die Laserstärke, das gewählte Material, das Volumen des Bauteils (Peng et al. 2018) sowie dessen Orientierung (Yi et al. 2020) nehmen Einfluss auf den Energieverbrauch. Zusätzlich kann durch die Erhöhung der Schichtdicke die Druckzeit verringert und somit Energie

eingespart werden (Peng et al. 2018). Hierbei gilt es zu beachten, dass geringere Schichtdicken zwar zu einer höheren Oberflächenqualität führen, diese aber für viele Anwendungsgebiete nicht notwendig ist.

Auch die Designoptimierung mittels geeigneter Software kann zu Energieeinsparungen führen, indem beispielsweise überflüssige Stützkonstruktionen eingespart werden können (Gao et al. 2021). Abbildung 6 zeigt eine graphische Zusammenstellung aller als relevant identifizierten Themen rund um den Energieverbrauch von AM.

Abbildung 6: Zusammenhänge und Potenziale in Bezug auf den Energieverbrauch von AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung)



4.1.3 Potenziale in Bezug auf den Materialeinsatz bei additiver Fertigung

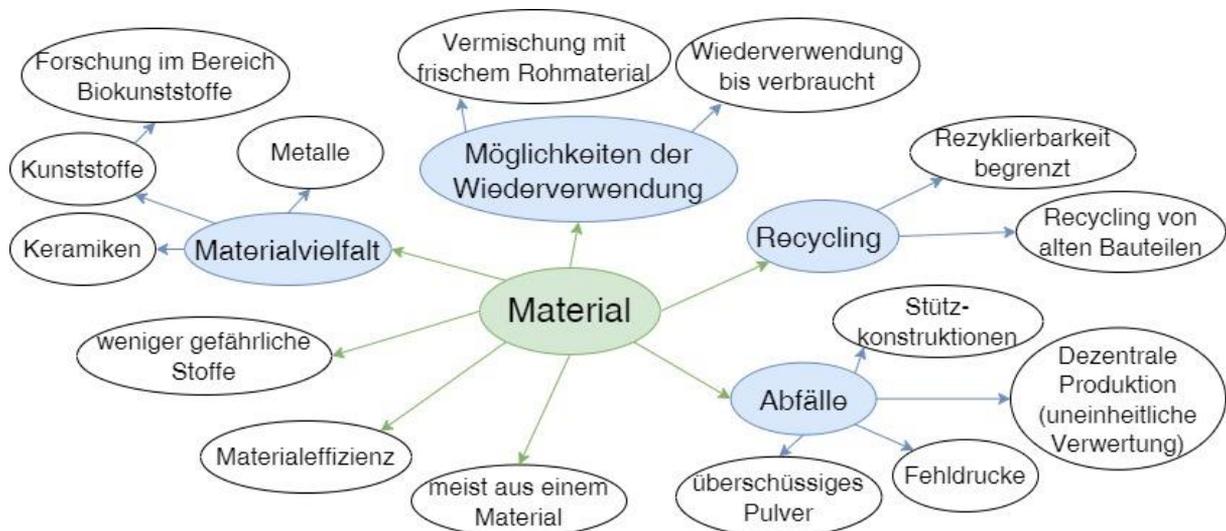
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass additive Fertigung gegenüber konventioneller Fertigung weniger Halbzuge und Werkzeuge braucht, Material und Abfälle und Ressourcen durch Regranulierung der Rohstoffe einsparen kann. Durch Topologieoptimierung, also einer Anpassung des Designs eines Bauteils, kann weiteres Material eingespart werden. Dies ist hinsichtlich der Tatsache, dass die Materialien meist aus nicht erneuerbaren Rohstoffen gewonnen werden, von großer Bedeutung. Außerdem sollte die Regranulierung von nicht mehr benötigten Bauteilen mehr forciert werden. Bei den Materialien sind Themen wie das Recycling und die Wiederverwendung von Bedeutung. Pulvermaterialien können demnach mit frischem Rohmaterial vermischt, wiederverwendet, bis sie verbraucht sind oder nach jedem Druck zur Gänze ausgetauscht werden (Gao et al. 2021). Die Rezyklierbarkeit der Materialien ist begrenzt und teilweise nicht möglich (Pulvermaterialien). Auch die Frage, ob alte Bauteile oder Fehldrucke recycelt werden können, bleibt offen. Vorteilhaft ist, dass die

meisten Bauteile aus einem Material bestehen und die Materialeffizienz von AM-Technologien prinzipiell hoch ist (Daraban et al. 2019).

Außerdem gibt es diverse Technologien, die unterschiedlichste Materialien verarbeiten können, wodurch viele Anwendungsgebiete bedient werden können. In der Praxis werden vor allem Metalle, Kunststoffe und Keramiken angewendet. Auch Forschung im Bereich Biokunststoffe für additive Fertigung wird forciert (Suarez und Domínguez 2020).

Abfälle in der Produktion entstehen primär durch Stützkonstruktionen, überschüssiges Pulver und Fehldrucke. Durch dezentrale Produktion kommt es zu einer uneinheitlichen Sammlung und Verwertung (Rejeski et al. 2018). Abbildung 7 zeigt eine graphische Zusammenstellung aller als relevant identifizierten Themen rund um den Materialeinsatz bei AM-Technologien.

Abbildung 7: Zusammenhänge und Potenziale in Bezug auf den Materialeinsatz bei AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung)



4.1.4 Verallgemeinerung ökologischer Aussagen

Über einige der in den vorangegangenen Kapiteln genannten Thematiken bezüglich der ökologischen Performance von AM herrscht Einigkeit, andere sind wiederum umstritten, weil bei der Ökobilanzierung generell Kontextabhängigkeit besteht. Saade et al. (2019) führen das näher aus und weisen auf die oft sehr spezifischen Anwendungsfälle von AM Technologien oder

Anwendungsfeldern hin, die untersucht werden und damit, keine allgemeine Gültigkeit erlangen. Da der Bezugspunkt für die Umweltwirkungen, die funktionelle Einheit, oft unterschiedlich definiert wird, ist ein direkter Vergleich nicht möglich. So werden die Umweltauswirkungen auf ein bestimmtes Bauteil bezogen oder auf einen Quadratmeter gedruckter Struktur oder verarbeitete Materialmenge. Das Umrechnen der Referenzflüsse auf eine gemeinsame Funktionelle Einheit ist limitiert durch die unterschiedlich konzipierten Ökobilanzstudien mit unterschiedlichen Zielsetzungen, Systemgrenzen, Daten, Annahmen und so weiter. Zur Bewertung der potentiellen Umweltauswirkungen werden weiters unterschiedliche Datenbanken und Methoden für die Wirkungsanalyse angewendet. Außerdem werden die Ergebnisse in unterschiedlichen Formen (Midpoint, Endpoint, Single Score, siehe dazu 2.2.3) angegeben, was einen Vergleich erschwert oder gar unmöglich macht. Daher bestehen Forderungen nach standardisierten Methoden und allgemeinen Modellen zur Berechnung der Umweltauswirkungen von additiv gefertigten Bauteilen, welche einen Vergleich ermöglichen, wenn auch nur eingeschränkt in entsprechenden Bauteilkategorien. Die Harmonisierung von Ökobilanzen wird vor allem in der Branchen nachhaltiges Bauen über das Umweltproduktdeklarationen und den dazugehörigen Produktkategorieeregeln entwickelt. Mit dem Product Environmental Footprint der Europäischen Kommission wird ein weiterer Vorstoß in Richtung Harmonisierung entwickelt. Abbildung 8 zeigt eine graphische Zusammenstellung der Gründe für die fehlende Vergleichbarkeit von Ökobilanzen im Bereich AM.

Abbildung 8: Gründe für die fehlende Vergleichbarkeit von Ökobilanzen im Bereich AM (Quelle: eigene Darstellung)

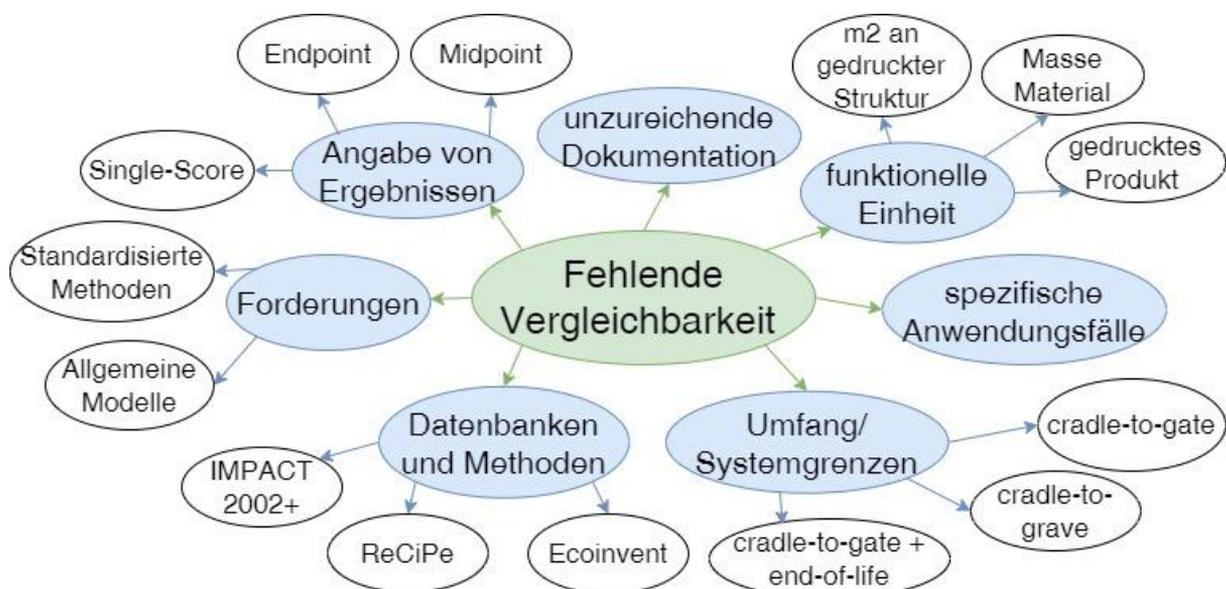
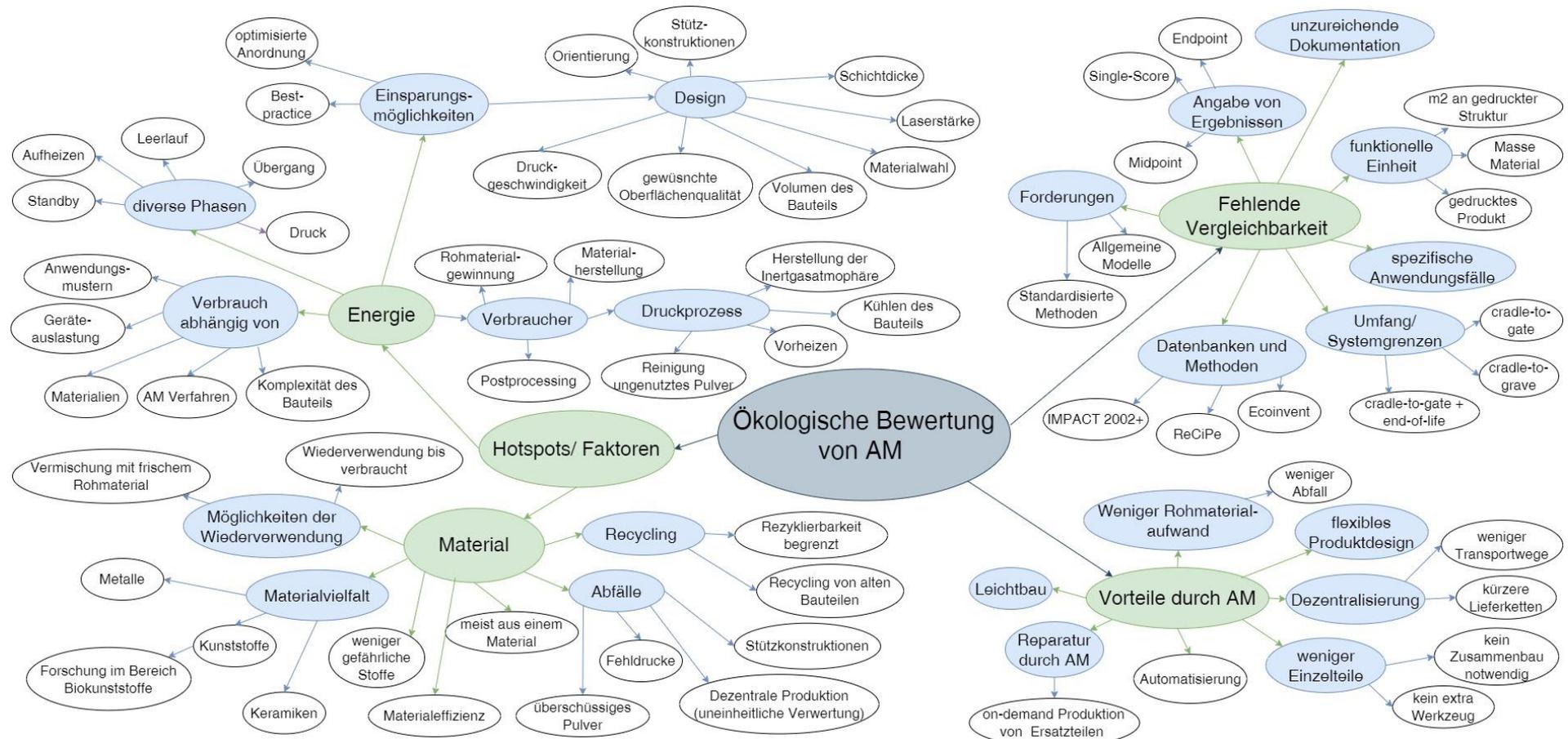


Abbildung 9 fasst den Stand des Wissens über ökologische Herausforderungen und Potenziale von AM zusammen und zeigt alle zuvor für die ökologische Bewertung von AM als relevant identifizierten Themenbereiche.

Abbildung 9: Mindmap aller als relevant identifizierten Themen rund um die ökologische Bewertung von AM, (Quelle: eigene Darstellung)



4.2 Wahrnehmung ökologischer Herausforderungen

Die folgend beschriebenen ökologischen Herausforderungen wurden im Rahmen des ersten Workshops erarbeitet. Das Expert-Panel bestand aus Vertreterinnen und Vertretern unterschiedlicher AM-Bereiche wie produzierende Industrie, Forschung sowie auch Interessensvertretern wie beispielsweise Clustern. Nach einem Impulsvortrag zum Stand des Wissens ökologischer Potenziale von AM basierend auf wissenschaftlicher Literatur, wurde konkret in mehreren Gesprächsrunden (World Café) mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der teilnehmenden Expertinnen und Experten diskutiert, welche zukünftigen ökologischen Herausforderungen auf die produzierende Industrie zukommen, welche konkrete Rolle hierbei die additive Fertigung einnimmt und ob diese entsprechend einen positiven Beitrag leisten kann oder eher negative ökologische Auswirkungen zu erwarten sind. Darüber hinaus konnte auch die Erkenntnis gewonnen werden, dass mit den identifizierten Auswirkungen durchaus alle drei Hauptbereiche (Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur; Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur; Wiederverwerten von Materialien) der Kreislaufgrundsätze aus der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMK, 2021) angesprochen werden.

4.2.1 Herausforderung Energieeffizienz

In Zusammenhang mit der Herausforderung der zu steigenden Energieeffizienz, schätzen Expertinnen und Experten sowohl den Druck als auch die Herstellung der Pulver für die pulverbettbasierten Verfahren als sehr energieintensiv ein. Weiters werden laut Expertinnen und Experten in der AM-Branche häufig CAD-Dateien versendet, was eine hohe Serverleistung erfordert und damit ebenfalls zu einem hohen Energieverbrauch beiträgt.

Begünstigend wirken hingegen die Einsparungen während der Nutzungsphase sowie ein möglicher Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoffe aus. Hierbei wurden Einsparungen von Treibstoff im Bereich der Luft- und Raumfahrt als Beispiel genannt.

4.2.2 Herausforderung Ressourcenschonung und Einsparung von Abfallmengen

Beim Thema Ressourcenschonung und Abfallmengen üben die Expertinnen und Experten Kritik an einer möglichen Förderung von Konsum- und Wegwerfgesellschaft durch AM, was sich hemmend auf die Ressourcenschonung auswirkt. Demnach kommt es vermehrt zu

schnellem und unbedachtem Prototyping, was zu einer Steigerung des Materialverbrauchs führt. Dies ist auf die schnellen Produktentwicklungszyklen vom Design bis zum Druck zurückzuführen. Außerdem verbrauchen einige Verfahren eine hohe Menge an Argon Gas, welches bei manchen Verfahren zur Herstellung einer Inertgasatmosphäre benötigt wird.

Auf die Ressourcenschonung begünstigend wirken sich hingegen die Abfall- und Materialeinsparungen gegenüber konventionellen Verfahren, der geringere Verbrauch von Halbzeugen sowie die Möglichkeit der Weitergabe von verbrauchtem Pulver an Einrichtungen mit geringerem Qualitätsanspruch. Letzteres tritt vor allem in der bemannten Luft- und Raumfahrt auf, da hier besonders hohe Qualitätsansprüche gefordert sind.

Außerdem geben die Teilnehmerinnen und Teilnehmer an, dass Fehldrucke, oder Drucke, für die es keine Verwendung mehr gibt, wiederverwendet werden können, indem sie regranuliert werden. Auch die Verwendung besonders hochwertiger Materialien und die Berücksichtigung ökologischer Aspekte in der Materialentwicklung für AM wird als begünstigend angesehen. Hinzu kommt, dass durch das Versenden von CAD-Dateien anstelle fertiger Produkte Verpackungsmaterial eingespart werden kann.

4.2.3 Herausforderung Recycling und Kreislaufwirtschaft

Hinsichtlich der Herausforderungen Recycling und Kreislaufwirtschaft, sehen die Expertinnen und Experten eine Barriere durch fehlende Recyclingmethoden und Infrastrukturen für Pulvermaterialien. Diese würden als gefährliche Abfälle verbrannt werden, wenn sie keiner Wiederverwendung mehr zugeführt werden können.

Außerdem wird das Recycling von Verbundwerkstoffen als schwierig angesehen. Jedoch hat AM auch das Potenzial die Kreislaufwirtschaft zu fördern. So können Filamente aus bereits verbrauchten Materialien (zum Beispiel Fehldrucken) hergestellt werden. Außerdem sei es denkbar, Trennschichten einzubauen, um die Trennbarkeit von Verbundwerkstoffen zu ermöglichen.

4.2.4 Herausforderung Umweltschonung durch Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe

Das Thema Umweltschonung bezieht sich im Zusammenhang mit additiver Fertigung nach Wahrnehmung der Expertinnen und Experten primär auf Pulvermaterialien, welche sich hemmend auf diese Herausforderung auswirken. Sie sind lungengängig und können, bei unzureichender Arbeitsplatzsicherheit, wie es im privaten Bereich nicht selten der Fall ist, schädliche Wirkungen haben. Außerdem werden durch die hohen Temperaturen flüchtige

organische Verbindungen (VOCs) frei. Weiters kann es bei unzureichenden Sicherheitsvorkehrungen, dazu kommen, dass das Abwasser durch Pulvermaterialien verunreinigt wird. Andererseits bietet AM laut Expertinnen und Experten das Potenzial, Materialien so zu entwickeln, dass auf gewisse Additive, welche in konventionellen Herstellungsverfahren Verwendung finden, verzichtet werden kann, was sich wiederum begünstigend auf die Herausforderung der Umweltschonung auswirken kann. Zusätzlich wurde betont, dass AM-Technologien häufig nur ein Ausgangsmaterial haben, was dazu führt, dass sortenreine Abfälle entstehen.

4.2.5 Herausforderung CO₂-Einsparung

Bei der genannten Herausforderung, CO₂ einzusparen nimmt die Expertinnen- und Expertengruppe hauptsächlich Bezug auf Transporte. Hierbei wurden Vorteile von AM genannt wie: Eine Minimierung der Versandwege durch das Versenden von CAD-Dateien anstatt fertiger Bauteile führt aufgrund geringerer Transportwege zu einer CO₂-Einsparung. Außerdem kann mittels AM die Masse von Bauteilen gesenkt werden. Der Leichtbau führt zu einem geringeren Gesamtgewicht des zu transportierenden Gutes, was ebenfalls zu einem geringeren Emissionsausstoß führt. Zusätzlich werden durch die Dezentralisierung der Produktion, also einer Produktion näher am Kunden, viele Transportwege eliminiert. Eine weitere Möglichkeit CO₂ einzusparen, welche sich durch AM ergibt, sind der geringere Materialverbrauch und die geringeren Abfallmengen. Indirekt können natürlich auch durch Reduktion von Energieverbrauch, durch reduzierten Materialeinsatz sowie Effizienzsteigerungen CO₂ eingespart werden.

4.2.6 Herausforderung Verlängerung der Lebensdauer von Produkten

Eine weitere Herausforderung ist die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten. AM ist laut Expertinnen und Experten dafür bekannt, hochwertige Werkstoffe einzusetzen, was zu einer längeren Lebensdauer im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen führt. Zusätzlich bietet AM die Möglichkeit Ersatzteile als CAD-Dateien zu speichern und diese bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. Dies ermöglicht es Ersatzteile über einen längeren Zeitraum verfügbar zu machen, ohne den logistischen Aufwand zu erhöhen. Diese Teile können in weiterer Folge zur Reparatur eingesetzt werden, was die Lebensdauer eines Gutes erhöht.

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht, der durch den Expertinnen- und Expertenworkshop identifizierten und zuvor beschriebenen ökologischen Herausforderungen sowie eine Bewertung der möglichen Wirkungen von AM auf die identifizierten Herausforderungen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Expertinnen- und Expertenworkshops zur Identifikation von ökologischen Herausforderungen und die Auswirkung von AM auf diese. ↘ hemmende Wirkung, ↗ begünstigende Wirkung (Quelle: eigene Darstellung)

Ökologische Herausforderung	Wirkung von AM	Erläuterung
Steigerung Energieeffizienz	↗	Möglicher Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoffe Energieeinsparungen in der Nutzungsphase
	↘	Pulverherstellung ist energieintensiv Herstellungsverfahren (Druck) energieintensiv (Laser) Versand von Dateien benötigt hohe Serverleistungen - hoher Energieverbrauch
Ressourcenschonung (Verringerung der Abfallmengen)	↗	Einsatz von hochwertigen und vielfältigen Materialien Nachhaltigkeit in der Materialentwicklung z.B. PLA Nicht mehr gebrauchte Drucke regranulieren und für minderwertigere Drucke (privater Einsatz) wiederverwenden z.B. PET Einsparung von Verpackungen durch versenden von CAD-Dateien Abfall-/Materialeinsparung gegenüber konventionellen Verfahren „Verbrauchtes“ Pulver (einmal verwendet, in Bereichen mit hohen Qualitätsansprüchen z.B. bemannte Luftfahrt) weitergeben an Einrichtungen mit geringeren Qualitätsansprüchen Weniger Halbzeuge
	↘	Kunststoffverbrauch durch schnelles, unbedachtes Prototyping (Wegwerfgesellschaft) Schnellere Produktentwicklungszyklen (Produkte veralten schneller (Konsumgesellschaft) Inertgas Verbrauch (Argon)
Recycling – Kreislaufwirtschaft	↗	„Design for Recycling“ als mögliches Potenzial (Einbau von Trennschichten, um Verbundstoffe trennen zu können) AM hat Potenzial Kreislaufwirtschaft zu fördern (Herstellung von Filamenten aus Abfällen z.B. Fehldrucke)

Ökologische Herausforderung	Wirkung von AM	Erläuterung
	<p>↘</p>	<p>Keine geeigneten Methoden für Pulverrecycling (Verbrennung als Sondermüll (gefährlicher Abfall)) Recycling von Composit- Materialien schwierig (Bauteilrecycling, DED, Extrusion)</p>
<p>Umweltschonung (Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe)</p>	<p>↗</p>	<p>Potenzial, Additive wegzulassen, Bewusstsein schaffen und Alternativen finden Eine Technologie, ein Verfahren, ein Abfall</p>
	<p>↘</p>	<p>Mögliche Kontamination von Abwasser durch Pulver Feinstaub, VOC, Toxizität</p>
<p>CO2-Einsparung (Transporte)</p>	<p>↗</p>	<p>Versand kann minimiert werden- versenden von Dateien Weniger Gewicht der Bauteile (Leichtbau)-CO2 Einsparungen bei Transport und Use Materialeinsparung gegenüber konventionellen Verfahren, Verkürzung von Transportwegen (Produktion näher am Kunden)</p>
	<p>↘</p>	<p>-</p>
<p>Verlängerung der Lebensdauer</p>	<p>↗</p>	<p>Ersatzteile können von Firmen als CAD-Dateien zur Verfügung gestellt werden Reparatur durch AM-Ersatzteilbau Einsatz von hochwertigen Werkstoffen</p>
	<p>↘</p>	<p>-</p>

4.2.7 Anmerkungen zur Interpretation

Viele der angeführten Themen sind auf die Hintergründe der befragten Expertinnen und Experten zurückzuführen. So ist zu erkennen, dass vor allem Pulvermaterialien und die damit verbundenen Prozesse für die Expertinnen und Experten von Bedeutung sind und unter mehreren der genannten Herausforderungen Erwähnung finden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops viele Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen, welche mit Pulverbettverfahren arbeiten, waren. Auch Thematiken rund um Kunststoffe, wie beispielsweise die Regranulierung waren für die Expertinnen und Experten von Bedeutung, was sich auf die Verwendung von Kunststoffen in den vertretenen Unternehmen zurückführen lässt. Weiters entsprechen Beispiele aus Luft- Raumfahrt (Leichtbau) sowie aus Maschinen- und Anlagenbau (Serverleistung für Versenden von CAD-Dateien – Ersatzteilproduktion) den Hintergründen der Workshop-Teilnehmerinnen und Teilnehmern.

Eine Reihe an Themen, welche durch die befragten Expertinnen und Experten hervorgebracht wurden, scheinen aus Sicht der Ökobilanz-Literatur, keine relevante Rolle einzunehmen. Hierzu zählt der Energieverbrauch durch die Server, welche für AM-Verfahren notwendig sind und auch Einsparungen durch das Versenden von CAD-Dateien anstelle von fertigen Bauteilen. Zumindest wird dieses Thema (noch) nicht im Kontext von Ökobilanzen von AM aufgegriffen. Auch als problematisch identifizierten die Expertinnen und Experten die potentielle Förderung der Konsum- und Wegwerfgesellschaft durch schnelle Produktdesignzyklen, welche durch AM ermöglicht werden. Dieses Thema wird nicht in der ausgewählten Literatur behandelt, was durch den Fokus auf die Produktionsphase der meisten Ökobilanzstudien erklärt werden kann. Die ökologischen Konsequenzen einer breiten Adoption von AM durch die Produktionswirtschaft beschreibt eine Forschungslücke. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops reflektierten auch diverse Optionen für die Verwertungsphase auf, welche in der untersuchten Literatur keine Erwähnung fanden. So besteht laut Expertinnen und Experten die Möglichkeit des Einsatzes von Abfällen als Ersatzbrennstoffe oder auch zur Weitergabe von „verbrauchten“ Pulvern. Auch die mögliche Verunreinigung von Abwasser und die gesundheitliche Beeinträchtigung durch die Lungengängigkeit von Pulvern wurde nicht in der Ökobilanz-Literatur behandelt, da ein professioneller Umgang vorausgesetzt wurde. Hierbei wird deutlich, dass die ökologische Bewertung abhängig ist aus Erkenntnissen aus vielen anderen Disziplinen. Vermutlich hätte das Einbeziehen von Literatur aus der Arbeitssicherheit oder Risikobewertung weitere Einblicke ermöglicht.

4.3 Ökologischer Vergleich von AM und konventionellen Fertigungstechnologien

4.3.1 Stand des Wissens zum ökologischen Vergleich von AM und konventionellen Technologien

Zunächst gilt es festzuhalten, dass die hier analysierten Fallstudien vergleichende Ökobilanzstudien von AM und konventioneller Fertigung (CM) sind (Tabelle 6), die sich auf spezifische Anwendungsfälle beziehen. So schreiben Faludi et al. (2015) beispielweise, dass es schwierig ist, eine Technologie ausfindig zu machen, die in jedem Fall umweltfreundlicher ist, als eine andere. Die Autoren stellen fest, dass die Umweltfreundlichkeit stark von den gewählten Geräten und dem Anwenderinnen- und Anwenderprofil abhängt. Trotzdem kann bestätigt werden, dass die Umweltauswirkungen pro Bauteil mit steigender Nutzung der Geräte sinken, da sich die Umweltwirkungen von Phasen wie dem Aufheizen und dem Kühlen des Geräts auf mehrere Bauteile aufteilen. Bei ihrem Vergleich stellen Faludi et al. (2015) fest, dass FDM auch bei geringer Nutzung, bei Abschalten des Geräts, in den Leerlaufzeiten, im Vergleich zu einem anderen AM Verfahren (Inkjet) und CNC-Fräsen am besten abschneidet.

Tabelle 6: Übersicht der Studien der vergleichenden Literaturrecherche

Studie	AM-Verfahren	CM-Verfahren
Abu-Ennab et al. 2022	k.A. (3D Betondruck)	Gießen
Bekker et al. 2018	WAAM	Gießen, CNC-Zerspanen (Fräsen)
DeBoer et al. 2021	BJ, PBF, BPE	Gießen, Zerspanen
Faludi et al. 2015	FDM, Polyjet	CNC-Zerspanen (Fräsen)
Garcia et al. 2021	FDM	Spritzguss
Hofstätter et al. 2016	DLP	Zerspanen (Fräsen)
Ingarao und Priarone 2020	EBM	Zerspanen
Jiang et al. 2019	LENS	CNC-Zerspanen
Kafara et al. 2017	FLM	Gießen, Zerspanen (Fräsen)
Landi et al. 2022	LENS	CNC-Zerspanen
Liu et al. 2018	DED	Gießen

Studie	AM-Verfahren	CM-Verfahren
Liu et al. 2022	k.A. (3D Betondruck)	Gießen
Lunetto et al. 2021	EBM	Zerspanen (Fräsen)
Lyons et al. 2021	EBM	Zerspanen (Fräsen)
Mrazovic et al. 2017	DMLS, EBM	k.A.
Paris et al. 2016	EBM	Zerspanen (Fräsen)
Prakash et al. 2021 ¹	FDM	Gießen (Feingießen)
Raoufi et al. 2022	LPBF, BJ	Metall-Spritzguss
Serres et al. 2011	CLAD	Zerspanen
Swetha et al. 2022	SLM	CNC-Zerspanen (Drehen, Fräsen, Bohren)
Výtisk et al. 2022	SLM	Trennen und Zerspanen

Auch die allgemein bekannte Aussage, dass AM zu Materialeinsparungen führt im Vergleich zu konventionellen Technologien, bestätigt diese Studie (Faludi et al. 2015), jedoch geben die Autoren zu bedenken, dass der hohe Energieverbrauch von AM in der Herstellung von Bauteilen diese Einsparung kompensieren kann. Der Energieverbrauch kann jedoch gesenkt werden, indem das Gerät während der Leerlaufzeiten abgedreht wird. So macht der Verbrauch an elektrischer Energie laut Faludi et al. (2015) in Bezug auf das FDM-Verfahren etwa 95 % der Gesamtumwelteinflüsse aus, wenn das Gerät bei der Produktion von einem Druckjob pro Woche ein Jahr lang verwendet wird und nie abgedreht wird (Szenario 1). Wenn das Gerät während der Leerlaufzeiten abgedreht wird, entspricht der Umwelteinfluss durch die Nutzung elektrischer Energie für das gleiche Verfahren nur noch 43 % der Gesamtumwelteinflüsse. Im Vergleich zu Szenario 1, kommt es zu Einsparungen von 94 %. Aufgrund dessen sei es wichtig die Problemstellung ganzheitlich zu betrachten. Als Potenzial sehen Faludi et al. (2015) die Materialeinsparung gegenüber konventionellen Verfahren. Eine Herausforderung sei hingegen die geringere Oberflächenqualität, die in einigen Anwendungsfällen problematisch sein könnte. Dies wird auch von DeBoer et al. (2021) bestätigt, oft sei eine Nachbearbeitung notwendig.

Inwieweit die Materialeinsparung einen umwelttechnischen Vorteil für AM bringt, haben Paris et al. (2016) erforscht. Im Rahmen der Studie wurden Indikatoren aufgestellt, welche

¹ Hybridverfahren (Kombination des konventionellen Verfahrens mit additiver Fertigung)

Auskunft über die Umwelteinflüsse und den Materialverbrauch der Verfahren geben sollten. Einer der Indikatoren bildet das Verhältnis aus dem Volumen des Materialeinsatzes und dem Volumen des Bauteils (K-Faktor) ab. Er gibt also Auskunft darüber, wie viel Material bei einem subtraktiven Verfahren abgetragen werden muss, um das gewünschte Bauteil zu erzeugen. Es wurde festgestellt, dass ab einem K-Faktor von über sieben das additive Verfahren (Electron Beam Melting, EBM) für alle untersuchten Wirkungskategorien umweltfreundlicher ist. Für Bauteile mit geringer Materialabtragungsrate ist das subtraktive Verfahren zu bevorzugen.

Paris et al. (2016) zeigen konkret auf, dass das EBM-Verfahren, welches sie untersucht haben, ab einem K-Faktor von 7,08 in zehn Wirkungskategorien besser abschneidet als das von ihnen untersuchte Fräsverfahren. In der Kategorie terrestrische Ökotoxizität (terrestrial ecotoxicity) ist der Unterschied am deutlichsten zu erkennen. Hier machen die Umweltauswirkungen durch das EBM-Verfahren nur etwa 21 % der Umweltbelastung durch das konventionelle Verfahren aus (Einsparung von 79 %). In der Kategorie Treibhauspotenzial (global warming) kommt es zu Einsparungen von etwa 6,3 %. Daraus lässt sich also schließen, dass AM besonders für komplexe Teile, mit einer hohen Abtragungsrate, geeignet ist. Als Herausforderungen heben Paris et al. (2016) den hohen Energieverbrauch bei der Pulverzerstäubung für das EBM-Verfahren heraus.

Auch DeBoer et al. (2021) stellen fest, dass konventionelles Zerspanen aufgrund seines hohen Materialverbrauchs wenig umweltfreundlich ist. Im Fall der Herstellung eines Gelenks (Double Cardan H-yoke) wird hier das Gießen inklusive einer entsprechenden mechanischen Nacharbeitung als optimale Variante beschrieben. Jedoch gilt es zu berücksichtigen, dass AM bei der Produktion geringer Stückzahlen eines komplexen Bauteils, die umweltfreundlichste Möglichkeit darstellt. AM hat laut DeBoer et al. (2021) das Potenzial Material einzusparen und gemeinsam mit konventionellen Verfahren umweltfreundliche Hybridverfahren zu ermöglichen.

Prakash et al. (2021) beschreiben die Möglichkeit der Kombination eines additiven Verfahrens mit einem konventionellen. Es wird beschrieben, wie AM dazu beitragen kann das konventionelle Feingussverfahren zu vereinfachen. Beim konventionellen Verfahren muss zunächst ein Modell aus Wachs gespritzt und anschließend zu Modelltrauben zusammengefügt werden. Für Hinterschneidungen werden dabei Kerne verwendet, für welche zusätzliches Werkzeug benötigt wird. In einem weiteren Schritt wird die Modelltraube in eine keramische Masse (Schlicker) getaucht und so eine Form hergestellt. Das sich in der Form befindliche Wachs muss anschließend in einem De-waxing Prozess

herausgeschmolzen werden. Durch den Einsatz von AM kann die Modelltraube direkt gedruckt werden, wodurch die Herstellung der Spritzgussform, der Spritzguss, das Zusammenfügen zu Modelltrauben und der De-waxing Prozess eliminiert werden können. Laut Prakash et al. (2021) werden durch dieses Vorgehen 70% Energie und rund 72% der CO₂-Emissionen eingespart. Der Herstellungszyklus dauert um 19% kürzer. Weiters wird Material eingespart, was ein klares Potenzial dieser Technologie ist.

Wie bereits erwähnt, spielt die Stückzahl bei der Frage um das geeignet Verfahren eine wichtige Rolle (DeBoer et al. 2021). Auch Garcia et al. (2021) stellen fest, dass sowohl das Treibhauspotenzial als auch der kumulierte Energieverbrauch pro Stück ab einer Losgröße von 50 Stück für CM geringer ist als für AM (Losgröße 1), unabhängig davon welche prozentuelle Ausfüllung das durch AM hergestellte Bauteil hat. Der kumulierte Energieverbrauch für die konventionelle Herstellung eines Bauteils beträgt demnach bei einer Losgröße von sieben rund 1,5 MJ-Äquivalente und bei einer Losgröße von 100 nur 0,36 MJ-Äquivalente. Das Treibhauspotenzial reduziert sich um 74% pro Bauteil bei einer Anhebung der Losgröße von sieben auf 100 für das konventionelle Verfahren. Bei den mittels AM-Verfahren produzierten Bauteilen wurde die Änderung der Ausfüllung bei gleichbleibender Losgröße betrachtet. Bei der Änderung der Ausfüllung von 25% auf 50%, von 50% auf 75% und von 75% auf 100% ändert sich das Treibhauspotenzial um jeweils etwa 5%. Sowohl das Treibhauspotenzial als auch der kumulierte Energieaufwand steigen mit steigender Ausfüllung. Der kumulierte Energieaufwand für das Bauteil mit 25% beträgt 0,72 MJ-eq. und ist somit doppelt so hoch wie der kumulierte Energieverbrauch pro Bauteil bei der konventionellen Produktion mit einer Losgröße von 100.

Weiters schreiben Garcia et al. (2021), dass der Druck bei Anwendung des AM-Verfahrens etwa 58% des gesamten Treibhauspotenzials ausmacht, das Rohmaterial nur 16 %. Beim konventionellen Verfahren macht das Rohmaterial hingegen etwa 53 % des gesamten Treibhauspotenzials aus.

Außerdem stellen Garcia et al. (2021) fest, dass die durch die erhöhte Ausfüllung verbesserten mechanischen Eigenschaften die Umweltauswirkungen überwiegen. Dementsprechend sollte immer ein Bauteil mit möglichst hoher Ausfüllung angestrebt werden.

Hofstätter et al. (2016) kommen zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Losgröße bei der Betrachtung von Einsätzen für Spritzguss. Die metallischen konventionellen Einsätze sind robuster und können deswegen häufiger wiederverwendet werden, führen jedoch in der

Herstellung zu mehr CO₂-Emissionen. Wenn also nur eine geringe Losgröße (bis zu 200 Stück) an Bauteilen mittels Spritzgusses hergestellt werden soll, sind die aus Photopolymer bestehenden, durch AM produzierten Einsätze umweltfreundlicher. Demnach eignet sich AM vor allem für Kleinserien und Prototyping.

Auch Raoufi et al. (2022) bestätigt diese Feststellung. Ab einer gewissen Losgröße amortisierte sich die Umweltwirkung durch die Herstellung von Werkzeug, wodurch CM umweltfreundlicher als AM ist. Konkret entstehen bei der Produktion von 100 Stück eines Bauteils (Teil eines chemischen Reaktors) 35 kg CO₂- eq. pro Bauteil, wenn dieses durch Binder Jetting (BJ) hergestellt wird und 92 kg CO₂- eq., wenn das Bauteil durch Spritzguss hergestellt wird. Bei einer Stückzahl von 1000 Bauteilen sind es 20 kg CO₂- eq. beim Einsatz von BJ und 22 kg CO₂- eq. beim Einsatz von Spritzguss. Bei der Herstellung von 10 000 Bauteilen generiert die durch Spritzguss hergestellte Variante nur noch 15 kg CO₂- eq. und die durch BJ hergestellte Variante 18 kg CO₂- eq. Zusätzlich stellen die Autoren fest, dass das Rohmaterial den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen nimmt. Die limitierte Auswahl an Rohmaterialien und die geringe Oberflächenqualität wird als Herausforderung gesehen. Auch schreiben Raoufi et al. (2022), dass Designentscheidungen eine Schlüsselrolle bei der Umweltperformance spielen. AM ermöglicht demnach Leichtbauteile und die Herstellung äußerst komplexer Bauteile.

Dieses Potenzial sehen auch Lyons et al. (2021). Bei der Herstellung von Knieimplantaten hat sich herausgestellt, dass die Produktion mittels EBM umweltfreundlicher ist und, dass dies vor allem auf die hohe Komplexität solcher Implantate zurückzuführen ist. Das AM-Verfahren hat demnach eine wesentlich höhere Materialeffizienz und benötigt nur rund 23 % der Menge an Material des CM-Verfahrens. Außerdem kommt es durch das AM-Verfahren zu einer Einsparung an Energie und CO₂-Emissionen. Dies ist im Wesentlichen auf die Materialeinsparung zurückzuführen, da der Energieverbrauch durch den Herstellungsprozess bei AM höher ist als bei CM.

Lyons et al. (2021) stellen fest, dass die Herstellung des Materials für AM rund 80 MJ/Bauteil benötigt und für einen CO₂-Ausstoß von rund 11,5 kg/Bauteil sorgt. Im Vergleich sind für Materialherstellung im CM-Verfahren rund 284 MJ/Bauteil aufzubringen, erzeugt werden rund 45 kg CO₂/Bauteil. Für das Herstellungsverfahren sind hingegen im AM Bereich nur rund 55 MJ/Bauteil (exkl. 8,6 MJ/Bauteil für Post Processing) notwendig und es entstehen 3 kg CO₂/Bauteil (exkl. 0,47 kg CO₂/Bauteil für Post Processing), im CM-Verfahren sind es 28,44 MJ/Bauteil und 0,68 kg CO₂/Bauteil. Es ist also zu erkennen, dass sowohl der Energieverbrauch als auch das erzeugte CO₂ im CM-

Verfahren hauptsächlich durch den Materialverbrauch gesteuert sind. Beim AM-Verfahren überwiegen zwar auch der Energieverbrauch und der CO₂-Ausstoß durch die Materialherstellung, jedoch nicht so klar. Hier gilt es anzumerken, dass es sich bei dem Material (EBM-Verfahren) um ein Pulvermaterial (EBM-Verfahren) handelt (Lyons et al. 2021).

Dass das Material den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen nimmt, stellen auch Bekker und Verlinden (2018) fest. Sie schreiben, dass durch Designoptimierung Material eingespart werden kann, was die Umweltfreundlichkeit von AM fördert. Die sogenannte Topologieoptimierung führt zu einem für die Anwendung idealem Design, was zu einem geringeren Material- und Energieverbrauch führt. Swetha et al. (2022) stellten beispielsweise fest, dass durch eine Topologieoptimierung rund 10 % der Energie und des Materials im Vergleich zu einem durch AM ohne Topologieoptimierung produzierten Bauteil, eingespart werden können. Auch Ingarao und Priarone (2020) sehen eine Möglichkeit der Material- und Energieeinsparung durch Topologieoptimierung.

Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen die Herausforderungen und Potenziale für eine ökologische Produktion mittels AM, die durch die systematische Literaturrecherche identifiziert wurden. Bei den Herausforderungen ist vor allem der Energieverbrauch durch die Herstellung ein häufig behandeltes Thema. Auch die umweltfreundliche Produktion bei höheren Stückzahlen stellt eine Herausforderung dar. Als Potenziale kristallisieren sich hingegen klar die Materialeinsparung und die umweltfreundliche Herstellung geometrisch komplexer Teile heraus.

Tabelle 7: Herausforderungen für eine ökologische Produktion mittels additiver Fertigung, (Quelle: eigene Darstellung)

Herausforderungen	Quellen
Steigerung der Pulvereffizienz	Jiang et al. 2019
Effizienzerhöhung des Herstellungsverfahrens	Lunetto et al. 2021; Liu et al. 2018
Energieverbrauch in der Herstellung	Garcia et al. 2021; Kafara et al. 2017; Lyons et al. 2021; Landi et al. 2022; Výtisk et al. 2022
Geringe Oberflächenqualität	Faludi et al. 2015; DeBoer et al. 2021; Raoufi et al. 2022
Energieverbrauch bei der Pulverherstellung	Paris et al. 2016; Landi et al. 2022

Herausforderungen	Quellen
Recycling von Abfällen	Výtisk et al. 2022
Umweltfreundlicher Einsatz für größere Stückzahlen	Hofstätter et al. 2016; Garcia et al. 2021; Raoufi et al. 2022

Tabelle 8: Potenziale für eine ökologische Produktion mittels additiver Fertigung, (Quelle: eigene Darstellung)

Potenziale	Quellen
Materialeinsparung	Jiang et al. 2019; Garcia et al. 2021; Paris et al. 2016; DeBoer et al. 2021; Lyons et al. 2021; Landi et al. 2022; Bekker et al. 2018; Swetha et al. 2022; Prakash et al. 2021; Liu et al. 2018
Leichtbau	Lunetto et al. 2021; Ingarao und Priarone 2020; Raoufi et al. 2022
Bessere Umweltleistung bei hoher Auslastung	Faludi et al. 2015
Anwendung von Hybridprozessen	DeBoer et al. 2021; Serres et al. 2011; Swetha et al. 2022
Effiziente Technologie für Kleinserien	Kafara et al. 2017; Hofstätter et al. 2016; Raoufi et al. 2022
Umweltfreundliche Herstellung von geometrisch komplexen Teilen, flexibles Design	Lyons et al. 2021; Landi et al. 2022; Bekker et al. 2018; Výtisk et al. 2022; Liu et al. 2022; Liu et al. 2018; Raoufi et al. 2022
Reduktion von Abfall	Landi et al. 2022; Swetha et al. 2022; Liu et al. 2018
Kein Hilfswerkzeug notwendig	Výtisk et al. 2022; Liu et al. 2018; Raoufi et al. 2022
Energieeinsparung über gesamten Lebensweg	Prakash et al. 2021; Landi et al. 2022
Massenproduktion von benutzerdefinierten Bauteilen	Mrazovic et al. 2017

4.3.2 Vergleichbarkeit von additiver und konventioneller Fertigung in Ökobilanzstudien

Der Vergleich von AM-Technologien mit konventionellen Verfahren (Fräsen, Spritzguss etc.) ist nicht eindeutig aufzustellen und zu bewerten da es oft nicht um eine direkte Substitution der Technologien geht und hängt vom angestrebten Erkenntnisgewinn ab. In

Tabelle 9 ist der spezifische Energiebedarf der betrachteten AM-Technologien sowie häufig im Vergleich stehender konventioneller Fertigungstechnologien angeführt.

Tabelle 9: Vergleich spezifischer Energiebedarf unterschiedlicher Fertigungstechnologien in der Produktionsphase (Quelle: eigene Darstellung)

Fertigungstechnologie	Spezifischer Energiebedarf [kWh/kg]	Quellen
PBF	31	Baumers et al. 2010
FFF	23	Luo et al. 1999
SLA	21	Luo et al. 1999
DED	68	Liu et al. 2018
Spritzguss	0,64-5, 82	Thiriez 2006
Fräsen	11	Gerke-Cantow und Hellwig 2010
Gießen	4,13	Yoon et al. 2014

Ein reiner Vergleich des Energieverbrauchs in der Herstellung greift zu kurz, da Emissionseinsparungen oder auch -ausstöße in anderen Lebenszyklusphasen einen westlich größeren Einfluss auf die Gesamtbilanz nehmen können. Daher ist der Vergleich zweier Technologien immer über den gesamten Lebenszyklus und unter Berücksichtigung diverser Einflussfaktoren (zum Beispiel Bauraumauslastung, Geräteeffizienz, Anwendungsmuster) zu vollziehen. Tabelle 9 soll daher nur einen Überblick der Energieverbräuche vermitteln und kein alleiniges Entscheidungsmerkmal darstellen. Bei AM handelt es sich nicht um eine Substitutionstechnologie, welche CM ersetzen soll, sondern um eine hoch individualisierbare Ergänzungstechnologie, durch die die Herstellung gewisser Teile erst möglich gemacht wird oder die es ermöglicht neue Design Strategien zu verwirklichen. Konventionelle Fertigung eignet sich aufgrund der erzielbaren Skaleneffekte vor allem für Gleichteile, die in großen Stückzahlen hergestellt werden sollen. Am Beispiel des Spritzgusses amortisiert sich ab einer gewissen Losgröße die Herstellung des Werkzeugs, welches für dieses konventionelle Verfahren notwendig ist (Hofstätter et al. 2016, Garcia et al. 2021). AM-Technologien sowie konventionelle Technologien können also nebeneinander existieren und unterschiedliche Anwendungsbereiche bedienen und stehen dabei nicht in direkter Konkurrenz zueinander.

Häufig wird AM dann angewendet, wenn aufgrund der Komplexität des Bauteils konventionelle Fertigung keine Option ist. Um ökologische Potenziale der jeweiligen Technologie zu realisieren, gilt es das jeweils am besten geeignete Verfahren für die Produktion zu identifizieren, um die Effizienz des Ressourceneinsatzes über den gesamten Lebenszyklus nützen zu können.

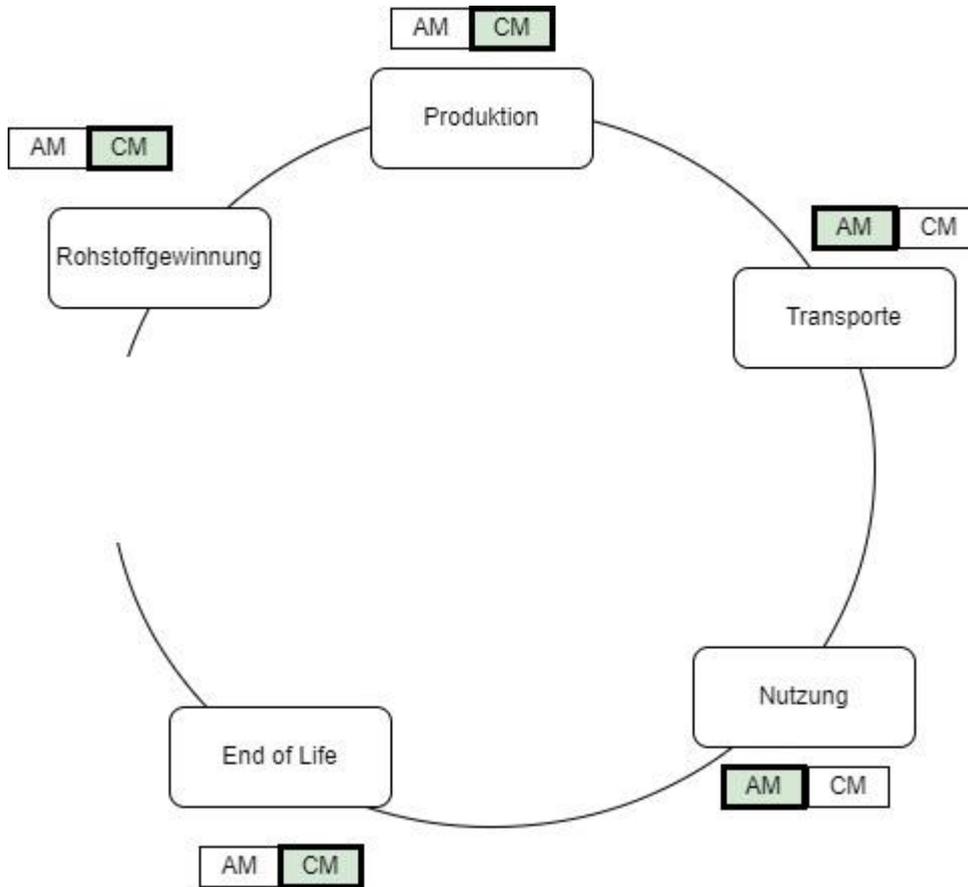
Die Untersuchung von Überblicksstudien über ökologische Vergleiche von AM-Technologien und konventioneller Verfahren zeigte, dass Autorinnen und Autoren wissenschaftlicher Publikationen die fehlende Vergleichbarkeit von Ökobilanzen kritisieren (Saade et al. 2019, siehe Abbildung 8). Was die Vergleichbarkeit verhindert, sind die Definition unterschiedlicher funktioneller Einheiten und Systemgrenzen aufgrund verschiedener Zielsetzungen der Untersuchungen, die Verwendung unterschiedlicher Datenbanken und Methoden der Umweltwirkungsanalyse oder unterschiedliche Rationalitäten beim Treffen von Annahmen. Zudem ist eine oft sehr ungenaue Beschreibung der Systemgrenzen gegeben mit unterschiedlich detaillierter Berücksichtigung von Lebenszyklusphasen und Prozessschritten. Die funktionellen Einheiten beziehen sich meist auf ein spezifisches Bauteil, wodurch ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Studien erschwert wird. Eine Angabe der Ergebnisse in Bezug auf den Referenzfluss der funktionellen Einheit (zum Beispiel ein Kilogramm des benötigten Materials) würde hier die Vergleichbarkeit erhöhen. Zusätzlich sollte auf die Angabe der Ergebnisse in Bezug auf Endpoint Kategorien oder in Form von Single-Scores verzichtet werden, da die Berechnungsmethoden sich stark unterscheiden und ein Vergleich der Ergebnisse mehrerer Studien nicht mehr möglich ist. Um Aussagen treffen zu können, welche auf Vergleichen basieren, sollten daher Studien herangezogen werden, welche innerhalb ihres Untersuchungsrahmens einen Vergleich aufstellen, denn innerhalb einer Studie muss die Konsistenz der Parameter gegeben sein.

Faludi et al. (2015) ermöglichen zum Beispiel einen direkten Vergleich, indem sie in ihre Betrachtung zwei Bauteile einbeziehen, wovon eines ein Design besitzt, welches üblicherweise durch AM produziert wird und das andere ein CM typisches Bauteil ist. Dadurch soll ein fairer Vergleich der Umweltperformance beider Bauteile geschaffen werden. Die Aussagekraft dieser Studie beschränkt sich jedoch auf eine bestimmte Bauteilanwendung.

Abbildung 10 zeigt den Versuch die Tendenzen der ökologischen Vorteile von AM-Technologien und konventioneller Fertigung über die Lebenszyklusphasen hinweg aus der Literaturstudie zu verallgemeinern. Hinsichtlich der Rohstoffe wird bei konventionellen

Verfahren ein besseres Zeugnis ausgestellt, da zum Beispiel der Energieaufwand für die Aufbereitung der Rohstoffe für AM entfallen. Tendenziell sind kritische Befunde hinsichtlich AM in der Produktionsphase aus vergleichenden Ökobilanzstudien ableitbar durch einen höheren Energiebedarf im Vergleich zu konventionellen Technologien. Durch das Potenzial von AM-Technologien dezentral zu produzieren, kann der Transport der gefertigten Produkte reduziert werden. In der Nutzungsphase können AM gefertigte Bauteile tendenziell ökologische Vorteile realisieren durch Ressourceneinsparungen primärer (Leichtbau) und sekundärer Natur (Treibstoffeinsparungen). In der Entsorgungsphase (EoL) wird AM kritischer gesehen, da Recyclingstrukturen, vor allem Produktionsabfälle betreffend, noch nicht so gut entwickelt sind. Da AM-Technologien ein breites Bouquet an Verfahren, Materialien, und Anwendungen bedienen können, muss weiter differenziert werden. Ein Vergleich mehrerer unterschiedlicher Studien einer AM-Brache kann daher höchstens Tendenzen aufzeigen und Bedarf sehr kritischer Interpretation. Nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund, dass additiv gefertigte Produkte erweiterte Funktionsumfänge aufweisen können und durch additive Potenziale auch erweiterte Anwendungsbereiche angesprochen werden können.

Abbildung 10: Tendenzen ökologischer Vorteile (grün, dick umrandet) in verschiedenen Lebenszyklusphasen durch AM und konventioneller Fertigung (CM). (Quelle: eigene Darstellung)

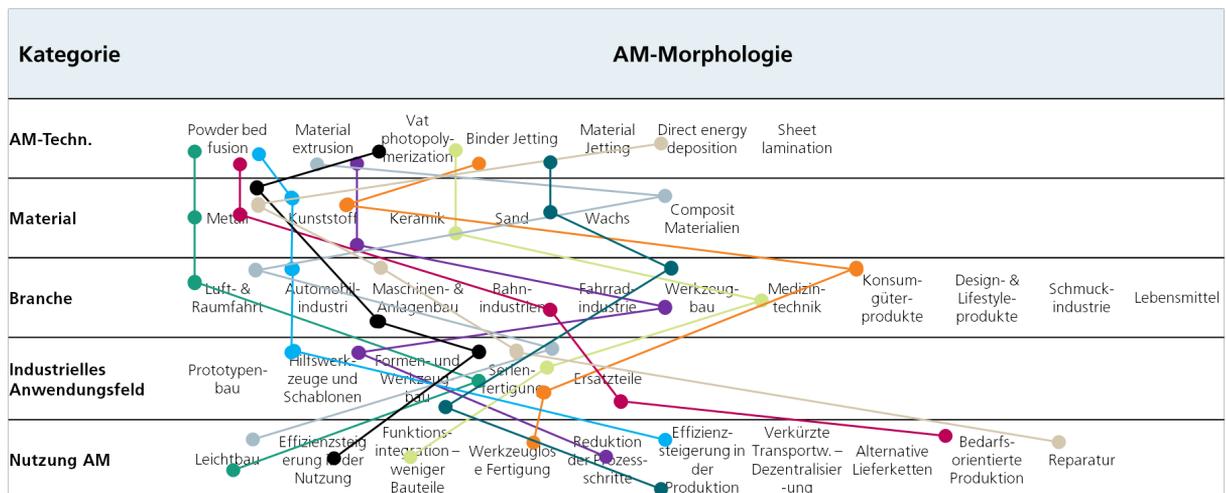


4.4 Auswahl und Beschreibung der Prozessketten

Die in der Studie betrachteten generischen Prozessketten wurden im Rahmen von Expertenworkshops identifiziert. In Abbildung 11 ist die Ableitung exemplarischer AM-Anwendungen dargestellt, die in weiterer Folge von den Fachexperten priorisiert wurden. Wichtig bei der Zusammensetzung der Fachexperten war die Auswahl von Vertretern aus Unternehmen, aus der Politik (inklusive Interessensvertretungen und Cluster) sowie aus dem Bereich der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung mit umfangreicher Erfahrung in der Additiven Fertigung. Die Definition möglicher generischer Prozessketten erfolgte aus der entwickelten Morphologie (Kapitel 3.4), womit möglichst viele Stellhebel angesprochen werden beziehungsweise Ansatzpunkte für eine nachhaltigere Produktion liefern sollten. Eine wesentliche Unterscheidung soll dabei über die unterschiedlichen AM-Technologien sowie der möglichen Materialien dargestellt werden. Die Branche

beeinflusst maßgeblich, in welcher Phase des Produktlebenszyklus ein ökologischer Impact einer AM-Anwendung zu erwarten ist. Die Kategorie der Anwendung gibt Aufschluss darüber, welche Vorteile von AM sich realisieren lassen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das technologische Potenzial genützt und richtig eingesetzt werden muss, um auch ökologische Vorteile erzielen zu können. Die Morphologie soll in weiterer Folge auch dafür eingesetzt werden können, spezifische Erkenntnisse aus folgend betrachteten Prozessketten auf weitere mögliche Prozessketten, die aus der Morphologie abgeleitet werden können, umzulegen. Eine detailliertere Beschreibung möglicher Sensitivitäten sowie Übertragbarkeiten über die Morphologie erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt, nach der Auswertung der analysierten und bilanzierten Prozessketten.

Abbildung 11: Morphologischer Kasten und Ableitung exemplarischer Prozessketten



In der folgenden Tabelle 10 werden die vier generischen AM-Prozessketten dargestellt, die von dem Expert-Panel als die vier, für die österreichische Industrie, relevantesten Prozessketten bewertet wurden. Sowohl den Studienautoren als auch den in dem Workshop beteiligten Experten ist bewusst, dass auch weitere generische AM-Prozessketten eine hohe Relevanz für die österreichische produzierende Industrie aufweisen können. Jedoch wurde durch das gewählte Studiendesign mit der entwickelten Morphologie darauf Rücksicht genommen, dass bei ausreichender vorhandener Datenqualität die Übertragbarkeit der wesentlichen Erkenntnisse auf weitere generische Prozessketten möglich ist.

Tabelle 10: Übersicht der für die ex-ante Ökobilanzierung ausgewählte generische AM-Prozessketten

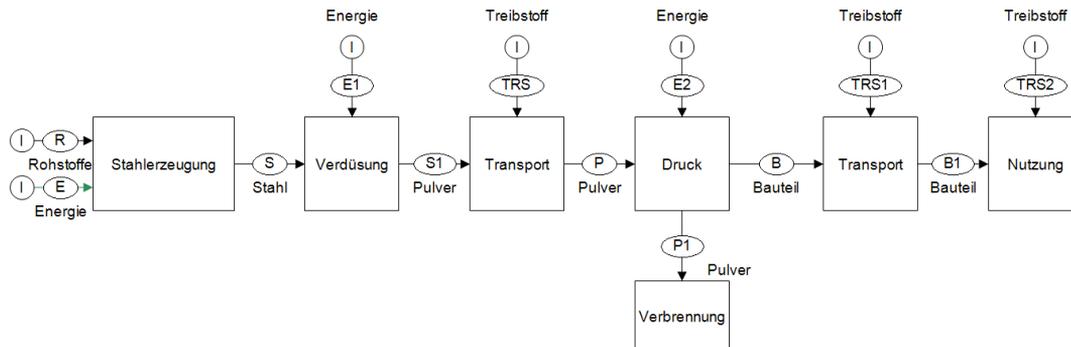
Prozesskette	Technologie	Material	Branche	Anwendung	Nutzung
1	Powder bed fusion (PBF)	Metall	Luft- & Raumfahrt	Serienfertigung	Leichtbau
2	Fused Filament Fabrication (FFF)	Kunststoff	Werkzeugbau	Hilfswerkzeug	Reduktion der Prozessschritte
3	Strereolithographie (SLA)	Keramik	Medizin-technik	Serienfertigung	Funktionsintegration, Reduktion der Bauteile
4	Direct Energy Deposition (DED)	Metall	Maschinen- und Anlagenbau	Serienfertigung	Reparatur (Neu- & Ersatzteile)

4.5 Ex-ante Ökobilanzierung

Die ex-ante Ökobilanz verfolgt das Ziel, die Etablierung der Technologie für eine ökologischere Produktionswirtschaft zu unterstützen, indem schon während der F&E ökologische Aspekte berücksichtigt werden. So können einerseits ökologische Hotspots identifiziert und quantifiziert werden und andererseits Potenziale von AM für die ökologischere Gestaltung der Produktionswirtschaft gezielt genützt werden. Die Ökobilanzierung der exemplarisch definierten Prozessketten quantifiziert potentielle Umweltwirkungen und bezieht diese auf ein definiertes Produktsystem, das als Produktlebenszyklus beschrieben wird mit den Phasen Ressourcenextraktion, Produktion mit AM, Nutzung und End of Life.

4.5.1 Prozesskette 1: Anwendung von Powder Bed Fusion am Beispiel einer Gurtschnalle für Passagierflugzeuge

Abbildung 12: Prozessfließbild Prozesskette 1: Anwendung von PBF am Beispiel einer Gurtschnalle für Passagierflugzeuge. (Quelle: eigene Darstellung)



Geltungsbereich und Systemgrenzen

Die generische Prozesskette „Anwendung von Powder Bed Fusion am Beispiel einer Metall-Gurtschnalle für Passagierflugzeuge“ zeigt exemplarisch die ökologischen Potenziale und Hotspots der Kombination aus der AM-Technologie PBF für ein seriengefertigtes Leichtbau-Teil aus einer Metalllegierung für die Nutzung in der Luftfahrtbranche. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde als generisches Bauteil eine Gurtschnalle eines Passagierflugzeugs gewählt, welche aus Stahl besteht und zu einer Gewichtseinsparung von 85 Gramm pro Gurtschnalle führt. Die Systemgrenzen (Abbildung 12) umfassen die Rohstoffgewinnung, Rohstoffaufbereitung für AM, Produktion durch AM, etwaige Transporte, Nutzung und die End of Life Phase. Diese bewertet allerdings nur die Verbrennung des überschüssigen Pulvers bei der Fertigung und nicht die Verwertung der Gurtschnallen nach deren Nutzungsdauer, da deren Verbleib oft ungewiss ist und häufig keine Verwertung stattfindet (Flugzeugfriedhöfe). Die funktionelle Einheit ist definiert als die Möglichkeit der Verwendung eines Sicherheitsgurts für alle Passagiere in einem Passagierflugzeug mit einer Passagieranzahl von 163, 455 oder 791 (je nach Flugzeugmodell).

Für die Berechnung der ökologischen Performance wurde ein 18/8 Chromstahl als Material angenommen, der für die Verarbeitung mittels PBF zerstäubt werden muss, was 0,46 kWh/kg (DeBoer et al. 2021) bedarf. Der gesamte Bauraum muss im PBF-Verfahren

mit Pulver angefüllt werden, jedoch wurde angenommen, dass die Hälfte des Pulvers Primärmaterial ist und die andere Hälfte einmal wiederverwendet wurde. Außerdem wurden 20% an zusätzlichem Material berücksichtigt, welche am Bauteil anhaften und nicht wiederverwendet werden kann. Das Material, das nicht für die Fertigung der Schnallen benötigt wird, verbleibt im Bauraum und kann weiterverwendet werden, weshalb es nicht in der Ökobilanz berücksichtigt wurde.

Für die Produktion wurde ein PBF-Drucker (MTT SLM 250) mit einer Bauraumgröße von 250*250*300 mm (Baumers et al. 2010) angenommen, welcher einen spezifischen Energiebedarf von 31 kWh/kg Material (Baumers et al. 2010) hat. Das Schnallengewicht der gedruckten Schnalle beträgt 70g (Voestalpine²), die Größe der Schnalle beträgt 7x5x1,5 cm, woraus sich ergibt, dass 180 Schnallen in dem Bauraum gedruckt werden können (4*3 Schnallen in 15 Ebenen). Die Schnallen werden außerdem nach dem Druck einem Post-Processing zugeführt, dem sogenannten HIP Prozess, mit einem spezifischen Energiebedarf von 3,95kWh/kg Material (DeBoer et al. 2021).

Für die Abschätzung der potentiellen Umweltwirkungen in der Nutzungsphase wurden drei verschiedene Flugzeugmodelle herangezogen: A320-200, A330-300, A380-800. Diese haben eine unterschiedliche Anzahl an Sitzen, weshalb für den A320-200 163, für den A330-300 455 und für den A380-800 791 Schnallen benötigt werden (Steinegger 2017). Für alle Modelle wurde eine Flugdauer von 55.000 Stunden über die gesamte Lebensdauer des Flugzeuges angenommen, jedoch wurden unterschiedliche Fluggeschwindigkeiten berücksichtigt: A320 830 km/h, A330 870 km/h, A380 1050 km/h. Die Gesamtflugstrecke berechnet sich aus der Gesamtflugdauer und der Fluggeschwindigkeit des jeweiligen Modells. Außerdem verbrauchen die Flugzeuge unterschiedliche Mengen an Treibstoff pro Kilogramm Nutzlast: Der A320 verbraucht auf einer Strecke von 4200 km 0,12 kgTreibstoff/kg Nutzlast, der A330 0,08 und der A380 0,17. Ein Kilogramm Kerosin resultiert in 3,16 kg CO₂ Emissionen. Um neben dem Treibhauspotenzial auch weitere Umweltwirkungskategorien berechnen zu können, wurden die Werte für ein Frachtflugzeug aus einem Datensatz der Datenbank ecoinvent auf den Treibstoffverbrauch pro Nutzlast nach Steinegger 2017 normalisiert. Diese Vorgehensweise hatte zum Ziel Aussagen für die drei spezifischen Flugzeuge treffen zu können, da der in der Datenbank hinterlegte Datensatz einen Durchschnittswert für den Flugverkehr annimmt.

² [Additive manufacturing: 3D printing with metals - voestalpine](#)

Für die Berechnung der Transporte wurde angenommen, dass der benötigte Stahl bei Voestalpine Boehler Edelstahl in Kapfenberg hergestellt und verdüst wird. Der Druck und das Post-Processing erfolgt bei der Firma DISTech in Kapfenberg. Das Pulver legt somit einen Transportweg von 6 km zurück. Die fertigen Schnallen werden in das Werk von Airbus in Hamburg geliefert und dort in das Flugzeug verbaut, was einem Transportweg von 1088 km entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass das Flugzeug ab diesem Zeitpunkt in den Betrieb geht und keine weiteren Transporte notwendig sind. Alle Transporte erfolgen mit einem LKW der Abgasklasse Euro 6.

Im Lebenszyklusabschnitt des End of Life wurde nur das überschüssige Pulver, welches am Bauteil anhaftet, berücksichtigt. Dieses wird einer Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle zugeführt. Pulvermaterialien werden als gefährliche Abfälle eingestuft, da sie lungengängig und somit gesundheitsschädlich sind. Die Schnalle selbst wird in der Praxis nicht verwertet, da Flugzeuge oft an andere Airlines verkauft werden und ihr letztendlicher Verbleib ungewiss ist.

In keiner der Berechnungen wurden die potentiellen Umweltwirkungen resultierend aus der Herstellung der Geräte und Infrastruktur berücksichtigt, da anzunehmen ist, dass diese über den Nutzungszeitraum in der Serienfertigung in einem industriellen Umfeld je Bauteil sehr gering werden.

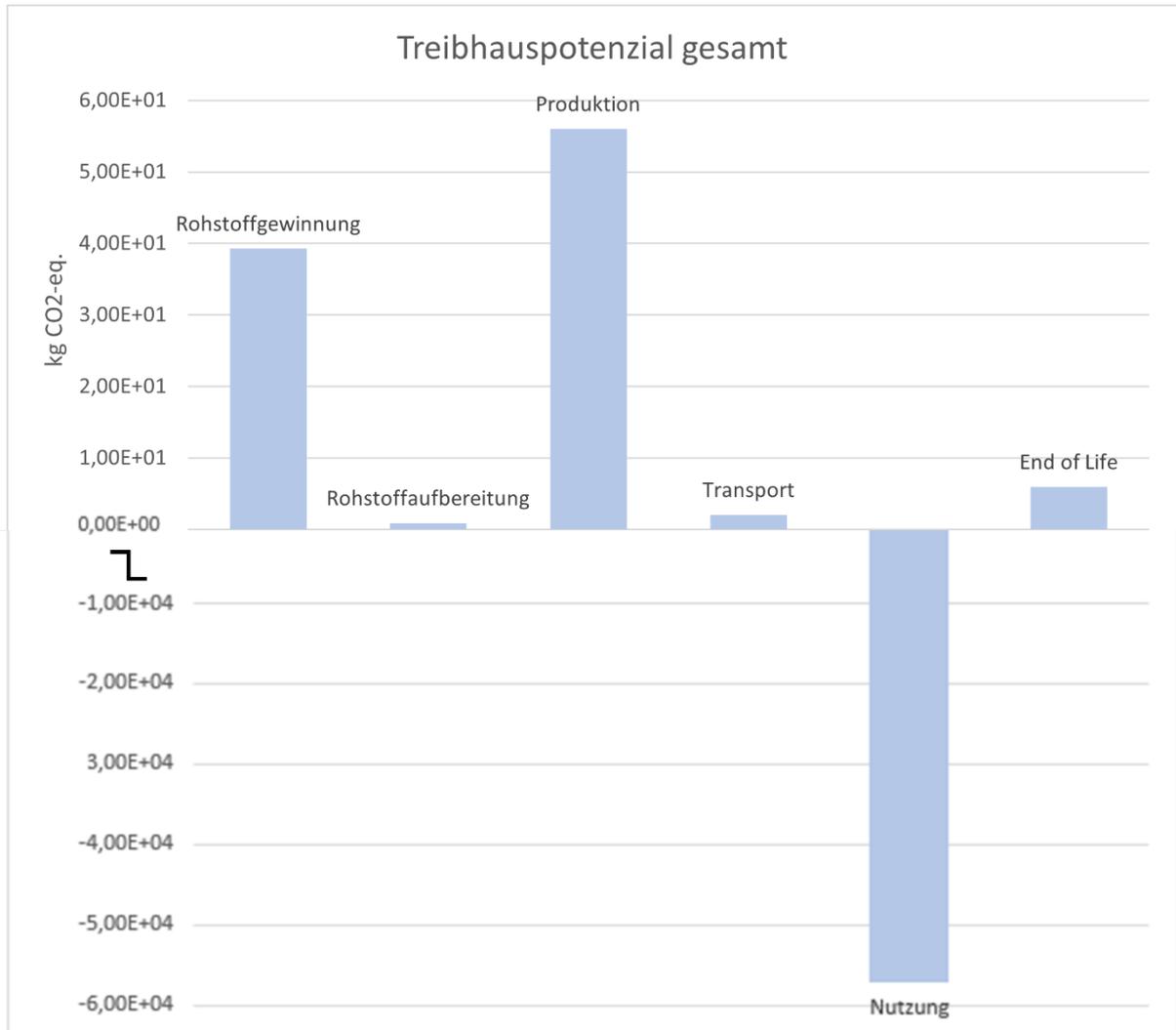
Insgesamt wurden für die Herstellung der 163 Schnallen für den A320-200 13,7 kg Material benötigt ($163 \cdot 0,07 \cdot 1,2$). 2,3 kg sind anhaftendes Restpulver, welches der Verbrennung für gefährliche Abfälle zugeführt wird. Für die Verdüsung dieser Menge an Material werden 6,3 kWh an Energie benötigt. Das Gesamtgewicht der Schnallen beträgt also rund 11,4 kg, der Druck dieser Materialmenge benötigt 353,7 kWh, das Post Processing 45,1 kWh. Es können 13,9 kg an Gewicht gegenüber konventionell gefertigten Gurtschnallen eingespart werden. Alle Aufwendungen (Inputs) und Umweltauswirkungen sind direkt proportional zur Sitzanzahl und können somit auf die anderen Flugzeugmodelle umgerechnet werden. Dies bezieht sich auf alle Lebenszyklusphasen außer der Nutzung. Hier unterscheidet sich der Treibstoffausstoß pro Nutzlast je nach Flugzeugmodell und dementsprechend auch die Einsparungen in der Nutzungsphase.

Wirkungsanalyse

Nach Normalisierung und Gewichtung wurde den folgenden Wirkungskategorien die größte Bedeutung zugesprochen: Treibhauspotenzial gesamt (32,8%), bodennahes

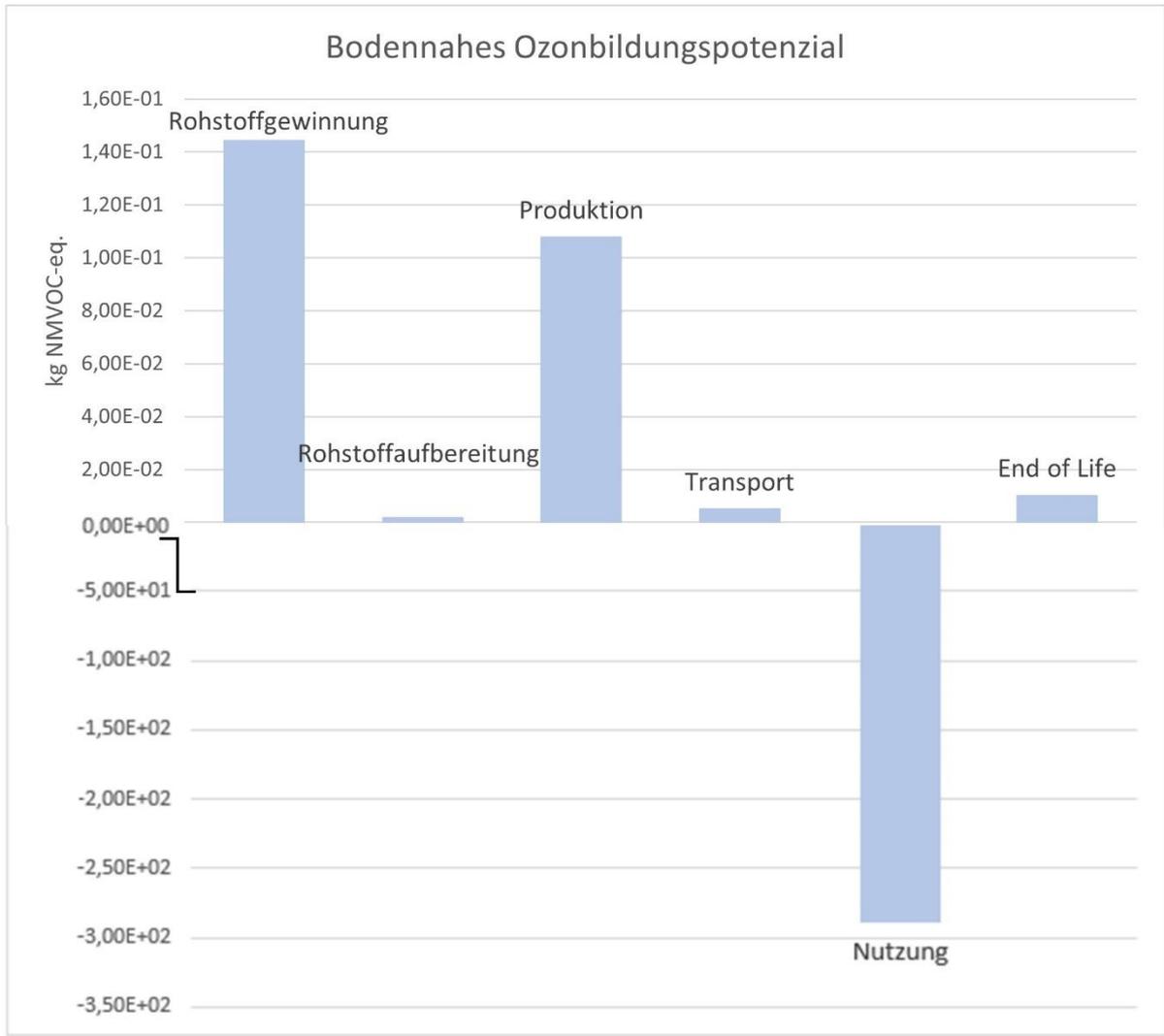
Ozonbildungspotenzial (27,8%), Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe (21,7%). In der Nutzungsphase wurden die Einsparungen gegenüber einem konventionell gefertigten Bauteil berücksichtigt. Abbildung 13 zeigt die Umweltauswirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen für die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt für das Modell A320-200. Hierbei ist zu erkennen, dass abgesehen von der Nutzungsphase, die Produktionsphase und die Rohstoffgewinnung den größten Einfluss auf die Gesamtumweltwirkung nehmen, dies gilt für alle drei Flugzeugtypen, da in den gezeigten Lebenszyklusphasen ein direkt proportionaler Zusammenhang herrscht. Dem gegenüber stehen die Einsparungen an Kerosin in der Nutzungsphase durch die Gewichtsersparnis der AM gefertigten Gutschnallen, die die Umweltwirkungen der anderen Lebenszyklusphasen deutlich überwiegen.

Abbildung 13: Prozesskette 1: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell A320-200. (Der Bruch in der Skalierung der positiven und negativen x-Achse ist zu berücksichtigen). (Quelle: eigene Berechnung)



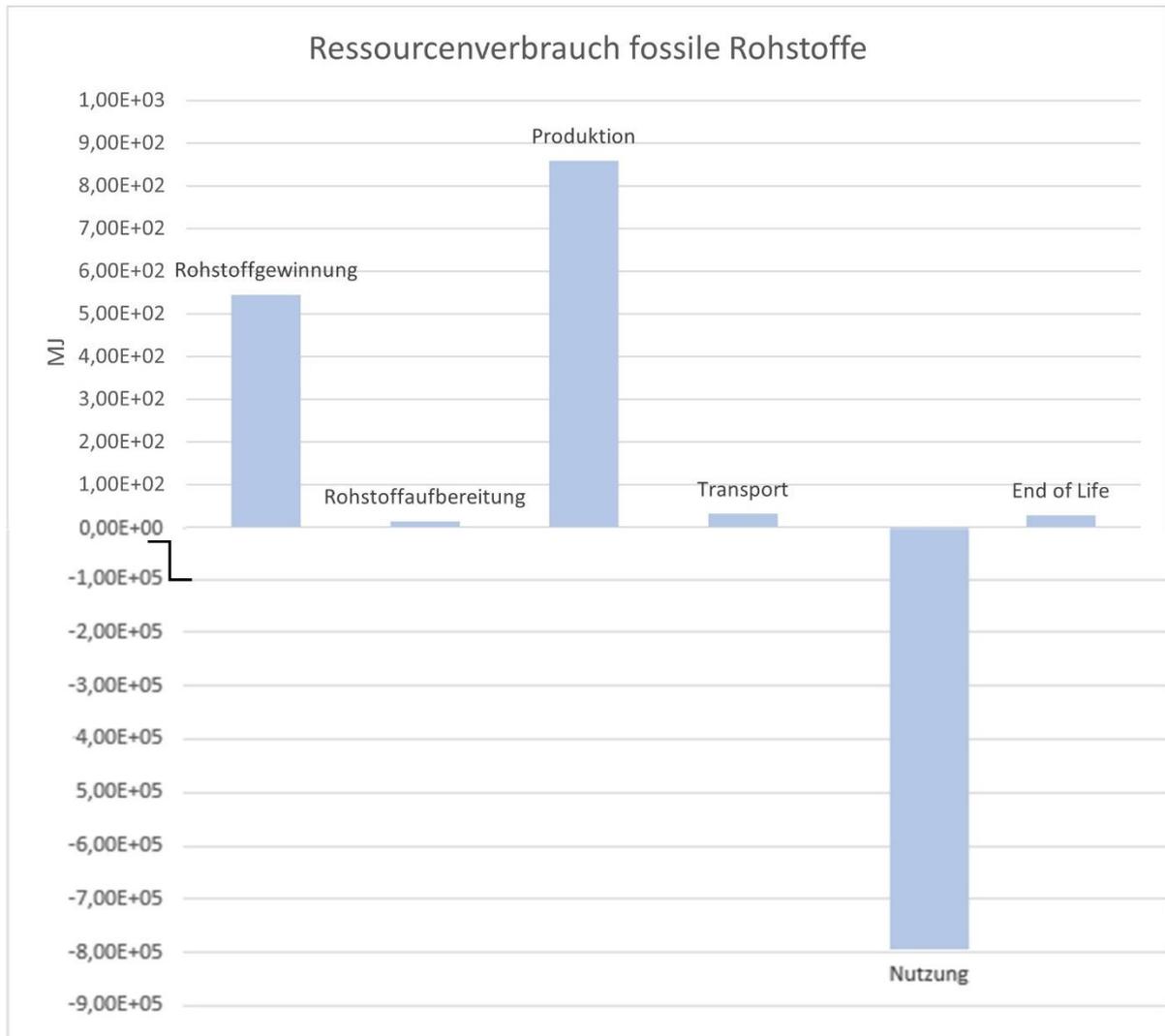
Auch für die Wirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial zeigt sich ein ähnliches Bild. Hier überwiegt die Rohstoffgewinnung bei den Umweltauswirkungen, gefolgt von der Produktion. Abbildung 14 zeigt die Umweltauswirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen in der Kategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial für das Modell A320-200. Auch hier überwiegen die Einsparungen in der Nutzungsphase die Umweltauswirkungen der anderen Lebenszyklusphasen.

Abbildung 14: Prozesskette 1 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell A320-200. (Der Bruch in der Skalierung der positiven und negativen x-Achse ist zu berücksichtigen). (Quelle: eigene Berechnung)



Die Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe zeigt, dass die Produktion gefolgt von der Rohstoffgewinnung den größten Einfluss auf die Gesamtauswirkungen nehmen (siehe Abbildung 15). Auch hier überwiegen die Einsparungen in der Nutzungsphase wieder deutlich die Umweltauswirkungen der anderen Lebenszyklusphasen.

Abbildung 15: Prozesskette 1 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell A320- 200. (Quelle: eigene Berechnung)



Auswertung und Interpretation

Insgesamt ist klar zu erkennen, dass die Einsparungen in der Nutzungsphase, durch die mit AM erzielten Gewichtsreduktion die Umweltauswirkungen der anderen Lebenszyklusphasen um ein Vielfaches überwiegen. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass AM als Stellhebel wirken kann Gewichtseinsparungen in der Konstruktion zu realisieren, welche deutlich zu Einsparungen in allen untersuchten Umweltwirkungskategorien führen. Dementsprechend wird empfohlen das Potenzial von AM für die Umsetzung von Leichtbaukonzepten gezielt auszunützen, um

Materialeinsparungen und in Folge die Reduktion von Energiebedarf in der Nutzungsphase zu erzielen. Dies ist weniger für die Ökologisierung der Produktion von AM, als für den Mobilitätssektor von hoher Relevanz, da neben der primären Gewichtsreduktion auch die sekundäre Gewichtreduktion zu geringerem Energiebedarf in der Nutzungsphase führt. Um diese ökologischen Potenziale zu realisieren ist zu berücksichtigen, dass diese Gewichtsreduktionen nicht anderweitig überkompensiert werden, wie zum Beispiel durch Produktgestaltung oder das Verhalten der Nutzer und Nutzerinnen. Insgesamt spielt die AM bei dieser beispielhaften Prozesskette ökologisch gesehen eine untergeordnete Rolle, da die Passagiere mit ihrem Flugverhalten und Gepäck den vermutlich größten Stellhebel bei einem Passierflugzeug darstellen, um den Treibstoffausstoß zu verringern. Auch ist die Realisierung von Bauteilgewichtseinsparungen nicht exklusiv der AM vorbehalten, jedoch hat diese Technologie besonders viele Möglichkeiten.

Abgesehen von der Einsparung in der Nutzungsphase ist zu erkennen, dass die Produktion und die Rohstoffgewinnung die meisten Umweltauswirkungen mit sich bringen. Aufgrund dessen wird empfohlen die Materialien sparsam einzusetzen, Bauteiltopologie zu optimieren, die Wiederverwendbarkeit von Pulvern zu erhöhen, Reuse-Strukturen auszubauen, Recyclingtechnologien zu entwickeln und die entsprechende Infrastruktur auszubauen. Um den Energieverbrauch in der Produktion zu reduzieren, müssen die Anwendungsmuster optimiert werden. Geräte sollten maximal ausgelastet werden und Leerlaufzeiten vermieden werden. Um Fehlerrate zu vermeiden und somit Material und Energie zu sparen ist die Weiterentwicklung von Simulationstools anzustreben. Außerdem sollten Unternehmen einen erneuerbaren Strommix verwenden und somit den Ausbau dieser fördern.

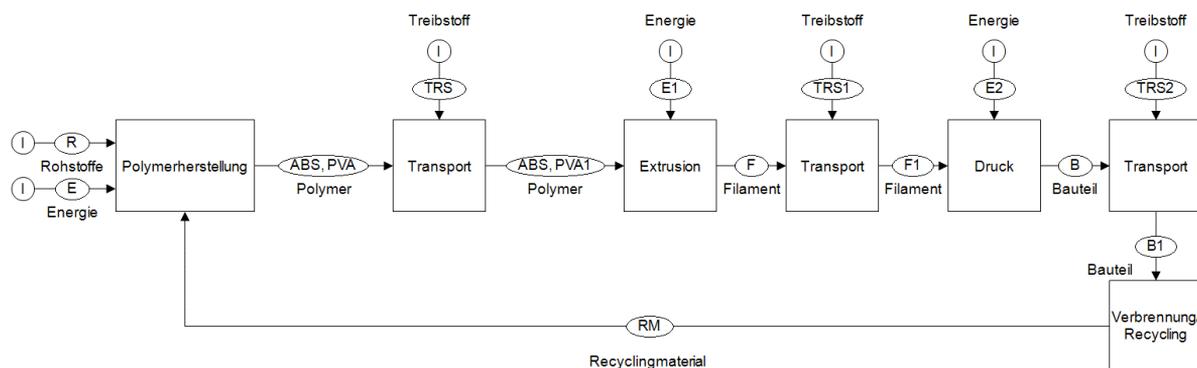
Einschränkungen

Es ist zu berücksichtigen, dass die angenommenen Gewichtseinsparungen pro Schnalle vom Hersteller abhängig sind und somit abweichen können. Generell kann jedoch gesagt werden, dass eine größere Gewichtseinsparung zu geringeren Emissionen führt. Das zur Berechnung herangezogene Material ähnelt dem in der Praxis angewendeten Material, ist jedoch nicht ident. Dies ist auf die fehlenden Daten für AM-Materialien zurückzuführen. Da sich die funktionelle Einheit auf ein gesamtes Flugzeug bezieht, ist außerdem zu erwähnen, dass die Sitzanzahl pro Flugzeug und somit auch die Gesamtgewichtseinsparung variieren kann. Die drei gewählten Flugzeuge sind eine exemplarische Darstellung. Weiters ist der Treibstoffverbrauch pro geflogenen Kilometer nicht bei jedem Flugzeugmodell und unter allen Bedingungen identisch, die hier

herangezogenen Daten sind Literaturdaten und können von der Praxis abweichen. Gleiches gilt für die über die Lebensdauer zurückgelegte Flugstrecke und die Durchschnittsgeschwindigkeit der Flugzeuge. Auch die Energieverbräuche sind aus der Literatur entnommen und können je nach Gerät und Anwendungsmuster abweichen. Für die Transportdistanzen gilt, dass sich um eine Option des Transportweges handelt und diese je nach Produzenten der Rohstoffe und des fertigen Produkts abweichen können. Außerdem wurden keine Gutschriften für ein mögliches Recyclingszenario berechnet, da der Verbleib von ausgedienten Flugzeugen in der Praxis oft ungewiss ist.

4.5.2 Prozesskette 2: Anwendung von Fused Filament Fabrication am Beispiel einer Montageschablone für die Erleichterung der Automobilfertigung

Abbildung 16: Prozessfließbild Prozesskette 2: Anwendung von FFF am Beispiel einer Montageschablone für die Erleichterung der Automobilfertigung. (Quelle: eigene Darstellung)



Geltungsbereich und Systemgrenzen

Die zweite Prozesskette „Anwendung von Fused Filament Fabrication zur Produktion einer Montageschablone für die Automobilfertigung“ zeigt exemplarisch die ökologische Performance und Hotspots der Kombination aus der AM-Technologie FFF für die Produktion eines maßgeschneiderten Hilfswerkzeugs aus Kunststoff für Erleichterungen und Effizienzsteigerungen bei der Automobilmontage (Abbildung 16). Das AM-Bauteil

stellt ein Hilfswerkzeug dar und führt zu einer Reduktion der Prozessschritte. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde als exemplarisches AM-Bauteil eine Schablone für die Fertigung von Automobilen gewählt, welche aus einem Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) besteht und in ihrer Anwendung die Handhabung für die Monteurinnen und Monteure erleichtert. Durch solche Montageschablonen können beispielsweise Tapes für die Lackierung von Autoteilen eingespart werden, der Montageprozess verkürzt und präziser mit weniger Ausschuss ausgeführt werden. Außerdem sind die AM gefertigten Montageschablonen leichter als konventionell gefertigte, was im Sinne des Arbeitnehmerinnen- und Arbeitnehmerschutzes ist. Durch die dezentrale Produktionsmöglichkeit durch AM können die Montageschablonen direkt im Automobilwerk produziert werden, wodurch die Flexibilität in der Automobilproduktion erhöht wird. Die betrachtete Montageschablone hat ein angenommenes Gewicht von 200 g. Die Systemgrenzen (Abbildung 16) umfassen die Rohstoffgewinnung, die Rohstoffaufbereitung für die AM, die Produktion, etwaige Transporte und die End of Life Phase. Als funktionelle Einheit wurde die Möglichkeit der Anbringung eines Firmenlogos an der richtigen Position in der Automobilfertigung definiert.

Lebenszyklusinventur

Für die Berechnung wurde ABS herangezogen, welches nach der Herstellung extrudiert werden muss mit einem spezifischen Energiebedarf von 0,33 kWh/kg Material laut Expertenabschätzung. Um die ökologische Wirkung der Verwendung von Sekundärmaterialien aufzuzeigen, wurden drei Szenarien erstellt: In Szenario 1 wurde eine Schablone bestehend aus 100% Primärmaterial untersucht, in Szenario 2 besteht die Schablone zu 100% aus Sekundärmaterial und in Szenario 3 zu 50% aus Primärmaterial und zu 50% aus Sekundärmaterial. Dabei gilt es zu beachten, dass das Recycling von ABS momentan noch geringe Bedeutung hat, da die entsprechenden Infrastrukturen fehlen. Aus diesem Grund wurde auf Daten von Polyethylenterephthalat-Recycling zurückgegriffen und das entsprechende Verhältnis der Umweltwirkungen von Primär- und Sekundärmaterial auf ABS umgelegt. Zusätzlich wird für etwaige Stützkonstruktionen 10% (20 g) Polyvinylalkohol benötigt, welcher wasserlöslich ist.

Für den Druck wurde ein FFF-Drucker (FDM 8000) angenommen, welcher einen spezifischen Energiebedarf von ca. 23 kWh/kg Material (Luo et al. 1999) hat. Die Stützkonstruktionen können händisch und mit Hilfe von Wasser abgelöst werden, was in dieser Bilanz vernachlässigt wird. Da die Montageschablonen nur als Hilfswerkzeug

eingesetzt werden und keine besondere Oberflächengüte erforderlich ist, ist kein weiteres Post Processing in Form einer Oberflächenbehandlung notwendig.

Die Nutzungsphase wurde in der hier vorliegenden Bilanz nicht eingerechnet, da während der angenommenen Nutzung der Montageschablone keinerlei Ressourcenverbrauch und damit Umweltauswirkungen assoziiert werden.

Für die Berechnung der Transporte wurde angenommen, dass der benötigte Kunststoff bei SAX Polymers in Wien hergestellt wird. Die Herstellung der Filamente erfolgt bei EvoTech in Schörfling am Attersee. Der Kunststoff legt hierbei eine Transportdistanz von 263 km zurück. Anschließend werden die Filamente in das BMW Werk in Steyr transportiert, was einer Distanz von 97 km entspricht. Die nicht mehr benötigten oder auch kaputten Schablonen werden bei der Energie AG in Wels einer Verwertung zugeführt, was einer Transportdistanz von 54 km entspricht. Alle Transporte erfolgen mit einem LKW der Abgasklasse Euro 6.

In der End of Life Phase wurden, wie bereits in der Rohstoffgewinnung, drei Szenarien betrachtet (Tabelle 11). In Szenario 1 werden 100% des Materials in einer Müllverbrennungsanlage verbrannt, in Szenario 2 findet rechnerisch keine weitere Verwertung statt, da hier 100% Sekundärmaterial eingesetzt wird und das Recycling bereits in der Rohstoffgewinnungsphase eingerechnet wurde. Szenario 3 ist wieder eine 50:50 Aufteilung gewählt worden. 50% des Materials werden verbrannt und 50% werden rechnerisch keiner weiteren Verwertung zugeführt, da das Recycling bereits in der Rohstoffgewinnungsphase berücksichtigt wurde. Weiters wurden Energiedaten des Unternehmens 3DEvo erhoben, welche ein System entwickelt haben, dass das Recycling von Kunststoffen dezentral innerhalb des Unternehmens ermöglicht. Hierzu werden ein Shredder, ein Trockner und ein Extruder benötigt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der drei in der Ökobilanzierung betrachteten Szenarien. (Quelle: eigene Darstellung)

Szenarien	Rohstoffgewinnung	End of Life
Szenario 1	100% Primärmaterial	100% Verbrennung
Szenario 2	100% Sekundärmaterial	100% Recycling
Szenario 3	50% Primärmaterial, 50% Sekundärmaterial	50% Verbrennung, 50% Recycling

Szenarien	Rohstoffgewinnung	End of Life
3D Evo	-	Recycling mittels 3D-Evo System

In keiner der Berechnungen wurden die potentiellen Umweltwirkungen resultierend aus der Herstellung der Geräte und Infrastruktur berücksichtigt, da anzunehmen ist, dass diese über den Nutzungszeitraum in einem industriellen Umfeld je produziertem Bauteil sehr gering werden.

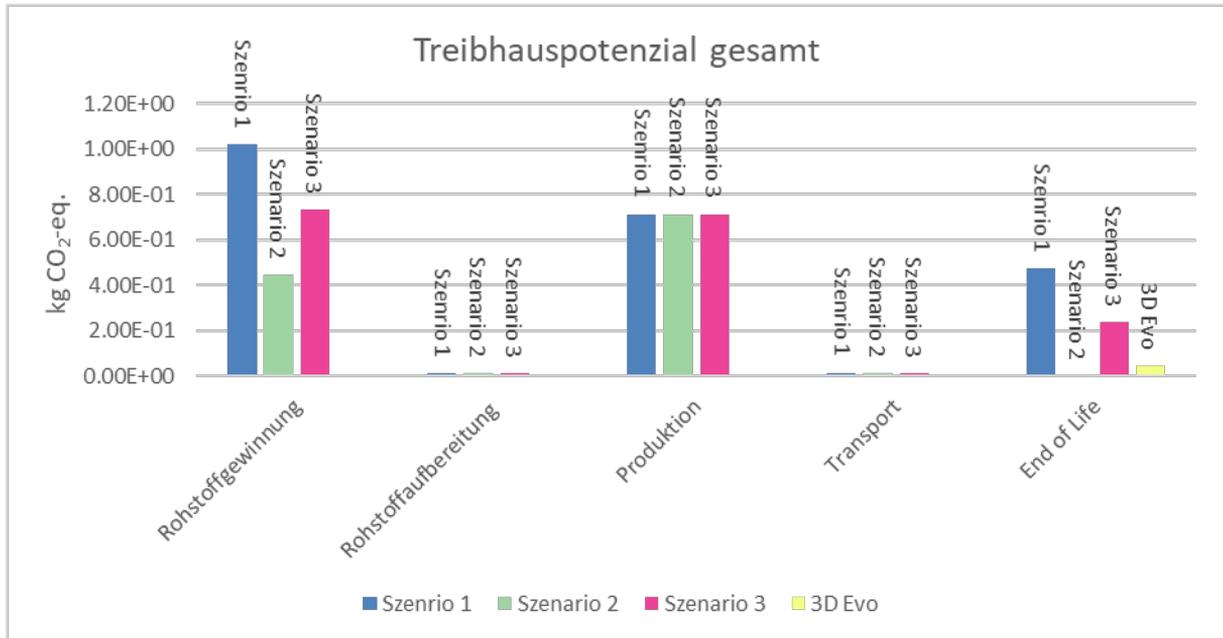
Insgesamt werden 200 g ABS und 20 g Polyvinylalkohol für die Herstellung einer Schablone benötigt. Für die Extrusion von 220 g ABS-Filament werden 0,07 kWh benötigt. Für den Druck der Montageschablonen werden 5,1 kWh benötigt. Für das Recycling von 200 g Material werden mit dem System von 3DEvo 0,18 kWh benötigt.

Wirkungsanalyse

Nach Normalisierung und Gewichtung wurde den folgenden Wirkungskategorien die größte Bedeutung zugesprochen: Treibhauspotenzial gesamt (40,7%), Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe (27,2%), bodennahes Ozonbildungspotenzial (13,1%).

Abbildung 17 zeigt die Umweltauswirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen in der Kategorie Treibhauspotenzial gesamt. Dargestellt sind die drei Szenarien, die sich in der Verwendung von Primär- beziehungsweise Sekundärmaterialien unterscheiden und auch in der End of Life Phase, nicht jedoch in den anderen untersuchten Lebenszyklusphasen. Es ist zu erkennen, dass Szenario 1, in welchem 100% Primärmaterial verwendet wird, die größten Umweltauswirkungen in der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt verursacht. Dies gilt sowohl für die Rohstoffgewinnung als auch für die End of Life Phase des Lebenszyklus. Die geringste Umweltwirkung hat Szenario 2, hier wird 100% Sekundärmaterial verwendet. Szenario 3 (50% Primärmaterial, 50% Sekundärmaterial) liegt in seinen Umweltauswirkungen zwischen Szenario 1 und 2. Auch die Produktion ist nicht zu vernachlässigen, sie hat je nach betrachtetem Szenario das höchste beziehungsweise zweithöchste Treibhauspotenzial aller Lebenszyklusphasen. Außerdem auffällig ist in dieser Darstellung das System von 3D Evo, welches zeigt, dass ein Recycling des Materials mit einem solchen System zu Einsparungen beim Treibhauspotenzial führen kann.

Abbildung 17: Prozesskette 2: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)



Ein ähnliches Bild ist auch in der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe zu erkennen. Abbildung 18 zeigt, dass der Ressourcenverbrauch bei der Rohstoffgewinnung mit steigendem Sekundärmaterialanteil sinkt. Die Produktion hat je nach betrachtetem Szenario den höchsten oder zweithöchsten Ressourcenverbrauch aller Lebenszyklusphasen.

Abbildung 18: Prozesskette 2: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

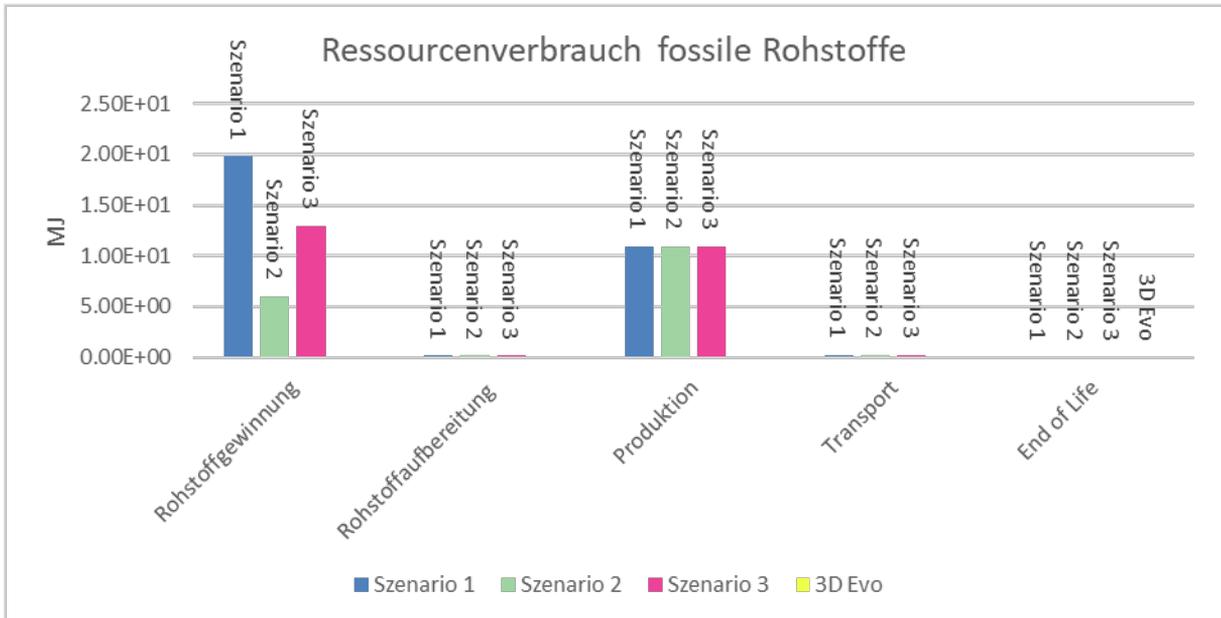
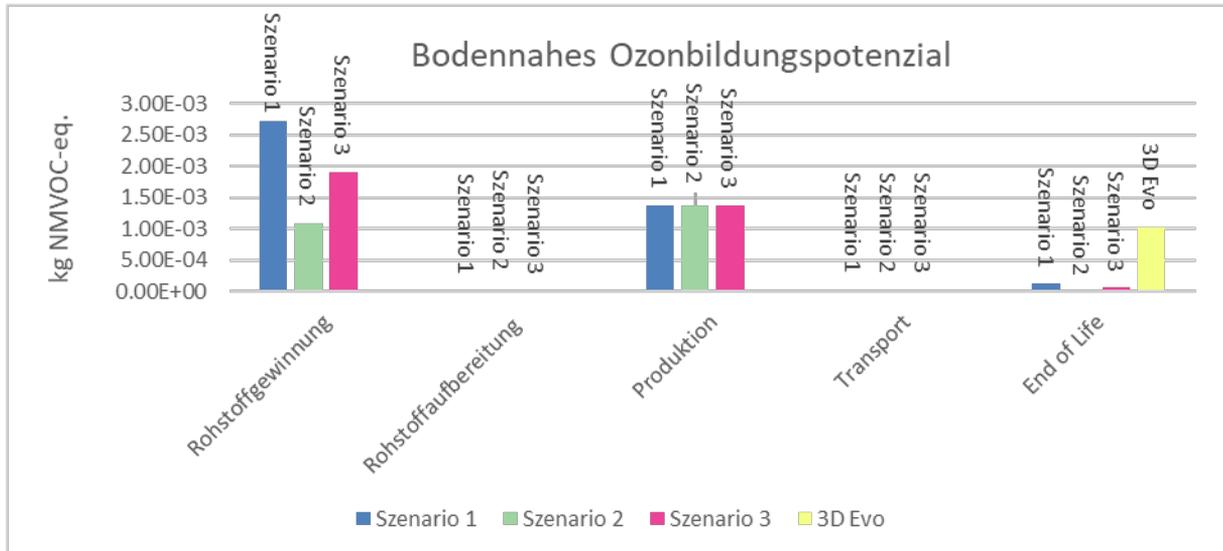


Abbildung 19 zeigt das bodennahe Ozonbildungspotenzial der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen. Auch hier ist in der Rohstoffgewinnung und der Produktion ein zu den bereits betrachteten Kategorien identisches Bild zu erkennen. Was jedoch auffällt ist das vergleichsweise hohe Ozonbildungspotenzial für das System von 3D Evo. Da hier in der Berechnung nur der Energiebedarf berücksichtigt wurde, ist dies auf den Strommix zurückzuführen.

Abbildung 19: Prozesskette 2 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)



Auswertung und Interpretation

Die Effizienzsteigerungen in der Automobilmontage durch die AM-Montageschablone wurden in der Ökobilanz unter den gesetzten Systemgrenzen nicht berücksichtigt. Die Montageschablone kann als passives Produkt beschrieben werden, da für die Nutzung keine Ressourceninputs nötig sind. Die Umweltwirkungen resultieren daher hauptsächlich aus den verwendeten Materialien, der Produktion und möglichen Recyclingoptionen. Es ist zu erkennen, dass die Verwendung von Sekundärmaterialien zu geringeren Umweltauswirkungen im Vergleich zu Primärmaterialien führt. Daher wird empfohlen, dass die Verwendung von Recyclingmaterialien und das Recycling auch im Kontext von AM zu forcieren. Eine neue Option scheint hierbei die Kombination der dezentralen AM mit dezentralem Recycling für die Realisierung eines closed-loop Systems. Recyclingsysteme, wie jenes von 3DEvo weisen durch ihren geringen Strombedarf niedrigere Umweltauswirkungen auf im Vergleich zu Primärmaterial. Um jedoch die erforderlichen Qualitätsmerkmale des Sekundärmaterials über mehrere Recyclingzyklen hinweg zu erzielen, ist es wichtig, Forschung in diesem Bereich zu forcieren. Dabei sei angemerkt, dass das Sekundärmaterial gegebenenfalls nicht zwingend die Eigenschaften eines Primärmaterials aufweisen muss. Mit einer maßgeschneiderten Funktionalität der Materialien je nach Anwendung lässt sich oft Material und Prozessenergie einsparen. Wie bereits bei Prozesskette 1 ist auch hier zu erkennen, dass die Produktion einen erheblichen Anteil der Umweltauswirkungen ausmacht. Um den Energieverbrauch in der

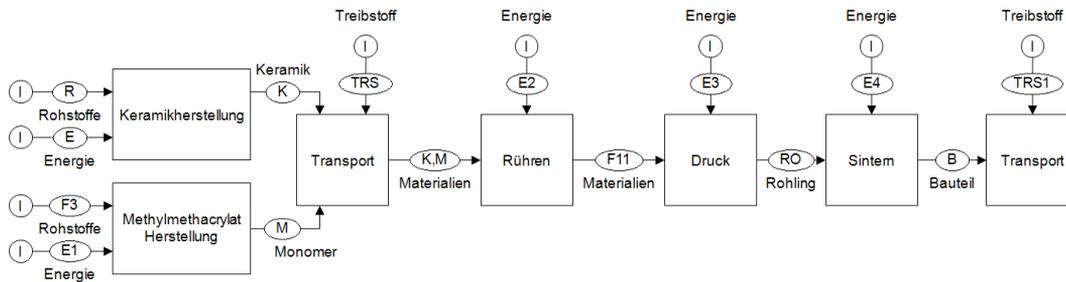
Produktion zu reduzieren, müssen die Anwendungsmuster optimiert werden. Geräte sollten maximal ausgelastet werden und Leerlaufzeiten vermieden werden. Außerdem sollten Unternehmen einen erneuerbaren Strommix verwenden und somit den Ausbau dieser fördern.

Einschränkungen

Zu berücksichtigen ist, dass das Recycling von ABS derzeit noch nicht umgesetzt wird, was die Datenlage zu recyceltem ABS beeinflusst. Aufgrund von fehlenden Daten wurde für die Annahmen für das Recyclingmaterial die Emissionseinsparungsquote von PET-Primärmaterial gegenüber PET-Sekundärmaterial herangezogen. Die Materialeigenschaften des Sekundär-ABS weichen gegebenenfalls vom Primärmaterial ab. Diese Reduktion der mechanischen Eigenschaften und etwaig zu berücksichtigenden Auswirkungen auf die Funktionalität der Montageschablone wurden nicht berücksichtigt. Die Montageschablonen können außerdem in der Praxis aus einem anderen Material gefertigt werden, wobei ABS für diese Anwendung sehr geläufig ist. Gleiches gilt für das Stützmaterial Polyvinylalkohol. Bei den Energiebedarfen handelt es sich um Literaturdaten beziehungsweise Angaben von Experten, die je nach Gerät und Anwendungsmuster abweichen können. Die angenommene Montageschablone hat eine Masse von 200 g, diese kann je nach Funktion und strukturellem Aufbau abweichen und somit das Ergebnis beeinflussen, wobei die Ökobilanzierung einer linearen Modellierung unterliegt. Weiters können die Transportdistanzen variieren, die hier angenommenen Distanzen beschreiben nur eine von vielen Möglichkeiten.

4.5.3 Prozesskette 3: Anwendung von Stereolithographie am Beispiel eines keramischen Herzpumpenrads

Abbildung 20: Prozessfließbild Prozesskette 3: Anwendung von SLA am Beispiel eines keramischen Herzpumpenrads. (Quelle: eigene Darstellung)



Geltungsbereich und Systemgrenzen

Die dritte Prozesskette „Anwendung von Stereolithographie am Beispiel eines keramischen Herzpumpenrads“ zeigt exemplarisch die ökologische Performance einer Funktionsintegration in der Medizintechnik mittels SLA. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde als generisches Bauteil das Rad einer Herzpumpe gewählt. Dieses ist durch den Einsatz von SLA individualisierbar, so kann die Anzahl und Form der Flügel angepasst werden, um die beste Leistung für die Patientin oder den Patienten zu erzielen. Die Masse des Bauteils beträgt 0,8 g. Die definierte Systemgrenze (Abbildung 20) umfasst die Rohstoffgewinnung, Rohstoffaufbereitung, etwaige Transporte und die Produktion. Die Nutzung sowie die End of Life Phase wurden nicht betrachtet, da es sich um ein Medizinprodukt handelt, welches operativ in einen menschlichen Körper eingesetzt wird. Die funktionelle Einheit ist definiert als Ersatz der Herzfunktion durch ein synthetisch hergestelltes Bauteil.

Lebenszyklusinventur

Für die Ökobilanzierung des eingesetzten Materials wurde Aluminiumoxidkeramik herangezogen, welche mit Methylmethacrylat gemischt wird. Das Verrühren der beiden Komponenten wird mit einem handelsüblichen Laborrührer durchgeführt, welcher für einen Liter des Materials 0,09 kWh, für eine Rührdauer von 1,5 h benötigt. Für ein Herzpumpenrad mit einer Masse von 0,8 g werden 0,34 g des Polymers benötigt.

Der Bauraum des SLA-Druckers ist $10*10*10$ cm groß. Daher können bis zu 729 Räder mit einem Durchmesser und einer Höhe von je einem Zentimeter zeitgleich gedruckt werden. Der Druck erfolgt in Deutschland, was für den angenommenen Strommix von Bedeutung ist. Betrachtet wurde der SLA5000 Drucker welcher 20,7 kWh/kg Material beansprucht (Luo et al. 1999). Zur Entfernung des Kunststoffes und Sinterung des keramischen Materials wird ein Sinterofen mit einem Energiebedarf von 3,8 kWh/Zyklus betrachtet. In einem Zyklus können 50 Räder gesintert werden, was einem Energiebedarf von 0,08 kWh/Bauteil entspricht.

Die Nutzungsphase wurde in der hier vorliegenden Bilanz nicht eingerechnet, da das Herzpumpenrad in seiner Nutzung keine direkten Emissionen, sondern nur indirekte Emissionen über die Patientin oder den Patienten, verursacht.

Für die Berechnung der Transporte wurde angenommen, dass das Aluminiumoxid bei CeramTec in Plochingen (DE) und das Methylmethacrylat bei der Firma Alfa Aesar in Karlsruhe (DE) produziert wird. Der Druck erfolgt bei der Firma Steinbach in Detmold (DE). Der keramische Werkstoff legt also eine Transportdistanz von 475 km, das Polymer eine Distanz von 430 km zurück. Das Herzpumpenrad wird anschließend im AKH Wien verwendet was einer Entfernung von 900 km entspricht. Alle Transporte erfolgen mit einem LKW der Abgasklasse Euro 6.

In keiner der Berechnungen wurden die potentiellen Umweltwirkungen resultierend aus der Herstellung der Geräte und Infrastruktur berücksichtigt, da anzunehmen ist, dass diese über den Nutzungszeitraum in einem industriellen Umfeld je produziertem Bauteil sehr gering werden.

Insgesamt werden 0,8 g Aluminiumoxid und 0,34g Methylmethacrylat für die Herstellung eines Herzpumpenrades benötigt. Der Rührprozess nimmt pro Rad $1,2*10^{-4}$ kWh in Anspruch, der Druck 0,02 kWh das Sintern 0,08 kWh.

Wirkungsanalyse

Nach Normalisierung und Gewichtung wurde den folgenden Wirkungskategorien die größte Bedeutung zugesprochen: Treibhauspotenzial gesamt (31,9%), Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe (24,8%), Süßwassereutrophierungspotenzial (17,4%), bodennahe Ozonbildungspotenzial (7,1%). Durchgängig durch alle betrachteten Umweltwirkungskategorien ist zu erkennen, dass die Produktion den höchsten

Umwelteinfluss hat (siehe Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 23 und Abbildung 24). Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass das Bauteil in Deutschland gedruckt und gesintert wird, wo der Strommix deutlich höhere potentielle Umweltauswirkung als in Österreich hat. Vor allem der Sinterprozess hat einen vergleichsweise hohen Energiebedarf.

Abbildung 21: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

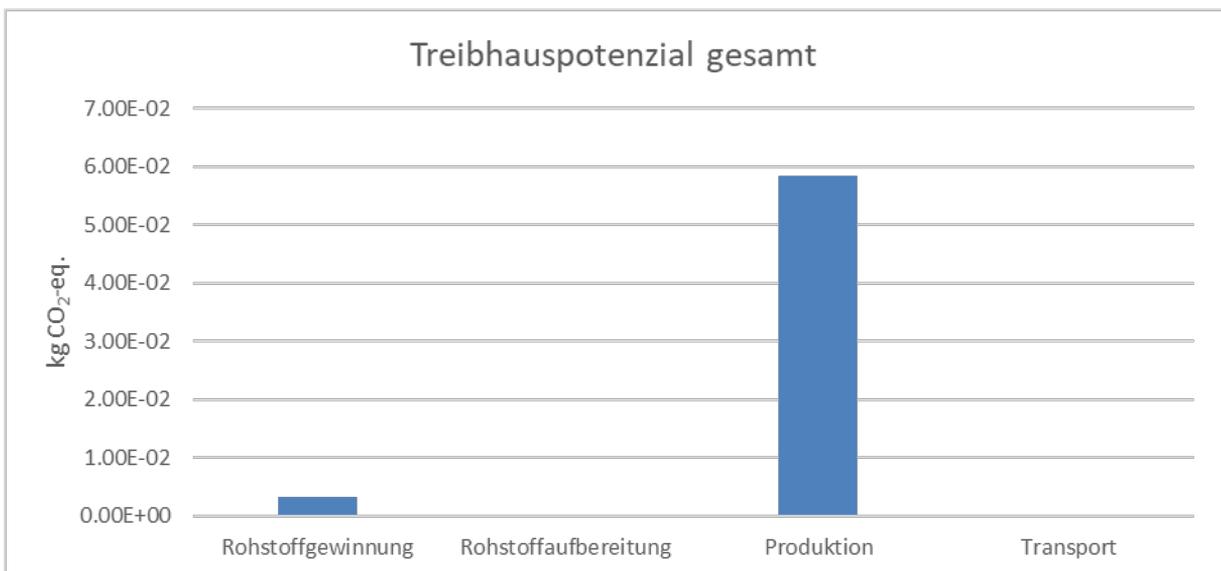


Abbildung 22: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

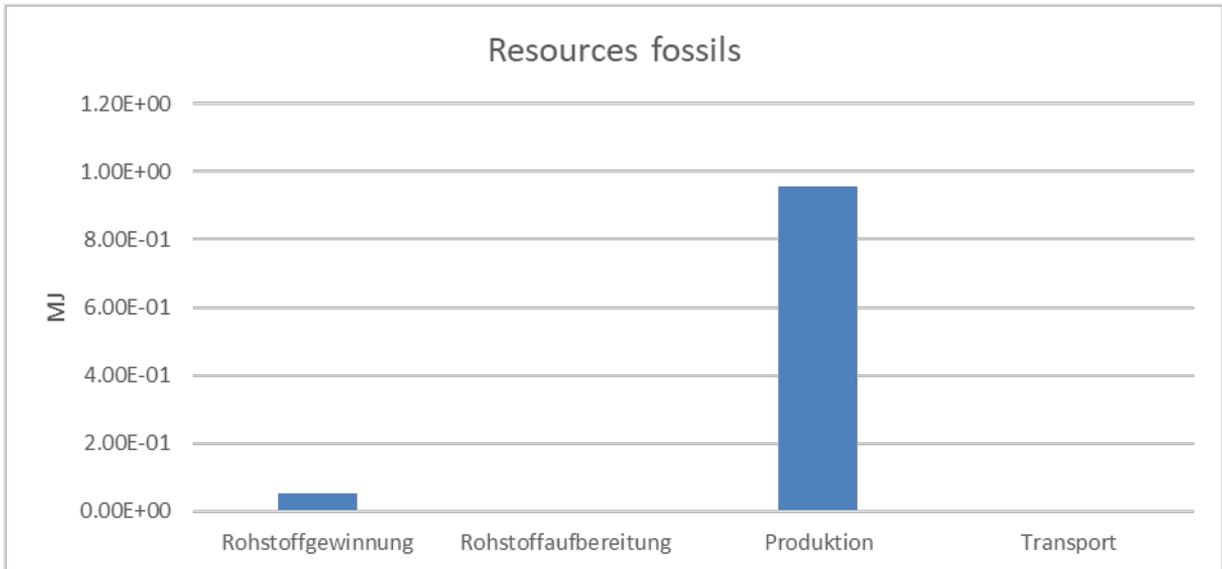


Abbildung 23: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Süßwassereutrophierungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

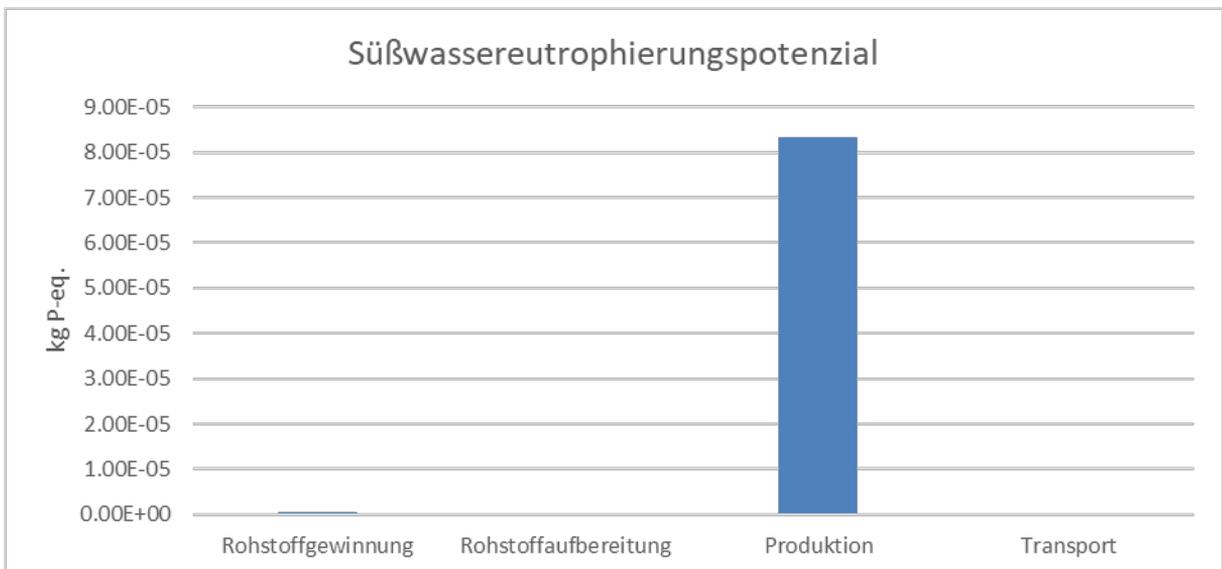
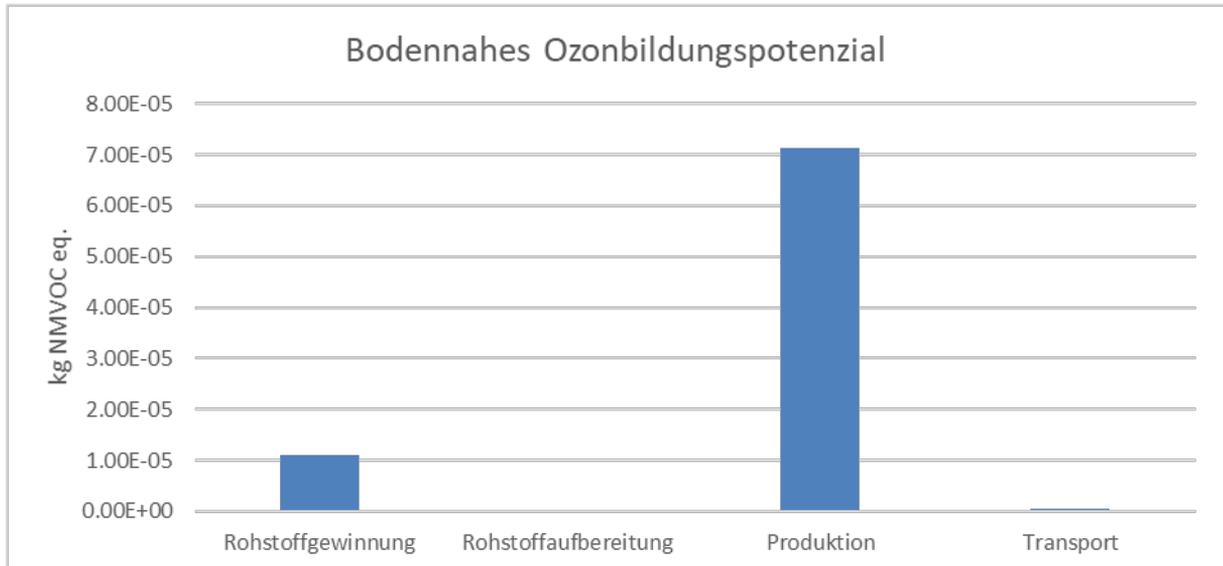


Abbildung 24: Prozesskette 3 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)



Interpretation

Es ist zu erkennen, dass die Produktion die größten potentiellen Umweltwirkungen mit sich bringt, hier ist auch das Post Processing (Sintern) bereits berücksichtigt. Außerdem wie in den Prozessketten 1 und 2 gilt es die Anwendungsmuster zu verbessern, um Energie zu sparen. Zusätzlich ergibt sich der Einsatz eines erneuerbaren Strommix beziehungsweise der Ausbau der erneuerbaren Energie als Handlungsempfehlung.

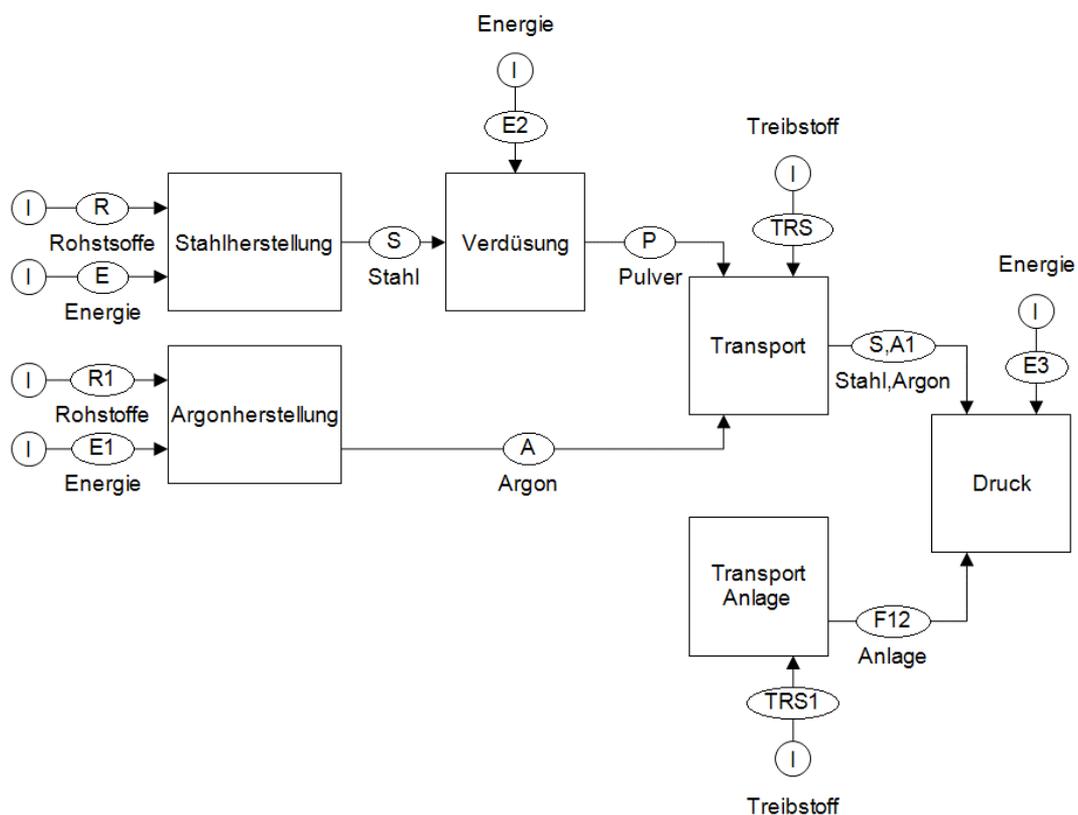
Einschränkungen

Die Nutzungsphase wurde in der hier vorliegenden Bilanz nicht eingerechnet, da das Herzpumpenrad in seiner Nutzung keine direkten Emissionen, sondern nur indirekte Emissionen über die Patientin oder den Patienten, verursacht. Auch der Effekt der Funktionsintegration konnte auf Grund von fehlenden Vergleichsdaten nicht berücksichtigt werden. Somit ist die Betrachtung auf die AM-Technologie eingeschränkt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass das Verhältnis des keramischen Werkstoffs zum Polymer variieren kann und der hier angenommene Fall auf der Schätzung eines Experten beruht. Auch die Rohstoffaufbereitung in Form des Rührens kann in der Dauer variieren und somit zu einem abweichenden Energiebedarf führen. Generell handelt es sich bei den Energiedaten um Literatur- oder Herstellerdaten, die je nach Gerät und

Anwendungsmuster abweichen können. Die Masse des Bauteils wurde anhand eines Beispielbauteils gemessen, kann jedoch in anderen Anwendungsfällen und durch Individualisierung abweichen. Die Anzahl der Bauteile, die pro Druckvorgang gefertigt werden können, ist eine Schätzung, die anhand der Bauteil- und Bauraummaße vorgenommen wurde und kann ebenfalls variieren. Weiters können die Transportdistanzen variieren, die hier angenommenen Distanzen sind nur eine von vielen Möglichkeiten.

4.5.4 Prozesskette 4: Anwendung von Direct Energy Deposition am Beispiel der Reparatur einer Baggerschaufel

Abbildung 25: Prozessfließbild der Prozesskette 4: Anwendung von DED am Beispiel der Reparatur einer Baggerschaufel. (Quelle: eigene Darstellung)



Geltungsbereich und Systemgrenzen

Die vierte Prozesskette „Anwendung von Direct Energy Deposition am Beispiel der Reparatur einer Baggerschaufel“ zeigt exemplarisch die ökologische Performance und Hotspots der Kombination aus der AM-Technologie DED für eine Reparatur mittels einer Metalllegierung für die Nutzung in der Maschinen- und Anlagenbaubranche dar (Abbildung 25). Die reparierten Produkte haben dieselben Qualitätsanforderungen wie die in einer Serienproduktion produzierten Produkte zu erfüllen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurde exemplarisch für den generischen Prozess die Reparatur einer Baggerschaufel mittels mobilem DED-Verfahren ausgewählt. Hierbei wird Metall an den Zähnen der Schaufel aufgetragen, um sie vor Verschleiß zu schützen. Die Masse der angenommenen Baggerschaufelzähne beträgt 17,7 kg pro Stück. Die Oberfläche wurde anhand von Maßen eines Vertriebsunternehmens berechnet und beträgt 1554 cm² pro Zahn. Die Schichtdicke des mittels DED aufgetragenen Materials beträgt 0,02 cm. Insgesamt beträgt die Masse drei neuer Zähne 53,1 kg, jene des mittels DED aufgetragenen Materials beträgt für drei Zähne hingegen nur rund 800 g. Es wurde angenommen, dass eine neue Baggerschaufel für 10.000 Arbeitsstunden ausgelegt ist und die mittels DED-Verfahren reparierten Zähne auf 20.000 Arbeitsstunden. Die Systemgrenzen umfassen die Rohstoffgewinnung, Rohstoffaufbereitung, etwaige Transporte und die Produktion, welche den Materialauftrag bei der Reparatur bezeichnet. Verglichen wurde mit einem konventionellen Ersatzteil, bei dem in den Systemgrenzen nur die Rohstoffgewinnung betrachtet wurde. Als funktionelle Einheit wurde die Möglichkeit des Bodenaushubs mit Hilfe einer funktionstüchtigen Baggerschaufel gewählt.

Lebenszyklusinventur

Für die Materialherstellung wurde ein niedriglegierter Stahl herangezogen. Die Stahlmasse für die neuen Zähne beträgt 53,1 kg und für das Auftragsschweißen 0,8 kg. Das hergestellte Material muss anschließend verdüst werden, was 0,46 kWh/kg beansprucht.

Für das DED-Verfahren werden 67,7 kWh und 2,7 kg Argon/kg Pulvereinsatz (Liu et al. 2017) angenommen. Auch die Herstellung des Argons für den DED-Prozess wurde in der Berechnung berücksichtigt. Es ist kein weiteres Post Processing vorgesehen,

In der Nutzungsphase der reparierten Baggerschaufel ist kein anderer CO₂-Ausstoß zu verzeichnen, weshalb diese in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde.

Für die Berechnung der Transporte wurde angenommen, dass das Metallpulver bei Voestalpine Boehler in Kapfenberg produziert und zu Laser Cladding Austria nach Wels transportiert wird, was einer Transportdistanz von 185 km entspricht. Das Argon Gas wird von Linde Gas in Linz zu Laser Cladding Austria nach Wels transportiert, was einer Transportdistanz von 34 km entspricht. Auch das Gewicht der Gasflasche wurde anteilmäßig berücksichtigt. Die mobile DED-Anlage hat eine Masse von 900 kg und kann zu beliebigen Einsatzorten transportiert werden. Um ein mögliches Szenario darzustellen, wurde eine Transportdistanz von 100 km angenommen. Alle Transporte erfolgen mit einem LKW der Abgasklasse Euro 6.

In keiner der Berechnungen wurden die potentiellen Umweltwirkungen resultierend aus der Herstellung der Geräte und Infrastruktur berücksichtigt, da anzunehmen ist, dass diese über den Nutzungszeitraum in einem industriellen Umfeld je repariertem Bauteil sehr gering werden.

Insgesamt wurden 53,1 beziehungsweise 0,8 kg Material verwendet. Die Verdüsung bedarf für 0,8 kg Material 0,4 kWh, der Materialauftrag 54 kWh. Für den Druck werden außerdem 2,1 kg Argon benötigt. Im Fall der Neuanschaffung wurde nur die Materialherstellung betrachtet, da diese Betrachtung bereits ein eindeutiges Ergebnis zeigt.

Wirkungsanalyse

Nach Normalisierung und Gewichtung wurde den folgenden Wirkungskategorien die größte Bedeutung zugesprochen: Treibhauspotenzial gesamt (27,3%), Ressourcenverbrauch Mineralien und Metalle (22,9%), Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe (20,9%), bodennahe Ozonbildungspotenzial (11,2%). Der Hauptverursacher aller Emissionen innerhalb der DED-Prozesskette sind die Transporte und hier vor allem der Transport der DED-Anlage, welche mit 900 kg sehr schwer ist. Dennoch zeigen die Ergebnisse klar, dass die Umweltauswirkungen einer Neuanschaffung deutlich höher sind als jene durch eine DED-Reparatur (siehe Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29)

Abbildung 26: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

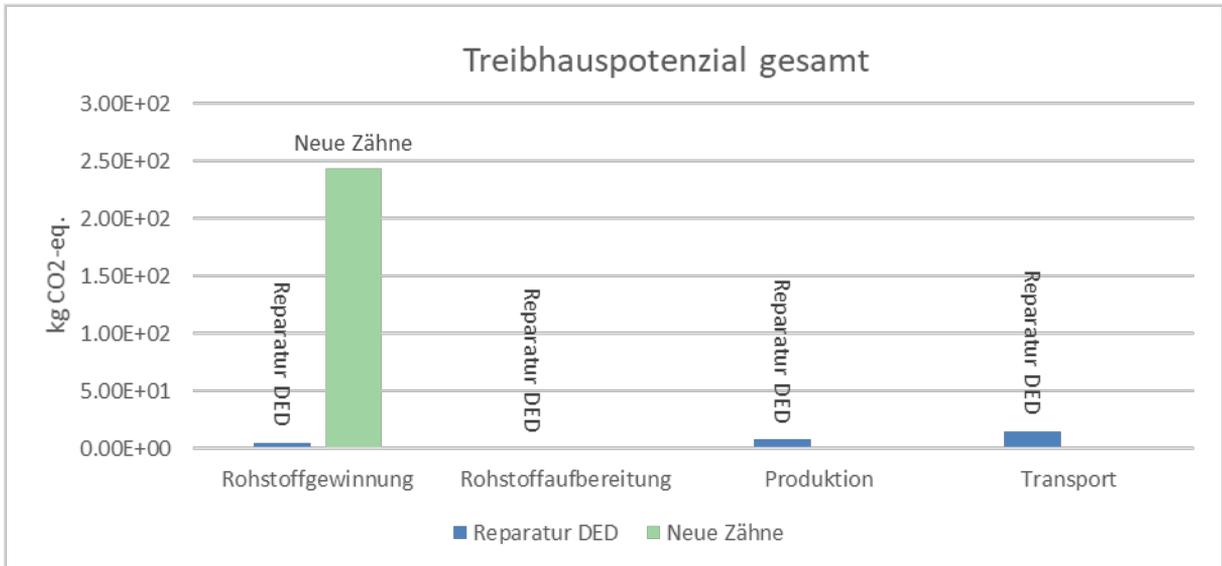


Abbildung 27: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch Mineralien und Metalle über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

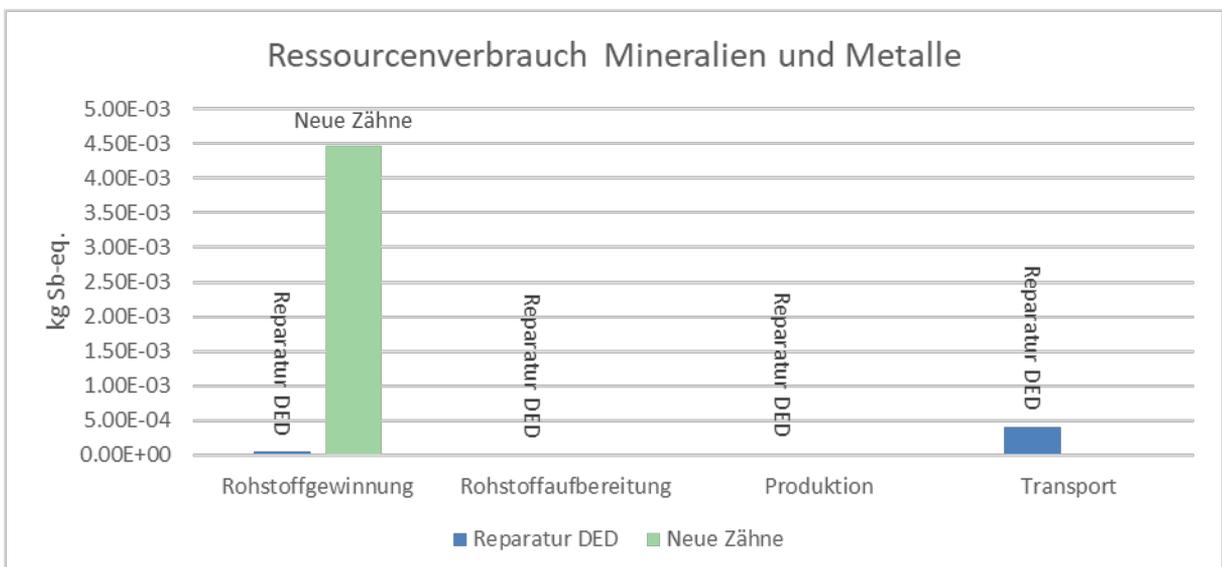


Abbildung 28: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)

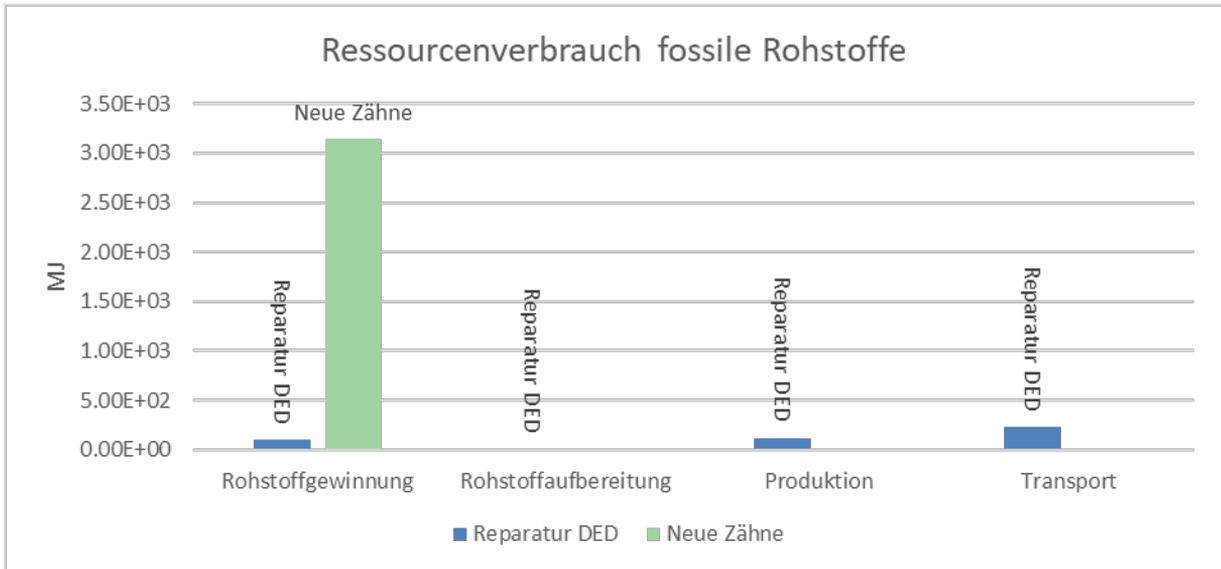
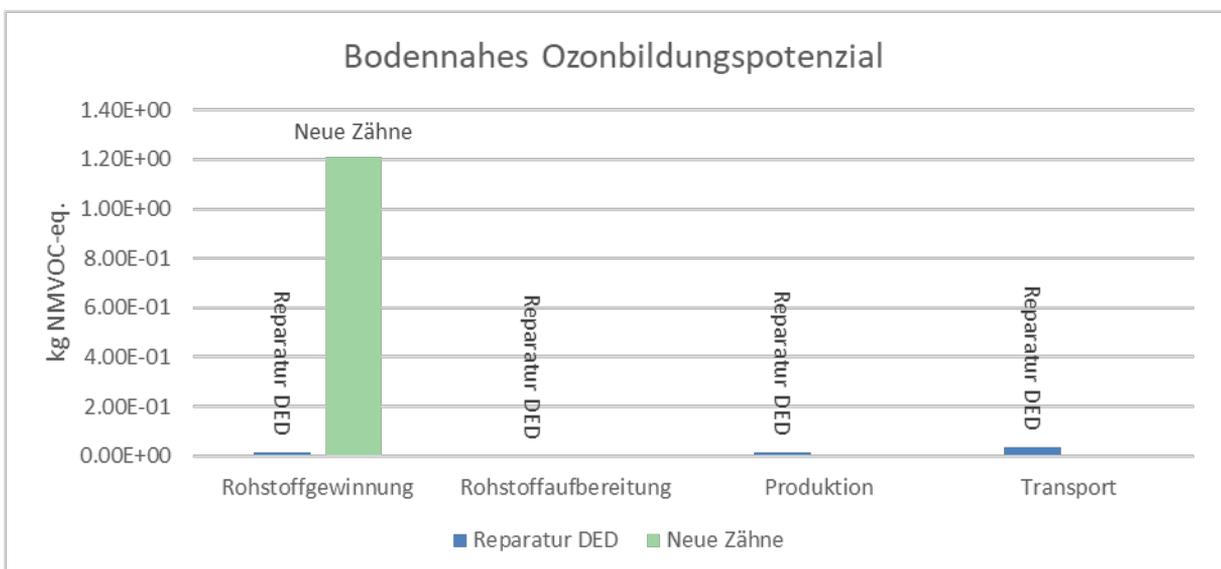


Abbildung 29: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)



Auswertung und Interpretation

Es ist klar zu erkennen, dass eine Reparatur der Zähne gegenüber einer Neuanschaffung zu Emissionseinsparungen führt. Die Lebensdauer der Baggerschaufel kann mit geringem Ressourcenaufwand verdoppelt werden. Innerhalb der DED-Prozesskette haben die Transporte den größten Einfluss auf die ausgewählten Umweltwirkungskategorien. Wird eine dezentrale und mobile Anwendung von DED angestrebt, wird empfohlen die Transportdistanzen möglichst kurz zu halten und die Anzahl der nötigen Transporte zu verringern durch gezielte Fahrtrutenplanung. So könnte eine solche mobile Anlage bei Großbaustellen, während der gesamten Laufzeit der Baustelle vor Ort zur Verfügung stehen oder auch erst zur Baustelle transportiert werden, wenn mehrere Teile defekt sind.

Einschränkung

Zu berücksichtigen ist, dass das zur Berechnung verwendete Material dem tatsächlich verwendeten Material ähnelt aber nicht identisch ist. Dies ist auf die fehlende Verfügbarkeit von Daten von spezifischen Materialien zurückzuführen. Die Menge des aufzutragenden Materials wurde anhand der Daten eines Vertriebsunternehmens berechnet und ist somit nur eine Schätzung. Außerdem ist der benötigte Materialauftrag abhängig von dem Untergrund, der mit dem Bagger bearbeitet wird. Dies gilt auch für die Lebensdauererlängerung durch den Materialauftrag. Bei lehmhaltigem Boden hat der Verschleißschutz eine längere Lebensdauer als bei sandigem Boden. Bei der Materialaufbereitung wurde nur der Verdünnungsprozess berücksichtigt, es kann jedoch vorkommen, dass das Material noch weiter vorbehandelt werden muss. Weiters können die Transportdistanzen variieren, die hier angenommenen Distanzen sind nur eine von vielen Möglichkeiten. Die angenommenen Energiebedarfe wurden der Literatur entnommen und können je nach Gerät und Anwendungsmuster variieren.

4.5.5 Zusammenfassende Darstellung der Prozessketten 1-4

Die zusammenfassende Darstellung dient dazu die prozentuellen Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen an der Gesamtumweltauswirkung innerhalb ausgewählter Wirkungskategorien zu zeigen. Außerdem wird die Umweltauswirkung pro Kilogramm gedruckter Struktur in ausgewählten Umweltwirkungskategorien gezeigt. Insgesamt wurden für diese Darstellung drei Umweltwirkungskategorien gewählt, diese sind: Treibhauspotenzial, bodennahes Ozonbildungspotenzial und Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe. Die Auswahl folgte aufgrund der Normalisierung und Gewichtung der einzelnen Prozessketten, durch welche sich herausstellte, dass die drei gewählten Kategorien in

allen vier Prozessketten als bedeutend (>80% der Gesamtwirkungen) identifiziert wurden. Die Darstellungen zeigen für die Prozessketten 2- FFF auch die drei unterschiedlichen Szenarien (vgl. Tabelle 11).

Abbildung 30 , Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die prozentuellen Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (exklusive Nutzungsphase) an der Gesamtumweltauswirkung für die ausgewählten Umweltwirkungskategorien. Es ist für alle drei dargestellten Umweltwirkungskategorien ein ähnliches Bild zu erkennen. In Prozesskette 1- PBF hat die Produktion die höchsten Umweltauswirkungen in der Kategorie Treibhauspotenzial und Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe. In beiden Kategorien macht die Produktion mehr als 50% der Gesamtumweltauswirkungen aus gefolgt von der Rohstoffgewinnung, die in beiden Kategorien knapp unter 40% der Gesamtumweltauswirkungen ausmacht (siehe Abbildung 30 und Abbildung 32). In der Kategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial hat die Rohstoffgewinnung die höchste Umweltauswirkung gefolgt von der Produktion. Die anderen Lebenszyklusphasen haben keinen ausgeprägten Einfluss auf die Gesamtumweltauswirkungen in den ausgewählten Kategorien.

In den drei Szenarien der Prozesskette 2- FFF ist ein ähnliches Bild zu erkennen. In Szenario 1 (100% Primärmaterial) dominiert in allen drei untersuchten Umweltwirkungskategorien der Einfluss der Rohstoffgewinnung die Umweltauswirkungen. In Szenario 2 (100% Sekundärmaterial) dominiert in allen drei untersuchten Umweltwirkungskategorien der Einfluss der Produktion die Umweltauswirkungen. Bei Szenario 3 (50% Primärmaterial, 50% Sekundärmaterial) sind die Umweltauswirkungen durch die Rohstoffgewinnung und die Produktion der Kategorie Treibhauspotenzial in etwa gleich hoch und machen gemeinsam mehr als 80% der Gesamtumweltauswirkungen in dieser Kategorie aus. In der Kategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial und Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe überwiegt die Umweltauswirkung durch die Rohstoffgewinnung.

In Prozesskette 3 -SLA ist über alle drei untersuchten Umweltwirkungskategorien das gleiche Bild zu erkennen. Die Produktion macht jeweils immer mehr als 80% teilweise sogar mehr als 90% der Gesamtumweltauswirkungen der jeweiligen Umweltwirkungskategorie aus. Dies ist primär auf den hohen Energieverbrauch des Sinterprozesses zurückzuführen.

In Prozesskette 4- DED ist über alle drei untersuchten Wirkungskategorien zu erkennen, dass die Transporte den höchsten Anteil an der Gesamtumweltauswirkung er jeweiligen Umweltwirkungskategorien einnehmen. Dies ist auf den Transport der mobilen DED-Anlage zurückzuführen, welche eine Masse von etwa 900 kg aufweist.

Abbildung 30: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung)

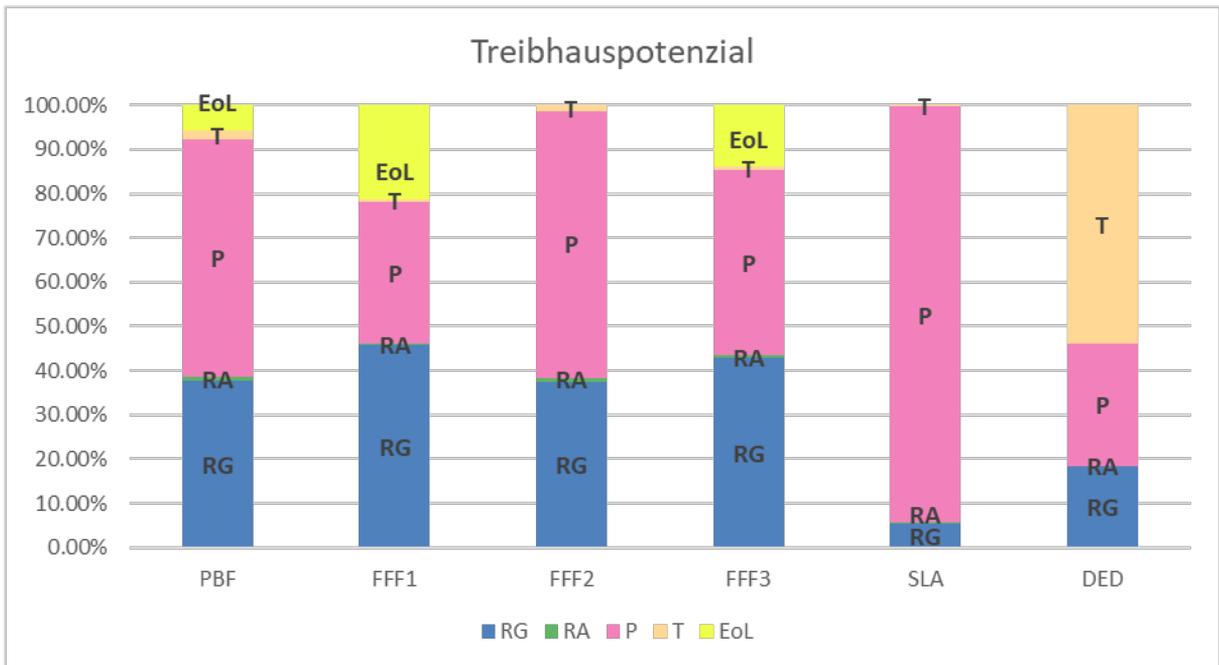


Abbildung 31: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung)

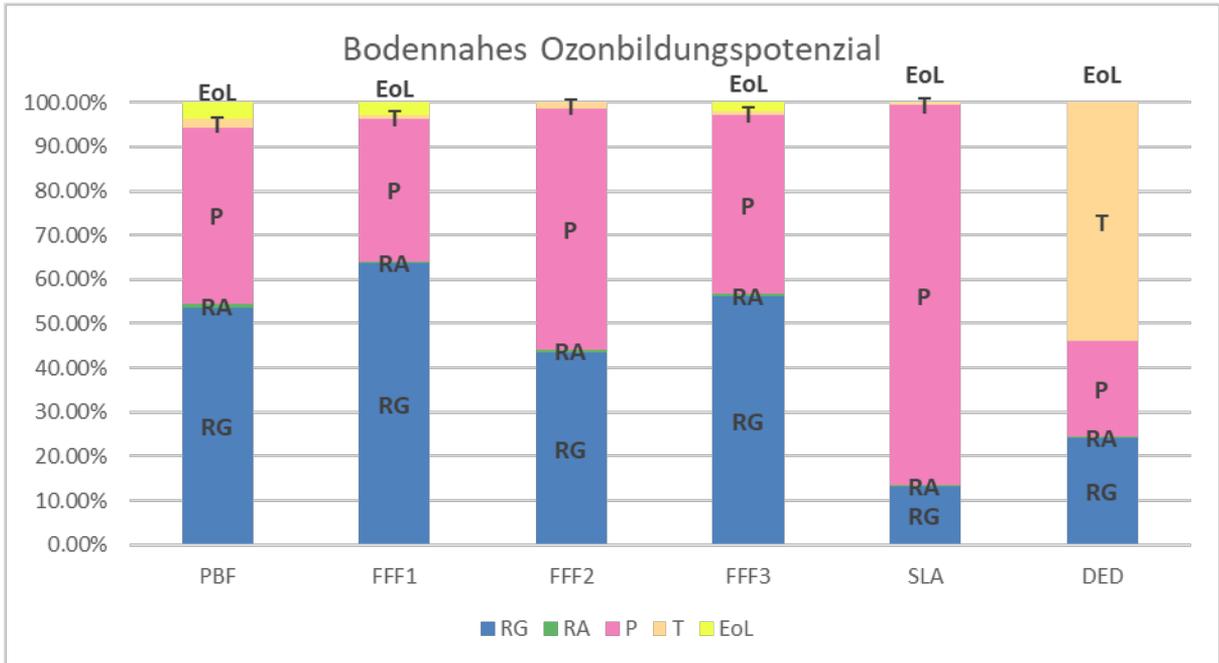


Abbildung 32: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung)

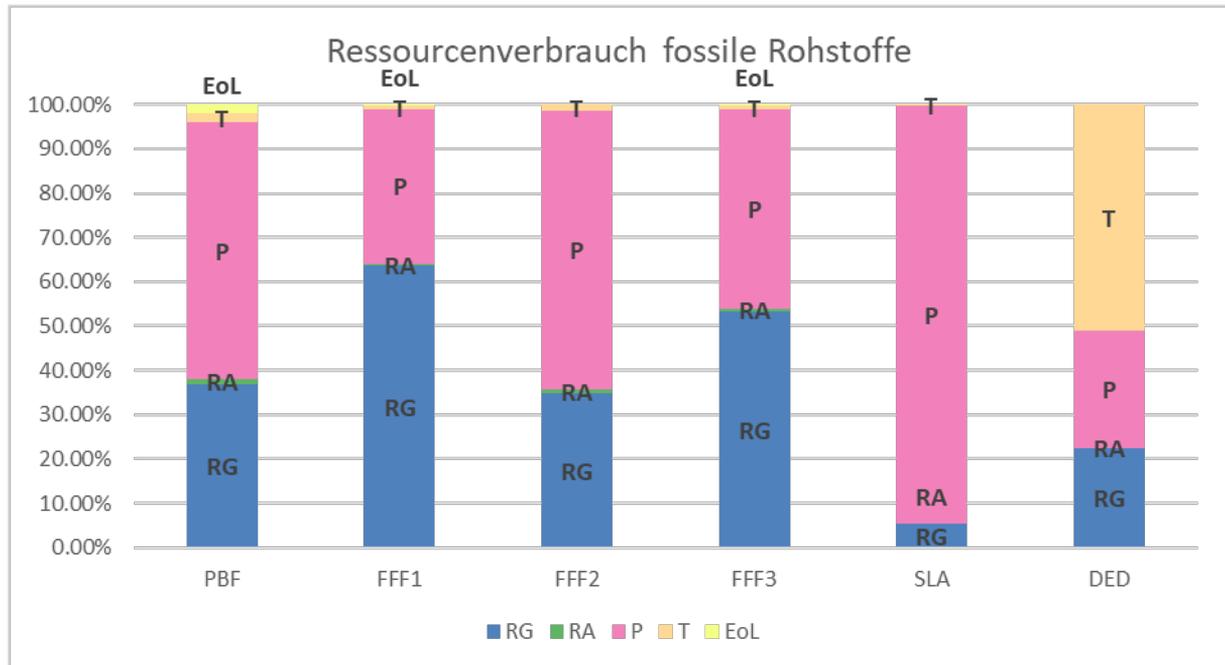


Abbildung 33, Abbildung 34, und Abbildung 35 zeigen die Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung und Produktion in Bezug auf ein Kilogramm an gedruckter Struktur. Hierbei wurden Stützmaterialien anteilmäßig in die Rohstoffgewinnung eingerechnet. Den höchsten Beitrag zur Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial und Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe leistet in der Phase Rohstoffgewinnung die Gewinnung des Primärmaterials (inklusive Stützmaterial) für das FFF Verfahren (Prozesskette 2, Szenario 1). In der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial ist der Einfluss durch die Gewinnung des metallischen Materials für Prozesskette 1- PBF am höchsten. Für die Produktion ist der Umwelteinfluss durch das Produktionsverfahren in Prozesskette 3 – SLA in allen betrachteten Umweltwirkungskategorien am höchsten. Dies ist auf das energieintensive Sinterverfahren zurückzuführen.

Abbildung 33: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung)

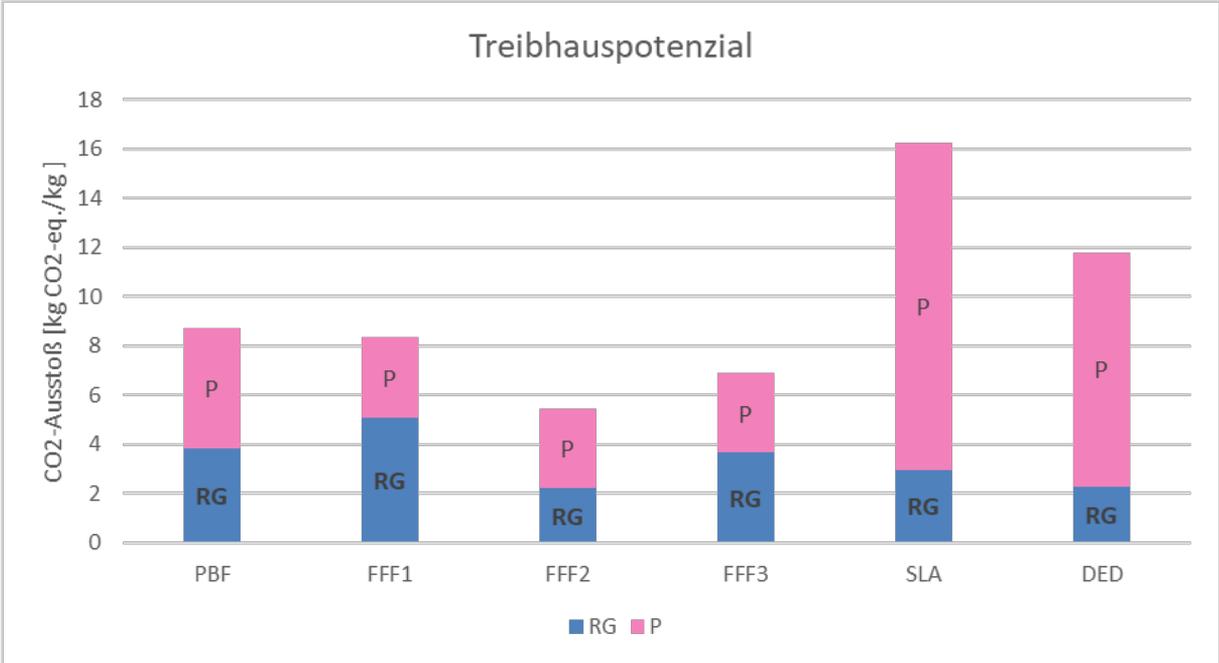


Abbildung 34: Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung)

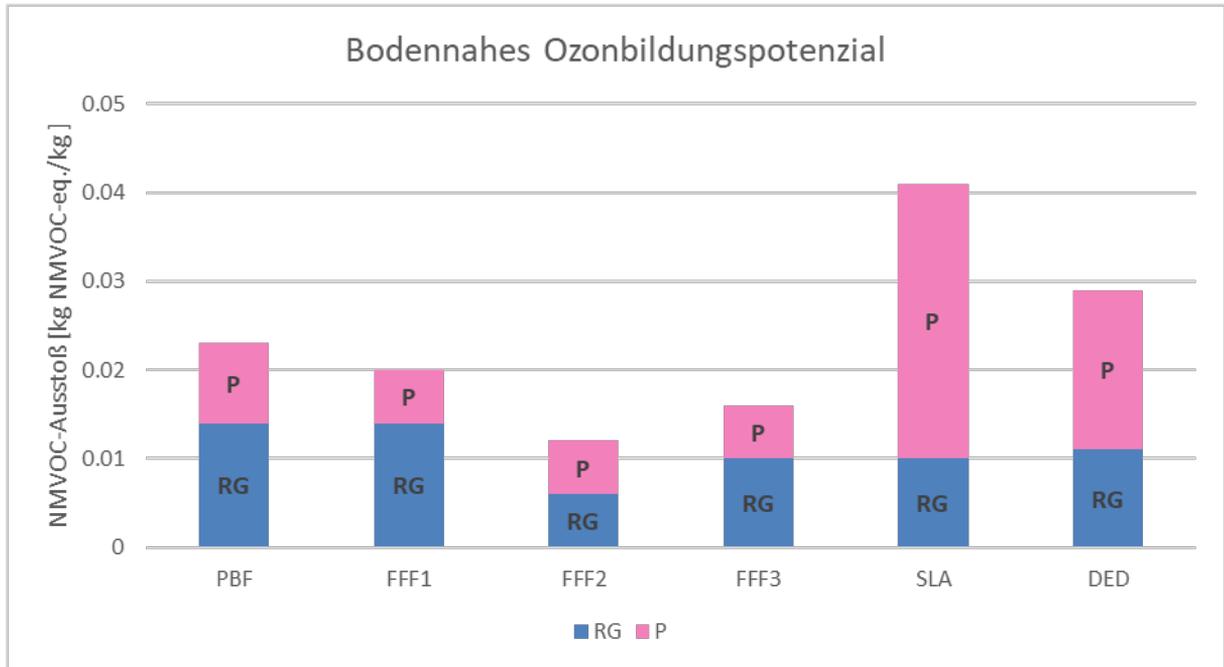
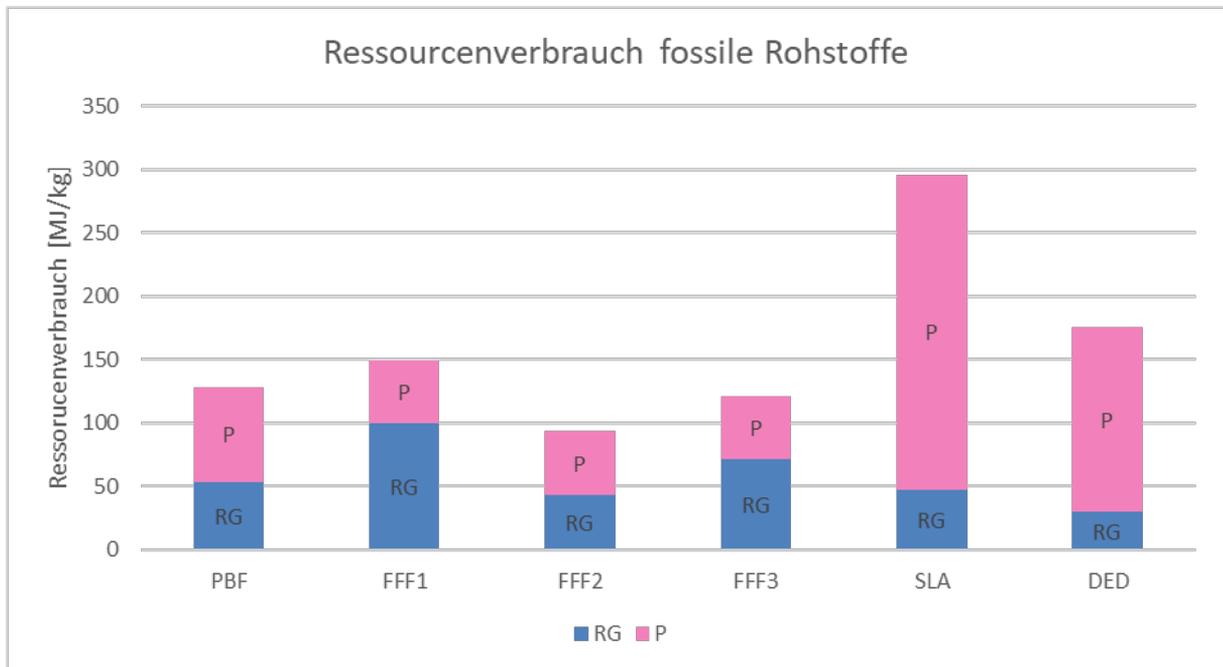


Abbildung 35: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung)



4.6 Stellhebel und Hotspots - Abhängigkeiten der ökologischen Potenziale

In den folgenden Subkapiteln werden Stellhebel angeführt, in denen Ansätze hinsichtlich des Einflusses auf die ökologische Performance von AM gefunden werden können. Die durchgeführten Recherchen und Analysen haben gezeigt, dass ein direkter Vergleich additiver Fertigungsverfahren mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht immer zielführend, häufig schwierig oder gar nicht möglich ist. Dies liegt in der Tatsache, dass wesentliche Potenziale additiv gefertigter Produkte in Eigenschaften oder Funktionalitäten zu finden sind, die mit konventionellen Fertigungstechnologien nicht generierbar sind. Dennoch können wesentliche Punkte herausgehoben werden, wo durch additive Fertigung, im Gegensatz zu konventionellen Verfahren, wesentliche ökologische Potenziale generiert werden können beziehungsweise in welchen Bereichen die AM tendenziell eher negative ökologische Wirkung aufweist. Die Aspekte der tendenziell negativen Auswirkungen werden in Tabelle 12 als kritische Hotspots angeführt. Diese Hotspots wirken, bezogen auf die identifizierten Herausforderungen, verstärkend, können jedoch mit geeigneten Maßnahmen wiederum kompensiert werden. Hingegen können über die Stellhebel die ökologischen Potenziale gehoben werden und die adressierten Herausforderungen abgeschwächt werden. Bei den Stellhebeln wird in zwei grundsätzlichen Arten unterschieden:

- Direkte Stellhebel (1. Ordnung): Durch die direkten Stellhebel können ökologische Potenziale unmittelbar umgesetzt werden, wie beispielsweise Prozessoptimierung im Bereich der Rohmaterialaufbereitung, des Produktionsprozesses sowie im Bereich des Postprocessings
- Indirekte Stellhebel (2. Ordnung): Diese entfalten ihre Wirkung durch die Möglichkeit der Integration AM-potenzialbasierter Funktionalitäten und erstrecken sich über unterschiedliche Bereiche des Produktlebenszyklus (PLC). Hierbei ist ein wesentlicher Wirkungsbereich die Nutzungsphase, wobei anwendungsspezifisch auch in der Logistik oder der EoL-Phase signifikante Wirkungen erzielt werden können.

Tabelle 12: Auszug der relevantesten Hotspots mit positiven beziehungsweise negativen ökologischen Effekten. (Quelle: eigene Darstellung)

Stellhebel für eine ökologischere Produktion von Sachgütern mit AM (1. Ordnung) bzw. durch AM (2. Ordnung)	Kritische Hotspots
Optimierung der Produktionsprozesse sowie der Postprozesse führen zu Energieeinsparungen	Die Herstellung von Materialien für die AM ist meist energie- und somit auch kostenintensiver als für konventionelle Fertigungstechnologien
Einsatz erneuerbarer Energiequellen führt zu einer CO2-Reduktion bei energieintensiven Prozessen	Die additive Produktion an sich erfordert häufig einen höheren Energieeinsatz als konventionelle Fertigungstechnologien benötigen, darüber hinaus fallen Skaleneffekte weg
Virtuelle Ersatzteillager und digitaler Versand führt zu geringeren Logistikaufwänden	Erneuter Einsatz von nicht verdruckten Ausgangsmaterialien im Bauprozess tlw. nur begrenzt möglich (primär für pulverbasierte Verfahren relevant)
Effizienzsteigerung in der Nutzung durch den Einsatz additiv gefertigter Produkte (hinsichtlich möglicher Bauteilkomplexitäten beispielsweise für spezielle Düsen-Geometrien)	Stärkere Digitalisierung (AM als digitale Produktionstechnologie) bedeutet höhere Daten-Speicherbedarfe und Energieverbräuche
Effizienzsteigerung in der Nutzung durch Leichtbau-Geometrien (überall, wo Bauteile bewegt oder befördert werden)	Fehlende Methoden für Pulverrecycling erschweren Verwendung von Material als Sekundärrohstoff – häufig wird Restmaterial als gefährlicher Sondermüll verbrannt
Materialeinsparungen durch eine effiziente Bauteilgestaltung (führt zu geringerem Materialeinsatz und somit zu einem geringerem Rohmaterialbedarf)	

Grundsätzlich gilt, dass bereits in der Bauteilkonstruktion ein großer Einfluss auf ökologische Auswirkungen eines Produktes, insbesondere auf die Kreislauffähigkeit, genommen werden kann. Die positiven Auswirkungen werden jedoch meist erst in der Nutzungsphase des Produktes sichtbar. Die positiven Hotspots bestätigen diese These, dass für signifikante positive ökologische Effekte bereits im Rahmen der Produktentwicklung beziehungsweise bei der Konstruktion der Grundstein gelegt werden muss. Durch die additive Herstellung eines bis dato unverändert konventionell gefertigten Bauteils sind somit keine bedeutenden positiven ökologischen Auswirkungen zu erwarten. Jedoch können durch gezielte Maßnahmen, zum Beispiel hohe Auslastungsgrade der Anlagen sowie optimiertes Betreiben von Anlagen durch einen Ausbau eines Dienstleisternetzwerkes manche negativen Effekte (wie beispielsweise fehlende Skaleneffekte) zu einem gewissen Maß reduziert werden.

4.6.1 Abhängigkeit von der Losgröße

Entsprechend der ausgewerteten Literatur lässt sich feststellen, dass die ökologischen Vorteile von AM nur für geringe Losgrößen gegeben sind. So schreiben Garcia et al. 2021, dass sowohl das Treibhauspotenzial als auch der kumulierte Energieverbrauch pro Stück ab einer Losgröße von 50 Stück für CM geringer sind als für AM, unabhängig davon welche prozentuelle Ausfüllung das durch AM hergestellte Bauteil hat. Auch Hofstätter et al. 2016 schreiben, dass AM-Verfahren für die Herstellung von soft tooling Einsätzen für Spritzguss bei Losgrößen bis zu 200 Stück (in der Verwendung) ein geringeres Treibhauspotenzial haben. Weiters unterstützt Raoufi et al. 2022 diese Aussage. Sie schreiben, dass sich die Herstellung von Werkzeugen ab einer gewissen Losgröße amortisiert und die Umweltauswirkungen von CM pro Stück geringer werden als jene von AM (siehe Kapitel 4.3.3). In der Gesamtbetrachtung lässt sich erkennen, dass AM tendenziell für Bauteile genutzt werden sollte, die in kleiner Stückzahl hergestellt werden müssen.

4.6.2 Abhängigkeit von der Energiequelle

Eine weitere Abhängigkeit besteht zwischen der Umweltfreundlichkeit von AM und dem verwendeten Strommix. So schreiben Faludi et al. 2015, dass der hohe Energieverbrauch von AM-Verfahren die häufig gegebene Materialeinsparung ausgleichen kann. Drucker haben einen hohen Energieverbrauch (Lyons et al. 2021), was jedoch vor allem zum ökologischen Nachteil wird, wenn die Energie aus fossilen Quellen bezogen wird. So wird AM umweltfreundlicher, wenn der Strommix aus einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien besteht. Unternehmen wird daher empfohlen, darauf zu achten, Prozessenergie

einzusparen und Ökostrom zu beziehen, um die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen zu fördern.

4.6.3 Abhängigkeit von Material und Branche

Einen Vorteil, den AM mit sich bringt, ist die Materialeinsparung (Jiang et al. 2019, Garcia et al. 2021). Es steht jedoch in Frage, ob diese Materialeinsparung auf alle Verfahren zutrifft. So ist es bei Pulverbettverfahren notwendig, das gesamte Bett mit Pulver zu befüllen, auch wenn nur ein kleiner Bauteil entsteht. Streulicht der Lichtquelle senkt jedoch die Qualität des umliegenden Pulvers, was in manchen Branchen dazu führt, dass das gesamte Pulver entsorgt werden muss. Expertinnen und Experten des Workshops geben an, dass dies vor allem in der bemannten Luft- und Raumfahrt geschehe, da hier besonders hohe Sicherheitsstandards in Kraft sind. Eine Möglichkeit diese Abfälle zu vermeiden wäre es, diese „verbrauchten“ Pulver an Forschungseinrichtungen oder Unternehmen weiterzugeben, welche geringere Qualitätsansprüche haben.

In den analysierten Studien gab es keine Angaben dazu, ob bei Pulverbettverfahren eine Wiederverwendung des Pulvers impliziert wurde beziehungsweise welche Masse an Pulver für die Berechnungen berücksichtigt wurde. Hier gilt es einheitliche Berechnungsstandards einzuführen, um die Vergleichbarkeit zu erhöhen. Generell ist das Recycling beziehungsweise die Wiederverwendung von Materialien aus AM-Verfahren noch nicht sehr ausgereift. Pulver gelten aufgrund ihrer Lungengängigkeit als gefährliche Abfälle und müssen verbrannt werden. Andere Materialien werden nach der Verwendung häufig im Hausmüll (bei privater Nutzung der Drucker) entsorgt und keinem geeigneten Recycling zugeführt. Insgesamt ist ein sparsamer Umgang mit Pulvern sowie die Entwicklung geeigneter Recyclingverfahren und die Förderung der richtigen Entsorgung von Bedeutung.

Außerdem sollte bei der Auswahl des Verfahrens und dem zugehörigen Material die Umweltperformance berücksichtigt werden. So ist bekannt, dass vor allem Pulvermaterialien bei ihrer Herstellung einen hohen Energiebedarf haben. Paris et al. (2016) schreiben, dass der Energieverbrauch bei der Zerstäubung von Pulvern einer der Hotspots ist und auch Expertinnen und Experten des Workshops sehen die Materialaufbereitung als Hotspot an. Daher sollten Pulvermaterialien und die zugehörigen Verfahren nur gewählt werden, wenn andere AM-Verfahren nicht in Frage kommen.

4.6.4 Abhängigkeit des Betrachtungsumfangs

Tendenziell wird die Nutzungsphase der Produkte in den betrachteten Ökobilanz Fallstudien nicht berücksichtigt oder nur in groben Zügen beschrieben und berechnet. Nur eine der betrachteten Studien beziehen Einsparungen in der Nutzungsphase mit in ihre Betrachtung ein. Ingarao und Priarone (2020) stellen fest, dass es bei dem Einsatz ihres Bauteils in einem Kurzstreckenflugzeug nach spätestens zwei Jahren zu Energieeinsparungen kommt, unabhängig davon wie viel Masse durch das produzierte Bauteil eingespart werden kann.

Es gilt folglich festzuhalten, dass vor allem betreffend der Energie- und Emissionseinsparungen eine ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus anzustreben ist. Denn der als hoch eingeschätzte Energieverbrauch in der Herstellungsphase, kann durch Leichtbau oder bessere Funktionalität des Bauteils in der Nutzungsphase amortisiert werden. Weiters bringt AM eine Materialeinsparung mit sich, die den hohen Energieverbrauch in der Herstellungsphase überwiegen kann.

Außerdem ist kritisch anzumerken, dass sich Energieeinsparungen teilweise durch die Wahl der funktionellen Einheit ergeben, wobei sich die ökologische Performance immer auf die abgezielte Funktion des Produktes beziehen sollte (und nicht etwa auf ein kg oder m³ Material). So definieren Abu-Ennab et al. (2022) zwei Funktionen des zu bilanzierenden Produktes, um die Sensitivität der ökologischen Performance zu vergleichen. Neben einem Kubikmeter an Materialvolumen vergleichen sie die Herstellungsverfahren auch auf Basis ihrer Druckfestigkeit. So schneidet die durch AM hergestellte Wand beim Vergleich auf Basis der Druckfestigkeit in allen betrachteten Kategorien besser ab, was bei einem Vergleich auf Basis des Volumens nicht der Fall ist. Funktionsorientiertes Design unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften und Verarbeitungstechnologien ist ein Stellhebel für die ökologischere Produktion.

4.6.5 Abhängigkeit von der Komplexität des Bauteils

Da die Gewinnung und Herstellung der entsprechenden Materialien einen großen Einfluss auf die Umweltperformance nimmt und es sich bei den Materialien meist um nicht erneuerbare Rohstoffe handelt, sollte ein möglichst geringer Verbrauch an Material angestrebt werden. Bei subtraktiven Verfahren ist für die Herstellung komplexer Teile ein hoher Materialabtrag notwendig, weshalb sie eher ungeeignet für solche Bauteile sind. Additive Verfahren sind hingegen bekannt dafür Material einzusparen und zu geringeren Materialverlusten zu führen. Ihnen wird daher nachgesagt, dass sie vor allem für

komplexe Bauteile geeignet sind (Paris et al. 2016). In der Praxis wird daher empfohlen AM für sehr aufwändige Bauteile, mit hoher Komplexität zu nutzen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass AM sich besonders für die Fertigung hoch individualisierter und komplexer Bauteile sowie Bauteile, die in kleiner Losgröße hergestellt werden sollen, eignet. Die Umwelteinflüsse durch den hohen Energieverbrauch gilt es durch die Anwendung eines erneuerbaren Strommixes zu reduzieren. Anwendungsmuster sollten optimiert werden, genauso wie das Bauteil- und Prozessdesign.

4.6.6 Übertragbarkeit über Morphologie

Die beschriebenen Prozessketten 1-4 stellen für die österreichische Industrie repräsentierende AM-Anwendungsfälle dar, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit stellen können. Aufgrund der einerseits aufwändigen Ermittlung der ökologischen Auswirkungen der einzelnen Prozessketten sowie der schlechten Datenverfügbarkeit andererseits musste im Rahmen der Studie diese Priorisierung vorgenommen werden. Jedoch wurde bereits im Studiendesign darauf geachtet, dennoch eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den betrachteten Anwendungen auf qualitativer Ebene zu ermöglichen. Über die entwickelte Morphologie können weitere generische Prozessketten generiert werden. Folgend werden die entsprechenden ökologischen Effekte aus den analysierten Prozessketten den jeweiligen Kategorien zugeordnet sowie die Bedeutung für weitere mögliche Kombinationen beschrieben.

Rohstoffgewinnung

Die Rohstoffgewinnung erfolgt gleichermaßen für Produkte beziehungsweise Bauteile die konventionell sowie additiv gefertigt werden. Im Bereich der additiven Fertigung kann durch die entsprechende Designfreiheit über alle Technologien hinweg auf konstruktive Maßnahmen zur Materialeinsparung zurückgegriffen werden, was wiederum positive Auswirkungen auf die Rohstoffgewinnung durch den geringeren Materialbedarf gegenüber konventionell gefertigten Produkten aufweist.

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen stellt einen weiteren Punkt dar, wo jedoch auch technologie- und materialunabhängig ökologische Potenziale gehoben werden können, indem bewusst mehr Materialien aus Sekundärrohstoffen entwickelt und in weiterer Folge auch eingesetzt werden.

Eine indirekte Auswirkung auf die Rohstoffgewinnung stellt die Rate der Wiederverwendbarkeit nicht verbauter Materialien in den Bauprozessen dar. Dies betrifft jedoch primär pulverbasierte Verfahren (Metall und Kunststoff), bei denen ein gesamter Bauraum mit Pulver gefüllt werden muss, jedoch die Bauraumausnutzung maximal im niedrigen zweistelligen Prozentbereich liegt.

Produktion

Über den Lebenszyklus eines AM-gefertigten Produktes und der entsprechenden Anwendung kann über alle betrachteten Prozessketten die Aussage getroffen werden, dass in der Phase der AM-spezifischen Rohstoffaufbereitung sowie dem eigentlichen AM-Produktionsprozess inklusive eventueller Post-Processings aufgrund des hohen notwendigen Energieeinsatzes ein negativer ökologischer Effekt zu erwarten ist. Dieser variiert zwischen den unterschiedlichen Materialien beziehungsweise Technologien leicht. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Verarbeitung metallischer Werkstoffe in der Produktion (Prozesskette 1 und 4) einen nur unwesentlich höheren CO₂-Ausstoß beziehungsweise Ressourcenverbrauch aufweisen als die kunststoffverarbeitende Technologie FFF (Prozesskette 2). Bei der keramisch verarbeitenden Stereolithographie wird durch das energieaufwändige Postprocessing (Entbindern und Sintern bei hohen Temperaturzyklen über einen längeren Zeitraum) ein hohes ökologisches Potenzial ausgewiesen.

Der Einfluss des ökologischen Potenzials ist primär abhängig von der Technologie sowie dem eingesetzten Material. Für die Übertragbarkeit auf weitere Technologien bedeutet dies, dass wesentliches Potenzial gleichermaßen über alle AM-Technologien einerseits durch eine Optimierung der Produktionsprozesse (zum Beispiel hinsichtlich Leistungseinbringung, Produktionsdauer etc.) sowie andererseits durch den Einsatz erneuerbarer Energien gehoben werden kann.

Transporte

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Ökobilanzen haben gezeigt, dass in den meisten Fällen die ökologischen Potenziale durch Einsparungen im Bereich der Logistik nur sehr gering ausfallen. Dies liegt daran, dass generell die Anteile der Logistik hinsichtlich der gesamten ökologischen Auswirkungen einer AM-Anwendung sehr gering sind. Prozesskette 4 weist hier unter den betrachteten Prozessketten den größten Anteil durch logistische Aufwendungen auf. Jedoch steht dieser Effekt nicht mit einer spezifischen AM-

Technologie oder einem Material in Zusammenhang, sondern mit dem Nutzungsszenario der Reparatur und dem Aspekt, dass in diesem Fall die massenmäßig schwerere Technologie und nicht das leichtere Bauteil transportiert wird. Für eine Übertragbarkeit auf andere AM-Technologien gibt es lediglich die Voraussetzung, dass die jeweilige Technologie mobil einsetzbar ist. Der positive ökologische Effekt tritt in diesem Fall durch die lebensdauerverlängernde Maßnahme der Reparatur und der damit verbundenen Einsparung von Rohmaterialien für ein Neuprodukt ein. Durch den Einsatz der transportierten Anlage für mehrere Reparaturen kann in diesem Fall der Transportanteil pro Reparaturfall noch weiter reduziert werden.

Nutzungsphase

In Prozesskette 1 konnte gezeigt werden, dass das größte ökologische Potenzial von AM-gefertigten Bauteilen in der Nutzungsphase zu finden ist. Die ökologischen Einsparungen übersteigen in dieser Anwendung die wesentlichen negativen ökologischen Auswirkungen in den anderen Bereichen wie beispielsweise der Produktion oder der Rohstoffgewinnung um ein Vielfaches. Auch in dieser Phase des Produktlebenszyklus ist das Potenzial nicht unmittelbar abhängig von der eingesetzten AM-Technologie oder dem Material. Vielmehr hat die entsprechende Branche sowie das Nutzungsszenario einen wesentlichen Einfluss auf das ökologische Potenzial von AM. Die Effizienzsteigerungen in der Nutzungsphase durch AM gefertigte Bauteile lassen sich hierbei in zwei Kategorien einteilen.

Einerseits kann durch AM ermöglichtes Leichtbaupotenzial in allen Bereichen genutzt werden, wo Massen bewegt beziehungsweise beschleunigt werden und durch geringeres Gewicht der dafür benötigte Energieeinsatz reduziert werden kann. Dieses Potenzial bekommt daher in jenen Branchen eine hohe Relevanz, in denen Leichtbaumaßnahmen bereits unabhängig von der eingesetzten Fertigungstechnologie eine hohe Bedeutung zugemessen wird. In der Luft- und Raumfahrt wird daher die größte Wirkung erzielt. In weiteren fahrzeugbezogenen Branchen wie der Automobilbranche oder der Fahrradindustrie fallen die Effekte daher bereits wesentlich niedriger aus, dennoch können gravierende Einsparungen erzielt werden. Als weitere Branchen sind hierbei auch noch der Maschinen- und Anlagenbau oder der Werkzeugbau zu nennen, insbesondere bei Anlagen oder Werkzeugen mit schnell beweglichen Teilen.

Andererseits führt eine funktionsintegrierte AM-gerechte Bauteilgestaltung zu höheren Effizienzen bei verbrauchsorientierten Anlagen. Neben bereits bekannten Beispielen für verbrauchsoptimierte Düsengeometrien für Kraftstoffeinspritzungen sollten an dieser

Stelle auch noch geringere Materialeinsätze sowie Einsparungen durch Baugruppenkonsolidierungen genannt werden. Eine geringere Zahl an Schnittstellen in Bauteilen und Baugruppen führt zu geringeren Aufwänden hinsichtlich qualitätssichernder Maßnahmen sowie Instandhaltungsaktivitäten, was zu weiteren indirekten positiven ökologischen Auswirkungen führen kann.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass die größten ökologischen Potenziale nach der AM-Morphologie im Bereich der Nutzung sowie in Branchen ausgewiesen werden können. Insbesondere bei fliegenden sowie bei beschleunigten Bauteilen können die größten Wirkungen erwartet werden.

5 Handlungsfelder und Handlungsempfehlungen für eine ökologischerere Produktion durch AM

Um das ökologische Potenzial von AM Technologien für eine Transformation zu nützen, müssen die im Folgenden angeführten Handlungsempfehlungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der sogenannten R-Strategien, deren Ziel es ist den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen, verfolgt werden. So fallen Maßnahmen wie die Kaskadennutzung und die Nutzung von Synergien unter Repurpose (Einsatz in einer anderen Funktion) und in weiterer Folge auch unter Rethink (überdenken) und Reduce (reduzieren), da neue Produktionswege eröffnet und Ressourcen eingespart werden können. AM- Technologien sind nicht die Einzigen, um die verschiedenen Kreislaufwirtschaftsprinzipien umzusetzen, aber sie bieten sehr viele Möglichkeiten für eine Kreislaufwirtschaft, die gezielt genutzt werden sollten. Um das Potenzial von AM für eine ökologischerere Produktion und einen Kreislaufschluss zu realisieren ist es unerlässlich entsprechende institutionelle Rahmenbedingungen zu schaffen. Um Ressourcensynergien nutzen zu können, kann es beispielsweise notwendig sein, ein vorzeitiges Abfallende zu ermöglichen beziehungsweise eine Ressource als Nebenprodukt zu deklarieren, um eine Weiterverwendung zu ermöglichen auch über Betriebseinheiten hinweg.

Als Grundlage für die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen diene zunächst die Konsolidierung des vorhandenen Wissens in der Literatur. Verschiedene Akteurinnen und Akteure der AM-Branchen wurden darauf aufbauend im Rahmen dieser Studie für die Validierung der Ergebnisse der Literaturstudie sowie der ex-ante Ökobilanzierung der generischen Prozessketten und bei der Entwicklung der Handlungsempfehlungen einbezogen. Somit soll sichergestellt sein, dass eine Bandbreite an Perspektiven und Bedürfnissen abgeholt wurde. Die Definition sowie Gruppierung der Handlungsempfehlungen sind folgend in die drei wichtigsten Akteursgruppen dieser Studie unterteilt:

- Unternehmen
- F&E-Einrichtungen
- Politik und öffentliche Hand

Dementsprechend wurde im Rahmen des abschließenden Workshops den jeweiligen Leitfragen der Akteursgruppen folgend diskutiert, welche Handlungen für eine ökologischere Produktion mit AM verfolgt werden sollen. Im Rahmen der Diskussionen mit den teilnehmenden Expertinnen und Experten wurden zur besseren Strukturierung unterschiedliche Stellhebel für die Ökologisierung in verschiedenen Handlungsfeldern wie Technologie, Material, Anwendungen, Design, Geschäftsmodelle beziehungsweise Ausbildung diskutiert.

Insgesamt haben die Workshops gezeigt, dass Handlungsempfehlungen sehr weitreichend sein können und dabei auch meist über mehrere Handlungsfelder wirken und sich nicht unbedingt exklusiv auf AM beziehen. Dies kann durch die Bandbreite an AM Technologien und ihrer Spezifika selbst, der Verflechtung in den unterschiedlichsten Branchen, der Nutzung von AM über ein Spektrum an Produktionskonzepten usw. erklärt werden.

5.1 Unternehmen

Um das Potenzial von AM für eine ökologischere Produktion nutzen zu können, wird im Wirkungsbereich von Unternehmen als Anwender additiver Fertigung folgendes empfohlen:

- **Anwendung für ökologisches Design:** Einer der größten ökologischen Stellhebel durch AM für Unternehmen liegt in der „Gestaltung“ von Produkten und AM-Anwendungen. Dabei gibt es mehrere Einflussbereiche im Produktlebenszyklus, die nicht zuletzt unter Berücksichtigung der R-Strategien betrachtet werden sollten beziehungsweise können.
 - **Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten:** AM sollte noch stärker dazu genutzt werden, Bauteile entsprechend ihrer Anforderung und Funktion möglichst materialeffizient zu gestalten und zu fertigen. Dies gilt einerseits für Einzelbauteile, insbesondere jedoch auch im designtechnisch anspruchsvolleren Bereich der Baugruppenkonsolidierung. Einerseits sollen dabei die Vorteile hinsichtlich des geringeren Materialverbrauchs während der Produktion, andererseits aber insbesondere in der Nutzungsphase

eines Produktes berücksichtigt werden. Hinsichtlich Effizienzgewinnen durch Leichtbau sind die größten Effekte im Bereich Luftfahrt, gefolgt von Automotive zu erwarten, also in Bereichen, wo durch Massenreduktion massive ökologische Vorteile erzielt werden können. Bei Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch spezielle Geometrien sind hingegen durchaus auch stationäre Branchen (also Produkte, die in statischen Anlagen wie beispielsweise Kraftwerken oder stationären Motoren verbaut sind) im Einflussbereich positiver ökologischer Auswirkungen durch AM.

- **Verlängerte Lebensdauer von Produkten und Komponenten:** Die designtechnischen Möglichkeiten von AM sollten auch dazu genützt werden, Bauteile bewusster auf eine höhere Bauteillebensdauer auszulegen, beziehungsweise, dass diese reparaturfähig sind. Durch eine additive Ersatzteilmontage kann weiters ermöglicht werden, die Obsoleszenz von Ersatzteilen zu umgehen und damit gesamte Baugruppen und Anlagen weiter zu betreiben. Darüber hinaus können durch eine Optimierung der Ersatzteile weitere positive lebensdauererlösende und damit ökologische Effekte durch Ressourceneinsparung erzielt werden.
- **Wiederverwerten von Materialien:** AM-Bauteile bestehen meist aus nur einem Material. Dadurch soll die Entwicklung recyclingfähiger Produkte bereits in der Designphase berücksichtigt werden, insbesondere auch dahingehend, dass die Bauteile nach ihrer Lebensdauer einem entsprechenden Recycling-Prozess zugeführt werden können, um daraus erneut hochwertiges Sekundärmaterial für AM-Anwendungen zu produzieren.
- **Smarte, digitale, ökologische Anwendungen:** Entwicklung von neuen smarten Produkten und Anwendungen hinsichtlich Design for Additive Manufacturing (DfAM), Funktionsintegration neben ökonomischen und technischen Aspekten mit speziellem Fokus auf ökologische Mehrwertgenerierung. Wille und Mut zur Innovation (ökologisch, CO₂-Reduktion), Neues Denken (zukunftsgerichtet)
- **Einsatz von biobasierten Materialien und Sekundärmaterialien:** Der Einsatz solcher Materialien kann einen wesentlichen ökologischen Impact aufweisen. Jedoch sollte sowohl auf Anwender- als auch auf Verarbeiterseite der AM-Materialien stärkeres Bewusstsein dafür geschaffen werden. Dazu ist es einerseits notwendig, technische Einsatzmöglichkeit sowie konkrete Materialspezifikationen zu beschreiben. Darüber hinaus ist die Sicherstellung der Materialverfügbarkeit in entsprechend ausreichender Menge ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

- **Verwertung von Abfallmaterialien unternehmens- beziehungsweise AM-Branchenintern:** AM-Materialien sind meist sehr kosten- und energieintensiv in der Herstellung, wodurch eine Bewusstseinsbildung über Verwertung von Abfallmaterialien innerhalb der AM Branchen für closed-loop Recycling geschärft werden sollte.
- **Erhöhung der Ausbringungsmengen:** In den pulverbasierten AM-Verfahren kann aktuell nur ein geringer Teil des ursprünglich erzeugten Pulvers aufgrund der erforderlichen Prozessparameter für den AM-Prozess eingesetzt werden. Durch Vergrößerung der Prozessfenster oder des anwendungsabhängigen Materialeinsatzes könnte der Anteil des einsetzbaren Pulvers signifikant erhöht und damit positive ökologische Wirkungen erzielt werden. Darüber hinaus könnte durch diese Anpassungen auch ein höherer Anteil an bereits im Bauprozess verwendetem Pulver wieder eingesetzt werden, wodurch sich die pulverbasierte Materialbilanz weiters positiv auf die gesamte ökologische Performance der AM auswirken würde.
- **Verwertung von Abfallmaterialien über die AM Branche hinaus:** Pulverrestmengen, die aufgrund unzureichender Materialspezifikationen nicht für AM-Prozesse einsetzbar sind, eignen sich evtl. für andere Branchen beziehungsweise Technologien. Jedoch ist für eine effiziente Distribution der Restpulvermengen die Realisierung von open-loop Recycling durch Technologie- und Material-Netzwerke sowie Infrastrukturen notwendig.
- **Optimierung der Prozessparameter:** Die Grundlast von Produktionsanlagen stellen einen wesentlichen Anteil der gesamten Energiekosten im Rahmen der Bauteilproduktion dar. Somit soll durch Maßnahmen, die den gesamten Produktionsprozess verkürzen, effizientere Prozesseinstellungen sowie Prozessoptimierungen ein weiterer signifikanter Beitrag für Energieeinsparungen geleistet werden. Ein konkreter Ansatz dafür kann ein vermehrter Einsatz von Produktions- sowie Prozesssimulationen sein.
- **Erhöhung des Automatisierungsgrades in der Produktentwicklung und Konstruktion:** Die Produktentwicklung und Konstruktion von Bauteilen bedeutet für Unternehmen hohe Personalressourcen. Zur Ermöglichung von kostenaufwändigen Designänderungen (Software) sowie zur besseren Nutzung der AM-Vorteile wie beispielsweise Individualisierung, Ergonomisierung, Parametrisierung für individuell angepasste ökonomische Bauteile sollten daher Maßnahmen ergriffen werden, um eine einfache und automatisierte Bauteilgenerierung zu ermöglichen.

- **Berücksichtigung ökologischer Faktoren im Geschäftsmodell:** Sehr häufig besteht die Schwierigkeit für Hersteller, eine „Abgeltung“ für ein ökologisch höherwertiges Produkt zu generieren, insbesondere auch denn, wenn sich der Mehrwert erst in der Nutzungsphase oder durch eine längere Bauteillebensdauer etc. ergibt. Durch die Entwicklung von „nachhaltigen“ beziehungsweise „kreislauffähigen“ Geschäftsmodellen kann eine Berücksichtigung der „Wertsteigerung“ additiv gefertigter Produkte, sowie eine ökologische Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus, einfacher umgesetzt werden. Klassische Geschäftsmodellansätze berücksichtigen primär unternehmensinterne Kostenfaktoren. Durch neue Geschäftsmodellansätze (wie zum Beispiel Leasing, Pay per use etc.) ist es produzierenden Unternehmen einfacher möglich, nachhaltigere oder effizientere Produkte zu vermarkten. Jedoch bedeutet dies auch die Notwendigkeit neuer Organisations- und Finanzierungsstrukturen.
- **Erweiterung der Lehrlingsausbildungs- und Weiterbildungsprogramme:** Zur stärkeren Berücksichtigung ökologischer Aspekte ist es für Unternehmen zukünftig auch immer wichtiger, entsprechende Inhalte für Ihre Mitarbeiter bereits im Rahmen der Aus- und Weiterbildungsprogramme zu erhalten.
- **Stärkung des unternehmensübergreifenden Erfahrungsaustausches:** Die Bewusstseinsbildung ist ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Umsetzung ökologisch sinnvoller Maßnahmen im Kontext der additiven Fertigung. Dabei hilft insbesondere eine stärkere Forcierung von Konzepten zum unternehmensübergreifenden Informationstransfers mit Fokus auf ökologische Aspekte beispielsweise in Form von Innovationslabs (Open Innovation), oder der Aufbau und die Teilnahme an kooperativen Ausbildungsprogrammen. Solche Programme sollten dabei sowohl branchenspezifisch (unter Berücksichtigung wettbewerblicher Themenstellungen) wie auch branchenübergreifend aufgebaut werden.

5.2 Forschung und Entwicklung

Um das Potenzial von AM für eine ökologischere Produktion nutzen zu können, wird im Wirkungsbereich der F&E folgendes empfohlen:

- **Die ökologische Bewertung von Technologien unterliegt dem Mangel an Informationen** über Materialzusammensetzungen, Materialverbrauch, Energiebedarf, ökologische Auswirkungen, Anwendung der Technologie,

Lebenszyklus, Funktionen, usw.). Diese Informationen sind für etablierte Technologien selten und für neue Technologien in der Regel gar nicht verfügbar und müssen daher für jeden Einzelfall erhoben werden:

- Es braucht Lösungen zur Ermöglichung und Erleichterung der ökologischen Bewertung durch die Schaffung von entsprechenden Datengrundlagen, damit ökologische Aspekte bei der Gestaltung von Technologien berücksichtigt werden können.
- Es braucht weiters methodische Entwicklungen um ökologische Hotspots neuer Technologien vor allem ex-ante (vor der Kommerzialisierung) bewerten und gegebenenfalls vergleichen zu können um Entscheidungsprozesse hinsichtlich ökologischer Abwägungen unterstützen zu können.
- Der relative hohe Energiebedarf von AM Produktionsprozessen wird oft als Nachteil dieser Technologiegruppe ins Treffen geführt. Konsequente Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien ist jedenfalls zu fördern.

Die ökologische Bewertung geht über den AM Produktionsprozess hinaus:

- Es müssen die ökologischen Effekte von AM Bauteilen in den verschiedenen Produkten in deren Lebenszyklus mit einbezogen werden. So kann ein gegebenenfalls höherer Energiebedarf in der Produktion sich in einer anderen Lebenszyklusphase amortisieren.
- Die ganzheitliche Betrachtung der ökologischen Potenziale verschiedener AM Technologien über verschiedene Nutzungskonzepte und Anwendungen inklusive Geschäftsmodelle muss systematisch aufgearbeitet werden, um die AM Technologiegruppe konkret als transformative Technologie weiterentwickeln und positionieren zu können.
- Die verschiedenen AM Technologien werden in sehr vielen verschiedenen Branchen genutzt und weiterentwickelt, daher sollte die ökologische Bewertung auch über die Produktebene hinausgehen und **systemische Betrachtungen in der Produktionswirtschaft** berücksichtigen. Hierbei sind strukturelle Abhängigkeiten und mögliche Rebound-Effekte für die Technologiebewertung von Relevanz. Es besteht die Chance über AM Technologien branchenübergreifenden Wissens- und Technologietransfer zu schaffen mit dem Ziel industrielle Symbiosen für eine ökologischere Produktionswirtschaft zu schaffen. Beispiele in Analogie zu Bioraffinerietechnologien von der Integration der Energieversorgung, der Nutzung von Reststoffströmen, Integration von Recyclingtechnologien in AM Prozesse, Modifikation von Bauteilen mit AM für neue Einsatzzwecke in einem weiteren Lebenszyklus, sind auch für AM entwickelbar.

- Durch die Anwendung und **Entwicklung von AM Technologien in verschiedenen Branchen** mit jeweils speziellen Anforderungen kann es zu unterschiedlichen Weiterentwicklungen von AM Technologien kommen (z. B. effizientere Prozesse, Optimierung der Anwendungsmuster über kürzere Leerlaufzeiten, maximale Auslastung von Geräten, Topologieoptimierung um Produktion, Nutzung und Wiederverwertung ökologisch zu gestalten):
 - Diese Diversifizierung der Technologieentwicklung sollte genutzt werden, um Prozesse/Technologien/Bauteil-Designansätze beziehungsweise deren Vorteile zusammenzuführen und damit Produktionsmittel oder Ressourcen entlang des Lebenszyklus der AM Anwendung einzusparen.
 - Best-Practice Beispiele sollten systematisch erarbeitet und mit Datenerhebung für ökologische Bewertungen begleitet werden.
- Viele in der AM eingesetzten Materialien sind nicht oder nur eingeschränkt wiederverwertbar. Die **Verarbeitung von Reststoffen und Sekundärrohstoffen** birgt enormes ökologisches Potenzial für Produktionsprozesse und in den jeweiligen Lebenszyklen:
 - Dabei stehen das closed-loop Recycling (meist sortenreine Abfallfraktionen aus der eigenen Produktion) und das open-loop Recycling (branchenübergreifend und inklusive Post-Consumer Fraktionen) vor unterschiedlichen Herausforderungen.
- Die weitere AM Technologieentwicklung sollte daher die Chance nutzen über die Ermöglichung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen Umweltauswirkungen zu reduzieren und sich damit in der Kreislaufwirtschaft auch Sektorübergreifend zu positionieren. Dabei muss wiederum der benötigte Ressourceneinsatz für das Recycling inklusive Logistik minimiert werden, um insgesamt einen Beitrag zur Reduktion des Ressourcendurchsatzes der Gesellschaft zu leisten. Die **Materialentwicklung für AM Technologien** kann verschiedene Strategien verfolgen (spezialisiert für Anwendungen, für Funktionalitäten, für Recycling, biobasiert):
 - Die Entwicklung universell einsetzbarer Materialien verspricht durch Massenproduktion Effizienzsteigerungen sowohl in der Herstellung als auch bei der Wiederverwertung durch entsprechend großes Stoffaufkommen, wenn entsprechende Recyclingstrukturen oder Take-back Systeme und Einsatzmöglichkeiten für die Sekundärrohstoffe vorhanden sind.
 - Die Materialherstellung selbst, ist derzeit teilweise noch ineffizient. Bei einer Effizienzsteigerung ist jedoch immer ein möglicher Rebound-Effekt zu berücksichtigen. Eine Effizienzsteigerung soll im Sinne der Nachhaltigkeit

nicht dazu führen, dass mehr produziert wird oder die Preise sinken, wodurch die Nachfrage steigen würde, sondern zu Material- und Energieeinsparungen in der Produktion der benötigten Menge.

- Es gilt die Effizienz zu erhöhen, um Materialverluste zu minimieren und in weiterer Folge Energie einzusparen. Synergien in der Materialherstellung können zur Reduktion von Ausschuss führen, zum Beispiel wenn unterschiedlich große Partikel nach der Zerstäubung für unterschiedliche AM-Verfahren oder andere Technologien Verwendung finden.
- **Simulationstools für AM** dienen in der Praxis meist dazu Bauteile möglichst an die in der Produktion (Anwendung) bestehenden Bedingungen anzupassen.
 - Die Entwicklung eines digitalen Prozesswillings verspricht die Vereinfachung von Simulationen, das Verstehen von Vorgängen im Druckprozess, das Verbessern der Prozessparameter für bessere Ergebnisse, Einsparung von Fehldrucken usw. Die Anwendung von Simulationstools für die Optimierung von Bauraumauslastung, Stützkonstruktionen, Verzugsberechnungen, usw. kann zu Energie und Materialeinsparungen führen.
 - AM Technologien eignen sich besonders gut einen Beitrag zu leisten für die Umsetzung von Leichtbaukonzepten, Funktionsintegration, Reduktion von Prozessschritten in der Fertigung und zur Reparatur, allesamt Strategien zur Reduktion von Ressourcennutzung. Dieses Potenzial muss besser genutzt werden für eine ökologischere Produktion.
 - Neben der Optimierung von Parametern im Herstellungsprozess sollten Simulationstools daher auch für die Umsetzung von weiteren Ecodesignprinzipien (Wiederverwendbarkeit, Wiederverwertbarkeit, Servicierbarkeit, ...) verwendet werden, um deren ökologische Effekte über die AM Bauteilproduktion hinweg während des Lebenszyklus der Endprodukte zu antizipieren. Damit könnten die ökologischen Hotspots von Endprodukten gemeinsam mit den Endproduktherstellern verbessert werden.

5.3 Politik und öffentliche Hand

Um das Potenzial von AM für eine ökologischere Produktion nutzen zu können, wird im Wirkungsbereich der Politik und öffentlichen Hand folgendes empfohlen:

- AM Technologien umfassen sowohl Einzelfertigung als auch Serienfertigungen in verschiedenen Branchen und AM Bauteile finden sich in den verschiedensten Produkten wieder. **Um die unterschiedlichen Potenziale von AM Technologien für eine ökologischere Produktion zu realisieren, braucht es:**
 - Forschungsförderung und Ausbildungsangebote mit guten finanziellen Mitteln, um grundsätzliche und holistische d.h. ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte bei der Wirkungsanalyse für diese Technologiegruppe zu ermöglichen. Sogenanntes „Nachhaltigkeitswissen“ muss generiert werden.
 - Anreize zur Betrachtung von Lebenszyklen auf Ebene des Endproduktes: Wie kommt AM zur Anwendung, welchen ökologischen Nutzen bringt die Technologie ein, um zu identifizieren wo in der Wertschöpfungskette, speziell hinsichtlich zirkulärer Wertschöpfungsketten der Return on Investment stattfindet. Rahmenbedingungen, damit gesellschaftlicher Mehrwert, der durch AM geschaffen wurde, an die AM Branche geht (zum Beispiel Emissionseinsparungen durch AM-Bauteil gehen an AM-Produktion zurück, vertraglich geregelt). Etablierung von CO₂-Preis/Wert und Bewertung über die Wertschöpfungskette beziehungsweise den Lebenszyklus.
 - Wille und Druck für Transformation: Anreize für Unternehmen und ökologische Gesetzgebungen etablieren und Ausarbeitung von „Belohnungssystemen“ für ökologisches Handeln.
- Durch die Diversität innerhalb der AM Branche ist der **Austausch von Informationen und das Entwickeln gemeinsamer Strategien für eine ökologischere Produktion** essenziell:
 - Es braucht einen verstärkten Dialog mit der AM-Branche, um über Normenaktivitäten, Zertifizierungen, Förderschwerpunkte Unternehmen bei der Transformation zu unterstützen.
 - Es müssen Märkte geschaffen werden für ökologischere Produkte z. B über Umweltproduktdeklarationen, Produktkategorieregeln für AM, Normen, Richtlinien (Produktpass) für ökologische Produkte.
 - Information und Bildungsangebote zur ökologischen Produktion sollten über alle Ebenen ausgebaut werden für Lehrberufe, HTLs, auf Universitäten und in der Verwaltung.
- Die verschiedenen AM Technologien können ihre ökologischen Potenziale noch nicht ausschöpfen, weil es an Strukturen fehlt:

- **Beitrag zur Kreislaufwirtschaft ermöglichen:** Schaffung von mehr Infrastruktur für Recycling und Anreize für Verwendung von Sekundärmaterial.
- **Beitrag zur Bioökonomie:** Verfügbarkeit von biobasiertem und biologisch abbaubarem Granulat für AM forcieren.
- **Mit Normenarbeit AM positionieren:** Normen für Qualitätsanforderungen und -kriterien für verschiedenen AM Anwendungen und Branchen schaffen, um den Beitrag der AM zur Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Over-engineering vermeiden, um Ressourcen einzusparen.
- **Barrieren abbauen:** Etablierte Normen für Designs von Produkten stellen eine Barriere für neue Designlösungen durch AM dar (v.a. auch Over-engineering) , daher braucht es Aktualisierungen, sodass das Normenwesen Schritt halten kann mit den AM Entwicklungen und Schaffung von global gültigen Normen und Regelungen, um Wettbewerbsfähigkeit von AM zu stärken.
- **Anreize in anderen Branchen schaffen:** um traditionelle Designs (Produktlösungen) aufzubrechen, um so ökologisch getriebene AM Produktentwicklung zu fördern.

6 Ausblick und Forschungsbedarf

Gesellschaftliche Probleme wie der Klimawandel, der enorme Ressourcendurchsatz industrialisierter Ökonomien und die gleichzeitig begrenzt verfügbare Menge an Rohstoffen werden in diversen politischen Agenden adressiert. Es gilt die Forschung auf jene Technologien zu fokussieren, die die Möglichkeit der Transformation der Wirtschaft hin zu nachhaltiger Entwicklung, Klimawandelmitigation und Umweltschutz bieten. Additive Fertigung hat das Potenzial, Teil dieser Transformation zu sein. Es können durch AM Materialien und Abfälle eingespart, Transportwege verkürzt und Produkte im Sinne des Ökodesigns produziert werden. Jedoch ist auch diese Technologie, wie viele andere nicht per se nachhaltig, daher gilt es die Möglichkeiten dieser Technologie für eine ökologischere Produktion auszunützen. Um die ökologische Nachhaltigkeit zu verbessern, gilt es daher, Materialien und deren Wieder- und Weiterverwendung sowie etwaige Recyclingmöglichkeiten zu erforschen. Außerdem sind die Generierung und Erfassung von ökologischen Daten rund um AM-Technologien von enormer Bedeutung. Unternehmen müssen in der Lage sein, ihre Materialien und Prozesse ökologisch zu bewerten, dies ist jedoch unter der aktuellen geringen bis fehlenden Verfügbarkeit von entsprechenden Daten nur schwer bis gar nicht möglich. Um den hohen Energieverbrauch von AM zu reduzieren, muss außerdem an der Effizienz der Materialherstellung und Produktion geforscht werden.

Unter Durchführung der angeführten Handlungsempfehlungen ist davon auszugehen, dass AM einen großen Beitrag zur nachhaltigen Transformation leisten kann. Die Technologie kann in vielen Bereichen eingesetzt werden und konventionelle Technologien dort unterstützen und ergänzen, wo diese an ihre Grenzen stoßen. AM ist ideal einsetzbar für Bauteile mit hohem Individualisierungsgrad, welche im Normalfall in geringer Stückzahl oder gar in Losgröße eins produziert werden. Durch diese Eigenschaft wird AM in Zukunft eine führende Rolle im Ersatzteilmarkt einnehmen und kann so die Zielvorgaben des Kreislaufwirtschaftspakets fördern. Die Dezentralisierung der Technologie verkürzt außerdem die Transportwege und beschleunigt die Verfügbarkeit, was in der heutigen Wirtschaft von enormer Bedeutung ist. Darüber hinaus sollte AM in den Bereichen eingesetzt werden, in denen AM-gefertigte Bauteile indirekt (2. Ordnung), also durch die

Möglichkeit komplexer Bauteilgeometrien, zu Effizienzsteigerungen in fliegenden, bewegten oder beschleunigten Anwendungen führt. Durch gezielte Optimierung der Fertigungs- wie auch der Nachbearbeitungsprozesse können auch direkte (1. Ordnung) ökologische Wirkungen, im Sinne einer Effizienzsteigerung in der Produktion, erreicht werden. Die ökologischen Konsequenzen einer breiten Adoption von AM durch die Produktionswirtschaft beschreibt jedoch eine Forschungslücke. Dazu gehört auch der notorische Mangel an Daten über Energie und Materialaufwendungen industrieller Prozesse, sowie Daten über Konsumverhalten, um Funktionalitäten von Produkten dem erwarteten Nutzen anzugleichen oder Kreislaufwirtschaftskonzepte an tatsächlichen Nutzungsmustern anzupassen oder umgekehrt, Nutzungsmuster zur Forcierung von Kreislaufwirtschaft zu fördern. Auf Ebene der Unternehmen werden ökologische Informationen benötigt um Nachhaltigkeitsstrategien überhaupt entwickeln und monitoren zu können. Damit einher geht auch die gesellschaftliche Forderung an Wirtschaft und öffentliche Hand Verantwortung zu übernehmen und eine Gemeinwohlorientierung zu unterstützen. Aufstrebende Konzepte wie Safe and Sustainable by Design versuchen diesen Diskurs aufzugreifen und zu institutionalisieren. Dabei wird deutlich, dass die ökologische Bewertung multidisziplinär und transdisziplinär aufgestellt sein muss. Sie ist abhängig von Erkenntnissen aus vielen Disziplinen wie der Toxikologie, den Gesundheitswissenschaften, der Ökologie, der Biologie, den Risikowissenschaften, der Innovationsforschung, den Sozialwissenschaften und vielen weiteren.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der für die ex-ante Ökobilanzierung ausgewählte generische AM-Prozessketten	8
Tabelle 2: Hauptkategorien der additiven Fertigung (Quelle: DIN EN ISO 17296-2)	16
Tabelle 3: AM-Morphologie als Basis für die generischen Prozessketten und deren Ökobilanzierung. (Quelle: eigene Darstellung)	27
Tabelle 4: Angewendete Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren. (Quelle: eigene Darstellung)	29
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Expertinnen- und Expertenworkshops zur Identifikation von ökologischen Herausforderungen und die Auswirkung von AM auf diese. ↘ hemmende Wirkung, ↗ begünstigende Wirkung (Quelle: eigene Darstellung)	42
Tabelle 6: Übersicht der Studien der vergleichenden Literaturrecherche	45
Tabelle 7: Herausforderungen für eine ökologische Produktion mittels additiver Fertigung, (Quelle: eigene Darstellung)	50
Tabelle 8: Potenziale für eine ökologische Produktion mittels additiver Fertigung, (Quelle: eigene Darstellung)	51
Tabelle 9: Vergleich spezifischer Energiebedarf unterschiedlicher Fertigungstechnologien in der Produktionsphase (Quelle: eigene Darstellung)	52
Tabelle 10: Übersicht der für die ex-ante Ökobilanzierung ausgewählte generische AM-Prozessketten	57
Tabelle 11: Zusammenfassung der drei in der Ökobilanzierung betrachteten Szenarien. (Quelle: eigene Darstellung)	68
Tabelle 12: Auszug der relevantesten Hotspots mit positiven beziehungsweise negativen ökologischen Effekten. (Quelle: eigene Darstellung)	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen für die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (eigene Berechnung)	10
Abbildung 2: Klassifizierung nach Erscheinungsform des Halbzeugs, modifiziert nach Gebhard 2013.....	17
Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz nach ISO EN 14040:2006, (Darstellung nach ISO EN 14040:2006)	18
Abbildung 4: Darstellung des Ablaufs der Wirkungsabschätzung von der Sachbilanz bis zu den Endpoint-Kategorien, (Quelle: modifiziert mit Miro nach Fischer et al. 2014)	21
Abbildung 5: Potenziale für ökologische Vorteile durch den Einsatz von AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung).....	33
Abbildung 6: Zusammenhänge und Potenziale in Bezug auf den Energieverbrauch von AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung).....	34
Abbildung 7: Zusammenhänge und Potenziale in Bezug auf den Materialeinsatz bei AM-Technologien, (Quelle: eigene Darstellung).....	35
Abbildung 8: Gründe für die fehlende Vergleichbarkeit von Ökobilanzen im Bereich AM (Quelle: eigene Darstellung).....	36
Abbildung 9: Mindmap aller als relevant identifizierten Themen rund um die ökologische Bewertung von AM, (Quelle: eigene Darstellung)	38
Abbildung 10: Tendenzen ökologischer Vorteile (grün, dick umrandet) in verschiedenen Lebenszyklusphasen durch AM und konventioneller Fertigung (CM). (Quelle: eigene Darstellung)	55
Abbildung 11: Morphologischer Kasten und Ableitung exemplarischer Prozessketten	56
Abbildung 12: Prozessfließbild Prozesskette 1: Anwendung von PBF am Beispiel einer Gurtschnalle für Passagierflugzeuge. (Quelle: eigene Darstellung).....	58
Abbildung 13: Prozesskette 1: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell A320-200. (Der Bruch in der Skalierung der positiven und negativen x-Achse ist zu berücksichtigen). (Quelle: eigene Berechnung).....	62
Abbildung 14: Prozesskette 1 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell	

A320-200. (Der Bruch in der Skalierung der positiven und negativen x-Achse ist zu berücksichtigen). (Quelle: eigene Berechnung).....	63
Abbildung 15: Prozesskette 1 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen für das Flugzeugmodell A320- 200. (Quelle: eigene Berechnung).....	64
Abbildung 16: Prozessfließbild Prozesskette 2: Anwendung von FFF am Beispiel einer Montageschablone für die Erleichterung der Automobilfertigung. (Quelle: eigene Darstellung)	66
Abbildung 17: Prozesskette 2: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	70
Abbildung 18: Prozesskette 2: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	71
Abbildung 19: Prozesskette 2 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	72
Abbildung 20: Prozessfließbild Prozesskette 3: Anwendung von SLA am Beispiel eines keramischen Herzpumpenrads. (Quelle: eigene Darstellung)	74
Abbildung 21: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	76
Abbildung 22: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	77
Abbildung 23: Prozesskette 3: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Süßwassereutrophierungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	77
Abbildung 24: Prozesskette 3 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	78
Abbildung 25: Prozessfließbild der Prozesskette 4: Anwendung von DED am Beispiel der Reparatur einer Baggerschaufel. (Quelle: eigene Darstellung)	79
Abbildung 26: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial gesamt über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	82

Abbildung 27: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch Mineralien und Metalle über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung).....	82
Abbildung 28: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	83
Abbildung 29: Prozesskette 4 Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial über die einzelnen Lebenszyklusphasen. (Quelle: eigene Berechnung)	83
Abbildung 30: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung)	86
Abbildung 31: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung).....	87
Abbildung 32: Prozentuelle Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Nutzungsphase exkludiert) für die Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe; Rohstoffgewinnung (RG), Rohstoffaufbereitung (RA), Produktion (P), Transporte (T), End of Life (EoL). (Quelle: eigene Berechnung).....	88
Abbildung 33: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Treibhauspotenzial in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung).....	89
Abbildung 34: Darstellung der Umweltwirkungskategorie bodennahes Ozonbildungspotenzial in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung)	90
Abbildung 35: Darstellung der Umweltwirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossile Rohstoffe in den Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung (RG) und Produktion (P) pro Kilogramm gedruckter Struktur. (Quelle: eigene Berechnung)	90

Literaturverzeichnis

Abu-Ennab, L.; Dixit, M. K.; Birgisson, B.; Pradeep Kumar, P. (2022): Comparative life cycle assessment of large-scale 3D printing utilizing kaolinite-based calcium sulfoaluminate cement concrete and conventional construction. In: Cleaner Environmental Systems 5. DOI: 10.1016/j.cesys.2022.100078.

Ahn, D.-G. (2016): Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 3 (4), S. 381–395. DOI: 10.1007/s40684-016-0048-9.

Baumers, M.; Tuck, C.; Hague, R.; Ashcrof, I.; Wildman, R. (2018): A Comparative Study of Metallic Additive Manufacturing Power Consumption. In: 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010. 278-288.

Bekker, A.C.M.; Verlinden, J. C. (2018): Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. In: Journal of Cleaner Production 177, S. 438–447. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.148.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie - BMK (2022) - Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft - Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie, https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:9377ecf9-7de5-49cb-a5cf-7dc3d9849e90/Kreislaufwirtschaftsstrategie_2022_230215.pdf, zuletzt gesehen am 31.03.2023

Daraban, A.E.O.; Negrea, C. S.; Artimon, F.G.P.; Angelescu, D.; Popan, G.; Gheorghe, S. I.; Gheorghe, M. (2019): A deep look at metal additive manufacturing recycling and use tools for sustainability performance. In: Sustainability (Switzerland) 11 (19). DOI: 10.3390/su11195494.

DeBoer, B.; Nguyen, N.; Diba, F.; Hosseini, A. (2021): Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison. In: International

Journal of Advanced Manufacturing Technology 115 (1-2), S. 413–432. DOI: 10.1007/s00170-021-07173-5.

DIN EN ISO 17296-2:2016-12 Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO 17296-2:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17296-2:2016

Faludi, J.; Bayley, C.; Bhogal, S.; Iribarne, M. (2015): Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. In: Rapid Prototyping Journal 21 (1), S. 14–33. DOI: 10.1108/RPJ-07-2013-0067.

Fischer G.; Schulter D.; Maydl p. (2014): Ökoindikatoren-Bau. Neue Indikatoren zur Bewertung der Umweltwirkung von Bauprodukten und Bauweisen. Hg. v. Technische Universität Graz. Online verfügbar unter <https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/%C3%B6koindikatoren-bau-neue-indikatoren-zur-bewertung-der-umweltwirku>, zuletzt geprüft am 14.11.2022.

Gao, C.; Wolff, S.; Wang, S. (2021): Eco-friendly additive manufacturing of metals: Energy efficiency and life cycle analysis. In: Journal of Manufacturing Systems 60, S. 459–472. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.06.011.

Garcia, F. L.; Nunes, A. O.; Martins, M. G.; Belli, M. C.; Saavedra, Y.M.B.; 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. In: International Journal of Sustainable Engineering 14 (6), S. 1604–1622. DOI: 10.1080/19397038.2021.1990435.

Gebhardt, Andreas, 1953- (2013): Generative Fertigungsverfahren : Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping, Tooling, Produktion. 4., neu bearb. und erw. Aufl.: München : Hanser. Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/bok/AC11078597>.

Gerke-Cantow, R. und Hellwig, C. (2010): Innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss. In: Umweltbundesamt, Fachgebiet III 2.2, Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie.

Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A. (2006): Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In: 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st – June 2nd, 2006

Hofstätter, T.; Bey, N.; Mischkot, M.; Lunzer, A.; Pedersen, D. B.; Hansen, H. N. (Hg.) (2016): Comparison of conventional injection mould Inserts to Additively Manufactured inserts using life cycle assessment. Proceedings of the 16th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2016. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84984604673&partnerID=40&md5=359e2af8c72fbaf9b40a06588529c530>.

Ingarao, G.; Priarone, P. C. (2020): A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches. In: Journal of Manufacturing Processes 56, S. 1219–1229. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.009.

ISO 14040:2006 environmental management - life cycle assessment - principles and framework. 2nd ed. 2006. International Standards Organization

ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. International Standards Organization

Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R. P.; Suman, R.; Rab, S. (2021): Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. In: Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 4 (4), S. 312–322. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.07.005.

Jiang, Q.; Liu, Z.; Li, T.; Cong, W.; Zhang, H.-C. (2019): Energy-based life-cycle assessment (Em-LCA) for sustainability assessment: a case study of laser additive manufacturing versus CNC machining. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (9-12), S. 4109–4120. DOI: 10.1007/s00170-019-03486-8.

Kafara, M.; Süchting, M.; Kemnitzer, J.; Westermann, H.-H.; Steinhilper, R. (2017): Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Additive Manufacturing in Mold Core Making for CFRP Production. In: Procedia Manufacturing 8, S. 223–230. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.028.

Khalid, M.; Peng, Q. (2021): Sustainability and environmental impact of additive manufacturing: A literature review. In: *Computer-Aided Design and Applications* 18 (6), S. 1210–1232. DOI: 10.14733/cadaps.2021.1210-1232.

Klöppfer, Walter; Grahl, Birgit (2007): *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden Für Ausbildung und Beruf*. Hoboken: Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated.

Landi, D.; Zefinetti, F. C.; Spreafico, C.; Regazzoni, D. (2022): Comparative life cycle assessment of two different manufacturing technologies: Laser additive manufacturing and traditional technique. In: *Procedia CIRP* (105), S. 700–705. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127510974&doi=10.1016%2fj.procir.2022.02.117&partnerID=40&md5=14cc7b27ec0c0bb3f961c314059b82cc>.

Liu, S.; Lu, B.; Li, H.; Pan, Z.; Jiang, J.; Qian, S. (2022): A comparative study on environmental performance of 3D printing and conventional casting of concrete products with industrial wastes. In: *Chemosphere* 298. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134310.

Liu, Z.; Jiang, Q.; Cong, W.; Li, T.; Zhang, H.-C. (2018): Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes. In: *International Journal of Environmental Science and Technology* 15 (11), S. 2273–2282. DOI: 10.1007/s13762-017-1622-6.

Lunetto, V.; Priarone, P. C.; Kara, S.; Settineri, L. (2021): A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing: Additive manufacturing versus Machining case. In: *Procedia CIRP* (98), S. 406–411. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102617976&doi=10.1016%2fj.procir.2021.01.125&partnerID=40&md5=d141af5fb777ea5767cd84078b9c130b>.

Luo, Y.; Zhiming, J.; Leu, M.C.; Caudill, R. (1999). Environmental performance analysis of Solid Freeform Fabrication processes. In: *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*. 1 - 6. 10.1109/ISEE.1999.765837.

Lyons, R.; Newell, A.; Ghadimi, P.; Papakostas, N. (2021): Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of Ti-6Al-4V knee implant: a

life cycle approach. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112 (3-4), S. 787–801. DOI: 10.1007/s00170-020-06367-7.

Mrazovic, N.; Mocibob, D.; Lepech, M.; Fischer, M. (Hg.) (2017): ASSESSMENT OF ADDITIVE AND CONVENTIONAL MANUFACTURING: CASE STUDIES FROM THE AEC INDUSTRY. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* (4). Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85130782349&doi=10.14455%2fISEC.res.2017.201&partnerID=40&md5=74da97dcb7c6a30b99269a29c682e136>.

Paris, H.; Mokhtarian, H.; Coatanéa, E.; Museau, M.; Ituarte, I. F. (2016): Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (1), S. 29–32. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.036.

Peng, T.; Kellens, K.; Tang, R.; Chen, C.; Chen, G. (2018): Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. In: *Additive Manufacturing* 21, S. 694–704. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.022.

Prakash, C.; Singh, S.; Kopperi, H.; Ramakrihna, S.; Mohan, S. V. (2021): Comparative job production based life cycle assessment of conventional and additive manufacturing assisted investment casting of aluminium: A case study. In: *Journal of Cleaner Production* 289. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125164.

Raoufi, K.; Haapala, K. R.; Etheridge, T.; Manoharan, S.; Paul, B. K. (2022): Cost and environmental impact assessment of stainless steel microscale chemical reactor components using conventional and additive manufacturing processes. In: *Journal of Manufacturing Systems* 62, S. 202–217. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.11.017.

Rejeski, D.; Zhao, F.; Huang, Y. (2018): Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 19, S. 21–28. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.019.

Ribeiro, I.; Matos, F.; Jacinto, C.; Salman, H.; Cardeal, G.; Carvalho, H. et al. (2020): Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. In: *Sustainability (Switzerland)* 12 (3). DOI: 10.3390/su12030929.

Saade, M.R.M.; Yahia, A.; Amor, B. (2020): How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies. In: *Journal of Cleaner Production* 244. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118803.

Sanchez-Rexach, E.; Johnston, T. G.; Jehanno, C.; Sardon, H.; Nelson, A. (2020): Sustainable Materials and Chemical Processes for Additive Manufacturing. In: *Chemistry of Materials* 32 (17), S. 7105–7119. DOI: 10.1021/acs.chemmater.0c02008.

Serres, N.; Tidu, D.; Sankare, S.; Hlawka, F. (2011): Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (9-10), S. 1117–1124. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.010.

Steinwender, Arko (2021): Entwicklung eines Vorgehensmodells zur multikriteriellen bewertungs-basierten Potenzialanalyse additiver Fertigung. TU Wien.

Swetha, R.; Siva Rama Krishna, L.; Hari Sai Kiran, B.; Ravinder Reddy, P.; Venkatesh, S. (2022): Comparative study on life cycle assessment of components produced by additive and conventional manufacturing process. In: *Materials Today: Proceedings* 62, S. 4332–4340. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.840.

Taddese, G.; Durieux, S.; Duc, E. (2020): Sustainability performance indicators for additive manufacturing: a literature review based on product life cycle studies. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (7-8), S. 3109–3134. DOI: 10.1007/s00170-020-05249-2.

Thiriez, A. (2006): An Environmental Analysis of Injection Molding. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2006.

Výtisk, J.; Honus, S.; Kočí, V.; Pagáč, M.; Hajnyš, J.; Vujanovic, M.; Vrtek, M. (2022): Comparative study by life cycle assessment of an air ejector and orifice plate for experimental measuring stand manufactured by conventional manufacturing and additive manufacturing. In: *Sustainable Materials and Technologies* 32. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00431.

Yi, L.; Glatt, M.; Sridhar, P.; Payrebrune, K. de; Linke, B. S.; Ravani, B.; Aurich, J. C. (2020): An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment. In: Additive Manufacturing 33. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101120.

Yoon, H.S.; Lee, J.Y.; Kim, H.S.; Kim, M.S.; Kim, E.S.; Shin, Y.J.; Chu, W.S.; Ahn, S.H. (2014): A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: review and case study. In: Int J Precis Eng Manuf Green Technol 1(3):261–279

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AM	Additive Manufacturing (Additive Fertigung)
BJ	Binder Jetting
BPE	Bound Powder Extrusion
CAD	Computer Aided Design
CLAD	Continuous Laser Assisted Deposition
CM	Conventional Manufacturing (Konventionelle Fertigung)
CNC	Computer Numerical Control
DALM	Direct Additive Laser Manufacturing
DED	Direct Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling
LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition
LDD	Laser Direct Deposition
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated object manufacturing
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
MJM	Multijet Modeling
PBIH	Powder Bed and Inkjet Head

Abkürzung	Beschreibung
PP	Plaster-based 3D printing
PET	Polyethylenterephthalat
SLA	Stereolithographie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
UC	Ultrasonic consolidation
VOC	Volatile Organic Compounds
WAAM	Wire Arc AM

Anhang

Kurze Beschreibung der Umweltwirkungskategorien der ex-ante Ökobilanz

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Treibhauspotenzial gesamt	GWP 100	kg CO ₂ -Äquivalente	Menge an freigesetzten Treibhausgasen. Klimagase werden nach ihrem Einfluss auf das Klima gewichtet und in ein Verhältnis zu CO ₂ gesetzt. Nähere Informationen finden Sie hier . Diese potentielle Klimaänderung wird über 100 Jahre berechnet, wie unter diesem Dokument ersichtlich.
Ozonabbau-potenzial	ODP	kg CFC-11-Äquivalente	Zerstörerische Auswirkungen auf die stratosphärische Ozonschicht (weitere Informationen finden Sie hier)
Süßwasser Ökotoxizität	FTP	CTU (comparative toxic units)	Abschätzung der potentiell betroffenen Fraktionen von Spezies, die von einer emittierten Chemikalie über eine bestimmte Zeit beeinflusst werden (weiterführende Informationen finden Sie hier).
Human-toxizität kanzerogene Effekte		CTU (comparative toxic units)	Erwarteter Anstieg der Sterblichkeit der Gesamtbevölkerung pro Masseinheit des emittierten Stoffes (Fälle pro kg Emission). Weiterführende Informationen finden Sie hier .
Schwebstaubbildung	PM or PMFP	kg PM _{2.5} Äquivalente	Menge an Partikeln von denen 50% einen Durchmesser kleiner als 2,5 µm haben. Diese Partikel gelangen in die Atemwege und sind daher schädlich. Weiterführende Informationen finden Sie hier .
Ionisierende Strahlung	IR	kg U235 Äquivalente	Ionisierende Strahlung kann Zellen und Organe schädigen. Die Strahlung wirkt entweder durch radioaktive Staubteilchen aus der Luft oder durch in den Körper

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit	Beschreibung
			aufgenommene radioaktive Stoffe. Nähere Informationen finden Sie hier .
Bodennahes Ozonbildungspotenzial	POFP	kg NMVOC-Äquivalente	Beitrag zur photochemischen Bildung von Ozon in der unteren Atmosphäre. Weiterführende Informationen finden Sie hier .
Bodenversauerungspotenzial	AP	mol H+ Äq	Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak reagieren in der Atmosphäre zu Säuren und gelangen als saurer Regen wieder auf die Oberfläche. Weiterführende Informationen finden Sie hier .
Bodeneutrophierungspotenzial	TEP	mol N Äq	Überdüngung von Böden durch Eintrag von N oder P reichen Substanzen wie zB Dünger oder Abwasser. Nähere Informationen finden Sie hier . Drückt aus zu welchem Grad die Nährstoffe in den Boden gelangen, wie in diesem Dokument beschrieben.
Eutrophierungspotenzial (Süßwasser und Meerwasser)	FEP and MEP	FEP: kg P Äq MEP: kg N Äq	Überdüngung von Gewässern mit der Folge von Algenblüten durch N oder P reichen Substanzen. Nähere Informationen finden Sie hier . Drückt aus zu welchem Grad die emittierten Nährstoffe in das Gewässer gelangen, wie in diesem Dokument ersichtlich.
Wasserverbrauch	WDP	m3 water use related to local scarcity of water	Abschätzung der natürlich verfügbaren Wassermenge für verschiedene Einzugsgebiete, nachdem der Bedarf für Menschen und aquatische Ökosysteme gedeckt ist, wie in diesem Dokument beschrieben.
Ressourcenverbrauch fossile, mineralische Rohstoffe	FDP	kg Sb Äq	Abschätzung abiotische Ressourcenaufzehrung von fossilen Energieträgern und von Mineralen und Metallen. Das Modell für die Entnahme basiert auf einem use-to-availability Verhältnis, wie in diesem Dokument ersichtlich.
Flächenverbrauch	LULUC	m2	Potentielle Umweltwirkungen die entstehen durch Landnutzung, und der Veränderung von Landnutzungsformen. Nähere Informationen finden Sie hier .

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 1 711 62 65-0

email@bmk.gv.at

bmk.gv.at