



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Ermittlung der ökologischen Umweltwirkungen eines 3D-Druckers und damit zusammenhängender Produktionsprozesse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. rer. soc. oec. Selim Erol

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Mario Steiner

01226315 (066 482)

Leonhard-Posch-Weg 4

6271 Uderns

Wien, im Juni 2018

Mario Steiner



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2018

Mario Steiner

Danksagung

Eingangs möchte ich mich bei all den Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit tatkräftig unterstützt und stets motiviert haben.

Ganz besonders bedanke ich mich beim Institut für Managementwissenschaften für die Bereitstellung dieses interessanten Themas für meine Diplomarbeit. Insbesondere gilt hier mein Dank Herrn Dr. Selim Erol, der durch seine hervorragende Betreuung und seinen persönlichen Einsatz einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieses Werkes geleistet hat. Auch möchte ich mich bei Herrn Dr. Rainer Pamminger für die hilfreichen Inputs bedanken.

Ein weiterer Dank gilt all den Freunden und Wegbegleitern, welche mich während des Studiums unterstützt und mir ein erstklassiges und stabiles Umfeld neben dem Studienalltag geboten haben.

Abschließend gilt der größte Dank meiner gesamten Familie und ganz besonders meinen Eltern. Sie sind es, die mir über all die Jahre jede nur erdenkliche Freiheit gegeben und mich in jeder Lebenslage unterstützt haben. Der familiäre Rückhalt war der Grundstein für eine sorgenfreie, erfolgreiche und unvergessliche Studienzeit.

Kurzfassung

Konsumenten achten, auch aufgrund der seit Jahren anhaltenden prekären Umweltsituation unseres Planeten, mit immer mehr Bewusstsein auf die Umweltverträglichkeit der Produkte. Folglich stellen sich Unternehmen diesen Herausforderungen und bewerten ihre Produkte bzgl. der Auswirkungen auf die Umwelt, wofür es zahlreiche unterschiedliche Ansätze und Methoden gibt. Mit dem schlichten Bewerten der Produkte ist der Prozess im besten Fall aber nicht abgeschlossen. Die Bestrebungen sollen dahin gehen, dass die Produkte aufbauend auf den Bewertungen bzgl. ihrer ökologischen Nachhaltigkeit stets verbessert bzw. umweltfreundlicher gestaltet werden. Auch die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 hat sich entschieden diesen Weg zu gehen und den gefertigten 3D-Drucker über den gesamten Lebenszyklus hinweg im Hinblick auf die ökologischen Umweltwirkungen zu bewerten und darauf basierend mögliche Produktverbesserungen abzuleiten. In der vorliegenden Arbeit wird diese Umweltbewertung für den 3D-Drucker mit einer zuvor ausgewählten Methode durchgeführt. Mit Hilfe der zugrundeliegenden Bewertung und unter Zuhilfenahme der Schlussfolgerungen werden dann Empfehlungen für Produkt- und Prozessverbesserungen bzgl. der ökologischen Nachhaltigkeit des Druckers ausgesprochen.

Um eine geeignete Umweltbewertungsmethode auszuwählen und um der speziellen Aufgabe gerecht zu werden, wurden in einem ersten Schritt mittels Literaturrecherche für diese Anwendung potentielle Methoden identifiziert. Die Festlegung auf eine zweckmäßige Bewertungsmethode für den 3D-Drucker erfolgte dann auf Grundlage von zuvor bestimmten Kriterien. Anschließend wurden mittels systematischer Literaturrecherche bereits vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern/3D-Druck erforscht und diskutiert. Somit wurde ein Überblick über durchgeführte Untersuchungen und Analysen in diesem Forschungsgebiet und eine Orientierung für die zu erstellende ökologische Lebenszyklusbewertung des Druckers geschaffen. Im nächsten Schritt wurden dann im Rahmen der zuvor festgelegten Methode alle notwendigen und hilfreichen Arbeitsschritte ausgeführt, um eine gründliche und aussagekräftige ökologische Umweltbewertung des 3D-Druckers zu erstellen.

Das Ergebnis der systematischen Literaturrecherche hat gezeigt, dass diese Arbeit eine der ersten detaillierten Bewertungen eines 3D-Druckers im Hinblick auf dessen ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt darstellt. Als Ergebnis der durchgeführten Lebenszyklusbewertung des Druckers wurden die wesentlichen Treiber der ökologischen Belastungen für die Umwelt aufgezeigt und Empfehlungen für diesbezügliche Produktverbesserungen ausgesprochen.

Abstract

Consumers pay more and more attention to the environmental sustainability of the products, also due to the precarious environmental situation that has existed on our planet for many years. On the other hand, companies face these challenges and assess their products in terms of environmental impacts, for which there are many different approaches and methods. In doing so the aim always should be to improve the products or make them more environmental friendly – based on the evaluations regarding their ecological sustainability. The TU Wien Pilot Factory Industry 4.0 has decided to follow this path and to evaluate the manufactured 3D printer over the entire life cycle with regards to the environmental impacts and to derive possible product improvements based thereon. In the present work, this environmental assessment for the 3D printer is performed using a previously selected method. Based on the underlying assessment and conclusions, recommendations for product and process improvements regarding the printer's environmental sustainability are provided.

In order to select a suitable environmental assessment method and to do justice to the task, potential methods were identified in a first step by means of literature research. The determination of a suitable evaluation method for the 3D printer was then based on previously determined criteria. Subsequently, existing studies on environmental assessments of 3D printers/ 3D printing were explored and discussed using systematic literature research. Thus, an overview of conducted investigations and analyzes in this research field and an orientation for the created ecological life cycle assessment of the printer were made. Afterwards, all the necessary and helpful steps were taken under the previously defined method to produce a thorough and meaningful environmental assessment of the 3D printer.

The result of the systematic literature research has shown that this work is one of the first detailed assessments of the environmental impact of the product 3D printer. As a result of the printer's life cycle assessment, the key drivers for the impact on the environment were identified and recommendations for product improvements were made.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	4
1.2	Forschungsfrage und Ziel der Arbeit	7
1.3	Vorgehensweise.....	8
2	Allgemeine Ansätze und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen ...	12
2.1	Literaturrecherche zu allgemeinen Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen	12
2.2	Ergebnisse der Literaturrecherche	12
2.2.1	Allgemeines	13
2.2.2	Begriffsdefinitionen	17
2.2.3	Methoden der Risikoabschätzung	19
2.2.4	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).....	23
2.2.5	Umweltmanagementsysteme (UMS).....	25
2.2.6	Technikfolgenabschätzung (TA).....	29
2.2.7	Ökobilanz (LCA)	31
2.2.8	Umweltfußabdruck (PEF)	39
2.2.9	Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS).....	40
2.2.10	MET (Materials-Energy-Toxicity)-Matrix und ABC-Methode	44
2.2.11	Zusammenfassende Darstellung und Auswahl einer geeigneten Methode für die Bewertung des 3D-Druckers	46
3	Vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern.....	49
3.1	Literaturrecherche zu vorhandenen Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern	49
3.2	Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	52
3.2.1	Allgemeines über Verfahren und Materialien des 3D-Drucks.....	52
3.2.2	Vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern bzw. 3D-Druck.....	57
4	Life Cycle Assessment für den 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik	71
4.1	Pilotfabrik und 3D-Drucker	71
4.2	Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen	74

4.2.1	Ziel der Studie	74
4.2.2	Funktionelle Einheit und Verwendungsszenario.....	74
4.2.3	Zu untersuchendes Produktsystem und die Systemgrenzen	75
4.2.4	Methode für die Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien	78
4.2.5	Methoden zur Auswertung.....	80
4.2.6	Daten und Datenqualität.....	80
4.2.7	Annahmen und Einschränkungen	81
4.3	Erstellung der Sachbilanz	81
4.3.1	Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Materialien und	
	Transport	81
4.3.2	Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Fertigung und Montage ..	86
4.3.3	Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Nutzung des Druckers	89
4.3.4	Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. End of Life des Druckers	90
4.3.5	Eingabe der Daten in openLCA.....	90
4.3.6	Datenvalidierung.....	94
4.4	Wirkungsabschätzung	95
4.5	Auswertung	98
4.5.1	Die Ergebnisse im Detail	99
4.5.2	Beurteilung der Vollständigkeit, Konsistenz und Datenqualität	101
4.5.3	Einschränkungen	101
4.5.4	Schlussfolgerungen	103
4.5.5	Empfehlungen	104
5	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz.....	106
5.1	Wesentliche Treiber der ökologischen Belastungen für die Umwelt	106
5.2	Einflussmöglichkeiten am Produkt	106
6	Diskussion und Ausblick	108
7	Literaturverzeichnis.....	110
8	Abbildungsverzeichnis.....	117
9	Tabellenverzeichnis.....	119
10	Formelverzeichnis	120
11	Abkürzungsverzeichnis	121
12	Anhang.....	123

12.1	Technisches Datenblatt: emco MAXXTURN 45.....	123
12.2	Technisches Datenblatt: emco MAXXMILL 500.....	124
12.3	Technisches Datenblatt: Universal UR5	125
12.4	Technisches Datenblatt: FTS NEOBOTIX MP-400.....	126
12.5	Eingabedaten und Bewertung der Elektrik/ Elektronik-Bauteile	
	in „LCA to go“	127
12.5.1	Eingabedaten	127
12.5.2	Bewertung	127

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Nach den ersten drei industriellen Revolutionen – Mechanisierung, Massenfertigung und Automatisierung der Produktion mittels Einsatz von Elektronik und IT – befinden wir uns inmitten der vierten industriellen Revolution, welche mit dem Begriff der Industrie 4.0 einhergeht.¹ Durch gezielten Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik kommunizieren Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte direkt miteinander, wodurch die komplette Wertschöpfungskette optimiert werden soll.² In Betracht gezogen werden dabei auch alle Stufen des Produktlebenszyklus, von der Entstehung der Produktidee bis hin zur End of Life-Phase. Die wichtigsten Grundpfeiler der Industrie 4.0 lassen sich mit den Begriffen der Vernetzung, Informationstransparenz, technischen Assistenz und dezentralen Entscheidungen zusammenfassen.

Einer weiteren Quelle ist zu entnehmen, dass an die Produktion der Zukunft, also somit auch an die Industrie 4.0, hohe Anforderungen gestellt werden: Sie muss intelligent, wandelbar, effizient und nachhaltig sein.³ An den genannten Eigenschaften lässt sich erkennen, dass die Industrie 4.0 mit den Begriffen der Transparenz und Nachhaltigkeit in Zusammenhang steht.

Daten und Transparenz

Technologien wie Mikrochips, RFID (Radio Frequency Identification), CPS (Cyber-Physical Systems) und das Internet der Dinge ermöglichen unter anderem Potentiale hinsichtlich der Steigerung der Beobachtbarkeit von Fertigungsprozessen und Produkten. Die Erfassung der Daten aus der physikalischen Welt führt zu einem impliziten Wissen über Maschinen und Fertigungsprozesse, das zur Darstellung der Wirkungszusammenhänge in der Produktion genutzt werden kann. Verknüpft mit der Produktion vor- und nachgelagerten Prozessen, lässt sich ein Gesamtbild darstellen, das neue Handlungsoptionen für Produktionsentscheidungen bietet. Produktionsnetzwerke ermöglichen den Austausch von Technologiedaten über den gesamten Wertschöpfungsprozess eines Produkts, bis dieses verbaut oder in Gebrauch ist. Die dadurch mögliche vollständige Rückverfolgbarkeit aller Prozessparameter wie z.B. Prozess- und Energie-Daten (einschließlich der Informationen darüber, wo und wie das Produkt hergestellt wurde) hat erhebliche Vorteile für ein Unternehmen, das im Verbund produziert.⁴ Bei der Nutzung des Produkts selbst als Informationsträger

¹ vgl. <http://plattformindustrie40.at> (30.05.2017)

² vgl. <https://www.tixxt.com> (11.12.2017)

³ vgl. <https://www.fraunhofer.it> (11.12.2017)

⁴ (vgl. Scheer, 2013, S. 25).

kommen heute häufig Auto-ID Technologien wie bspw. RFID zum Einsatz. Solch ein digitales Produktgedächtnis (DPG) ermöglicht den gewünschten Informationsaustausch über den gesamten Lebenszyklus des Produkts. Ein transparentes und enges Monitoring von Ereignissen, die während der Produktion und des gesamten Lebenszyklus eines Produkts auftreten, steht dabei im Fokus.

Zukünftig ist vorstellbar, dass diese Informationen über den Herstellungsprozess die Grundlage von internetbasierten Mehrwertdiensten, sowohl für Unternehmen als auch für Endkunden, sein werden. Ein Beispiel für einen solchen Mehrwertdienst stellt die Nutzung von DPG-Informationen zur zuverlässigen und für den Kunden transparenten Darstellung der Produkthistorie und des daraus resultierenden CO₂-Footprints zur Motivation einer ökologisch begründeten Kaufentscheidung dar.⁵

Die, mit der Industrie 4.0 einhergehende, erhöhte Verfügbarkeit und Transparenz der Daten über den gesamten Lebenszyklus der Produkte hinweg, ermöglicht darüber hinaus zunehmend präzisere Bewertungen bzw. Analysen von Produkten und Herstellungsprozessen hinsichtlich deren Energieverbräuche und Auswirkungen auf die Umwelt.

Nachhaltigkeit

Steigender Wohlstand und die Durchsetzung der Massenproduktion nach dem 2. Weltkrieg, führten zu Massenkonsum. Die an die Massenproduktion geknüpfte Zentralisierung der Herstellung und die damit verbundene Homogenisierung der Produkte beruhen im Wesentlichen auf der optimalen Nutzung von Skaleneffekten. Dadurch wurden die Produkte einerseits massenmarktfähig und breiten Bevölkerungsschichten zugänglich, andererseits schraubten sich die ökologischen Nebeneffekte dieses Umgangs mit Ressourcen jedoch auf jenes nicht nachhaltige Niveau, das aktuell die planetaren Belastungsgrenzen zu sprengen droht.⁶ Um dem entgegenzuwirken, haben sich die Produktionsverfahren im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte von der traditionellen Produktion, mit Fokus auf Kosten, Qualität, Distribution und Flexibilität, hin zur nachhaltigen Produktion, welche darauf abzielt ein Gleichgewicht zwischen Umwelt, sozialen und wirtschaftlichen Aspekten zu erreichen, entwickelt.⁷

Seit geraumer Zeit sorgen sich fast alle entwickelten Länder um die Gesundheit der Umwelt. Als Konsequenz aus den hohen Umweltbelastungen, adaptieren Unternehmen zunehmend Maßnahmen, um diesen Entwicklungen entgegenzusteuern. Umweltfreundliche Produktionsprozesse und Produkte haben für Organisationen oft die gleiche Priorität wie die Qualität der Waren und der dazugehörigen Dienstleistungen und sind wichtige Bausteine für den Unternehmenserfolg. Des Weiteren werden Un-

⁵ (vgl. Scheer, 2013, S. 15f).

⁶ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 10).

⁷ (vgl. Dubey et al., 2016, S. 634).

ternehmen, deren Aktivitäten zu erhöhten Umweltbelastungen führen, ob beabsichtigt oder nicht, öffentlich sehr kritisch gesehen. Zusätzlich wird das Umweltschutzgesetz in den meisten Ländern immer strenger. Missachtungen führen dabei meist, im glimpflichsten Fall für das Unternehmen, zu Geldstrafen und im schlechtesten Fall zur Einstellung des Betriebs bis die Ursachen der Umweltverschmutzung behoben sind.⁸

Auch Konsumenten achten mit mehr Bewusstsein auf die Umweltfreundlichkeit der Güter. Immer mehr Unternehmen stellen sich diesen Herausforderungen und bewerten ihre Produkte über den gesamten Lebenszyklus hinweg bzgl. der Auswirkungen auf die Umwelt. Es gibt unterschiedliche Ansätze und Methoden, um solche Umweltbewertungen durchzuführen. Damit man den Lebenszyklus eines Produkts, angefangen von der Rohstoffgewinnung bis hin zur End of Life-Phase, bewerten kann, ist es notwendig über detaillierte Informationen und Daten der einzelnen Lebensabschnitte zu verfügen. Folglich werden u. a. auch unternehmensinterne Produktionsprozesse ausführlich in Bezug auf Energieverbrauch, Material- und Informationsflüsse analysiert, wodurch häufig Effizienzsteigerungspotentiale aufgedeckt werden. Die Ziele solcher Vorhaben sind, neben dem Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten und der Bereitstellung von Informationen für Entscheidungsträger, auch Hilfestellungen beim Implementieren einer Umweltkennzeichnung oder beim Erstellen einer Umweltdeklaration zu bieten, woraus Unternehmen marketingtechnische Vorteile ziehen können.

3D-Druck

Im Zusammenhang mit den Begriffen der Industrie 4.0 und der digitalen Transformation der Wertschöpfung wird 3D-Druck oft als einer der technologischen Treiber bzw. Enabler genannt. „3D-Drucken“ bildet den derzeit gebräuchlichsten Überbegriff für jene Gruppe von Technologien, die zur generativen Fertigung physischer Objekte genutzt werden. Dabei entstehen Gegenstände ohne Einsatz zusätzlicher Werkzeugmaschinen auf Basis digitaler dreidimensionaler Modelle durch einen schichtweisen Aufbau. Die zentralen Funktionsansätze dieser Verfahren sind demnach einerseits die unmittelbare Transformation computerbasierter Daten in physische Gegenstände und andererseits der additive, plastische Aufbau dieser Objekte.⁹

In der Pilotfabrik der TU Wien wird ein Kunststoff 3D-Drucker produziert, für den mechanische Komponenten gefertigt, aber auch Teile und Komponenten zugekauft werden. Für diesen 3D-Drucker wird im Zuge dieser Arbeit eine Umweltbewertung durchgeführt. Eine gründliche Recherche hat ergeben, dass es derzeit einige Studien gibt, die Produkte, welche sowohl mittels 3D-Druck als auch mittels konventioneller Verfahren hergestellt wurden, vergleichen (z. B. Petschow et al., 2014). Wird jedoch

⁸ (vgl. Morris, 2004, S. 1).

⁹ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 21).

ein 3D-Drucker per se als zu bewertendes Produkt gewählt, so konnten keine bereits existierenden Studien eruiert werden, die sich also explizit auf das Produkt 3D-Drucker beschränken.

Wie bereits erwähnt, gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansätze und Methoden, welche sich auf mögliche Umweltwirkungen, die u. a. mit der Produktion und der Verwendung von Produkten zusammenhängen, beziehen. Diese werden im Zuge der Arbeit verglichen und bereits vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern/ 3D-Druck werden diskutiert. Die zentrale Aufgabe besteht aber darin, den genannten 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik über seinen gesamten Lebenszyklus im Hinblick auf Umweltwirkungen zu bewerten.

1.2 Forschungsfrage und Ziel der Arbeit

Im Zuge einer Analyse und Zusammenfassung von ausgewählter Literatur zum Thema Ansätze und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen von Produkten, werden allgemeine Vorgehensweisen dieser Praktiken aufgezeigt. Schon existierende Umweltbewertungen von 3D-Druckern/ 3D-Druck werden erforscht und diskutiert.

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Erstellung einer Umweltbewertung für einen 3D-Drucker, welcher in der TU Wien Pilotfabrik hergestellt wird. Dabei soll der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden. Ein besonderes Augenmerk wird hier auf den Produktionsprozess in der Pilotfabrik gelegt und dabei werden die ökologischen Auswirkungen der Produktion basierend auf möglichst realen, gemessenen Daten bestimmt. Mit Hilfe der zugrundeliegenden Bewertung des Druckers und unter Zuhilfenahme der Schlussfolgerungen werden Empfehlungen für Produkt- und Prozessverbesserungen bzgl. der ökologischen Nachhaltigkeit ausgesprochen.

Die Ergebnisse, Daten, Methoden, Annahmen und Einschränkungen der Studie werden transparent und mit ausreichender Ausführlichkeit dargelegt, um es dem Leser zu ermöglichen, die Komplexität und Wechselwirkungen, die der Umweltbewertung inhärent sind, zu verstehen.¹⁰

Basierend auf den oben angeführten Aufgaben und Zielen wurden die Forschungsfragen dieser Arbeit entwickelt:

- **Welche allgemeinen Ansätze und Methoden zur Bewertung von ökologischen Umweltwirkungen von Produkten gibt es?**
- **Welche ökologischen Umweltwirkungen hat ein 3D-Drucker über seinen Lebenszyklus?**

¹⁰ (vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 54).

Die Details zur Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Forschungsfragen werden im Folgenden erläutert.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit ist als anwendungsorientierte ingenieurwissenschaftliche Forschung zu klassifizieren, wo existierende Methoden und Werkzeuge auf das praktische Problem der Bewertung der ökologischen Umweltwirkungen des 3D-Druckers angewendet werden.

Dabei werden im Anschluss an die Abgrenzung des Themas und der groben Festlegung der Vorgehensweise, die für die Literaturrecherche relevanten Themen abgesteckt, um das nötige Grundlagenwissen aufzubauen, damit die Forschungsfrage ordentlich wissenschaftlich ausgearbeitet werden kann. Die Dokumentation der existierenden Ansätze und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen von Produkten wird anhand von vorhandenen Übersichtswerken durchgeführt, wobei zusätzlich Fachliteratur bei der Ausarbeitung berücksichtigt wird.

Vorab durchgeführte Recherchen haben gezeigt, dass es in der Literatur zahlreiche unterschiedliche Ansätze und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen gibt, wobei diese jedoch in vielen Fällen methodisch vergleichbare Komponenten, Datengrundlagen oder Arbeitsschritte beinhalten. Beispielhaft können hier die Methoden der Risikoabschätzung, der Ökobilanz (LCA) oder der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) genannt werden.¹¹ Darüber hinaus können innerhalb der verschiedenen Umweltbewertungsmethoden weitere Varianten bzw. Unterteilungen existieren. Dies kann am Beispiel LCA gezeigt werden, wo einerseits unterschiedliche Ausführungsmöglichkeiten bzgl. des Umfangs der Untersuchung und andererseits Spezialformen im Hinblick auf den angepeilten Nutzen der durchgeführten Studie bestehen.^{12 13} Aufgrund der Vielfalt an Methoden werden diese in einem nächsten Schritt ausgearbeitet und verglichen. Hierzu werden die wichtigsten Punkte und Merkmale der jeweiligen Methode aufgezeigt, um im Anschluss eine übersichtliche und zusammenfassende Darstellung bieten zu können. Auf Basis der durchgeführten Recherche und der nun vorhandenen Übersicht über die verfügbaren Methoden wird eine geeignete Praktik für die Umweltbewertung des 3D-Druckers ausgewählt.

Des Weiteren werden vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern/ 3D-Druck dokumentiert und diskutiert, damit ein Überblick geschaffen wird, welche Untersuchungen und Analysen in diesem Gebiet bereits durchgeführt wurden. Hier werden mittels systematischer Literaturrecherche die festgelegten Themenbereiche abgearbeitet, um ausreichend Quellen zu erhalten. Durch zweckgerichtetes Durchar-

¹¹ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 12f).

¹² (vgl. Filimonau, 2016, S. 23).

¹³ (vgl. Hellweg and i Canals, 2014, S. 1109ff).

beiten der nun vorhandenen Literaturverzeichnisse der Basisliteratur, wird so gezielt nach weiterer vielversprechender Literatur gesucht. Nach erfolgreicher Besorgung der Unterlagen werden diese gescreent, zusammengefasst und dokumentiert.

Anschließend werden im Rahmen der zuvor festgelegten Methode alle notwendigen und hilfreichen Arbeitsschritte durchgeführt, um eine gründliche und aussagekräftige Bewertung bzgl. der ökologischen Nachhaltigkeit des 3D-Druckers erstellen zu können. Die dazu benötigten Informationen und Daten werden direkt von der TU Wien Pilotfabrik bereitgestellt. Auf Basis der aus der Bewertung gewonnenen Erkenntnisse werden die Umweltwirkungen des 3D-Druckers, mitsamt den wesentlichen Treibern der Belastungen für die Umwelt, bzw. etwaige Einflussmöglichkeiten in übersichtlicher Form aufgezeigt.

Die allgemeine Vorgehensweise ist nachfolgend abgebildet:

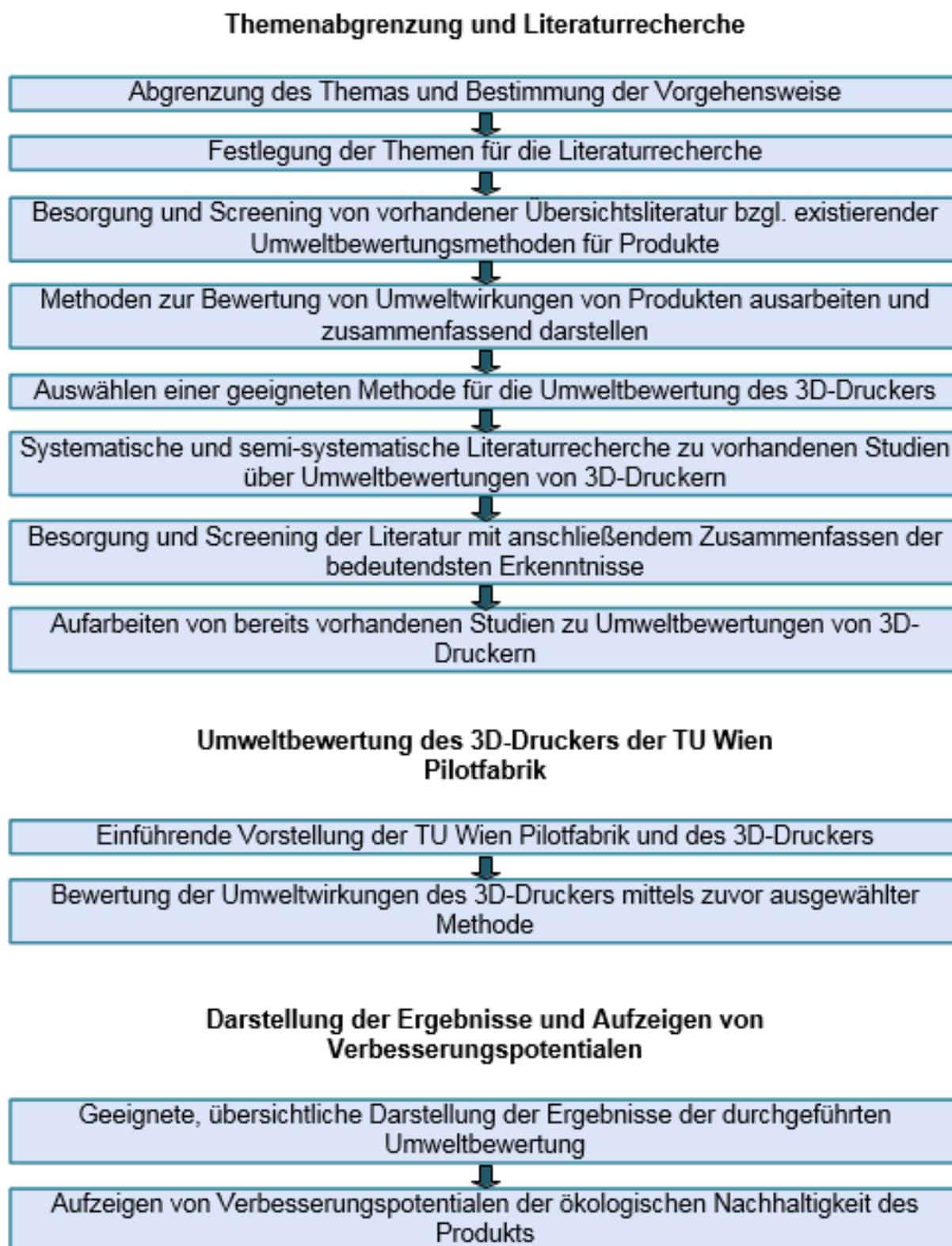


Abbildung 1: Überblick Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit ist grundsätzlich in sechs Blöcke aufgeteilt. Nach **Kapitel 1** (Einleitung) werden im **zweiten Kapitel** die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den unterschiedlichen allgemeinen Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen von Produkten erläutert. Dabei wird zunächst auf die allgemeinen Erkenntnisse und Merkmale dieser Methoden eingegangen (2.2.1 Allgemeines), um im

Anschluss die wichtigsten Punkte der einzelnen Ansätze und Methoden anzuführen und in einer zusammenfassenden Darstellung miteinander zu vergleichen (2.2.11 Zusammenfassende Darstellung und Auswahl einer geeigneten Methode für die Bewertung des 3D-Druckers). Dann wird auf dieser nun vorhandenen Grundlage eine geeignete Methode zur Bewertung der Umweltwirkungen des 3D-Druckers ausgewählt.

Das **dritte Kapitel** befasst sich mit bereits vorhandenen Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern bzw. 3D-Druck, da auch Prozessbewertungen für diese Arbeit von großer Bedeutung sind. Zunächst wird ein grober Überblick über die Verfahren bzw. Materialien des 3D-Drucks gegeben, um dann in Punkt 3.2.2 auf die vorhandenen Studien einzugehen.

In **Kapitel 4** wird eine Bewertung der Umweltwirkungen eines 3D-Druckers, welcher zusammen mit der TU Wien Pilotfabrik in Punkt 4.1 erläutert wird, erstellt. Die Umweltbewertung wird mittels einer zuvor, auf Basis von Kapitel 2, ausgewählten Methode und mit allen dafür notwendigen Arbeitsschritten durchgeführt.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung des 3D-Druckers werden in **Kapitel 5** noch einmal übersichtlich tabellarisch dargestellt. Dabei werden die wesentlichen Treiber der Belastungen für die Umwelt hervorgehoben. Kapitel 5 wird mit dem Aufzeigen von Verbesserungspotentialen der ökologischen Nachhaltigkeit des Produkts abgeschlossen.

Im **sechsten Kapitel** (Diskussion und Ausblick) werden die Ergebnisse, Einschränkungen und Schwächen der vorliegenden Studie diskutiert und Empfehlungen für weiterführende Forschungen gegeben.

2 Allgemeine Ansätze und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen

2.1 Literaturrecherche zu allgemeinen Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen

Die Qualität einer wissenschaftlichen Arbeit hängt insbesondere auch von der Qualität der durchgeführten Literaturrecherche ab.¹⁴ Um nun das Thema dieser Arbeit ordentlich wissenschaftlich ausarbeiten zu können, ist es notwendig, eine ausführliche Literaturrecherche durchzuführen. Die Recherche beginnt mit der Suche nach Schlüsselwörtern bzw. Suchbegriffen in relevanten elektronischen Datenbanken. Aus den gefundenen Resultaten wird eine Vorauswahl mittels Durchführung eines Titel-Screenings getroffen, um anschließend mit Hilfe eines Abstract-Screenings der verbliebenen Werke eine objektive wissenschaftliche Selektierung vorzunehmen. Die relevanten Artikel werden dann gelesen und zusammengefasst.¹⁵ Die Suche deckt mehrere Datenbanken ab, um gegebenenfalls weitere relevante, in der primären Datenbank nicht erfasste, Literatur zu identifizieren.

2.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Die durchgeführte Recherche zu allgemeinen Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen hat gezeigt, dass zahlreiche wissenschaftliche Werke für dieses Themengebiet vorhanden sind. Neben gut strukturierten Übersichtswerken, welche neben der Beschreibung der vorhandenen unterschiedlichen Methoden auch ausreichend allgemeine Informationen über historische Hintergründe, Herausforderungen und Ziele von Umweltbewertungsmethoden bereitstellen, ist auch umfangreich einschlägige Fachliteratur zu den jeweiligen Ansätzen und Methoden vorhanden. Unterschiedliche Charakteristiken von Werkzeugen für Umweltbewertungen und deren Beziehungen zueinander werden in Finnveden und Moberg (2005) dargestellt. In Kaltschmitt und Schebek (2015) werden wesentliche Umweltbewertungsinstrumente dargestellt und die jeweiligen Vorgehensweisen und Anwendungsgebiete verdeutlicht. Fet (1999) klassifiziert in ihrer Veröffentlichung neben den verschiedenen Ebenen der Umweltleistung der Unternehmen auch Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung dieser Umweltleistung.

Aufgrund der Tatsache, dass in diesem Abschnitt eine geeignete Methode zur ökologischen Bewertung des 3D-Druckers ermittelt werden soll, wird der Fokus in der Ausarbeitung auf Umweltbewertungsinstrumente für Produkte gelegt. Das Werk von

¹⁴ (vgl. Läzer et al., 2010, S. 10).

¹⁵ vgl. <http://www.emeraldgroupublishing.com> (19.12.2017)

Kaltschmitt und Schebek (2015) dient hier als Leitfaden und zur Bereitstellung von Basisinformationen zu den behandelten Methoden und Ansätzen zur Bewertung von Umweltwirkungen. Die detaillierten Informationen zu den einzelnen Methoden werden dabei größtenteils aus einschlägiger Fachliteratur gesammelt.

In 2.2.1 Allgemeines wird zunächst als Einstieg der historische Hintergrund der Umweltbewertungsinstrumente erläutert, um anschließend die Herausforderungen und Ziele für solche Vorhaben des Bewertens von Umweltwirkungen aufzuzeigen. Um dem Inhalt problemlos folgen zu können und für das allgemeine Verständnis, werden dann in Punkt 2.2.2 wichtige Begriffe definiert. Nachfolgend werden die verschiedenen Ansätze und Methoden angeführt und abschließend tabellarisch zusammengefasst. Darauf basierend wird dann eine passende Methode für die Bewertung der Umweltwirkungen des 3D-Druckers ausgewählt.

2.2.1 Allgemeines

Historischer Hintergrund von Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen

Ab den 1950er Jahren wurden die Auswirkungen der auf Maximierung des ökonomischen Gewinns und zu Lasten der natürlichen Umwelt ausgerichteten Wirtschaftsweise sichtbar. Die direkt erkennbaren Wirkungen wie tote Flüsse, Smog oder nicht abbaubare Kunststoffmaterialien in der Landschaft führten zur Sensibilisierung der Bevölkerung, die zusammen mit gesellschaftlichen Veränderungen zum Beginn der internationalen Umweltpolitik Anfang der 1970er Jahre führten. Anhand von speziell auf diesen unmittelbar erkennbaren Problemen ausgerichteten Umweltschutzmaßnahmen konnten in den Folgejahren erhebliche Verbesserungen erzielt werden. Ab den 1980er Jahren ca. wurde man auf Umweltprobleme aufmerksam, die nicht mehr von unmittelbar benachbarten Gebieten ausgingen. Als Beispiele können hier das „Ozonloch“ (die Verringerung der UV-Strahlung absorbierenden stratosphärischen Ozonschicht insbesondere über der Antarktis) und das „Waldsterben“ (Stresserscheinungen von Bäumen der mitteleuropäischen Bergwälder aufgrund säurehaltiger Niederschläge) genannt werden. Etwa ein Jahrzehnt später kam schließlich die Diskussion um den anthropogenen (durch Menschen hervorgerufenen) Treibhauseffekt auf und schärfte somit das Bewusstsein dafür, dass Globalisierung nicht nur die Wirtschaft, sondern auch die Umweltprobleme und den Umweltschutz bestimmt. Die nachrichtentechnisch voranschreitende Globalisierung bestärkte zudem diese Aufmerksamkeit durch Schlagzeilen über Havarien, Unglücksfällen und Katastrophen, welche an unterschiedlichsten Stellen weltweit passieren können.¹⁶ Eine der größten und wichtigsten umweltbezogenen Herausforderungen ist eben das Problem der Erderwärmung (Anstieg der Durchschnittstemperatur nahe der Erdoberfläche und der

¹⁶ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 3).

Ozeane) mitsamt deren Folgen, wie der steigende Meeresspiegel, die Gletscherschmelze, die Verschiebung der Klimazonen, Stürme, Dürren, etc. Die Erderwärmung wird primär durch Treibhausgasemissionen verursacht und dies im Speziellen durch von Menschen verursachten CO₂ Belastungen.¹⁷

Das im Laufe der letzten Jahrzehnte gesellschaftlich gestiegene Bewusstsein für Nachhaltigkeit in Bezug auf das tägliche Leben führt dazu, dass auch Unternehmen „grüne“ oder „nachhaltige“ Denkweisen und Praktiken vermehrt forcieren. Nachhaltigkeit wird in diesem Zusammenhang als „Entwicklung, die den Bedürfnissen der Gegenwart entspricht, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“ verstanden.¹⁸ Die daraus resultierende zunehmende Nachfrage der Gesellschaft nach wissenschaftlich untermauerten Analysen und Bewertungen der Auswirkungen von Tätigkeiten oder Maßnahmen auf die Umwelt im Hinblick auf die Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen, führte u. a. zur Entwicklung von unterschiedlichen Ansätzen und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen.

Aufgrund des gestiegenen gesellschaftlichen und politischen Drucks begannen Unternehmen ihre Produkte, aber auch die Produktionsprozesse bzgl. deren Auswirkungen auf die Umwelt, zu bewerten. Die daraus abgeleiteten Verbesserungen und Effizienzsteigerungen bringen nicht nur Vorteile für die Umwelt, sondern auch das Unternehmen selbst kann in Form von Kosteneinsparungen und Gewinnsteigerungen profitieren. Schnell wurde den Unternehmen auch bewusst, dass Kunden umweltfreundliches Handeln honorieren und daraus durchaus marketingtechnische Vorteile gezogen werden können. Dadurch wurde auch von unternehmerischer Seite die Entwicklung von Bewertungsmethoden, welche des Weiteren für Unternehmen wichtige Hilfestellungen beim Implementieren einer Umweltkennzeichnung oder beim Erstellen einer Umweltdeklaration bieten, vorangetrieben.

In dieser Arbeit werden die folgenden, im Rahmen der Recherche für das Problem des 3D-Druckers als relevant herausgestellten Ansätze und Methoden näher betrachtet:

- Methoden der Risikoabschätzung
- Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)
- Umweltmanagementsysteme (UMS)
- Technikfolgenabschätzung (TA)
- Ökobilanz (LCA)
- Umweltfußabdruck (PEF)
- Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)

¹⁷ (vgl. zur Muehlen and Su, 2011, S. 512).

¹⁸ (World Commission on Environment and Development, 1987).

- MET (Materials, Energy, Toxicity) Matrix
- ABC-Methode

Dabei werden die wichtigsten Eigenschaften, die Vorgehensweisen und der Nutzen bzw. die Verwendung der jeweiligen Methode hervorgehoben.

Herausforderungen für die Bewertungsmethoden

Umweltbeeinflussungen lassen sich größtenteils genau erfassen und quantifizieren. Für NO_x-Emissionen oder Abwassereinleitungen ist dies bspw. anhand von Messungen relativ gut möglich. Demgegenüber können die daraus resultierenden Folgen – die eigentlichen Umweltwirkungen – nicht so einfach gemessen werden, da diese oft sehr vielschichtig sind und möglicherweise über längere Zeiträume und geographisch weit verteilt auftreten. Auch die Zuordnung zum konkreten Verursacher der Umweltwirkungen ist häufig sehr schwierig. Die Umweltpolitik fokussiert sich aufgrund der dargelegten prinzipiellen Schwierigkeiten im Allgemeinen auf die Reduzierung der unerwünschten und schädlichen Handlungen oder die Freisetzung von Stoffen beim möglichen Verursacher, was einem klassischen Vorsorgeprinzip entspricht. Ob ein Umweltproblem tatsächlich „gelöst“ wird oder in welchem Umfang potentielle Umweltwirkungen beeinflusst werden können, ist somit nur schwer feststellbar und mit großer Unsicherheit zu beantworten.¹⁹

In der folgenden Tabelle werden einige Herausforderungen für Umweltbewertungsmethoden übersichtlich dargestellt.^{20 21 22 23} Dabei ist anzumerken, dass aufgrund der Verschiedenheit der Methoden nicht jede Herausforderung auf alle Methoden gleichermaßen zutrifft, trotzdem soll diese Tabelle einen beispielhaften Überblick über mögliche Schwierigkeiten bieten.

	Herausforderungen
Systemgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • bereits zu Beginn einer Bewertung festzulegen • räumliche und zeitliche Systemgrenzen • klare und eindeutige Definition notwendig • eindeutiges Erklären von Ausgrenzungen • Welche Umweltwirkungen sollen erfasst werden? • Grundvoraussetzung für sämtliche Bewertungsmethoden • Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse auch von Systemgrenze abhängig

¹⁹ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 10).

²⁰ (vgl. Hellweg and i Canals, 2014, S. 1109ff).

²¹ (vgl. Grunwald, 2010, S. 141ff).

²² (vgl. DIN EN ISO 14040:2009).

²³ (vgl. Renn, 1998, S. 49ff).

Referenzsysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Womit wird das Untersuchungsergebnis verglichen? • Vergleichssysteme nicht immer vorhanden • Ergebnis u. a. vom Referenzsystem abhängig • Auch bestimmte gesetzliche Vorgaben bzw. Richtwerte können als Bezugsgrößen verwendet werden. • Funktionelle Einheit oft nicht automatisch klar vorgegeben • sinnvolle, realistische und aussagekräftige funktionelle Einheit wählen
Zielkonflikte	<ul style="list-style-type: none"> • Konsequenzen einer Handlung auf die Umwelt bei Betrachtung mehrerer Umwelteffekte oft schwierig zu beurteilen • Wahl einfacher Indikatoren nicht immer zielführend • Vergleich zweier Systeme bei unterschiedlicher Art der Wirkung der Emissionen • Bewertung lokal wirksamer Freisetzungen gegen global wirksamen Emissionen • Vergleich zweier unterschiedlicher Umweltprobleme miteinander
Daten	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Datenqualität erforderlich • Beschreibung der Datenqualität wichtig, um Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu beurteilen und um Resultate richtig zu interpretieren • oft hoher Zeitaufwand bei der Datenrecherche • meist Messungen und gründliche Recherchen notwendig • benötigte Daten nicht immer erfassbar • ggf. hohe technische, organisatorische und ökonomische Aufwände
Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> • Leitprinzip für angemessene Auswertung der Ergebnisse • u. a. bei der Wirkungsabschätzung entscheidend • Transparenz und Nachvollziehbarkeit vor allem wichtig für Interessensgruppen • oft schwierig zu gewährleisten bei hoher Komplexität des Problems • bei hoher Komplexität häufig Kompromiss zwischen Wirklichkeit und vereinfachenden Annahmen, um Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten

Tabelle 1: Herausforderungen für Umweltbewertungsmethoden

Ziele von Umweltbewertungen

Ziel einer Umweltbewertung ist es im Allgemeinen, zu einer belastbaren Einschätzung der Konsequenzen eines bestimmten Handelns auf die Umwelt in ihrer gesamten Breite zu kommen.²⁴ Unter Umständen wird dabei eine umfassende Untersuchung aller Auswirkungen oder aller Einflüsse forciert, wobei im Gegensatz dazu je-

²⁴ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 11).

doch häufig nur spezielle ausgewählte Folgen interessieren. Die existierenden Umweltbewertungsinstrumente erfüllen teilweise auch verschiedene Aufgaben und verfolgen unterschiedliche Ziele. Mit einer vorgegebenen Methode zu beweisen, dass Prozesse oder Produkte gesetzlichen Vorgaben genügen, unternehmensintern die eigene Umweltsituation zu verstehen und zu verfolgen oder neue Technologien, innovative Verfahren oder alternative Prozesse zu bewerten, können solche Ziele darstellen. Die Ziele werden meist am Beginn einer Untersuchung festgelegt und daran wird konsequent festgehalten. Es kann aber durchaus sein, dass Ziele auch während der Durchführung einer Umweltbewertung aufgrund des fortschreitenden Ergebnisergebnisses angepasst werden müssen.²⁵

Konkrete Beispiele von Zielen für die oben genannten übergeordneten Zielkategorien, werden im Folgenden aufgelistet:

- Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Prozessen und Produkten
- Schwachstellenanalysen und Aufzeigen von Effizienzsteigerungspotentialen
- Produktvergleiche und Hilfestellung für strategische Entscheidungen
- Implementierung einer Umweltkennzeichnung
- Erstellung einer Umweltdeklaration
- marketingtechnische Vorteile und Steigerung des Geschäftserfolgs eines Unternehmens erzielen
- Einhaltung von umweltpolitischen Vorgaben

Die verfügbaren Bewertungsmethoden stellen dabei die notwendigen Werkzeuge zur Durchführung der Analysen und in weiterer Folge zum Erreichen der Ziele dar.

2.2.2 Begriffsdefinitionen

In nachstehender Tabelle werden wichtige Begriffe, die vor allem für das Verstehen und Folgen der weiteren Kapitel von Bedeutung sind, definiert.

Begriff	Definition
Ökobilanz	Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines gesamten Lebensweges
Sachbilanz	Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst
Lebenszyklus	Aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung

²⁵ (vgl. Kaltschmitt und Schebek, 2015, S. 46).

	oder -erzeugung bis zur Beseitigung
Wirkungsabschätzung	Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient
Wirkungskategorie	Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können
Wirkungsindikator	Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie
Transparenz	Offene, umfassende und verständliche Darstellung von Informationen
Produkt	Jede Ware oder Dienstleistung
Prozess	Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt
Energiefluss	In Energieeinheiten quantifizierter Input oder Output aus einem Prozessmodul oder Produktsystem
Rohstoff	Primäres oder sekundäres Material, das zur Herstellung eines Produktes verwendet wird
Allokation	Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen
Datenqualität	Eigenschaften von Daten in Bezug auf ihre Eignung, festgelegte Anforderungen zu erfüllen
Funktionelle Einheit	Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit
Input	Produkt-, Stoff- oder Energiefluss, der einem Prozessmodul zugeführt wird
Output	Produkt-, Stoff- oder Energiefluss, der von einem Prozessmodul abgegeben wird
Produktfluss	Produkte, die von einem anderen Produktsystem zugeführt oder an ein anderes Produktsystem abgegeben werden
Produktsystem	Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt
Emissionen	Emissionen in Luft, Einleitungen in Wasser und Verunreinigung von Boden
Treiber	Aktivitäten oder Umstände, die bestimmte Auswirkungen zur Folge haben
Umweltbeeinflussung	Potentielle und tatsächliche Eingriffe in die natürliche Umwelt
Umweltwirkungen	Oberbegriff für alle Arten von positiven und negativen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt
Sensitivitätsanalyse	Systematisches Verfahren zur Einschätzung der Wirkungen der getroffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse einer Studie
Systemgrenze	Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind

Abfall	Substanzen oder Gegenstände, die der Eigentümer für die Beseitigung vorgesehen hat oder die er beseitigen muss
Vollständigkeitsprüfung	Verfahren zur Überprüfung, ob die Informationen für die Ableitung von Schlussfolgerungen – in Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens – ausreichend sind
Konsistenzprüfung	Vor der Ableitung von Schlussfolgerungen durchgeführtes Verfahren zur Überprüfung, ob die Annahmen, Methoden und Daten in der Studie einheitlich angewendet werden und sich in Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens befinden
Beurteilung	Bestandteil in der Auswertungsphase, der dazu dient, Vertrauen in die Ergebnisse zu setzen
Wiederverwendung	Erzeugnisse oder Bestandteile werden wieder für denselben Zweck verwendet, für den sie ursprünglich bestimmt waren
Weiterverwendung	Erzeugnisse oder Bestandteile werden für andere Zwecke weiterverwendet
Wiederverwertung	Wiedereinsatz von Erzeugnissen oder Bestandteilen in den gleichen Produktionsprozessen unter partieller oder völliger Formauflösung und -veränderung
Weiterverwertung	Einsatz von Erzeugnissen oder Bestandteilen in anderen Produktionsprozessen unter Umwandlung zu neuen Produkten oder Bestandteilen.
Recycling	Rückführung hergestellter und/oder verwendeter Produkte oder Erzeugnisse in den Produktions- und/oder Verwendungskreislauf zum Zweck der Ressourcenschonung

Tabelle 2: Begriffsdefinitionen

Die Definitionen wurden größtenteils von der Norm ISO 14040:2006 übernommen.²⁶

2.2.3 Methoden der Risikoabschätzung

Risikoabschätzung ist die Identifizierung, Quantifizierung und Bewertung von Risiken, d.h. die nach dem Stand des Wissens bestmögliche Prognose von unerwünschten Folgewirkungen im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß ihres Eintreffens.²⁷

Die Methoden der Risikoabschätzung werden in vielen verschiedenen und oft auch voneinander unabhängigen Gebieten angewendet. Betrachtet man ein Unternehmen, dann kann die Risikoabschätzung bspw. ein Hilfsmittel für das Treffen von strategischen Entscheidungen sein, in der Finanzabteilung zur Entscheidungsfindung bei Investitionstätigkeiten eingesetzt werden oder in der Konstruktionsabteilung als Baustein der FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) dienen. In dieser Arbeit

²⁶ (vgl. DIN EN ISO 14040:2009, S. 7ff).

²⁷ (vgl. Renn, 1993, S. 181).

werden die Methoden der Risikoabschätzung in Bezug auf ökologische Anwendungsfelder genauer betrachtet.

Wichtige Eigenschaften und Vorgehensweise

Unabhängig vom Anwendungsgebiet ist die Vorgehensweise bei der Durchführung einer Risikoabschätzung stets die gleiche. Lediglich die eingesetzten Methoden, z. B. für die quantitative Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer unerwünschten Folge einer Handlung oder eines Ereignisses, können variieren. Eine Risikoabschätzung beginnt mit der Phase der Risikoanalyse, gefolgt von der Quantifizierung und der Bewertung von Risiken. Zur Risikoabschätzung gehört die Phase der Risikominimierung/ -begrenzung nicht zwingend dazu, wird jedoch hier auch kurz beschrieben.

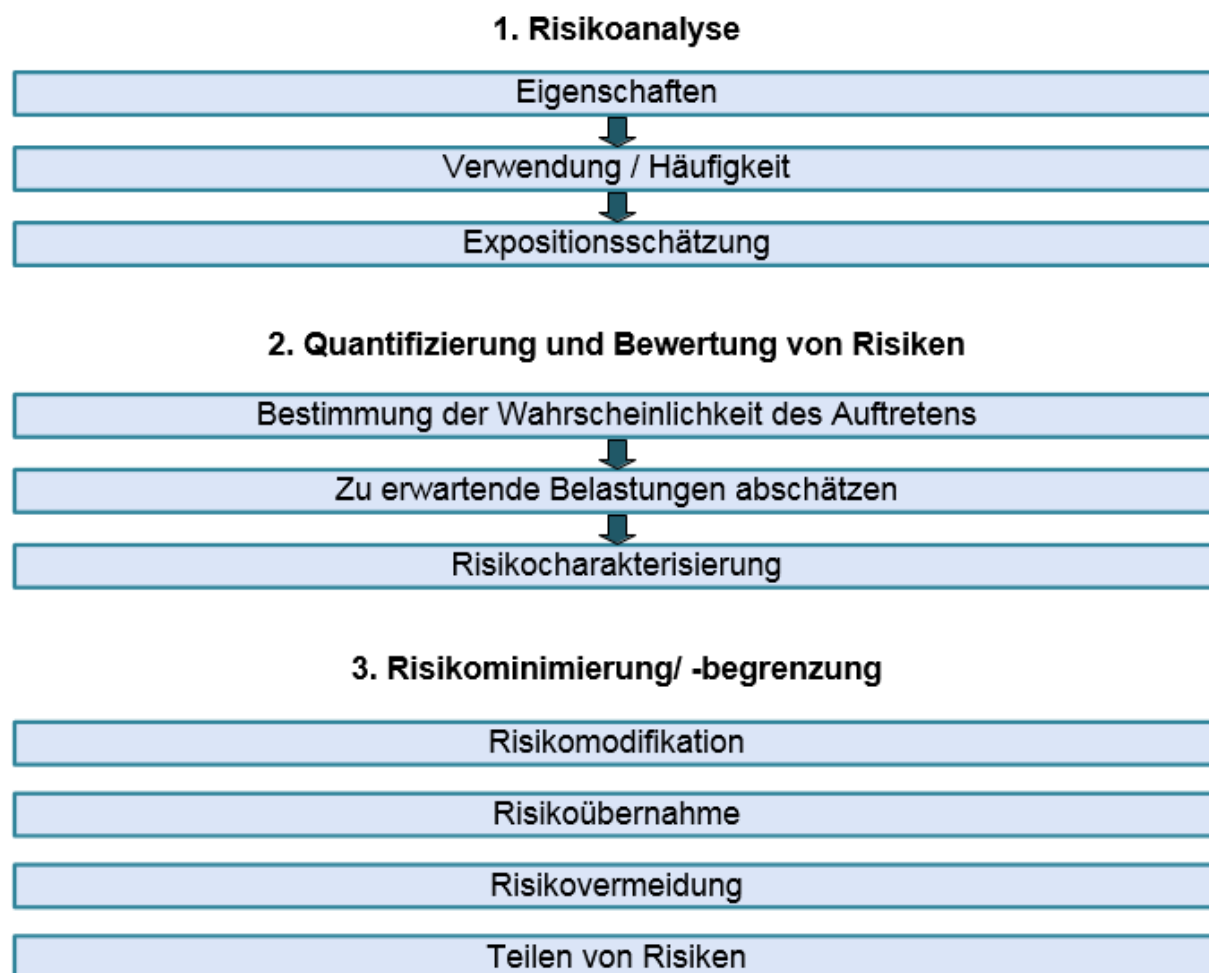


Abbildung 2: Vorgehensweise bei einer Risikoabschätzung

1. Risikoanalyse

Der erste Schritt der Risikoabschätzung besteht in der Identifikation von möglichen Nebenfolgen, die sich als Resultat eines Ereignisses oder einer Handlung einstellen können. Eine solche Identifikation beruht immer auf einer Selektionsleistung. Folgen

können entweder als erwünscht, unerwünscht oder neutral eingestuft werden. Dabei werden Folgen, welche all das, was Menschen als „wertvoll“ einschätzen, gefährden, als Risiken bezeichnet. Mit der Identifikation geht auch immer eine Prioritätensetzung einher. Auch wenn man den Bedeutungsinhalt von Risiko auf potentielle Umwelt- oder Gesundheitsschäden reduziert, verbleibt die Notwendigkeit wegen der Vielzahl an möglichen Schäden diejenigen auszuwählen, die von der Gesellschaft als besonders dringlich eingestuft werden.²⁸

Zuerst muss die Frage geklärt werden, ob ein Risiko vorliegt oder nicht. Um dies beantworten zu können, benötigt man Daten zu den Eigenschaften und Wirkungen der betrachteten Handlungen, Stoffe oder Produkte und in welchem Umfang der Mensch und die Umwelt diesen ausgesetzt sind (Exposition). Bei den Eigenschaften ist herauszufinden, ob sich Grenzwerte angeben lassen bzw. angegeben sind oder dies nicht zutrifft, weil schon geringste Aktivitäten oder Verwendungen zu unerwünschten Wirkungen für die Umwelt oder die Menschen führen können. Als nächstes folgt die Ermittlung dieser verschiedenen schädlichen Wirkungen und sollte sich herausstellen, dass es sich um eine „problematische“ Handlungen, Stoffe oder Produkte handelt, werden zusätzliche Informationen (Häufigkeit, Menge, etc.) benötigt und des Weiteren wird eine Expositionsschätzung und Risikobeschreibung durchgeführt. Die auszuführenden Tätigkeiten werden im Folgenden noch einmal zusammengefasst:

- Ermittlung schädlicher Wirkungen auf die Gesundheit des Menschen
- Ermittlung schädlicher Wirkungen auf die Umwelt
- Expositionsschätzung
- Risikobeschreibung

Weitere wichtige Arbeitsschritte im Abschnitt der Risikoanalyse sind die Abschätzung der Adäquatheit, der Relevanz und der Zuverlässigkeit der gesammelten Informationen.²⁹ Der Prozess Risikoanalyse bzw. Informationsgenerierung kann durchaus mehrere Durchläufe benötigen, bis die zuvor genannten Kriterien erfüllt werden.

2. Quantifizierung und Bewertung von Risiken

Die nächste Phase der Risikoabschätzung ist die Phase der quantitativen Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass eine unerwünschte Folge eintritt und der Bewertung, ob das Risiko unter den gegebenen Rahmenbedingungen vertretbar ist.

Ziel der Risikobewertung von Stoffen oder Produkten ist es, die Anwendungs- und Expositionsbereiche zu erfassen, von welchen während der Herstellung, Verwendung und Beseitigung ein nicht akzeptables Risiko ausgeht.³⁰ Für die Durchführung der Quantifizierung und Bewertung von Risiken stehen zahlreiche unterschiedliche

²⁸ (vgl. Renn, 1993, S. 181).

²⁹ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 174ff).

³⁰ vgl. <http://www.umweltbundesamt.at> (17.01.2018)

Methoden und Kennzahlen zur Verfügung, jedoch wird aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit darauf nicht genauer eingegangen. Die zur Quantifizierung und Bewertung verwendeten Methoden und die Durchführung selbst müssen transparent und ausführlich dokumentiert werden, damit die durchgeführten Arbeitsschritte, die verwendeten Daten, sowie die Randbedingungen für alle Stakeholder nachvollziehbar sind.

3. Risikominimierung/ -begrenzung

Wie bereits erwähnt zählt die Phase der Risikominimierung/ -begrenzung nicht unbedingt zum Überbegriff der Risikoabschätzung, wird hier jedoch trotzdem kurz erläutert.

Werden in den vorgelagerten zwei Schritten inakzeptable Risiken, in unserer Betrachtung für Lebewesen oder die Umwelt, festgestellt bzw. Schwellenwerte überschritten, dann müssen diese Risiken im besten Fall beseitigt oder zumindest in hinnehmbaren Grenzen gehalten werden. Diese Risikobehandlung kann in vier Maßnahmen eingeteilt werden:³¹

- Risikomodifikation
- Risikoübernahme
- Risikovermeidung
- Teilen von Risiken

Diese vier Möglichkeiten schließen sich keineswegs gegenseitig aus, was bedeutet, dass die Lösung des Problems durchaus eine Kombination der genannten Maßnahmen darstellen kann. In nachstehender Tabelle werden Beispiele für die vier Alternativen in Bezug auf die Risikominimierung/ -begrenzung von chemischen Stoffen bzw. den in Produkten verwendeten Materialien gegeben.

Maßnahme	Erkanntes Risiko	Problemlösungsansätze
Risikomodifikation	Verwendung eines umweltschädlichen Materials	Reduktion des Materials in der Konstruktion, Besondere End of Life-Maßnahmen;
Risikoübernahme	Verwendung eines umweltschädlichen Materials	Tragen des damit verbundenen Risikos unter festgelegten Kriterien;
Risikovermeidung	Verwendung eines umweltschädlichen Materials	Verwendung eines alternativen Werkstoffs, Heranziehen einer anderen Technik;
Teilen von Risiken	Verwendung eines umweltschädlichen Materials	Verlagern des Risikos zu kleineren Teilen (z. B. verschiedene Hersteller/ Ver-

³¹ (vgl. Klipper, 2015, S. 78).

		fahren verwenden);
--	--	--------------------

Tabelle 3: Beispiele für Risikominimierung/ -begrenzung

Nach der Durchführung der Maßnahmen kann es sein, dass ein gewisses Restrisiko bestehen bleibt. Ein Restrisiko ist also das nach der Risikobehandlung verbleibende Risiko.³² Das Restrisiko gilt es dann wiederum zu bewerten und ggf. sind weitere Schritte in Bezug auf Risikominimierung/ -begrenzung einzuleiten.

Verwendung

Richtlinien und Hilfestellungen für eine Risikoabschätzung bieten bspw. die Norm ISO 31000 Risikomanagement oder andere, auf bestimmte Anwendungsfälle bezogene, spezifische Normen. Risikoabschätzungen können in vielen unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen von Organisationen, wie z. B. bei der Entscheidungsfindung, den Prozessen, Funktionen, Produkten oder Projekten angewendet werden und müssen stets an die besonderen Gegebenheiten des betrachteten Gegenstands angepasst werden.

2.2.4 Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Der Begriff der Umweltverträglichkeitsprüfung bezeichnet ganz allgemein ein Verfahren zur systematischen und umfassenden Prognose und Bewertung der Folgen, die eine geplante Aktivität voraussichtlich für die Umwelt haben wird.³³ Mit der Einführung der UVP geht man weg von der in früheren Jahren eher üblichen Reparatur von Umweltschäden und hin zu vorausschauendem und vorsorglichem Handeln.

Mit Hilfe der UVP sollen medienübergreifend die umweltrelevanten Folgen eines Vorhabens frühzeitig erfasst werden. Für die Bewertung können unterschiedliche Methoden herangezogen werden. Des Weiteren ist die UVP gesetzlich verankert und u. a. Bestandteil von Genehmigungsverfahren. Der Ablauf des Verfahrens ist dabei fest geregelt.³⁴

Wichtige Eigenschaften und Vorgehensweise³⁵

Das UVP-Gesetz gibt die zentralen Prüfschritte zur Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen eines Vorhabens auf die Umwelt vor. Die gesetzliche Vorgehensweise bei einer Umweltverträglichkeitsprüfung wird in folgender Abbildung übersichtlich und vereinfacht dargestellt.

³² (vgl. Klipper, 2015, S. 19).

³³ (Stahl, 1998, S. 55).

³⁴ (vgl. Stahl, 1998, S. 57).

³⁵ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 315ff).

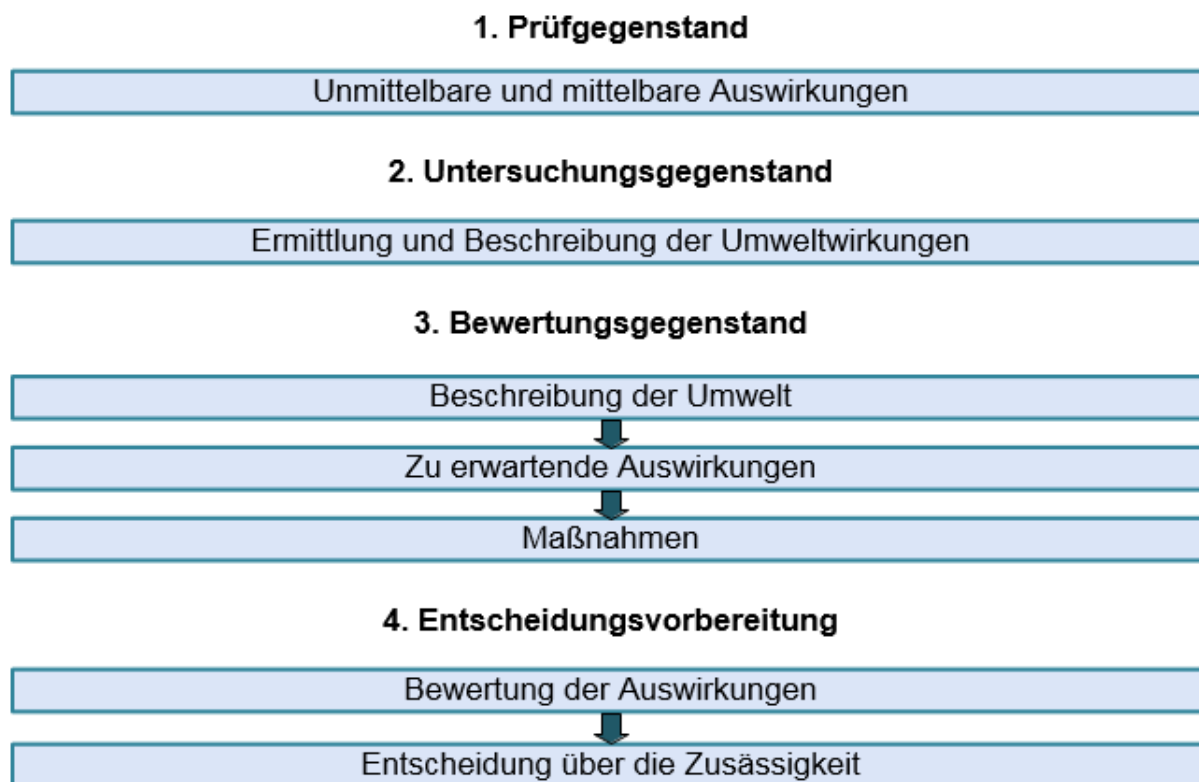


Abbildung 3: Vorgehensweise bei einer UVP

1. Prüfgegenstand

Bereits zu Beginn des Verfahrens der UVP sind die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf

- Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
- Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie
- die Wechselwirkung zwischen den Schutzgütern

zu untersuchen.

2. Untersuchungsgegenstand

Im Punkt des Untersuchungsgegenstands kommt es zur Ermittlung und Beschreibung der Umweltwirkungen auf die Schutzgüter.

3. Bewertungsgegenstand

Von der zuständigen Behörde ist hier eine zusammenfassende Darstellung zu verfassen, worin alle wesentlichen, für die Bewertung erforderlichen Aussagen enthalten sind.

- Beschreibung der Umwelt

- Zu erwartende Auswirkungen auf die Umweltgüter einschließlich der Wechselwirkungen
- Maßnahmen zur Vermeidung, Verminderung oder zum Ausgleich der Umweltbeeinträchtigungen

Der nächste Abschnitt ist die Entscheidungsvorbereitung, in der u. a. die Bewertung als Teil der UVP durchgeführt wird.

4. Entscheidungsvorbereitung

Neben der Bewertung der Auswirkungen des Vorhabens wird in dieser Phase die Entscheidung über die Zulässigkeit getroffen, wobei sich der Bewertungsvorgang auf die Umweltauswirkungen beschränkt, aber auch Elemente aus dem Nicht-Umweltbereich (bspw. ökonomische oder soziale Elemente) bei der Entscheidung mitwirken können.

Verwendung

Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist Bestandteil von behördlichen Verfahren, in denen die umweltbezogenen Folgen von Vorhaben im Vorfeld erkannt, daraus Vorsorgemaßnahmen abgeleitet und über die Zulassungen für die betrachteten Projekte entschieden werden sollen. Solche Projekte sind üblicherweise der Bau von Anlagen, Straßen und andere Eingriffe in die Natur und Landschaft.³⁶

2.2.5 Umweltmanagementsysteme (UMS)

Umweltmanagementsysteme dienen Unternehmen dazu, ihre normativen, strategischen und operativen Umweltschutz- und Umweltmanagementaktivitäten in ein (wenn möglich an standardisierte Vorgaben angelehntes) Gesamtkonzept zu überführen.³⁷

- Normativ: Gewährleistung gesellschaftlicher Akzeptanz und Legitimation durch Etablierung einer umwelt- bzw. nachhaltigkeitsorientierten Unternehmenskultur und -philosophie.
- Strategisch: Erschließung neuer Märkte und Kunden durch Umsetzung eines offensiven Umweltmanagements.
- Operativ: Umsetzung von Umweltschutz und -management durch Integration in die betrieblichen Funktionsbereiche (z.B. Beschaffung, Produktion, Absatz, Lagerung, Personalwesen, Organisation oder Controlling).³⁸

³⁶ (vgl. Stahl, 1998, S. 55f).

³⁷ (vgl. Butterbrodt, 1997, S. 18).

³⁸ (vgl. Kramer, 2010, S. 280).

In einigen Unternehmen wurden zunächst individuelle Konzepte für UMS entwickelt, bis 1993 Anregungen der Internationalen Handelskammer und des British Standard Institute dazu führten, dass eine europäische Verordnung zum Umweltmanagement (EMAS-VO) und dann 1996 die Norm ISO 14001 verabschiedet wurden. Diese Standards für die Implementierung von UMS sollen Unternehmen erleichtern, ein unternehmensweites Konzept des Umweltmanagements einzurichten.³⁹

Normung und wichtige Eigenschaften

UMS, welche sich an ISO 14001 bzw. an EMAS-VO orientieren, sollen die Effektivität des betrieblichen Umweltschutzes auch langfristig erhöhen. Des Weiteren sollen diese Vorschriften dabei helfen, die Umweltleistung und die Größenordnung der jeweiligen Umweltwirkungen von verschiedenen Unternehmen miteinander vergleichen zu können. Ein Unternehmen, das dem Umweltschutz einen hohen Stellenwert einräumt, das Umweltrecht umfassend berücksichtigt und energisch an einer positiven Umweltbilanz arbeitet, kann eine Zertifizierung seines Umweltmanagementsystems erhalten.⁴⁰

Nach ISO 14001 beruht der Ansatz eines Umweltmanagementsystems grundsätzlich auf dem Zyklus von Planen-Durchführen-Prüfen-Handeln (PDCA: Plan-Do-Check-Act). PDCA stellt dabei einen iterativen Prozess bereit, welcher es Organisationen erleichtert, sich kontinuierlich zu verbessern. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte kurz beschrieben:⁴¹

- Planen: Umweltziele und Prozesse festlegen, um Ergebnisse in Übereinstimmung mit der Umweltpolitik der Organisation zu erhalten;
- Durchführen: Prozesse wie geplant umsetzen;
- Prüfen: Prozesse überwachen, diese an der vorgegebenen Umweltpolitik messen und Ergebnisse berichten;
- Handeln: Maßnahmen zur ständigen Verbesserung ergreifen;

Die Implementierung und Zertifizierung von Umweltmanagementsystemen erfolgt gemäß ISO 14001 in fünf Phasen, welche in folgender Abbildung dargestellt und anschließend kurz erläutert werden.⁴²

³⁹ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 364).

⁴⁰ (vgl. ebd., S. 365f).

⁴¹ (vgl. ISO 14001:2015, S. 7).

⁴² (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 366ff).



Abbildung 4: Phasen eines UMS

1. Umweltpolitik

In einem ersten Schritt gilt es eine unternehmensinterne, auf Dauer angelegte Umweltpolitik festzulegen. Diese Erklärung muss die Verpflichtung zur Einhaltung der geltenden Umweltvorschriften beinhalten und darlegen, wie die kontinuierliche Verbesserung des internen Umweltmanagementsystems erreicht wird.

2. Planung

Die Festlegung und Anwendung von Instrumenten zur umfassenden Untersuchung des ökologischen IST-Zustands und zur allgemeinen Erfassung relevanter Informationen sind in der Planungsphase wichtige Schritte, um konkrete Umweltziele und –programme festzulegen. Darauf aufbauend werden auch Verantwortlichkeiten, Mittel und Zeitrahmen für das Erreichen dieser Umweltziele vorgegeben.

3. Verwirklichung und Betrieb

Im nächsten Schritt werden geeignete Konzepte für Schulungen der Mitarbeiter und für die interne sowie externe Kommunikation erstellt. Die für die Umsetzung der Um-

weltpolitik notwendigen Abläufe, mitsamt der Festlegung von Verfahrens- und Arbeitsanweisungen, werden hier genau geplant. Die Dokumentation dieser Arbeitsschritte ist für die gesamten Abläufe des UMS von großer Bedeutung.

4. Überprüfung

Zahlreiche Ansätze zur Überprüfung der Einhaltung der Ziele stehen zur Verfügung. Dabei sollen mittels prozessbegleitenden Messungen Abweichungen von Sollwerten möglichst frühzeitig erkannt werden, um diesen ggf. gegensteuern zu können. Zertifizierungsfähige Managementsysteme unterliegen des Weiteren regelmäßigen internen und externen Audits, bei denen festgestellt wird, inwieweit Auditkriterien (Politiken, Verfahren oder Anforderungen) erfüllt werden. Im Fall der ISO 14001 wird dabei geprüft, ob das UMS den Vorgaben der Norm entspricht, die umweltrelevanten Prozesse mit den Anforderungen übereinstimmen und die umweltrechtlichen Vorschriften eingehalten werden. Wiederum werden der gesamte Ablauf und die Ergebnisse dokumentiert und ggf. notwendige Handlungsbedarfe aufgezeigt.

5. Managementbewertung

Der letzte Schritt ist die Bewertung des UMS durch die oberste Leitung der Organisation. Bei dieser Bewertung soll festgestellt werden, ob das UMS zweckentsprechend, angemessen und wirksam ist. Da es sich um einen iterativen Prozess handelt, ist die Bewertung gleichzeitig auch Startpunkt für das erneute Durchlaufen des gesamten Zyklus.

Ohne weiter darauf einzugehen, wird an dieser Stelle nochmal darauf hingewiesen, dass es für Unternehmen neben der Zertifizierung gemäß ISO 14001 auch die Möglichkeit gibt, an der europäischen Verordnung für Umweltmanagement (EMAS-VO) teilzunehmen. Die EMAS-VO beinhaltet zusätzlich zu den Anforderungen der ISO 14001 noch weiterführende Anforderungen, wie bspw. die Berücksichtigung indirekter Umweltaspekte (z. B. Umweltwirkungen, verursacht durch Zulieferer).

Verwendung

Stakeholder wie z. B. der Gesetzgeber fordern häufig eine Bestätigung über die Einhaltung von umweltrechtlichen Vorschriften. Auch der Druck durch Kunden, Investoren und die Öffentlichkeit kann zur Einführung von UMS beitragen. Organisationen verwenden Umweltmanagementsysteme als ein Konzept, um ihre Umweltauswirkungen systematisch erheben, vermindern und „managen“ zu können. Wirtschaftliche Aspekte spielen bei der Verwendung von UMS in Unternehmen ebenfalls eine gewichtige Rolle, da durch die notwendige Transparenz der Prozessabläufe für dieses Konzept, Einsparungspotentiale aufgezeigt werden können.⁴³

⁴³ (vgl. Reckmann, 2001, S. 205).

Zusammenfassend kann man sagen, dass UMS zur Bestimmung und Erreichung von Umweltzielen, die sich auf eine Verbesserung der ökologischen Lage und/oder der Wechselwirkungen von Umweltschutz und der wirtschaftlichen Lage beziehen, in Organisationen angewendet werden.

2.2.6 Technikfolgenabschätzung (TA)

Die Idee der Technikfolgenabschätzung entstand als „Technology Assessment“ in der zweiten Hälfte der 1960er Jahre in den USA. Sie stieß im Laufe der Jahre immer wieder auf Kritik und ablehnende Haltungen. Unter Anderem hieß es in Deutschland bspw., dass die Technikfolgenabschätzung das Innovationsklima behindere, Technikängste schüre oder auch die Überwindung der Arbeitslosigkeit erschwere. Des Weiteren herrschte häufig die Meinung, dass sich die TA sehr stark auf politische oder administrative Anwendungsgebiete beschränkt.⁴⁴

Die moderne TA behandelt neben politischen Anliegen jedoch auch mehrere weitreichende Wirkungsbereiche, zu denen ganz allgemein auch Umwelt und Ökologie zählen. Die TA trägt dazu bei, Vor- und Nachteile von Technologien im Rahmen einer umfassenden Analyse gegeneinander abzuwägen, wobei es aber nicht nur um die rein technische Betrachtung geht, sondern auch ökologische, ökonomische, rechtliche, soziale und ethische Gesichtspunkte miteinbezogen werden. Typisch für die Anwendung der TA ist, dass im Allgemeinen ein großes Maß an Unsicherheit des vorhandenen Wissens über das zu behandelnde Thema vorherrscht, was sich unter anderem dadurch erklären lässt, dass meist Folgen einer Implementierung oder Anwendung von neuen, oft weitgehend unbekanntem Technologien erörtert werden. Daher ist die TA auch keine fest definierte und klar abgegrenzte Methode wie z. B. die Ökobilanz, sondern wendet unterschiedliche, der Situation entsprechende, Methoden an.⁴⁵

Wichtige Eigenschaften und Struktur zur Durchführung von TA-Projekten⁴⁶

Die TA hat den Anspruch, die Gesamtheit aller Technikfolgen in Zusammenhang zu bringen und strebt die Berücksichtigung und eine umfassende Beschreibung aller relevanten Aspekte an. Ob diese resultierenden Folgen als positiv oder negativ wahrgenommen werden, kann je nach Betrachtungsweise unterschiedlich sein. Im Folgenden werden verschiedene Einteilungsmöglichkeiten von Folgen aufgezählt:

- Beabsichtigte und nicht beabsichtigte Folgen
- Erwünschte und nicht erwünschte Folgen
- Vorhersehbare und nicht vorhersehbare Folgen

⁴⁴ (vgl. Paschen, 1999, S. 77f).

⁴⁵ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 403f).

⁴⁶ (vgl. ebd., S. 405ff).

- Haupt- und Nebenfolgen

Eine Aufgabe der Technikfolgenabschätzung ist es auch, Unterscheidungen zwischen den verschiedenen Betrachtungsweisen und den damit verbundenen divergierenden Auffassungen der Folgen zu treffen.

Umweltfolgen bilden, neben den Folgen für die Gesundheit von Mensch und Tier, für einen Wirtschaftsstandort, für Minderheiten einer Bevölkerung, für eine aktuell bestehende politische Gesamtkonstellation usw., eine inhaltliche Folgenkategorie, die praktisch quer zu den oben genannten Einteilungsmöglichkeiten der Folgen verläuft.

Die hier betrachtete Struktur für das Design eines TA-Projekts zeigt in verallgemeinernder Weise ein generelles Ablaufschema. Den Rahmen dafür bildet eine TA-Einrichtung, die in einer speziellen Situation zu einem bestimmten Thema ein TA-Projekt starten möchte.

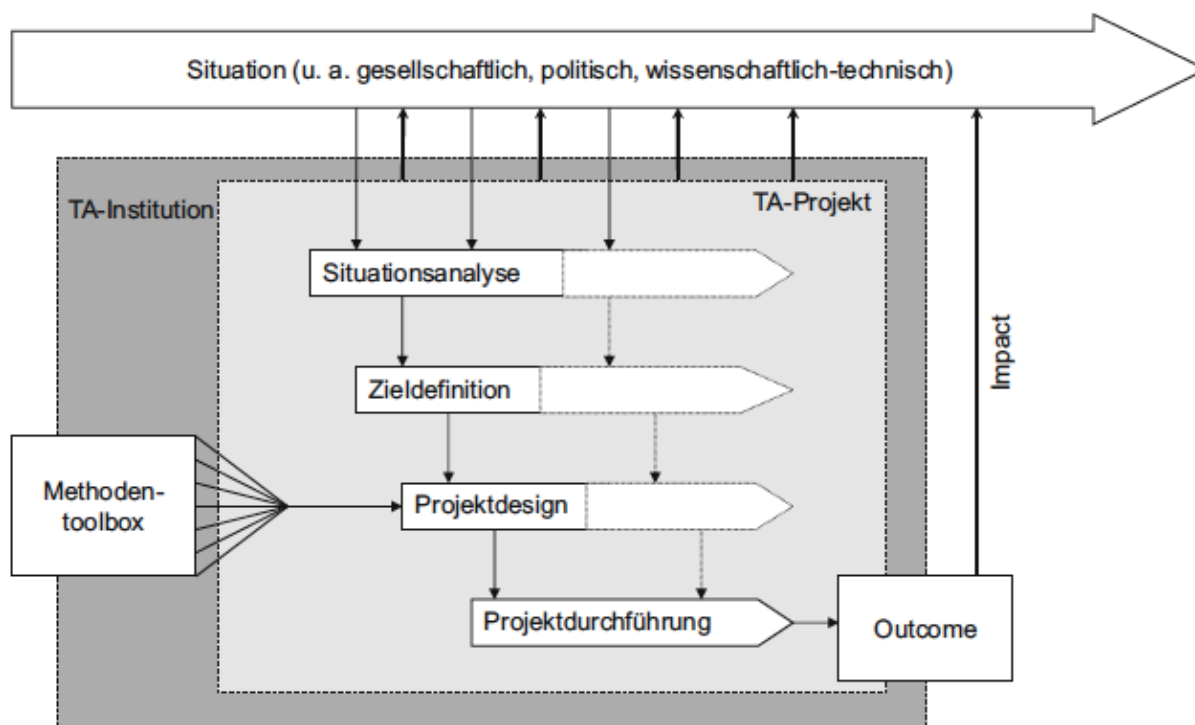


Abbildung 5: Struktur eines TA-Projekts⁴⁷

Die Struktur der gezeigten Darstellung startet in einer konkreten Situation, in der das Projekt stattfinden soll. Als erster Schritt wird die vorherrschende Situation analysiert und darauf aufbauend werden die Ziele des TA-Projekts festgelegt. Auf Basis der nun bekannten Situation und der definierten Ziele werden passende Methoden ausgewählt, welche die größte Chance zum Erreichen der Projektziele aufweisen. Die Methoden sind dabei in wissenschaftliche (z. B. Expertendiskurs, Ökobilanz, Experteninterviews), interaktive (z. B. Fokusgruppen, Wertbaumverfahren, Konferenzen)

⁴⁷ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 408).

und kommunikative (z. B. Newsletter, Pressemeldungen) Kategorien aufgeteilt. Des Weiteren wird angestrebt, dass das Projektdesign den Kontakt zu den Stakeholdern hält, damit gegebenenfalls Maßnahmen zur Neuorientierung eingeleitet werden können. Dieser ständige Austausch soll in der Abbildung mit den Pfeilen zwischen TA-Projekt und Situation angedeutet werden.

Verwendung

Die TA wird allgemein betrachtet zur Abschätzung aller, mit der zu untersuchenden Technologie zusammenhängenden Folgen, unter Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen, rechtlichen, sozialen und ethischen Gesichtspunkten, verwendet. Mit dem Fokus auf Umweltbewertungen wird die TA häufig für Analysen als Basis für politische bzw. gesellschaftliche Entscheidungen herangezogen.

2.2.7 Ökobilanz (LCA)

Die ersten Bestrebungen einer Beschreibung von Produkten und Prozessen, um eine umfassende Lebenszyklusbetrachtung einzuführen, wurden in den späten 1960er und frühen 1970er Jahren in den USA unternommen. Die ersten Ökobilanzen im modernen Sinn wurden um 1970 am Midwest Research Institute mit der Bezeichnung „Resource and Environmental Profile Analysis (REPA)“ durchgeführt.⁴⁸ Dass gerade um 1970 die Entwicklung der Ökobilanz begann, liegt einerseits daran, dass damals eine steigende Abfallproblematik vorherrschte (daher wurden viele Verpackungsstudien durchgeführt), andererseits Engpässe bei der Energieversorgung auftraten und die Erkenntnis über die Endlichkeit der Ressourcen, die Menschen zum Handeln bewegten. 1990 führte die Zunahme des Interesses an die Ökobilanz zu internationalen Tagungen, wo die SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) einen Workshop organisierte und auch in den Folgejahren waren die SETAC und die SETAC-Europe entscheidend in der Entwicklung und Harmonisierung bzw. beginnenden Standardisierung der Ökobilanz beteiligt.⁴⁹ Heute ist die Ökobilanz eine über die Normen ISO 14040 und ISO 14044 definierte Methode.

In der Einleitung der Norm ISO 14040 ist die Ökobilanz wie folgt definiert:

„Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“⁵⁰

⁴⁸ (vgl. Hunt, Franklin, 1996, S. 4ff).

⁴⁹ (vgl. Klöpffer and Grahl, 2009, S. 8ff).

⁵⁰ (DIN EN ISO 14040:2009, S. 4).

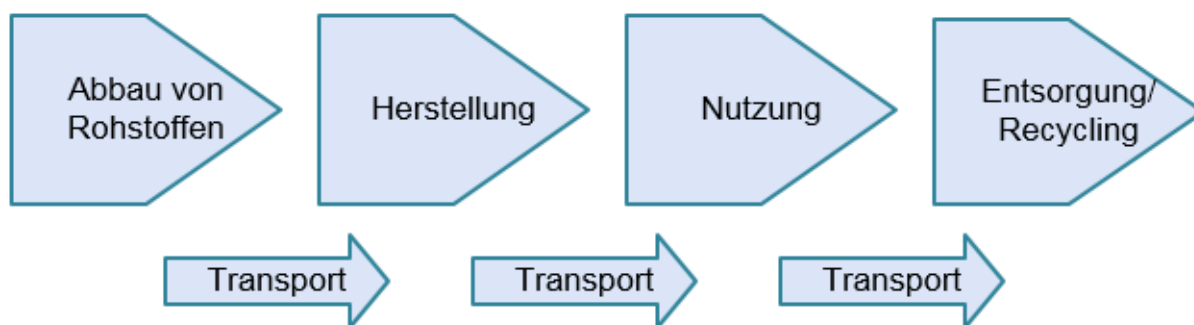


Abbildung 6: Lebenszyklus eines Produktes

Ökobilanzen werden also als ganzheitliche Ansätze verstanden, mit denen unterschiedliche Umweltwirkungen eines Produkts über die gesamte Lebensdauer analysiert, dokumentiert und quantifiziert werden. Die Herausforderung bei der Anwendung dieser Methode besteht dabei meist darin, dass häufig komplexe Produktsysteme betrachtet werden müssen, bei denen die Gewinnung der notwendigen Daten für die Bewertung der einzelnen Lebenswegabschnitte einen großen Aufwand bedeutet und viel Zeit in Anspruch nehmen kann.⁵¹ Dokumentation, Transparenz und Kontrolle sind im Speziellen bei der Datenerhebung, aber auch generell während der gesamten Durchführung von Lebenszyklusbewertungen von großer Bedeutung.

Arten von Ökobilanzen

Da sich diese Arbeit auf die Ökobilanz des Produkts 3D-Drucker bezieht, konzentriert sie sich folglich auf Produktökobilanzen. Des Weiteren wird aber auch, je nach betrachtetem Bilanzraum und Untersuchungsgegenstand, zwischen folgenden Typen von Ökobilanzen unterschieden:⁵²

- Prozessökobilanzen
- Betriebs- bzw. Standortökobilanzen
- Ökobilanzen für Regionen

Neben den oben genannten „klassischen“ Ökobilanzen gibt es weitere Methoden, die einen ähnlichen methodischen Ansatz verfolgen, darüber hinaus aber auch andere Nachhaltigkeitsaspekte (z. B. soziale und ökonomische Faktoren) miteinbeziehen:⁵³

- Social LCA
- Ökoeffizienz-Analyse
- SEEBALANCE

⁵¹ (vgl. Schmidt and Schorb, 2013, S. 121).

⁵² (vgl. Stahl, 1998, S. 5f).

⁵³ (vgl. Kaltschmitt and Schebek, 2015, S. 208).

Außerdem können noch Unterscheidungen bzgl. des Untersuchungsrahmens getroffen werden (angeführt in den gebräuchlicheren englischen Ausdrücken).⁵⁴

- Cradle-to-grave
- Well-to-wheel
- Farm (field)-to-fork
- Cradle-to-gate
- Gate-to-gate
- Cradle-to-cradle

Dabei ist aber zu erwähnen, dass es sich bei den letzten drei Arten (cradle-to-gate, gate-to-gate und cradle-to-cradle) genau genommen um keine Lebenszyklusbewertungen mehr handelt, da Ausgrenzungen bzw. Erweiterungen einzelner Lebensabschnitte stattfinden.

Die hier genannten Unterscheidungsmöglichkeiten sollen die Vielfalt der vorhandenen Ökobilanz-Typen verdeutlichen. Jedoch besteht bei den oben dargelegten Varianten von Ökobilanzen, u. a. aufgrund der permanenten Weiterentwicklung oder bspw. der Möglichkeit von Hybrid-Ökobilanzen (Kombination mehrerer Varianten), kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Normung und wichtige Eigenschaften

Wie bereits angedeutet, kann die Methode der Lebenszyklusbewertung für ein breites Spektrum von Anwendungen herangezogen werden. Die individuelle Nutzung, Anpassung und Ausführung der Ökobilanz für alle potentiellen Anwendungen basiert auf den Normen ISO 14040 und ISO 14044.⁵⁵ Die Norm ISO 14040 beschreibt dabei die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz und die Norm ISO 14044 legt die Anforderungen fest und liefert Anleitungen für die Erstellung der Lebenszyklusbewertung.

Eine Ökobilanzstudie umfasst gemäß ISO 14040 vier Phasen.⁵⁶

⁵⁴ (vgl. Filimonau, 2016, S. 23ff).

⁵⁵ (vgl. Finkbeiner et al., 2006, S. 84).

⁵⁶ (vgl. DIN EN ISO 14040:2009, S. 4ff).

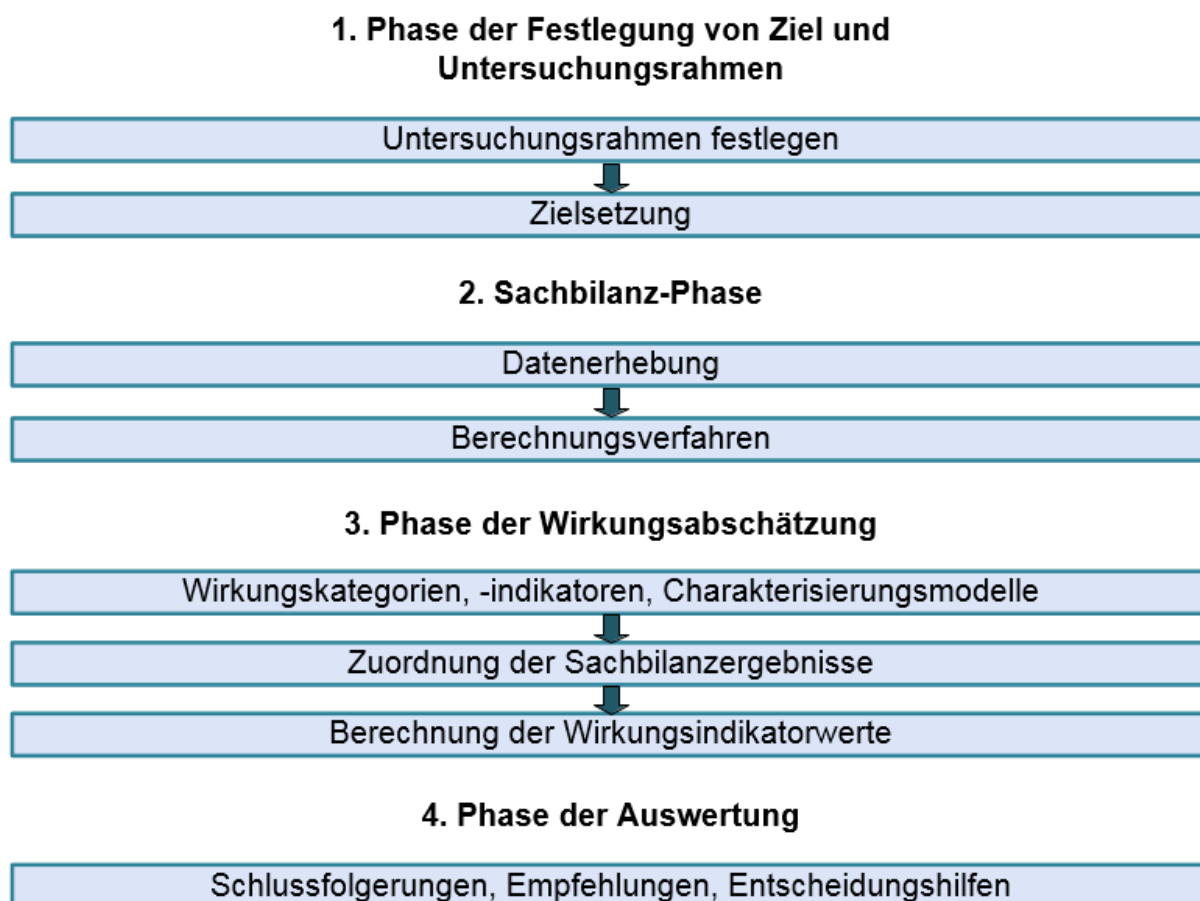


Abbildung 7: Phasen einer Ökobilanz

1. Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen beinhaltet neben der Systemgrenze auch den Detaillierungsgrad einer Ökobilanz und hängt dabei vom Untersuchungsgegenstand und von der vorgesehenen Anwendung der Studie ab. Wie vorher bereits erwähnt, können Breite und Tiefe von Ökobilanzen je nach Zielsetzung beträchtlich schwanken. Das Ziel einer Ökobilanz enthält dabei folgende Punkte:

- Beabsichtigte Anwendung,
- Gründe für die Durchführung der Studie,
- angesprochene Zielgruppe,
- ob die Ergebnisse für die Verwendung in vergleichenden Aussagen bestimmt sind oder nicht.

Der Untersuchungsrahmen gibt Folgendes an:

- zu untersuchendes Produktsystem,
- Funktionen des Produktsystems/ -systeme,
- funktionelle Einheit,
- Systemgrenze,
- Allokationsverfahren,

-
- ausgewählte Wirkungskategorien und Methode für die Wirkungsabschätzung und die anschließende Auswertung,
 - Anforderungen an die Daten,
 - Annahmen,
 - Einschränkungen,
 - anfängliche Anforderungen an die Datenqualität,
 - Art der kritischen Prüfung, falls vorgesehen,
 - Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts.

2. Sachbilanz-Phase

Die Erstellung der Sachbilanz ist die Bestandsaufnahme von Input-/ Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System. Dazu gehört die Sammlung der Daten, die zum Erreichen der festgelegten Ziele der Studie notwendig sind. Die Daten können dabei Folgendes umfassen:

- Energie-Inputs, Rohstoff-Inputs, Betriebsstoff-Inputs und andere physikalische Inputs,
- Produkte, Koppelprodukte und Abfall,
- Emissionen in die Luft, Einleitungen in Wasser und Verunreinigungen des Bodens,
- weitere Umweltaspekte.

Im Anschluss an die Datenerhebung sind Berechnungsverfahren, inklusive

- der Validierung der gesammelten Daten,
- des Bezugs der Daten auf Prozessmodule und
- des Bezugs der Daten auf den Referenzfluss der funktionellen Einheit,

notwendig.

Der Ablauf einer Sachbilanz wird in nachstehender Abbildung genauer gezeigt.

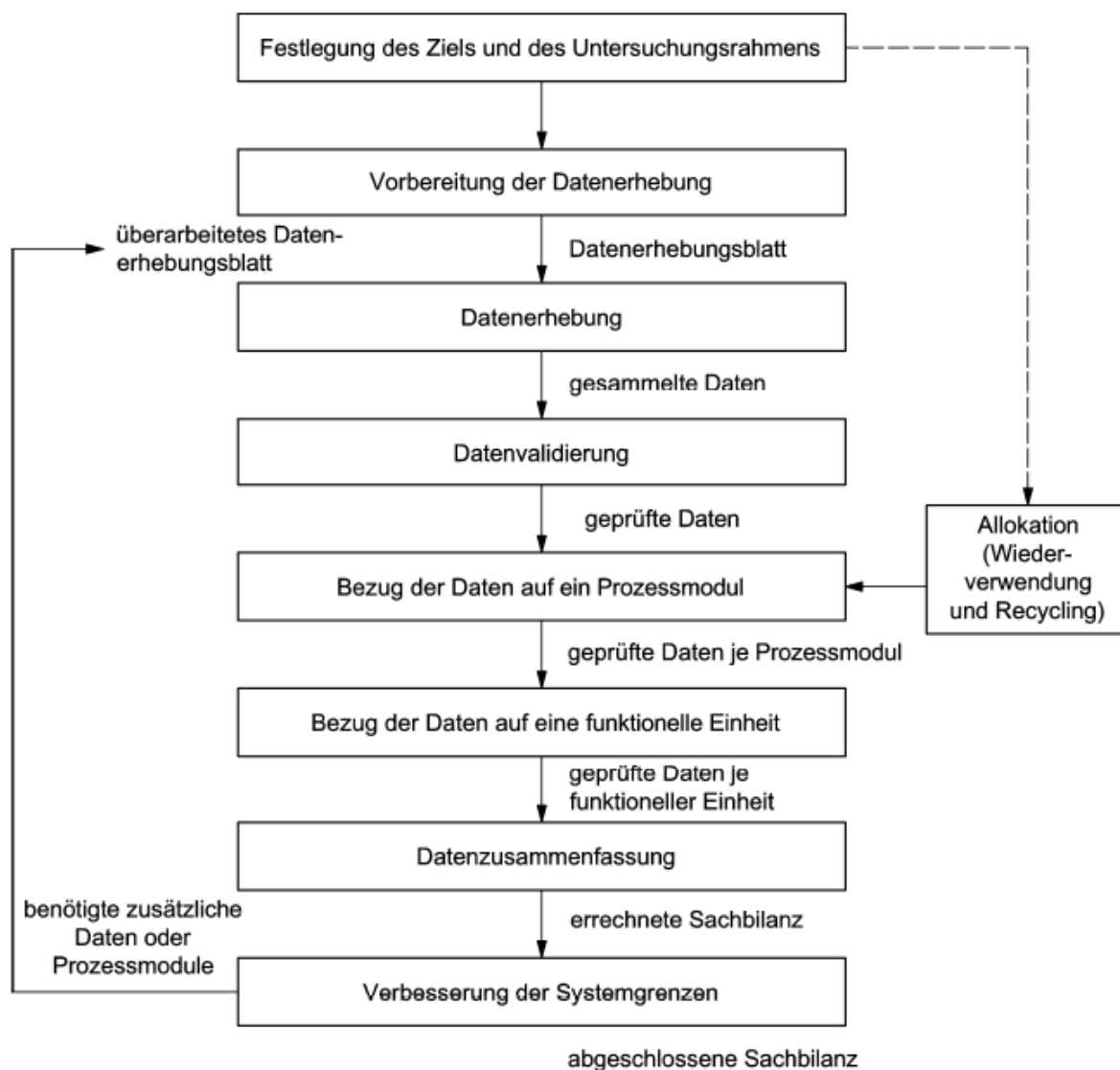


Abbildung 8: Ablauf einer Sachbilanz⁵⁷

In der Darstellung ist gut zu erkennen, dass es sich bei der Erstellung der Sachbilanz durchaus um einen iterativen Prozess handeln kann.

3. Phase der Wirkungsabschätzung

Die Bereitstellung zusätzlicher Informationen zur Unterstützung der Einschätzung der Sachbilanzergebnisse, um deren Umweltrelevanz besser zu verstehen, ist Zweck der Wirkungsabschätzung. Die Bestandteile der Wirkungsabschätzungsphase lauten wie folgt:

- Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen,
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse,
- Berechnung der Wirkungsindikatorwerte,

⁵⁷ (DIN EN ISO 14044:2006, S. 25).

- Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.

Die folgende Darstellung zeigt, dass der Wirkungsindikator frei zwischen den Sachbilanzergebnissen und Wirkungsendpunkten entlang des gesamten Umweltwirkungsmechanismus gewählt werden kann.

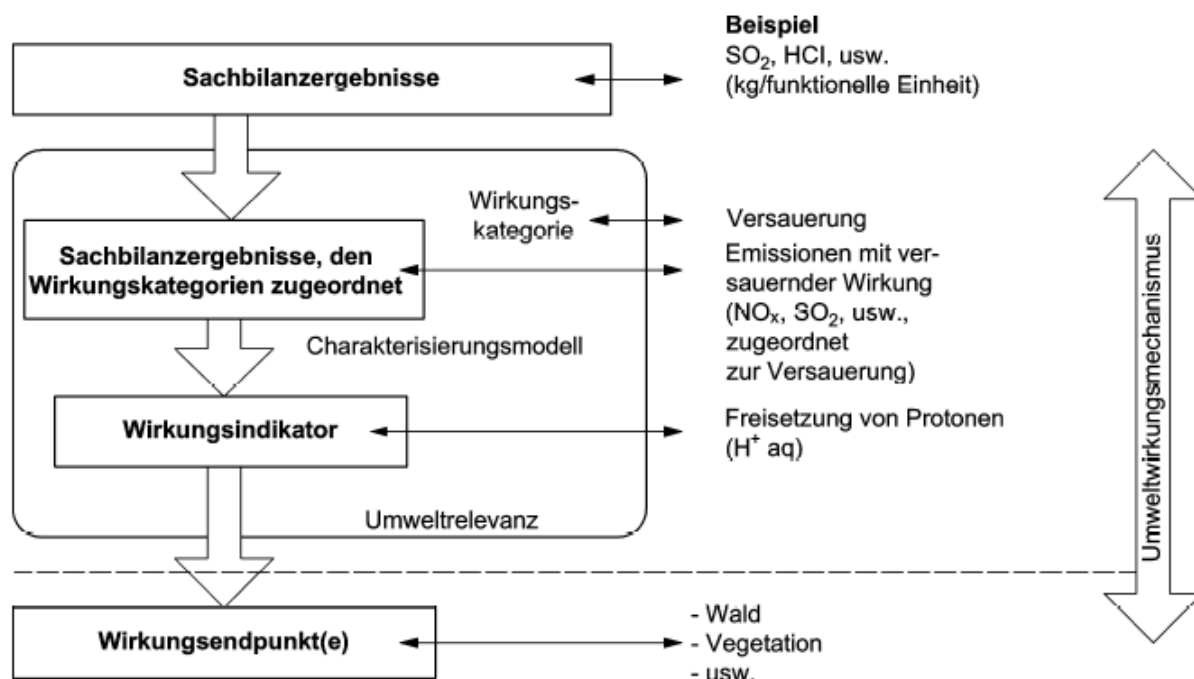


Abbildung 9: Wirkungsabschätzung⁵⁸

Zu beachten ist, dass die Wirkungsabschätzung lediglich jene Themen behandelt, die im Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt sind. Folglich stellt die Wirkungsabschätzung keine vollständige Bewertung aller Umweltaspekte des untersuchten Systems dar.

4. Phase der Auswertung

In der abschließenden Phase der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beider, in Übereinstimmung mit der Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen der Studie, als Basis für Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfen diskutiert und zusammengefasst.

Vorgehensweise und Verwendung

Die Vorgehensweise bei der Erstellung einer Ökobilanz ist mit dem sukzessiven Arbeiten der oben beschriebenen Phasen mitsamt den notwendigen Arbeitsschritten definiert. Beim Bearbeiten der einzelnen Bestandteile der Ökobilanz ist empfehlenswert, sich an die Vorgaben und Anweisungen der Normen ISO 14040 und ISO 14044

⁵⁸ (DIN EN ISO 14044:2006, S. 36).

zu halten, um die vorgegebenen Ziele zu erreichen und ein dementsprechend zufriedenstellendes Ergebnis zu erlangen.

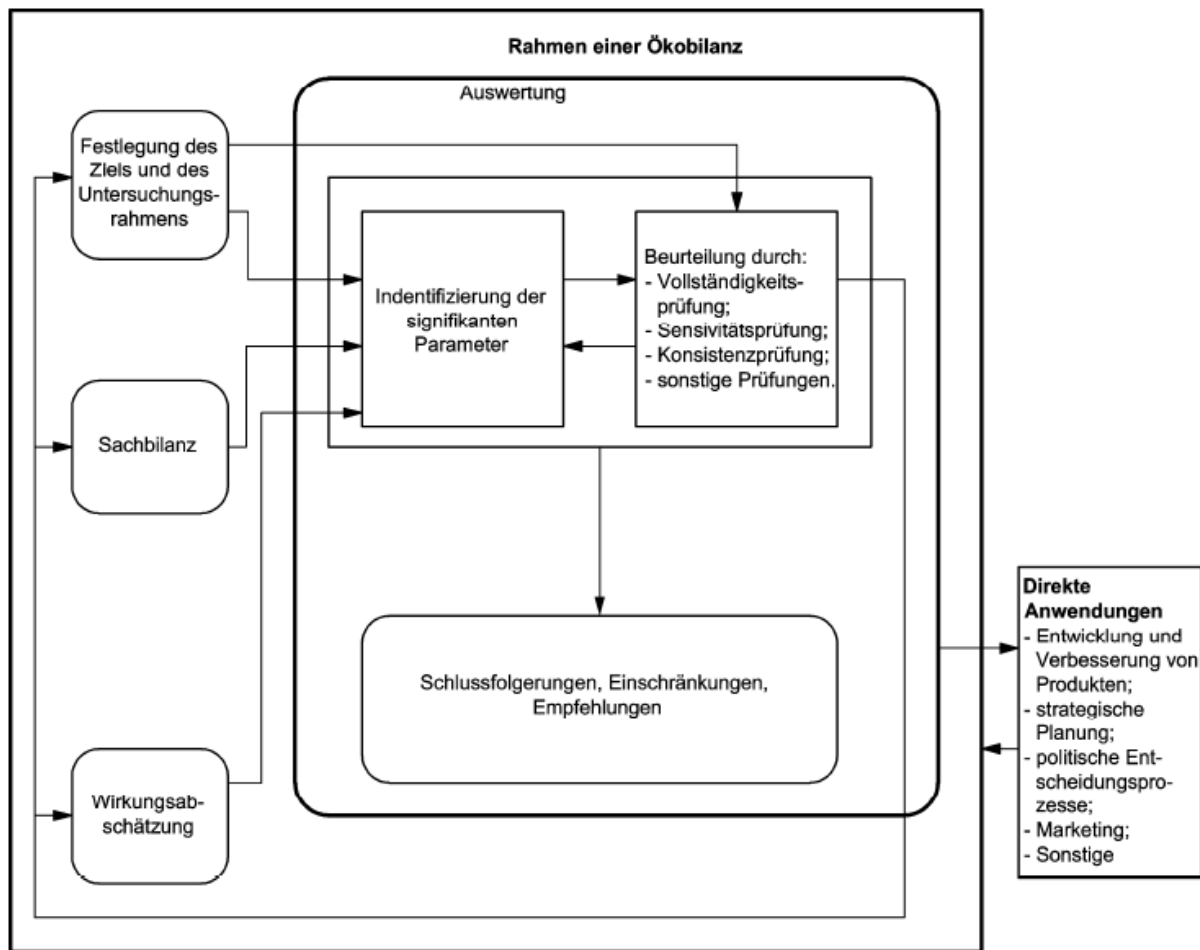


Abbildung 10: Beziehungen zwischen den Bestandteilen der Ökobilanz⁵⁹

Obige Abbildung verdeutlicht mit den dargestellten Pfeilen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bestandteilen einer Ökobilanz. Dabei kann man erkennen, dass die Erstellung einer Lebenszyklusbewertung ein wiederholender Prozess mit Vervollständigungen, Verbesserungen und Anpassungen sein kann.

Die nachstehende Tabelle soll verdeutlichen wofür Ökobilanzen verwendet bzw. nicht verwendet werden können.⁶⁰

Die Methode der Ökobilanz ist geeignet für	Die Methode der Ökobilanz ist nicht geeignet für
die Informationsbereitstellung bzgl. der gesamten über den kompletten Lebenszyklus hinweg entstehenden Umweltbelastung,	das Feststellen und Bewerten von Umweltauswirkungen von bestimmten Produktionsstätten auf ein konkretes Gebiet,
das Aufzeigen der Umweltrelevanz verschiedener Abschnitte und Bereiche des	das Ermitteln und Bewerten des von einem Produkt unter definierten räumli-

⁵⁹ (DIN EN ISO 14044:2006, S. 47).

⁶⁰ (vgl. Schmidt and Schorb, 2013, S. 122).

Lebensweges,	chen und zeitlichen Umweltbedingungen ausgehenden Risikos für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit,
das Hervorheben umweltbezogener Verbesserungspotentiale,	das Aufzeigen von unbekanntem Umwelteinwirkungen.
vergleichbare Studien bzgl. umweltbezogener Vor- und Nachteile von Produkt- oder Dienstleistungssystemen mit vergleichbarer Verwendung,	
Marketingzwecke (z. B. Hilfestellung beim Einführen von Umweltkennzeichnungen oder Umweltdeklarationen).	

Tabelle 4: Verwendung von Ökobilanzen

Die Lebenszyklusbewertung kann also für ein breites Spektrum von Anwendungen herangezogen werden, wobei auch die oben gezeigten Grenzen der Methode zu beachten sind.

2.2.8 Umweltfußabdruck (PEF)

Um die Vergleichbarkeit von Umweltbewertungsstudien zu verbessern, entwickelte die Gemeinsame Forschungsstelle der EU-Kommission die PEF (Product Environmental Footprint)-Methode, welche auf dem Lebenszyklus-Ansatz, wie er in den Normen der ISO 14040 und ISO 14044 formuliert ist, basiert. Beim Umweltfußabdruck wird der Leitsatz „Vergleichbarkeit über Flexibilität“ verfolgt. Das bedeutet, dass die Flexibilität der ISO 14040 und ISO 14044 durch bestimmte methodische Regeln eingeschränkt wird, um so eine bessere umweltbezogene Vergleichbarkeit von Produkten zu erreichen.^{61 62} Die PEF-Methode wurde 2013 veröffentlicht und befindet sich derzeit noch in einer Pilotphase, in der die Methode getestet und spezifische Produktkategorieregeln (PEFCRs – product environmental footprint category rules) entwickelt werden. Dafür werden in 26 Pilotprojekten verschiedene Entwicklungsschritte durchgeführt.⁶³ Aktuell gibt es aber auch durchaus kritische Stimmen, die an einer nachhaltigen Durchsetzung der Methode aufgrund zahlreicher methodischer und praktischer Herausforderungen und Schwächen zweifeln.^{64 65}

Wichtige Eigenschaften und Vorgehensweise

Die Methode des Umweltfußabdrucks bewertet ein Produkt auf Basis mehrerer Kriterien über den gesamten Lebenszyklus und kann durchaus, bis auf einige Modifikationen, mit der Ökobilanz nach ISO 14044 verglichen werden. Um die Ergebnisse für

⁶¹ (vgl. Lehmann, Bach, and Finkbeiner, 2016, S. 83).

⁶² vgl. <https://www.wko.at/service/umwelt-energie/> (18.03.2018)

⁶³ vgl. <http://ec.europa.eu/environment/> (18.03.2018)

⁶⁴ (vgl. Finkbeiner, 2014, S. 270).

⁶⁵ (vgl. Lehmann, Bach, and Finkbeiner, 2016, S. 84).

Produktvergleiche nutzen zu können gibt es in einigen Punkten eben auch Abweichungen. Diese umfassen u. a. die Anforderungen hinsichtlich der Datenqualität (z. B. Allokationsregeln), die Wirkungskategorien, die über den gesamten Produktlebenszyklus zu betrachten sind oder die Bewertungsmethoden für die Wirkungsabschätzung. Auch die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien sind strikt festgelegt.⁶⁶ Einen Vergleich von unterschiedlichen Umweltbewertungsmethoden mit der PEF-Methode bietet Manfredi et al. (2015), wo neun Kernfragen in Bezug auf die betrachteten Methoden beantwortet werden.

Um die methodische Vereinheitlichung, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Studien innerhalb einer Produktkategorie zu gewährleisten, bietet die PEF-Methode die sogenannten PEFCRs, welche die PEF-Studie für ein Produkt aus einer bestimmten Produktkategorie auf die wichtigsten Parameter fokussieren sollen. Dies hilft Zeit, Aufwand und Kosten zu sparen.⁶⁷ Dafür wird in diesen Produktkategorieregeln bspw. für definierte Produktgruppen festgehalten, welche Wirkungskategorien in einem bestimmten Fall nicht berücksichtigt werden müssen, da sie auf das Ergebnis der Studie keinen Einfluss haben.

Da die Entwicklungs-, Test- und Verbesserungsphase der Umweltfußabdruckmethode bis dato noch nicht abgeschlossen ist, lassen sich über die genaue Vorgehensweise bei der Methode und über die zu berücksichtigenden spezifischen PEFCRs noch keine finalen und haltbaren Aussagen treffen, wobei 2012 ein PEF-Guide⁶⁸ von der Europäischen Kommission veröffentlicht wurde.⁶⁹

Verwendung

Die von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission entwickelte PEF-Methode soll vor allem dazu verwendet werden, Produkte innerhalb einer Produktkategorie möglichst effizient und aussagekräftig vergleichen zu können.⁷⁰ Wie vorher bereits beschrieben, wird die Umweltfußabdruckmethode derzeit hauptsächlich in Pilotprojekten verwendet. Ob sie sich dann auf Dauer durchsetzen kann, stellen einige Studienautoren in Frage.

2.2.9 Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)

Das MIPS Konzept wurde von Friedrich Schmidt-Bleek entwickelt und basiert auf der Idee des „ökologischen Rucksacks“, welcher als Metapher für die Belastung natürlicher Ressourcen durch ein Objekt gesehen wird.⁷¹ MIPS ist eine standardisierte Me-

⁶⁶ vgl. <https://www.wko.at/service/umwelt-energie/> (18.03.2018)

⁶⁷ (vgl. Manfredi et al., 2015, S. 391).

⁶⁸ (vgl. European Commission JRC, 2012).

⁶⁹ vgl. <http://ec.europa.eu/environment/> (18.03.2018)

⁷⁰ (vgl. Ojala et al., 2016, S. 1092).

⁷¹ (vgl. Liedtke et al., 2014, S. 547).

thode, welche aussagekräftige, sinnvolle und wiederholbare Informationen über den gesamten Materialverbrauch eines bestimmten Produkts oder einer bestimmten Dienstleistung bereitstellt. Dabei werden alle Material-Inputs über den gesamten Lebenszyklus („cradle-to-grave“), das heißt die Gesamtmasse aller Materialflüsse, berücksichtigt und auf eine bestimmte Referenz, die sogenannte Serviceeinheit, bezogen. Dies erlaubt, dass unterschiedliche Produkte mit gleicher Funktion miteinander verglichen werden können.⁷²

$$MIPS = \frac{MI}{S} = \frac{\text{Material Input}}{\text{Serviceeinheit}}$$

Formel 1: Material-Input pro Serviceeinheit

Wichtige Eigenschaften und Vorgehensweise

Das MIPS Konzept basiert grundlegend auf der Überlegung, dass Material- und Energieinputs in die Produktion und in das Konsumsystem schlussendlich in Outputs mit Folgen für die Umwelt (z. B. Klimawandel, Eutrophierung oder Versauerung) umgewandelt werden. Die MIPS Methode ist also, im Gegensatz zu output-orientierten Methoden wie der Ökobilanz nach ISO 14040/44, ausschließlich input-orientiert.^{73 74} Dem liegt also die Auffassung zugrunde, dass die möglichen Umweltwirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung anhand des lebenszyklusweiten Material-Inputs bewertet werden können: Je weniger Rohstoffe eingesetzt werden, umso weniger Umweltschäden entstehen.⁷⁵ Im Gegensatz zu anderen Umweltbewertungsmethoden führt das MIPS-Konzept also keinen Vergleich von unterschiedlichen Wirkungskategorien bereits bekannter Umweltwirkungen durch.

Die Material-Inputs werden bei der MIPS-Methode in fünf Hauptkategorien eingeteilt und je Kategorie separat berechnet. Folgende Tabelle zeigt die Einteilung und die dazugehörigen Materialien:⁷⁶

Abiotische Rohstoffe	Mineralische Rohstoffe, fossile Energieträger, nicht verwertete Rohförderung (z. B. Abraum), bewegte Erde;
Biotische Rohstoffe	Pflanzliche Biomasse aus Bewirtschaftung, Biomasse aus nicht bewirtschafteten Bereichen;
Bodenbewegung in Land- und Forstwirtschaft	Mechanische Bodenbearbeitung, Erosion;
Wasser	Oberflächenwasser, Grundwasser, Tiefengrundwasser;
Luft	Verbrennung, chemische Umwandlung,

⁷² (vgl. Spangenberg et al., 1999, S. 7f).

⁷³ (vgl. Liedtke et al., 2014, S. 547).

⁷⁴ (vgl. Wiesen, Saurat, and Lettenmeier, 2014, S. 357).

⁷⁵ (Ritthoff, Rohn, and Liedtke, 2002, S. 11).

⁷⁶ (vgl. Spangenberg et al., 1999, S. 10).

physikalische Veränderung;

Tabelle 5: Hauptkategorien der Material-Inputs bei der MIPS-Methode

Die sogenannten MI-Faktoren erleichtern die Berechnungen des Material-Inputs bei allgemein gehandelten Stoffen (z. B. Stahl, Aluminium, Beton, Kunststoff etc.), da diese Faktoren die Vorketten der verwendeten Materialien berücksichtigen. Sie werden auf der Homepage des Wuppertal Instituts regelmäßig aktualisiert und erweitert. Die Anwendbarkeit der MI-Faktoren ist jedoch beschränkt und situationsabhängig, da die Daten nicht für alle Umstände gelten.⁷⁷

Die Vorgehensweise bei der MIPS-Berechnung wird in folgender Abbildung dargestellt und anschließend erläutert:⁷⁸



Abbildung 11: Vorgehensweise bei einer MIPS-Berechnung

⁷⁷ (vgl. Ritthoff, Rohn, and Liedtke, 2002, S. 15f).

⁷⁸ (vgl. ebd., S. 17ff).

1. Definition von Ziel, Objekt und Serviceeinheit

Zu Beginn wird das Ziel der Analyse und der Berechnung sowie das betrachtete Objekt oder die betrachteten Objekte definiert. Auch die Serviceeinheit, welche alle wichtigen Nutzungsaspekte der Produkte widerspiegelt, wird hier festgelegt. Auf die Definition der Serviceeinheit kann verzichtet werden, wenn kein dienstleistungsfähiges Zwischenprodukt berechnet wird, Produkte nicht verglichen werden sollen oder die zu vergleichenden Produkte ohnehin die gleiche Dienstleistung erbringen.

2. Darstellung der Prozesskette

Im zweiten Schritt wird eine Prozesskette oder ein System von Prozessketten festgelegt, wo klar ausgeführt ist, welche Prozesse zur Herstellung eines Produkts notwendig sind.

3. Datenerhebung

Ziel der Datenerhebung ist es, eine Übersicht über die stofflichen und energetischen In- und Outputs der einzelnen Prozesse bei der Herstellung eines Produkts und den daran anschließenden Dienstleistungen zu erhalten. Eine Überprüfung der Vollständigkeit und Schlüssigkeit der Daten wird durchgeführt und etwaige Datenlücken werden geschlossen.

4. Berechnung des Material-Inputs „cradle-to-product“

Hier wird der Material-Input pro Produkt berechnet. Diese Berechnungen werden mittels sogenannter Material-Intensitäten durchgeführt und dazu können unterschiedliche Hilfsmittel verwendet werden.⁷⁹

5. Berechnung des Material-Inputs „cradle-to-grave“

Zusätzlich zu den Ressourcenverbräuchen bis zum Produkt, die in Schritt 4 berechnet wurden, werden an dieser Stelle die Ressourcenverbräuche in den Phasen der Nutzung und der Entsorgung ermittelt und mit dem Ergebnis von vorher addiert. Somit erhält man den Material-Input bei angenommener Nutzung über alle Lebensphasen.

6. Von MI zu MIPS

Mit diesem Schritt erhält man den MIPS-Wert, mit welchem schließlich Vergleiche von unterschiedlichen Produkten mit gleicher Funktion angestellt werden können. Dazu wird das Ergebnis aus Punkt 5 auf die festgelegte Serviceeinheit bezogen (Formel 1).

⁷⁹ vgl. <https://wupperinst.org/> (19.03.2018)

Die Durchführung einer MIPS-Berechnung kann grundsätzlich manuell oder mit Hilfe von geeigneten Computerprogrammen durchgeführt werden.

7. Interpretation der Ergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und interpretiert. Dabei werden bspw. bevorzugte Alternativen ermittelt, besonders materialintensive Prozesse auffindig gemacht und/oder geeignete Optimierungsstrategien gewählt.

Verwendung

Wie bereits erwähnt wird die MIPS-Methode vorwiegend verwendet, um unterschiedliche Produkte mit gleicher Funktion zu vergleichen und Prozessketten im Hinblick auf den Material-Input zu optimieren. Die Optimierung bzw. Reduktion des Material-Inputs hilft dabei gleichzeitig die bekannten und auch unbekanntes negativen Umweltwirkungen zu minimieren. Dies führt zu einem optimierten Ressourcen-Input-Management. Mit Hilfe der MIPS-Methode können die Komplexität und die Ungewissheiten der Output-orientierten Bewertungsmethoden reduziert bzw. umgangen werden.⁸⁰

2.2.10 MET (Materials-Energy-Toxicity)-Matrix und ABC-Methode

Die beiden qualitativen Methoden werden an dieser Stelle näher betrachtet. Diese Bewertungsinstrumente dienen der qualitativen Umweltbewertung und lassen grobe Abschätzungen sowie Beschreibungen des zu bewertenden Systems zu.^{81 82}

MET-Matrix

Die MET-Matrix wird verwendet, um eine Bestandsaufnahme der einflussreichsten Umweltaspekte eines Produkts mit wenig Aufwand bereitzustellen. Die Matrix bildet dabei ein qualitatives Input-Output Modell über den gesamten Produktlebenszyklus ab.⁸³ Im Allgemeinen kann anhand der Materials-Energy-Toxicity-Matrix ein guter umweltbezogener Überblick über ein Produkt geschaffen werden, selbst wenn nur vage Daten vorliegen.⁸⁴

In folgender Tabelle wird eine MET-Matrix veranschaulicht.⁸⁵

	Materials	Energy	Toxicity
Verwendung von Rohmaterialien	Für das Produkt verwendete Rohmaterialien;	Energieaufwand für Rohstoffgewinnung, Transporte;	Giftige Abfälle durch die Rohstoffgewinnung;

⁸⁰ (vgl. Liedtke et al., 2014, S. 547f).

⁸¹ (vgl. Schwarz, 2014, S. 394).

⁸² (vgl. Kunnari et al., 2009, S. 794).

⁸³ (vgl. Van Berkel, Willems, and Lafleur, 1997, S. 14).

⁸⁴ (vgl. Wimmer et al., 2008, S. 85).

⁸⁵ (vgl. Szendiuch, 2007, S. 6).

Herstellung	Hilfsmaterialien (Schmierstoffe, Reinigungsmaterial);	Energieverbrauch der Herstellungsprozesse;	Giftige Produktionsabfälle, Rückstände;
Distribution	Kraftstoffe für den Transport, Verpackungsmaterial;	Energieverbrauch für die Verpackungsherstellung, Transport;	Verpackungsabfälle, Emissionen durch den Transport;
Verwendung	Verbrauchsmaterialien, Hilfsmaterialien;	Energieverbrauch während der Verwendung;	Abfälle durch Verbrauchsmaterialien und Ersatzteile;
End of Life	Verwendete Roh- und Hilfsmaterialien für die EoL-Behandlung;	Energieverbrauch der EoL-Prozesse;	Giftige Abfälle des Produkts, Verbrennung, Deponie, Recycling;

Tabelle 6: MET-Matrix

Die MET-Matrix wird u. a. verwendet, um die benötigten Informationen bspw. für eine quantitative Lebenszyklusbewertung herauszustreichen.⁸⁶

ABC-Methode

Diese Methode wurde ursprünglich nicht für den Zweck einer ökologischen Bewertung entwickelt, sondern stammt aus der Materialwirtschaft und wurde für umweltrelevante Fragestellungen angepasst. Die ABC-Methode dient u. a. zum Aufzeigen umweltrelevanter Schwachstellen, wobei hier die Bewertung von betriebsspezifischen Anforderungen und den aktiv Beteiligten (subjektiv) abhängt.⁸⁷ Hier wird also eine grundlegende Sortierung nach Umweltrelevanz von einzelnen Bauteilen oder Materialien eines Produkts vorgenommen.

Die Bewertung erfolgt dabei mittels der Einteilung in die Kategorien A, B und C.⁸⁸

- **A-Einstufung:** Diese Bauteile bzw. Materialien sind sehr relevant bzgl. ihrer ökologischen Auswirkungen – akuter Handlungsbedarf.
- **B-Einstufung:** Diese Teile sind umweltrelevant, jedoch nicht in dem Ausmaß wie die A-Teile – mittelfristiger Handlungsbedarf.
- **C-Einstufung:** Hier liegen nach vorhandenem Kenntnisstand nur geringe oder keine Umweltbeeinträchtigungen vor – kein Handlungsbedarf.

Wie auch die MET-Matrix kann die ABC-Methode als alleinstehende, qualitative und oft mit geringem Aufwand umsetzbare Bewertungsmethode eingesetzt werden. Hauptsächlich dienen diese Methoden aber als Vorstufe bzw. Unterstützung für eine übergeordnete quantitative Umweltbewertung.

⁸⁶ (vgl. Kunnari et al., 2009, S. 794).

⁸⁷ (vgl. Tschandl and Posch, 2012, S. 108).

⁸⁸ (vgl. Schwarz, 2014, S. 394).

2.2.11 Zusammenfassende Darstellung und Auswahl einer geeigneten Methode für die Bewertung des 3D-Druckers

Methode	Anwendungsbereich	Zweck	Adressat
Risikoabschätzung	Prozesse, Produkte, Funktionen, Projekte, FMEA;	Entscheidungsfindung, Identifikation, Quantifizierung und Bewertung von Risiken;	Öffentlichkeit, Unternehmen;
UVP	Vorhaben, unter Umständen auch Produkte, Projekte;	Entscheidungsvorbereitung/ -hilfe;	Hauptsächlich Behörde;
UMS	Produkte, Prozesse, Verfahren, Dienstleistungen;	Umwelttechnische und wirtschaftliche Optimierung, Umweltschutzmanagementgesamt-konzept;	Unternehmen, Politik;
TA	Technik, Produkte, Prozesse, Verfahren;	Entscheidungsvorbereitung/ -hilfe;	Hauptsächlich Politik, Öffentlichkeit;
LCA Produkte	Produkte, Dienstleistungen;	Produktvergleich, Schwachstellenanalyse, Verbesserungspotentiale aufzeigen, Informationsbereitstellung, Marketing;	Öffentlichkeit, Unternehmen;
PEF	Produkte, Dienstleistungen;	Hauptsächlich Produktvergleich innerhalb einer Produktkategorie, Informationsbereitstellung, Marketing;	Öffentlichkeit, Unternehmen;
MIPS	Produkte, Prozesse, Dienstleistungen;	Vergleich von Produkten oder Dienstleistungen, Schwachstellenanalyse, Verbesserungspotentiale aufzeigen;	Öffentlichkeit, Unternehmen;
MET-Matrix	Produkte	Qualitatives Aufzeigen von Umweltaspekten, Informationsbereitstellung;	Unternehmen;
ABC-Methode	Produkte (bezogen auf Umweltbewertung)	Qualitative Schwachstellenanalyse, Sortierung nach Umweltrelevanz,	Unternehmen;

		Informationsbereitstellung,	
--	--	-----------------------------	--

Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung der Methoden

In folgender Tabelle werden verschiedene Entscheidungskriterien angeführt und den Methoden zugeordnet. Die Kriterien ergeben sich dabei einerseits aus der Aufgabenstellung und andererseits aus Gesprächen mit den Stakeholdern (Pilotfabrik). Das Zutreffen des Kriteriums auf die jeweilige Methode wird mit 3 Punkten gewichtet. Ist keine eindeutige Aussage möglich, dann werden 2 Punkte vergeben. Trifft das Kriterium nicht zu, dann erfolgt die Gewichtung mit 1. Mit Hilfe dieser Übersicht wird eine Umweltbewertungsmethode für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik ausgewählt.

Methode	Kriterien										Summe
	Gesamter Produktlebenszyklus	Hohe Präzision/ Aussagekraft	Separate Bewertung der Lebensphasen	Mehrere Wirkungskategorien	Hervorheben von Umweltrisiken	Erkennen von Schwachstellen	Quantitativ				
Risikoabschätzung	3	3	1	2	3	3	3	18			
UVP	2	2	3	3	2	2	2	16			
UMS	3	2	1	1	3	3	3	16			
TA	3	2	2	3	3	1	2	16			
LCA Produkte	3	3	3	3	2	3	3	20			
PEF	3	3	3	3	2	3	3	20			
MIPS	3	3	1	1	1	2	3	14			
MET-Matrix	3	1	1	1	2	2	1	11			
ABC-Methode	1	1	1	1	2	3	1	10			

Tabelle 8: Auswahltabelle für geeignete Methode

Die LCA- und die PEF-Methode wurden jeweils mit 20 Punkten gewichtet und erweisen sich in Bezug auf die herangezogenen Kriterien und somit für die Anwendung in dieser Arbeit als am geeignetsten. Da sich die PEF-Methode derzeit noch in einer Pilotphase befindet und noch nicht ausgereift scheint, wird der 3D-Drucker mit der Ökobilanz-Methode nach ISO 14040/44 bewertet (Kapitel 4). Bevor diese Bewertung erfolgt, wird jetzt auf vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern eingegangen.

3 Vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern

3.1 Literaturrecherche zu vorhandenen Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern

Die hier durchgeführte systematische Literaturrecherche zu vorhandenen Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern umfasst jene Arbeitsschritte, die in Punkt 2.1 bereits angeführt und beschrieben wurden. Die Suche nach vielversprechender Literatur erfolgte in mehreren Datenbanken und wird nachfolgend dokumentiert.

Definition der Fragestellung und Festlegung der Quellen

Die unten aufgelisteten Fragestellungen sollten mit Hilfe der Literaturrecherche beantwortet werden:

- Welche Verfahren bzw. Materialien des 3D-Drucks gibt es?
- Wurden bereits Umweltwirkungen von 3D-Druckern ermittelt?
- Wie wurden die Ergebnisse dieser Studien ermittelt und welche Aussagen wurden getroffen?

Die Suche nach relevanten Veröffentlichungen zu diesen Fragen wird in den Datenbanken Google Scholar, Science Direct, TU Wien CatalogPlus und Emerald Insight durchgeführt.

Erarbeitung der Suchstrategie

Die für die Suche verwendeten Begriffe werden direkt aus den oben angeführten Fragestellungen abgeleitet. Die Suchbegriffe lauteten wie folgt:

- „3D-Druck“
- „3D printing“
- „Umweltwirkung 3D-Drucker“
- „Environmental impact 3D printer“

Dokumentation der Literaturrecherche

Fester Bestandteil jeder systematischen Suche sollte außerdem die Dokumentation und das Berichten (Reporting) der Suche mit all ihren Komponenten sein. Eine Suche sollte darüber hinaus immer gründlich, objektiv und wiederholbar sein.⁸⁹ Die Dokumentation der Literaturrecherche in dieser Arbeit ist angelehnt an Läger et al. (2010) und umfasst die folgenden Punkte:

⁸⁹ (vgl. Läger et al., 2010, S. 4f).

- Angabe der benutzten Datenbank
- Angabe des Datums der Suche
- Angabe der benutzen Suchbegriffe
- Angabe der Suchstrategie (z. B. Boolesche Operatoren)
- Angabe der gesetzten Filter (z. B. Jahrgänge, Medium, usw.)
- Angabe der erhaltenen Einträge in der Datenbank

Die beschriebenen Punkte werden für alle benutzten Datenbanken abgearbeitet. Da die Datenbank Google Scholar bspw. auch auf die Datenbank von Science Direct zugreift, wird darauf geachtet, dass die besorgten Resultate den ursprünglichen Datenbanken zugeordnet werden.

Da die Suchmaschinen die Suchergebnisse nach Relevanz (Zitierhäufigkeit in anderen Publikationen, Erscheinungsdatum etc.) absteigend sortieren, wurden je Suchanfrage jeweils die ersten 50 Ergebnisse berücksichtigt.

Datenbank: Google Scholar

Die Suche wurde am 20.03.2018 durchgeführt.

	Suchbegriffe	Eingesetzte Operatoren	Gesetzte Filter	Anzahl Resultate	Ausgewählte Resultate
1	3D-Druck	“ “; ”	keine	1.650	6
2	3D printing	“ “; ”	keine	91.800	2
3	Umweltwirkung 3D-Drucker	keine	keine	14	1
4	Environmental impact 3D printer	“ “; “ “; ”	keine	1.030	5

Tabelle 9: 3D-Druck, Google Scholar

Datenbank: Science Direct

Die Suche wurde am 20.03.2018 durchgeführt.

	Suchbegriffe	Eingesetzte Operatoren	Gesetzte Filter	Anzahl Resultate	Ausgewählte Resultate
1	3D-Druck	“ “; ”	keine	11	2
2	3D printing	“ “; ”	keine	7.709	2
3	Umweltwirkung 3D-Drucker	keine	keine	0	0
4	Environmental impact 3D printer	“ “; “ “; ”	keine	133	3

Tabelle 10: 3D-Druck, Science Direct

Datenbank: TU Wien CatalogPlus

Die Suche wurde am 20.03.2018 durchgeführt.

	Suchbegriffe	Eingesetzte Operatoren	Gesetzte Filter	Anzahl Resultate	Ausgewählte Resultate
1	3D-Druck	“ “;	keine	218	1
2	3D printing	“ “;	keine	33.688	1
3	Umweltwirkung 3D-Drucker	keine	keine	0	0
4	Environmental impact 3D printer	“ “; “ “;	keine	77	1

Tabelle 11: 3D-Druck, TU Wien CatalogPlus

Datenbank: Emerald Insight

Die Suche wurde am 20.03.2018 durchgeführt.

	Suchbegriffe	Eingesetzte Operatoren	Gesetzte Filter	Anzahl Resultate	Ausgewählte Resultate
1	3D-Druck	keine	keine	9	0
2	3D printing	“ “;	keine	607	3
3	Umweltwirkung 3D-Drucker	keine	keine	0	0
4	Environmental impact 3D printer	“ “; “ “;	keine	11	0

Tabelle 12: 3D-Druck, Emerald Insight

Der Einsatz von anderen Operatoren neben “ “ brachte keine weiteren relevanten Vorteile bei der Recherche.

Da, wie oben beschrieben, je Suchanfrage maximal die ersten 50 Treffer berücksichtigt wurden, ergaben sich daraus 495 potentiell relevante Werke. Diese wurden einem Titel- bzw. in weiterer Folge einem Abstractscreening unterzogen und nach Ausschluss der doppelten oder irrelevanten Arbeiten wurden 27 Werke besorgt. Darunter sind 17 Publikationen, die sich mit der allgemeinen Frage des Verfahren bzw. der Materialien des 3D-Drucks beschäftigen und 10 bzgl. Studien zu Umweltwirkungen von 3D-Druckern bzw. 3D-Druck.

Die genaue Vorgehensweise bei der Identifikation von relevanten Veröffentlichungen wird in folgender Abbildung dargestellt.

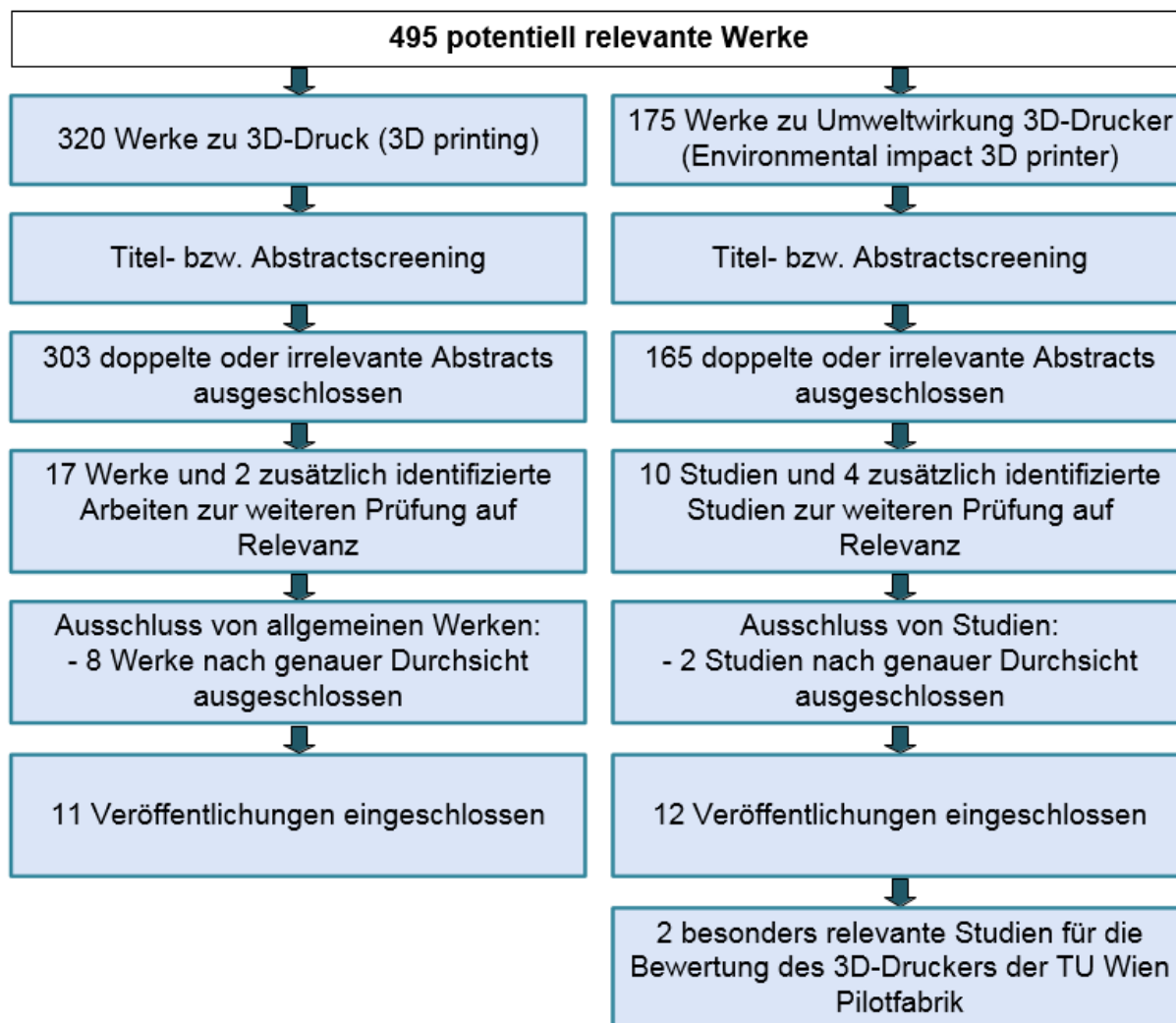


Abbildung 12: Identifikation von relevanten Veröffentlichungen

3.2 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

3.2.1 Allgemeines über Verfahren und Materialien des 3D-Drucks

3D-Druck ist ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von hauptsächlich Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. 3D-Druck ist ein so genanntes generatives Fertigungsverfahren, was bedeutet, dass die Fertigung auf Basis von rechnerinternen Datenmodellen erfolgt. Häufig spricht man auch von Additive Manufacturing in Zusammenhang mit 3D-Druck. So werden Herstellungsverfahren genannt, bei denen kein Material abgetragen wird, sondern das Bauteil im schichtweisen Aufbau aus vorher bspw. flüssigem oder pulverartigem Material erzeugt wird. Das funktioniert so, dass die Schichten entweder durch Verkleben oder Verschweißen auf die jeweils vorherige Schicht aufgebracht werden. Vorteilhaft ist dabei, dass

nahezu alle beliebigen Objektformen möglich sind und Hinterschneidungen oder die Ausformbarkeit bei der Konstruktion nicht berücksichtigt werden müssen.^{90 91}

Verwendung findet die Technik des 3D-Drucks in den Bereichen der Medizintechnik (z. B. Herstellung von Zahnersatz, Hörgeräten, Gelenk-Implantaten), der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Architektur und der Elektrotechnik. Ein weiterer Anwendungsbereich kann die Produktion von Ersatzteilen direkt vor Ort sein, wobei die benötigten Daten für den 3D-Drucker online von der Unternehmenshomepage heruntergeladen werden und das Bauteil gedruckt werden kann.⁹² Dadurch können unter anderem Transportwege im Vergleich zu klassischen Produktionsverfahren eingespart werden, jedoch können unter Umständen Herausforderungen für den Bereich des Copyrights und des Patentrechts durch die 3D-Druck-Technik entstehen.⁹³

Auch für private Verwender von 3D-Druckern ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten. So können neben Produkten für den Eigengebrauch auch eigene Erfindungen, die für den Verkauf gedacht sind, hergestellt werden. Internet, Online-Plattformen oder soziale Netzwerke können dabei unterstützen. Solche Ansätze führen gegenwärtig bspw. zur Entwicklung des sogenannten „Maker Movements“, dessen Akteure sich neue Technologien aneignen, alternative Möglichkeiten dezentraler und personalisierter Produktion erschließen und Herstellungsformen wie „Do-it-yourself“ bzw. „Do-it-with-others“ etablieren.^{94 95 96}

Vom CAD-Modell zum 3D-Objekt

Der 3D-Druck-Prozess beginnt im Allgemeinen mit einem 3D-Modell des herzustellenden Objekts. Dieses 3D-Modell wird üblicherweise mit Hilfe einer CAD-Software oder eines Scans erzeugt. Im Anschluss zerschneidet eine spezielle Software dieses Modell in einzelne Querschnittsschichten und sendet eine dabei entstandene Datei zum 3D-Drucker. Dieser stellt dann das Objekt mittels schichtweisem Aufbau her.⁹⁷ Die zahlreichen unterschiedlichen Technologien dieses Herstellungsverfahrens werden nachstehend aufgezeigt. Abschließend wird das gedruckte Objekt noch häufig nachbehandelt, um bspw. Oberflächenbehandlungen oder die Entfernung von etwagem Stützmaterial durchzuführen.⁹⁸

⁹⁰ (vgl. Fastermann, 2014, S. 11f).

⁹¹ (vgl. Kollenberg, 2014, S. 234).

⁹² (vgl. Lachmayer, Lippert, and Fahlbusch, 2016, S. 2).

⁹³ (vgl. Gebler, Schoot Uiterkamp, and Visser, 2014, S. 166).

⁹⁴ (vgl. Fastermann, 2014, S. 4f).

⁹⁵ (vgl. Isenburg, 2013, S. 24f).

⁹⁶ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 15).

⁹⁷ (vgl. Zhai, Lados, and LaGoy, 2014, S. 808).

⁹⁸ (vgl. Campbell, Williams, Ivanova, Garrett, 2011, S. 3).



Abbildung 13: 3D-Druck-Prozess⁹⁹

3D-Druck-Technologien

Wie oben schon erwähnt sind bei vielen 3D-Druckverfahren Stützmaterialien notwendig, die es ermöglichen, dass komplizierteste Formen von Objekten hergestellt werden können. Stützmaterialien sind meist gelartig oder pulverförmig und müssen nach dem Druckvorgang vom Bauteil entfernt werden. Die Abweichungen der 3D-gedruckten Objekte sind je nach verwendeter Technologie oft größer als bei Objekten, welche mit anderen Verfahren (z. B. Spritzguss) hergestellt wurden. Das heißt, dass 3D-Druck gewisse Toleranzen hat, die bei der Weiterverwendung der Bauteile berücksichtigt werden müssen.

Grundsätzlich lassen sich die üblichen 3D-Druck-Verfahren in das Sinter- oder Pulverdruckverfahren, das Drucken mit extrudierten Baumaterialien und das Stereolithographie-Verfahren einteilen. In folgender Tabelle werden repräsentative 3D-Druck-

⁹⁹ <https://www2.deloitte.com> (15.02.2018)

Technologien mit den dazugehörigen Eigenschaften und Werkstoffen vorgestellt:¹⁰⁰
101 102 103

Technologie	Eigenschaften	Werkstoffe
3D-Drucken mit Pulver (3DP)	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtweiser Aufbau mit zuvor pulverförmigem Material, • Druckköpfe, aus denen flüssiges Bindemittel geschossen wird, • Bindemittel verhält sich wie Klebstoff oder Härter und lässt Pulverkörner kristallisieren oder verkleben, • Pulverbett bewegt sich immer um eine Schicht nach unten, damit Objekt nach oben hin aufgebaut werden kann, • überschüssiges Pulver wird zum Teil wiederverwendet; 	Kunststoff-, Kalk- oder Glaspulver; Weitere pulverförmige Materialien (z. B. Keramik, Zellulose)
Selektives Lasersintern (SLS)	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtweises Versintern eines Pulverwerkstoffs, • Laser trifft auf Pulver, um dieses an definierten Stellen zu verschmelzen, • Partikel werden so durch den Laser an der Oberfläche verschmolzen, • Bauraum wird ständig um eine Schichtdicke gesenkt und dünne Pulverschicht wird auf vorheriger Schicht aufgetragen, • kein Stützmaterial, • überschüssiges Pulver teilweise wiederverwendbar; 	Thermoplaste (z. B. Polycarbonate, Polyamide, Polyvinylchlorid), Metalle, Keramiken, Sande;
Selective Heat Sintering (SHS)	<ul style="list-style-type: none"> • Statt Laser (SLS) wird ein thermischer Druckkopf verwendet, welcher das Bauteil schichtweise in ein vorgewärmtes Pulverbett zeichnet, • kein Stützmaterial; 	Thermoplastisches Kunststoff-Pulver;
Selektives Laserschmelzen (SLM)	<ul style="list-style-type: none"> • Materialpulver wird nicht gesintert, sondern lokal am Bearbeitungspunkt aufgeschmolzen, • sonst ähnlich zu SLS, • Aufbau von poren- und rissfreier Struktur; 	Metalle (z. B. Aluminium, Edel- und Werkzeugstahl, Titan), Kunststoffe, Keramiken;
Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	<ul style="list-style-type: none"> • Elektronenstrahl schmilzt schichtweise Metallpulver auf, • Elektronenstrahl wird dabei gelenkt, • hoher Wirkungsgrad des Elektronen- 	Metalle (z. B. Titan, Kobalt-Chrom);

¹⁰⁰ (vgl. Fastermann, 2014, S. 25ff).

¹⁰¹ (vgl. Duda and Raghavan, 2016, S. 103ff).

¹⁰² (vgl. Hofmann and Oettmeier, 2016, S. 85).

¹⁰³ (vgl. Ngo et al., 2018, S. 173ff).

	strahls, <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenqualität mit herkömmlichem Sandguss vergleichbar; 	
Fused Deposition Modeling (FDM)	<ul style="list-style-type: none"> • Drahtförmiges Kunststoff- oder Wachsmaterial wird knapp über Verflüssigungspunkt erhitzt und dann mit Hilfe eines Extruders und beweglicher, heißer Düse schichtweise auf bereits erstarrtes Material aufgetragen, • Oberflächenqualität in der Regel geringer als bei anderen Verfahren; 	ABS, PLA (biologisch abbaubar), Wachs; Experimente mit weiteren Materialien finden statt;
Multi-Jet Modeling (MJM)	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteil wird durch Druckkopf schichtweise aufgebaut, • ähnlich wie Tintenstrahldrucker, aber Druckkopf kann in zwei Richtungen verfahren, • Bauplattform wird nach jeder Schicht nach unten bewegt, • Material ist im Ausgangszustand flüssig und wird nach dem Auftragen mittels UV-Licht verfestigt; 	Wachsartige Thermoplaste, UVempfindliche Photopolymere;
Stereolithographie (STL/ SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Photopolymer wird von einem Laser in dünnen Schichten ausgehärtet, • flüssiges Kunststoffbad vorhanden, • Nach jeder Schicht wird ausgehärtetes Bauteil in die Flüssigkeit abgesenkt und so wird die Schichtstärke eingestellt, • glatte Oberflächen realisierbar; 	Flüssige Duromere (Epoxidharze, Acrylate), Elastomere;
Film Transfer Imaging (FTI)	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich dem Stereolithographie-Verfahren, • Material wird mittels Beamer verfestigt, • mittels Transportfolie wird das noch nicht vollständig ausgehärtete Material auf Bauplattform aufgebracht; 	Photopolymere;
Selective Deposition Lamination (SDL)	<ul style="list-style-type: none"> • Papier wird 3D in hoher Qualität gedruckt, • Papier wird jeweils mit der Schicht darunter verklebt, • Form wird mittels in Drucker integriertem Messer ausgeschnitten, • Papierblätter können mittels Tintenstrahldrucker direkt eingefärbt werden, • vorzugsweise für Design- und Architekturmodelle geeignet; 	Papier;

Tabelle 13: 3D-Druck-Technologien

Durch die oben genannten 3D-Druck-Technologien und allgemein durch generative Fertigungsverfahren entstehen Möglichkeiten, individuelle Produkte in stetig wach-

sender Bandbreite in kleinen Stückzahlen und dezentral herzustellen. Bezogen auf die damit einhergehenden Umwelteffekte richtet sich die technologische Entwicklung im Zusammenhang mit intelligenten Fabriken auf Ressourceneinsparung aus, was aber für generative und subtraktive Technologien zutrifft. Der modernen dezentralen Wertschöpfungsform werden also zahlreiche Nachhaltigkeitspotentiale zugeschrieben (weniger Transportwege, Energieeinsparung usw.), jedoch ist bisher offen, inwieweit sich diese Aussagen auch als richtig erweisen. Mit der Nutzung von 3D-Druck, z. B. in Zusammenhang mit Peer Production, kann man sowohl Optionen für die nachhaltigere Gestaltung von Stoffströmen als auch Gefahren zur häufigeren Herstellung von Wegwerfgütern erkennen. Das bedeutet, dass die Einsparungen bspw. pro Produkteinheit durch vermehrte unnötige Nutzung der 3D-Drucker (Rebound Effekt) wieder in Frage gestellt werden können.¹⁰⁴ Im Folgenden werden nun vorhandene Studien zur ökologischen Nachhaltigkeit von 3D-Druckern bzw. 3D-Druck besprochen.

3.2.2 Vorhandene Studien zu Umweltbewertungen von 3D-Druckern bzw. 3D-Druck

Die durchgeführte Literaturrecherche hat gezeigt, dass sich zahlreiche Autoren mit den Umweltwirkungen bzw. den Energieverbräuchen von additiven Herstellungsverfahren beschäftigen. Dabei gibt es Studien, die sich ausschließlich mit den zu berücksichtigenden Faktoren bzw. Komponenten des Energieverbrauchs bei 3D-Druckprozessen für die Bestimmung von Umweltwirkungen auseinandersetzen und somit als Anleitungen oder Leitfäden herangezogen werden können.¹⁰⁵ Andere Veröffentlichungen befassen sich darüber hinaus mit allen Energie- und auch Stoffflüssen bei additiven Fertigungsprozessen.¹⁰⁶ Viele ausführliche Analysen und Bewertungen fokussieren sich auf den Vergleich des 3D-Druck-Verfahrens mit konventionellen Fertigungsverfahren (meist Spritzguss oder abtragende Fertigung). Hierbei wurden u. a. Lebenszyklusbewertungen von den einerseits durch dezentrale Fertigung mittels 3D-Druck und andererseits mittels zentraler konventioneller Fertigung hergestellten Produkten durchgeführt.^{107 108 109} Unter Berücksichtigung von vergleichbaren Rahmenbedingungen und ähnlicher Produktqualität, schneidet der 3D-Druck-Prozess bzgl. der Umweltwirkungen, auch aufgrund des deutlich höheren Energieverbrauchs bei der Fertigung, stets schlechter ab. Der spezifische Energieverbrauch hängt dabei immer von der herzustellenden Stückzahl ab. Je kleiner die Losgrößen dabei werden, umso besser liegt der additive Fertigungsprozess bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit

¹⁰⁴ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 24).

¹⁰⁵ (vgl. Peng, 2016).

¹⁰⁶ (vgl. Le Bourhis et al., 2013).

¹⁰⁷ (vgl. Belculfine, 2016).

¹⁰⁸ (vgl. Kreiger and Pearce, 2013).

¹⁰⁹ (vgl. Cerdas et al., 2017).

im Vergleich mit konventionellen Verfahren.¹¹⁰ Cerdas et al. (2017) listen in ihrer Studie einige Punkte, welche die Umweltwirkungen von 3D-Druck mitbestimmen:

- Energieeffizienz des Druckvorgangs,
- Druckdauer,
- verwendetes Material,
- regionaler Elektrizitätsmix
- Qualität des gedruckten Produkts,
- Erfahrung des Anwenders und
- der Rebound-Effekt.

Weitere Autoren beschäftigen sich nicht nur mit der ökologischen, sondern auch mit der ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit von additiven Herstellungsverfahren.^{111 112} Gebler, Schoot Uiterkamp und Visser (2014) geben dabei eine globale Nachhaltigkeitsperspektive bzgl. des 3D-Drucks bis 2025 und halten fest, dass kritische Punkte wie die Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit oder die Erhöhung der Vielfalt und Verfügbarkeit von druckbaren Rohmaterialien zu einer Erweiterung von 3D-Druck in größeren Produktionsserien führen und dadurch das Nachhaltigkeitspotential signifikant steigen würde.

Die oben genannten Studien beziehen sich ausschließlich auf die Produktionsprozesse und die dabei entstehenden Produkte. Arbeiten, die sich hauptsächlich auf die ökologischen Umweltwirkungen des 3D-Druckers als bewertetes Produkt konzentrieren, konnten im Zuge dieser Recherche nicht identifiziert werden. Lediglich Faludi et al. (2015) vergleichen in ihrer Lebenszyklusbewertung Produkte, die jeweils mit zwei unterschiedlichen 3D-Druckern und mit einer konventionellen CNC-Maschine hergestellt wurden und schließen dabei die Fertigungsmaschinen mit ein. Jedoch werden auch hier die Ökobilanzen der 3D-Drucker nicht im Detail besprochen.

Bei der Betrachtung von 3D-Druckern muss grundsätzlich zwischen professionellen Geräten und Geräten für den Privat- bzw. Hobbybereich unterschieden werden. Aufgrund dessen und wegen der vielen Möglichkeiten der technischen Umsetzbarkeit der generativen Fertigung, sind generelle Aussagen über die Geräte, deren Prozesse und auch über die damit verbundenen Umweltaspekte nur begrenzt möglich. Dies vor Augen führend wird festgehalten, dass diese modernen Verfahren durchaus einen Beitrag zur Umweltentlastung leisten bzw. positive Umwelteffekte herbeiführen können, andererseits aber auch Risiken für Ökologie und Nachhaltigkeit darstellen können. Die, in den vorliegenden Studien aufgezeigten, positiven sowie negativen As-

¹¹⁰ (vgl. Yoon et al., 2014).

¹¹¹ (vgl. Ford and Despeisse, 2016).

¹¹² (vgl. Gebler, Schoot Uiterkamp, and Visser, 2014).

pekte bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit von 3D-Druck werden im Folgenden tabellarisch näher beleuchtet.¹¹³

Positive Aspekte	Negative Aspekte
Möglichkeit einer abfallfreien Herstellung aufgrund des additiven Verfahrens bzw. weniger Abfall als bei subtraktiven Herstellungsformen (Bühner 2013)	Je nach verwendetem Verfahren oft energieaufwendige Herstellungsprozesse der Ausgangsmaterialien, welche auch zum Verwendungsort transportiert werden müssen (Petschow et al. 2014)
Geringere Transport- und Logistikaufwände aufgrund der Möglichkeiten dezentraler Wertschöpfungssysteme (Petschow et al. 2014)	Abfälle durch begrenzte Wiederverwendbarkeit des nicht genutzten Rohmaterials (auch Stützmaterial) und häufig notwendiges Nachbearbeiten der Produkte (Fastermann 2014)
Mit Leichtbaupotentialen des 3D-Drucks verbundene mögliche Energieeinsparung in der Nutzungsphase von entsprechenden Bauteilen ¹¹⁴	Mögliche Qualitätsmängel und zu hinterfragende Sinnhaftigkeit bei den von Laien hergestellten Objekten – Mehrproduktion (Petschow 2014)
Einsparung von problematischen Stoffen wie z. B. Schneidflüssigkeiten (Petschow et al. 2014)	Ungewissheit über die Recyclebarkeit der gedruckten Produkte bzw. der verwendeten Materialien (Bourell, Leu, Rosen 2009)
Herstellung von Ersatzteilen vor Ort und zum Zeitpunkt des Gebrauchs und damit Einsparung von Transportwegen und Lagerplätzen (Mallée 2015)	Gegenüber herkömmlicher Verfahren tendenziell höherer Energieverbrauch während des Produktionsprozesses pro hergestelltem Objekt (Huang et al. 2012)
Möglichkeit der Verwendung biologisch abbaubarer Ausgangsmaterialien in einigen Verfahren (Fastermann 2014)	Drucken mit unterschiedlichen Materialien für dasselbe Produkt verringert die Recyclebarkeit (Faludi et al. 2015)
	Derzeit großer Zusammenhang zwischen Druckqualität und negativer Umweltwirkungen der Drucker – höhere Qualität heißt meist mehr negative Umweltwirkungen (Faludi et al. 2015)

Tabelle 14: Positive und negative Aspekte bzgl. Nachhaltigkeit von 3D-Druck

Die Autoren sprechen u. a. wegen der derzeit noch sehr geringen Anzahl an quantitativen Studien zu den Umwelteffekten von generativen Fertigungsverfahren davon, dass die qualitativen Befunde größtenteils auf Vermutungen und Einschätzungen basieren. Darüber hinaus unterscheiden sich die vorhandenen quantitativen Studien größtenteils in ihren jeweiligen Forschungsfragen. Aus den eben genannten Gründen sprechen die Autoren von vorherrschenden Unsicherheiten und Interpretationsspielräumen bezüglich ökologischer Bewertungen des 3D-Druck-Prozesses.

Im Folgenden werden nun zwei Studien aufgrund ihrer Relevanz für die im Anschluss durchgeführte Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik nä-

¹¹³ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 25ff).

¹¹⁴ vgl. <http://www.weltderfertigung.de> (17.02.2018)

her betrachtet. Dabei wurde das Werk von Petschow et al. (2014) ausgewählt, weil hier mit Hilfe der Ökobilanz-Methode nachhaltigkeitsbezogene Effekte diskutiert werden. Auch in dieser Arbeit sollen solche Effekte diskutiert werden und die in Petschow et al. (2014) berücksichtigten Bereiche des Transports, des verwendeten Materials, der Herstellung und der Entsorgung sind Teil der hier durchgeführten Ökobilanz-Studie. Auf Faludi et al. (2015) wird näher eingegangen, da diese Veröffentlichung in ihren vergleichenden LCA-Studien die Umweltwirkungen der 3D-Drucker bzw. der CNC-Maschine per se auch miteinbezieht. Des Weiteren sollen Erkenntnisse über die geeignete Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz und über die anschließende Auswertung und Diskussion mitgenommen werden.

Ausgewählte Fallstudien zu Umweltbewertungen von 3D-Druck

Dieser Abschnitt ist zweigeteilt. Zunächst wird auf zwei Fallstudien (Petschow et al. 2014) eingegangen, wobei erstere eine Handyschale bilanziert und die zweite Studie sich mit einem Flugzeugersatzteil befasst. Dabei werden die ökobilanziellen Aspekte dieser, durch 3D-Druck hergestellten, Produkte beäugt. Der zweite Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich mit dem Vergleich der Umweltbelastungen von additiver und traditioneller Fertigung anhand von Lebenszyklusbewertungen (Faludi et al. 2015).

1. Fallstudien¹¹⁵

Bei den betrachteten Fallstudien liegt der Fokus jeweils auf den potentiellen Umweltauswirkungen des, durch 3D-Druck bzw. konventionellen Herstellungsverfahren, gefertigten Produkts. Zur Modellierung der verschiedenen Szenarien, Berechnung und Auswertung wurde die Ökobilanzsoftware Umberto verwendet. Die Wirkungsabschätzung und Auswertung der Betrachtungen basiert auf der Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“ (CML 2001), wo unterschiedliche Umweltwirkungen quantitativ ermittelt werden.

Die berücksichtigten Wirkungskategorien sind der Treibhauseffekt (Global Warming Potential GWP für einen Zeitraum von 100 Jahren in kg CO₂-Äquivalente berechnet), der abiotische Ressourcenverbrauch (Extraktion von Mineralien und fossilen Brennstoffen in kg Antimon und kg Extrahierung basierend auf der Konzentration von Reserven und der Rate der Wiederanhäufung), die Humantoxizität (Wirkung der erfassten toxischen Stoffe auf die menschliche Gesundheit für einen Zeitraum von 100 Jahren in kg 1,4-Dichlorbenzol-Äquivalente) und die Versauerung (Wirkung versauernder Emissionen ausgedrückt in massebezogener SO₂-Äquivalente).

- Handyschale

Für die Bewertung wurden fünf mögliche Szenarien, welche sich auf die Dezentralisierungspotentiale der jeweiligen Technologien fokussieren, herangezogen.

¹¹⁵ (vgl. Petschow et al., 2014, S. 29ff).

- Szenario 1 (klassische Massenproduktion): Produkt in China auf Lager gefertigt, Rohstoffversorgung durch lokalen Lieferanten (200 km Entfernung zum Produktionsstandort), für den Versand: LKW-Transport zum 58 km entfernten Flughafen, per Luftfracht 9000 km nach Leipzig, per Schwer-LKW nach Berlin und mittels Kleinlaster zum Endkunden;
- Szenario 2 (Mass Customization-Produktion): Produktion in Frankreich, Rohstoff 850km per Schwer-LKW geliefert, LKW als Transportmittel bis zum Endkunden;
- Szenario 3 (Produktion in 3D-Druckzentrum): Druckzentrum in Eindhoven, professionelle 3D-Drucker (Laser Sintering Prinzip), Rohstoffversorgung durch BASF in Ludwigshafen, Lieferung des Produkts mittels Schwer-LKW nach Berlin und anschließend mittels Kleinlaster zum Endkunden;
- Szenario 4 (Produktion in dezentralisiertem 3D-Druckzentrum): regionales 3D-Druckzentrum, unmittelbare Nähe zum Endkunden, Rohstoffversorgung wie in Szenario 3, Abholung der Handyschale durch Endkunden;
- Szenario 5 (Produktion im heimischen 3D-Drucker): Filament statt Granulat für den 3D-Druck, Rohstoff für Herstellung des Filaments aus den USA, dort von Nebraska mittels Bahn zum New Yorker Hafen, verschifft nach Amsterdam, anschließend Transport mit Schwer-LKW zur Filamentproduktion, Filament mit mittelschwerem LKW zur Zwischenlagerung, dann mit Schwer-LKW zu Logistikdienstleister und Auslieferung zum Endkunden in Berlin;

Die Szenarien 1 und 2 basieren auf konventionellen Spritzgussverfahren und die Szenarien 3 und 4 auf professionellen Laser-Sinter-Geräten. Die heimische Herstellung der Handyschale erfolgt mit einem handelsüblichen 3D-Drucker.

Auffallend bei der durchgeführten Ökobilanz war, dass der Energiebedarf für die Verarbeitung sowie für die Vorproduktion des eingesetzten Materials großen Einfluss auf die verschiedenen Umweltwirkungen hat. Demgegenüber stellen die Transporte und Entsorgungsprozesse nur geringe Einflüsse auf die Ökobilanz dar. Ausgenommen sind dabei die Flugtransporte bei der klassischen Massenproduktion, welche sich schon wesentlich auf die Ökobilanz auswirken. Des Weiteren wird festgestellt, dass die professionellen Laser-Sinter-Geräte einen deutlich höheren Energiebedarf haben als die heimischen 3D-Drucker. Die heimische Variante zeichnet sich auch durch den optimalen Einsatz von regenerativem Kunststoff als Ausgangsmaterial aus.

Die unten angeführte Abbildung zeigt die Treibhauspotentiale der verschiedenen Szenarien für die Handyschalenproduktion bei gleicher funktioneller Einheit für alle Varianten.

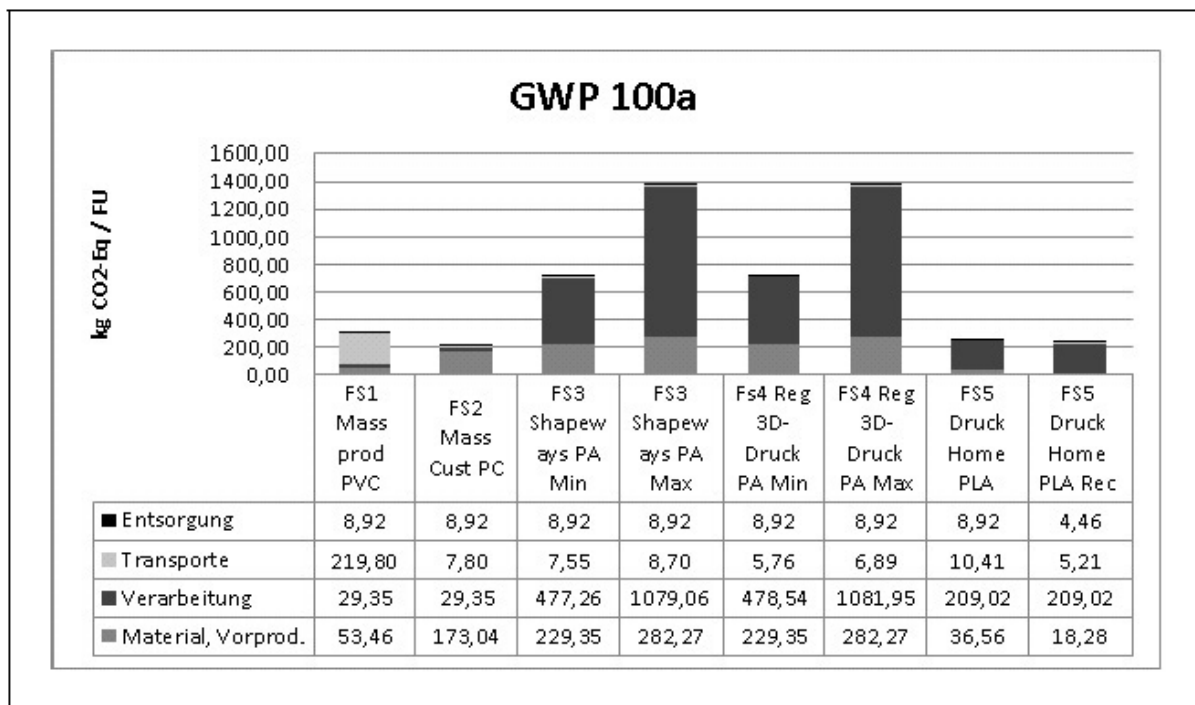


Abbildung 14: Treibhauspotentiale der Handyschale¹¹⁶

Diese Studie der Handyschalenproduktion macht deutlich, dass die wesentlichen Einflüsse auf die Ökobilanz auf die eingesetzten Technologien und auf die Art des Transports innerhalb der Wertschöpfungskette zurückzuführen sind. Auffallend ist auch, dass, entgegen vieler Annahmen, die Dezentralisierung der Produktion per se nicht zur Verminderung der Ressourcenverbräuche und der Umweltbelastungen führt. Der Vorteil der Produktion mit heimischem 3D-Drucker ist nur dann gegeben, wenn bestimmte bio-basierte Ausgangsmaterialien verwendet werden und die Produkte länger genutzt werden (Gefahr von möglicher Mehrproduktion durch Laien).

- Flugzeugersatzteil

Die Raum- und Luftfahrt wird im Zusammenhang mit den Potentialen des 3D-Drucks häufig adressiert. Dabei werden die Aspekte der möglichen Vor-Ort-Produktion von Komponenten der Luftfahrzeuge (Ersatzteile etc.) und die der erweiterten Möglichkeiten für Leichtbaustrukturen der gedruckten Komponenten genannt. Leichtbau kann in weiterer Folge in der Nutzungsphase zu einer Senkung des Energie- bzw. Treibstoffverbrauchs führen.

In der durchgeführten Ökobilanz dieser Studie werden die Umweltwirkungen verschiedener Herstellungstechnologien unter Einbeziehung von spezifischen Logistikketten betrachtet. Dabei wird die Herstellung eines Flugzeugteils aus Aluminium mit einem Gewicht von 1 kg (funktionelle Einheit) mitsamt den Vorketten und des notwendigen Transportaufwands untersucht. Der Aspekt der Leichtbaumöglichkeiten

¹¹⁶ (Petschow et al., 2014, S. 40).

des 3D-Drucks wird in einer zusätzlichen Variante berücksichtigt. Der Nutzen der Leichtbauweise in der Gebrauchsphase wird in einem weiteren Szenario angeführt. Die untersuchten Szenarien und verwendeten Daten für die Lebenszyklusbewertung eines Flugzeugersatzteils werden in nachstehender Tabelle zusammengefasst:

Szenarien	Eigenschaften
FZ1 konv Al	Herstellung mittels Aluminiumguss und Metallbearbeitung; Gussausbeute 66,66%, 10% Bearbeitungsrückstände;
FZ2 MLS Al gleich Min	Herstellung mittels Metall Laser Sintern; Optimalvariante: geringer Erzeugungsenergieverbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad;
FZ2 MLS Al gleich Max	Herstellung mittels Metall Laser Sintern; Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch, niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad;
FZ3 MLS Al red Min	Bionisches Design – Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg); Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Optimalvariante: geringer EE-Verbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad;
FZ3 MLS Al red Max	Bionisches Design – Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg); Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch und niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad;
FZ4 MLS Al red + Nutzen Min	Bionisches Design – Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg), zusätzliche Berücksichtigung der Gebrauchsphase (Kerosineinsparung von insgesamt 1500kg); Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Optimalvariante: geringer EE-Verbrauch und hoher Verarbeitungswirkungsgrad;
FZ4 MLS Al red + Nutzen Max	Bionisches Design – Gewichtseinsparung von 40% (funktionelle Einheit: 0,6 kg), zusätzliche Berücksichtigung der Gebrauchsphase (Kerosineinsparung von insgesamt 1500kg); Herstellung mittels Metall Laser Sintern, Maximalvariante: hoher EE-Verbrauch und niedrigerer Verarbeitungswirkungsgrad;

Tabelle 15: Szenarien und Daten bei der Bewertung des Flugzeugersatzteils

Dazu ist zu erwähnen, dass beim Szenario FZ1 eine zentralisierte Produktionsform zum Einsatz kommt. Das bedeutet, dass die Teile in den USA hergestellt und mittels Luftfracht nach Deutschland verschickt werden. In Hamburg befindet sich dabei ein Zentrallager, von wo aus die weltweite Versorgung mit Ersatzteilen sichergestellt wird. Bei den restlichen Szenarien werden die Ersatzteile im Bedarfsfall dezentral produziert.

Die quantitativen Unterschiede zwischen den oben beschriebenen Szenarien (ausgenommen FZ4) werden beispielhaft beim ausgewerteten Treibhauspotential dargestellt:

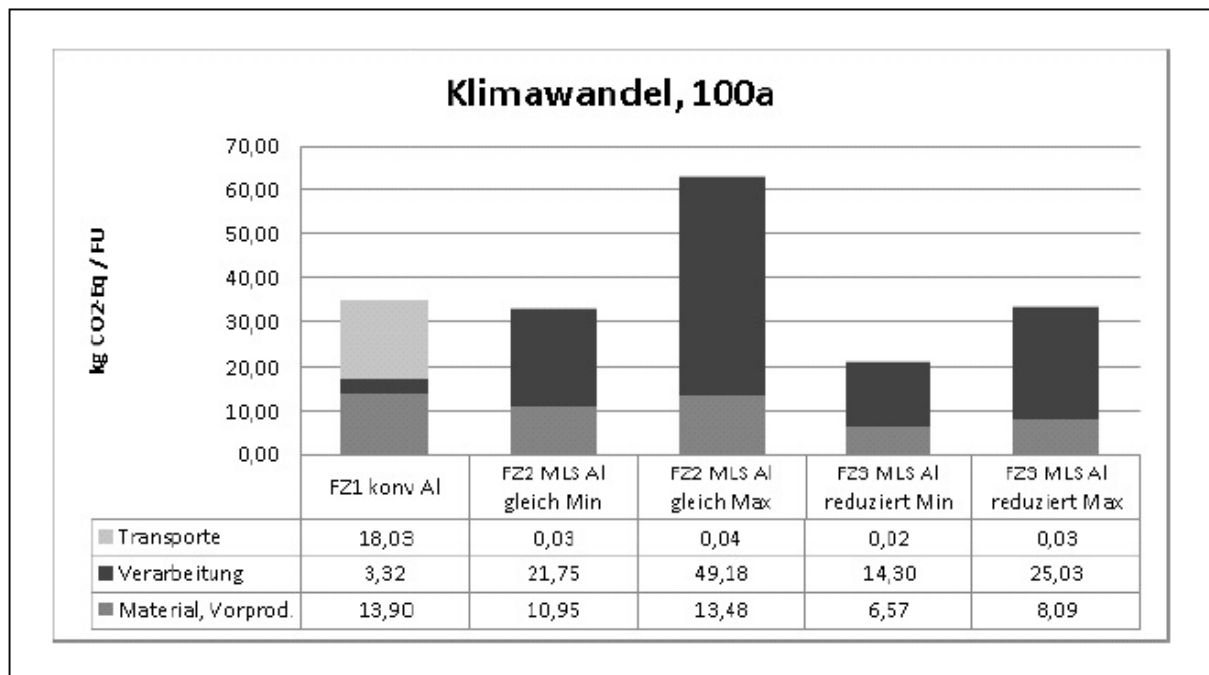


Abbildung 15: Treibhauspotentiale für das Flugzeuersatzteil¹¹⁷

Gegenüber dem ersten Szenario ist der Einfluss des Materialtransports bei den dezentralen Varianten vernachlässigbar. Der größte Einflussfaktor auf die Umweltwirkungen bei der Vor-Ort-Herstellung ist die Verarbeitung durch die MLS-Technologie, wobei die Verarbeitung bei der herkömmlichen Fertigung nur eine kleine Rolle spielt. Die Einflüsse der Aufwendungen zur Herstellung des Ausgangsmaterials haben bei allen Szenarien ähnliche Ausmaße.

Mit Berücksichtigung der Szenarien FZ4 wird deutlich, dass die durch das gewichtsoptimierte Design erzeugte Einsparung von Kerosin die Aufwendungen zur Herstellung des Ersatzteils um ein Vielfaches überwiegt.

¹¹⁷ (Petschow et al., 2014, S. 47).

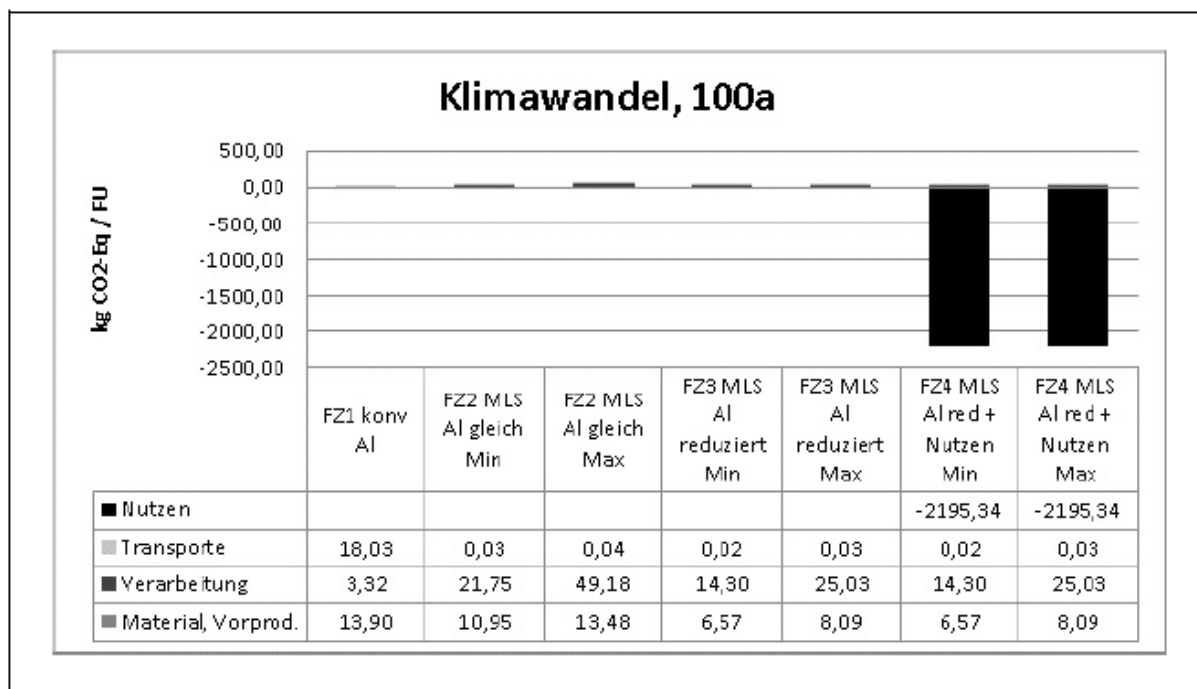


Abbildung 16: Treibhauspotentiale des Flugzeugersatzteils inkl. Gebrauchsphase¹¹⁸

Hier zeigt sich, dass es höchst interessant ist, inwieweit sich die Potentiale additiver Fertigungsverfahren im Hinblick auf Materialeinsparungen und folglich Gewichtseinsparungen erschließen lassen. Dadurch können erhebliche Umweltentlastungen in Form von Emissionsreduzierungen während der Nutzungszeit bspw. von Flugzeugteilen erreicht werden. Nicht zu vernachlässigen sind in diesem Zusammenhang auch die Transportaufwendungen (hauptsächlich Flugtransporte), welche bei der konventionellen Variante einen wesentlichen Einfluss auf die unterschiedlichen Umweltwirkungen haben.

Die zwei Fallbeispiele zeigen, dass mögliche Umweltentlastungen durch neue Technologien von einer Vielzahl von Faktoren abhängen. 3D-Druck kann vor allem dort punkten, wo aufgrund des Verfahrens Material eingespart werden kann und sich dies darüber hinaus bspw. in der Nutzungsphase des hergestellten Objekts durch verringerte Energieverbräuche bemerkbar macht.

2. Vergleich der Umweltbelastung additiver und traditioneller Fertigung¹¹⁹

Für diese Untersuchungen wurden vergleichende Lebenszyklusbewertungen von einer Haas VF0 CNC-Fräsmaschine, einem Dimension BST 1200 FDM-Drucker und einem Objet Connex 350 inkjet Drucker (ähnliches Verfahren wie Multi-Jet-Modeling¹²⁰), mit jeweils unterschiedlichen Szenarien, durchgeführt.

¹¹⁸ (Petschow et al., 2014, S. 48).

¹¹⁹ (vgl. Faludi et al., 2015, S. 17ff).

¹²⁰ (vgl. Fastermann, 2014, S. 38f).

Die funktionelle Einheit umfasste die Herstellung von zwei verschiedenen Kunststoffteilen (Anmerkung: Ein Job beinhaltet die Herstellung beider Teile.) – eines mit einer komplizierten Krümmung und das andere mit einfachen Ebenen und Bohrungen.



Abbildung 17: Zwei verschiedene Teile als funktionelle Einheit¹²¹

In den Lebenszyklusbewertungen wurden die unterschiedlichen Qualitätsstufen der hergestellten Kunststoffteile nicht berücksichtigt. Die Ökobilanzen wurden auf Basis der ReCiPe Endpoint H Methode, welche verschiedene Umweltbelastungen miteinander, mit der Software SimaPro durchgeführt. Der Untersuchungsrahmen umfasste die Umweltwirkungen der Maschinen selbst (Rohmaterialien und Herstellung), den Transport der Maschinen zur (bzw. weg von der) University of California Berkeley, den Energieverbrauch während der Herstellung der Kunststoffteile, den Energieverbrauch während Leerlauf und Standby, die verwendeten Materialien für die hergestellten Teile, den Materialabfall während der Herstellung, die Kühlschmierstoffe für die CNC-Maschine und die Entsorgung des Materialabfalls und der Maschinen selbst.

Zur Bewertung der Herstellungsphase der jeweiligen Maschine wurden die einzelnen Bauteile abgemessen und mit Hilfe der Dichten der verwendeten Materialien die Massen berechnet. Für nicht zugängliche Bauteile wurden Annahmen getroffen. Weitere Details über den Transport oder die End of Life-Phase werden hier nicht angeführt. Für den Energieverbrauch während des Herstellungsprozesses der Kunststoffteile wurden drei unterschiedliche Szenarien betrachtet:

- Szenario 1: Minimale Auslastung der Maschinen (ein Job pro Woche), sonst Leerlauf (Standby bei der FDM-Maschine);

¹²¹ (Faludi et al., 2015, S. 17).

- Szenario 2: Minimale Auslastung der Maschinen (ein Job pro Woche), sonst energiesparend (Inkjet-Maschine in Leerlauf, CNC- und FDM-Maschine komplett abgeschaltet);
- Szenario 3: Maximale Auslastung der Maschinen (Produktion 24 Stunden pro Tag, sieben Tage pro Woche);

Da die verschiedenen Maschinen für die Ausführung eines „Jobs“ unterschiedlich viel Zeit benötigen, wurden bei Szenario 3 weitere Annahmen und Berechnungen getroffen bzw. durchgeführt, um die drei Maschinen fair miteinander vergleichen zu können. Für die Herstellung der Kunststoffteile konnten aufgrund von Einschränkungen der additiven Verfahren nicht exakt die gleichen Materialien verwendet werden. Jedenfalls wurden ABS (Acrylnitril Butadien Styrol) oder zumindest ABS-ähnliche Werkstoffe verwendet.

Die Auswertung der Lebenszyklusbewertungen zeigt unter anderem, dass von den 17 gemessenen Arten von Umweltbelastungen, fünf als dominant hervorgehoben werden können. Diese sind die Erschöpfung fossiler Brennstoffe, der Klimawandel, die Schädigung der Ökosysteme und der menschlichen Gesundheit, Feinstaub und Humantoxizität. Dies kommt daher, dass die Auswirkungen größtenteils vom Energieverbrauch, der Produktion von Metallen, Elektronik und von Kunststoffen kommen. Nachfolgend sind die ökologischen Auswirkungen der jeweiligen Lebensphasen für die einzelnen Maschinen bei Verwendung von Szenario 1 dargestellt.

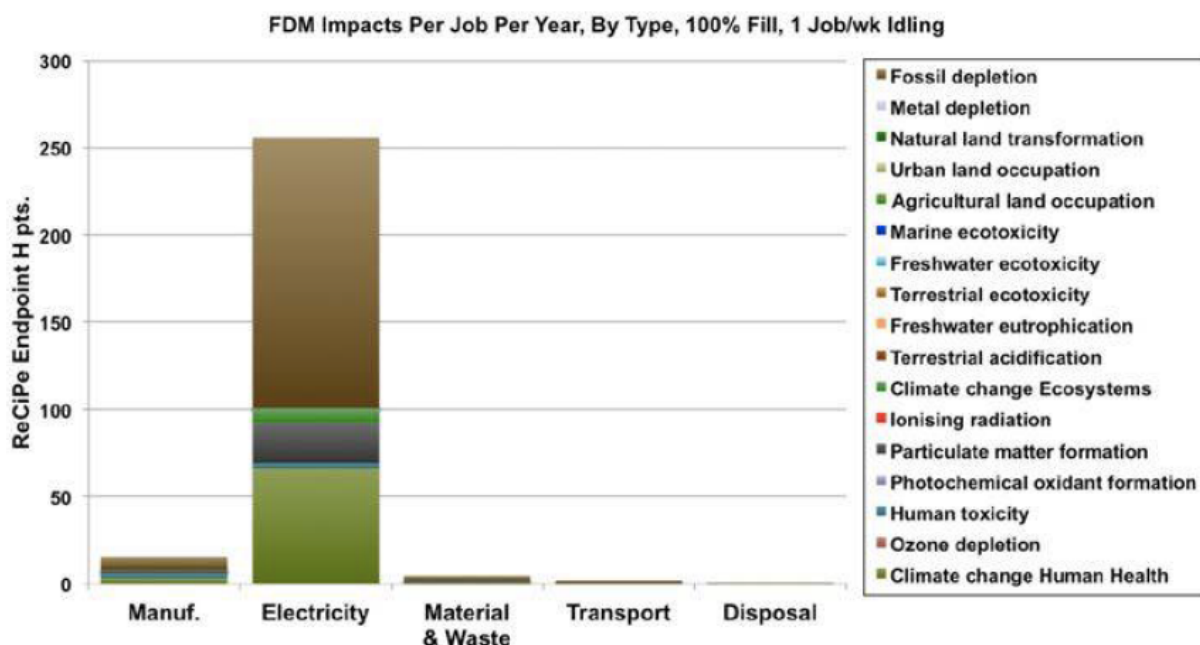


Abbildung 18: Ökologische Auswirkungen, FDM-Maschine¹²²

¹²² (Faludi et al., 2015, S. 21).

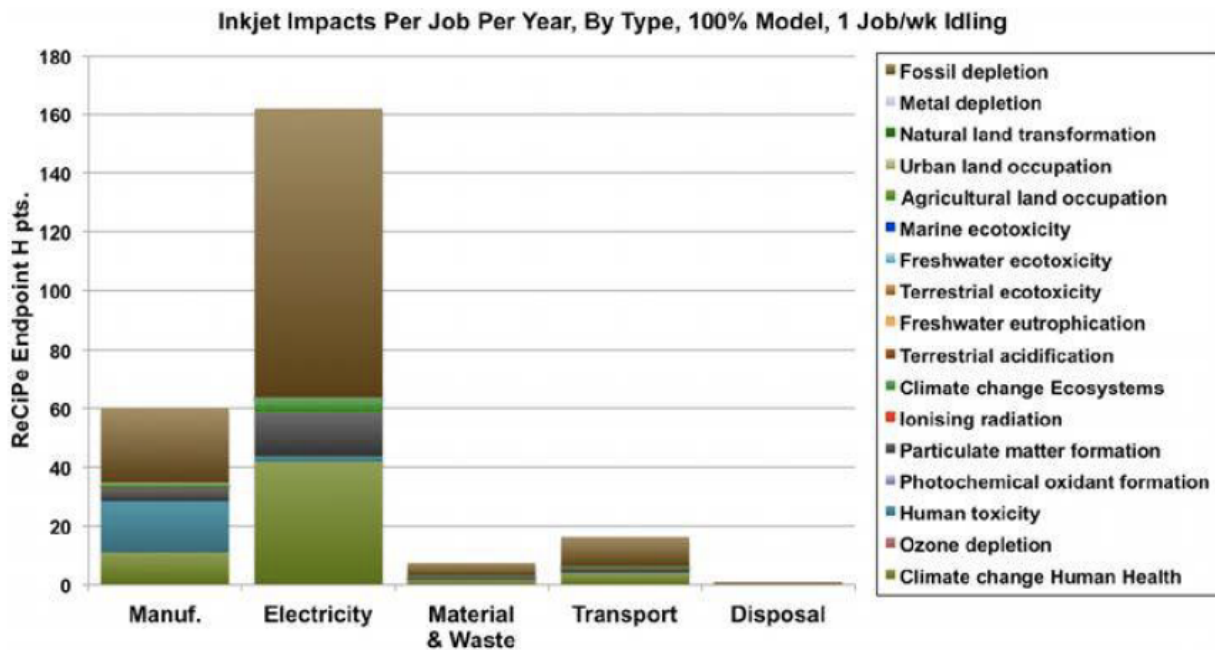


Abbildung 19: Ökologische Auswirkungen, Inkjet¹²³

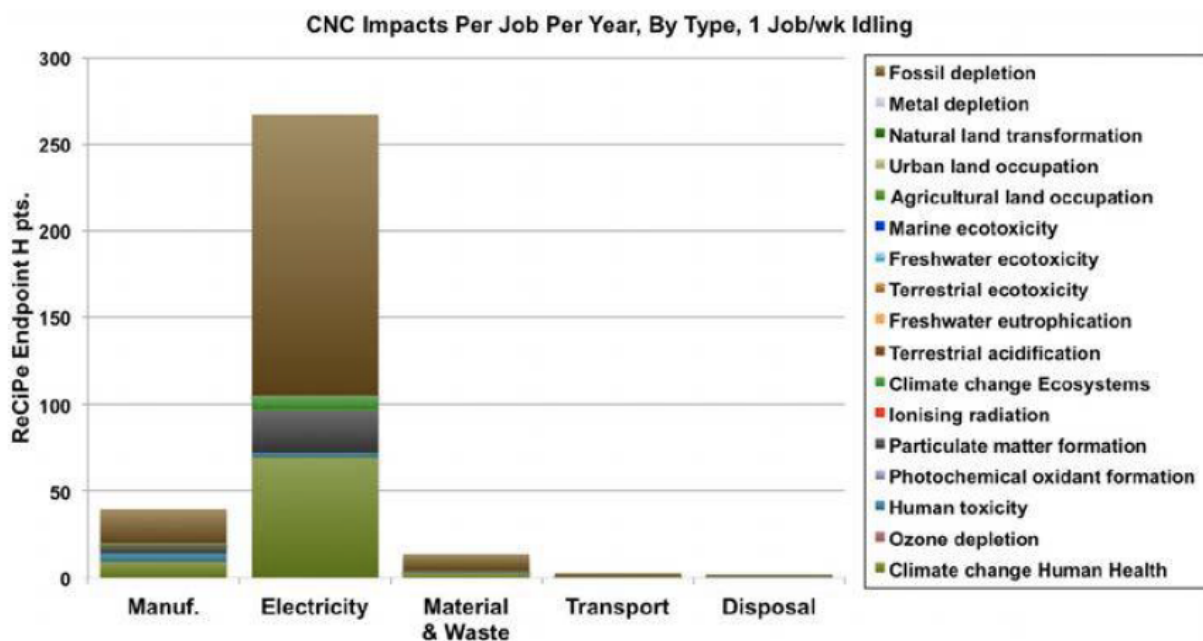


Abbildung 20: Ökologische Auswirkungen, CNC-Maschine¹²⁴

Auf den ersten Blick ist auffallend, dass die Auswirkungen der Herstellungsphase der CNC-Maschine geringer sind als die der Inkjet-Maschine, obwohl die CNC-Maschine größer und schwerer ist. Allerdings muss man sich hier vor Augen halten, dass diese Auswirkungen pro Job pro Jahr berechnet wurden und die Lebenszeit der CNC-Fräsmaschine doppelt so lange angenommen wurde als die des 3D-Druckers.

¹²³ (Faludi et al., 2015, S. 22).

¹²⁴ (ebd.).

Die nächste Darstellung zeigt die Bewertungsergebnisse für die drei Maschinen in allen drei Szenarien. Hier ist gut zu erkennen, dass die Auswirkungen pro Job in Szenario 3 bei allen Maschinen auf rund ein Zehntel gegenüber Szenario 1 einbrechen. Das bedeutet, dass die Auslastung der Maschinen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen, gemessen pro Job pro Jahr, hat.

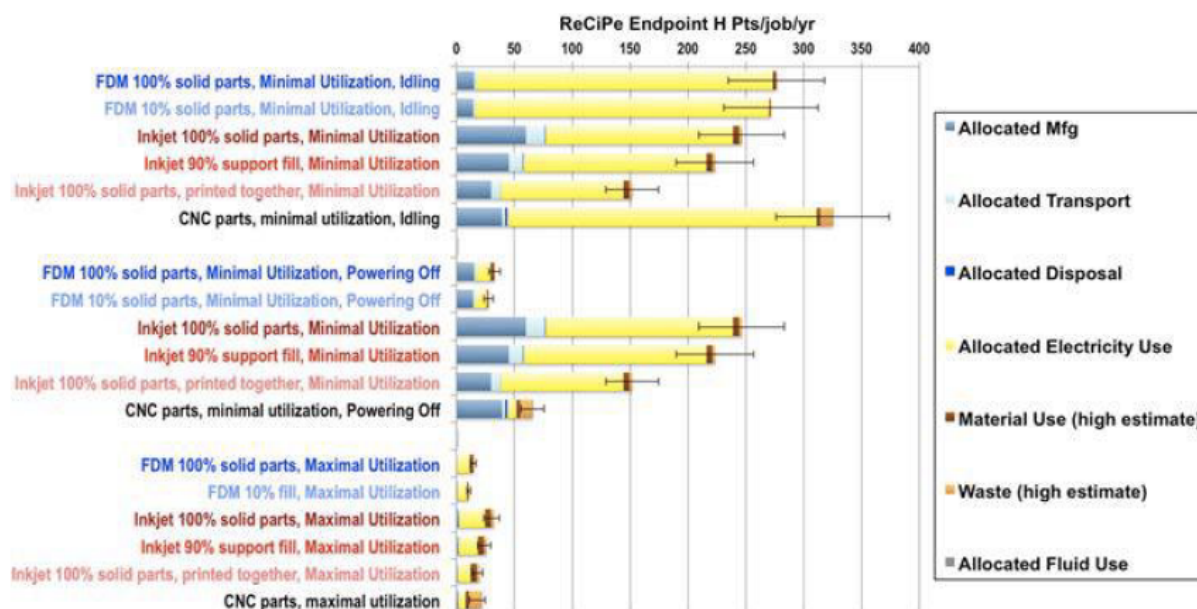


Abbildung 21: LCA, Vergleichende Darstellung der drei Szenarien¹²⁵

Für Szenario 1 ist bei allen drei Maschinen der Stromverbrauch der dominierende Faktor, gefolgt von der Herstellung der Maschinen selbst. Bei maximaler Auslastung (Szenario 3) wird die Phase der Herstellung der Maschinen beinahe unbedeutend. Unter anderem wird hier klar, dass die Signifikanz der Umweltbelastung der Herstellungsphase der verwendeten Maschinen stark von deren Maschinenauslastung abhängt. Für beide 3D-Drucker ist in Szenario 3 nach wie vor der Stromverbrauch dominierend und der Materialverbrauch hat relativ größere Auswirkungen. Bei CNC-Maschine hat in Szenario 3 der Materialabfall größerer Umweltauswirkungen als der Stromverbrauch.

Die Resultate dieser vergleichenden Lebenszyklusbewertungen zeigen, dass die relative Nachhaltigkeit von additiver Fertigung gegenüber der CNC-Bearbeitung in erster Linie von den Nutzungsprofilen und dann von den jeweiligen Maschinen abhängt.

Wie durch die betrachteten Studien ersichtlich wird, lohnt es sich bei vermeintlichen Nachhaltigkeits-Vorteilen, wie bspw. bei den am häufigsten angepriesenen Ressourceneinsparungen, bei verwendeten Materialien oder der Reduzierung von Transportwegen, genauer hinzuschauen. Zusammenfassend kann aber festgehalten werden, dass 3D-Druck bzgl. umweltbezogener Nachhaltigkeit gegenüber anderen Fertigungsverfahren großes Potential besitzt.

¹²⁵ (Faludi et al., 2015, S. 17).

Die durch die Betrachtung der beiden Studien erlangten Erkenntnisse bzgl. folgender Punkte:

- Festlegung des Untersuchungsrahmens,
- Festlegung der funktionellen Einheit,
- diverse zu berücksichtigende Aspekte,
- Berechnung der Massen der verschiedenen Bauteile der Maschine,
- betrachtete Wirkungskategorien,
- mögliche Darstellung der Ergebnisse,
- Vorgehen in der Auswertungsphase und
- Diskussion

werden nun bei der Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers berücksichtigt bzw. dienen teilweise als Leitfaden.

Wie bereits vorher beschrieben, gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die sich mit der Nachhaltigkeit des Prozesses 3D-Druck beschäftigen oder Produkte, welche mittels 3D-Druck und konventionellen Verfahren hergestellt werden, miteinander vergleichen. Fallstudien, die sich mit der ökologischen Nachhaltigkeit des Produkts 3D-Drucker per se beschäftigen und diese detailliert behandeln, sind derzeit nicht bekannt. Die hier durchgeführte Ökobilanz des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik soll nun ein erster Schritt in die Richtung der Bewertung bzw. detaillierten ökologischen Betrachtung der Nachhaltigkeit und diesbezüglichen möglichen Verbesserungen von 3D-Druckern sein.

4 Life Cycle Assessment für den 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist die Erstellung einer produktbezogenen Lebenszyklusbewertung („cradle-to-grave“) des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik mit Hilfe der in Kapitel 2 ausgewählten Methode der Ökobilanz. Dafür werden alle notwendigen und hilfreichen Arbeitsschritte durchgeführt, wobei die Normen ISO 14040:2009 und ISO 14044:2006 als Leitfaden dienen.

Im Folgenden werden zunächst die Pilotfabrik und der 3D-Drucker näher betrachtet, damit ein Überblick über die Ausgangssituation geschaffen wird. Im Anschluss werden die vier Phasen der erstellten Ökobilanz-Studie dokumentiert.

4.1 Pilotfabrik und 3D-Drucker

Getrieben von den Herausforderungen der Industrie 4.0 entstehen derzeit viele Pilotfabriken, welche als sogenannte „Demofabriken“ realitätsnahe Modelle von Fabriken darstellen und vor allem der Praxis, Forschung und Weiterbildung dienen. Die Webseite von Labs Network Industrie 4.0 listet deutschlandweit 65 verschiedene Testzentren für Industrie 4.0.¹²⁶ Von diesen zahlreichen Einrichtungen in Deutschland wurden vier, welche Parallelen zur TU Wien Pilotfabrik aufweisen, ausgewählt und zum Thema des ökologischen Nachhaltigkeitsgedankens befragt. Des Weiteren war von Interesse, ob diese Testzentren eventuell Studien bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit (z. B. Prozess- oder Produktökobilanzen) durchführen ließen.

Einrichtung	Nachhaltigkeitsgedanke	Durchgeführte Studien
Modellfabrik Bodensee	Thema der Nachhaltigkeit wird nicht umfangreich betrachtet; Fokus auf technische Aspekte der Vernetzung in der Produktion und auf die Unterstützung der Werker in Montagevorgängen;	Keine;
Demofabrik Aachen	Keine Auskunft nach Anfrage; Keine diesbezüglichen Anzeichen laut Homepage ¹²⁷ ;	Keine Aussage möglich;
Lernfabrik für vernetzte Produktion in Bayern	Thema der Nachhaltigkeit steht aktuell nicht im Fokus der Lernfabrik;	Keine;

¹²⁶ vgl. <https://lni40.de> (02.03.2018)

¹²⁷ vgl. <https://demofabrik-aachen.rwth-campus.com> (02.03.2018)

	Konzentration auf Digitalisierung in der Produktion;	
Experimentier- und Digitalfabrik in Chemnitz	Keine Auskunft nach Anfrage; Energieeffizienz und ressourcenschonende Produktions- und Logistikumgebungen als Bestandteile der Hauptziele – laut Homepage ¹²⁸ ;	Keine Aussage möglich;

Tabelle 16: Befragungsergebnis Testzentren I 4.0 Deutschland

Nach Durchsicht weiterer Internetseiten der 65 verschiedenen Testzentren für Industrie 4.0 und aufgrund der Befragung lässt sich zusammenfassen, dass der Fokus dieser Einrichtungen derzeit auf Digitalisierung und den damit verbundenen technischen Aspekten liegt und der ökologische Nachhaltigkeitsgedanke dabei keine oder nur eine untergeordnete Rolle einnimmt.

In Österreich sind neben der bestehenden TU Wien Pilotfabrik aktuell zwei weitere Pilotfabriken an den Standorten Graz und Linz in der Entstehungsphase.

Die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 ist eine Demonstrationsfabrik für Smart Production und Cyber-Physische Produktionssysteme und befasst sich mit neuen Konzepten und Lösungen für variantenreiche Serienproduktion (Low Volume - High Mix). Dabei werden die Bereiche bzw. Anwendungsgebiete der

- spanabhebenden Bearbeitungsverfahren in robotergestützten flexiblen Fertigungszellen,
- robotergestützten Laserbearbeitungsverfahren,
- innerbetrieblichen Logistik mit Fokus auf Lean-Methoden und autonomen Handhabungssystemen und der
- Lean Montage und Werker-Assistenzsysteme für Montageprozesse

fokussiert. Des Weiteren liegt das Augenmerk der Pilotfabrik auf der Implementierung bzw. Weiterentwicklung von IT-Lösungen für die durchgängige Unterstützung der abgebildeten Systeme, was für die Umsetzung von Smart Production und Cyber-Physischen Produktionssystemen von wesentlicher Bedeutung ist.

Die TU Wien Pilotfabrik beschäftigt sich, bezogen auf die universitäre Forschung und Entwicklung sowie bzgl. der Industrie, mit drei inhaltlichen Schwerpunkten:

- Stärkung der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Produktionstechnik,
- Erweiterung der Aktivitäten in der akademischen Ausbildung, wie auch in der berufsbegleitenden Weiterbildung für Unternehmensinteressenten,

¹²⁸ vgl. <https://www.tu-chemnitz.de/> (02.03.2018)

- Wissens- und Innovationstransfer.

Neben der Fertigung und Montage von Bauteilen und Komponenten im Rahmen von Kooperationen mit Industriepartnern, wird in der Pilotfabrik ein Kunststoff 3D-Drucker als Beispielprodukt hergestellt. Für diesen 3D-Drucker werden mechanische Komponenten produziert, aber auch Teile und Komponenten zugekauft, um komplette Montage- und innerbetriebliche Logistikprozesse abbilden zu können.¹²⁹

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte ökologische Umweltbewertung bezieht sich auf diesen FDM 3D-Drucker, welcher in folgender Abbildung dargestellt und im Laufe seiner Lebenszyklusbewertung noch genauer beschrieben wird.

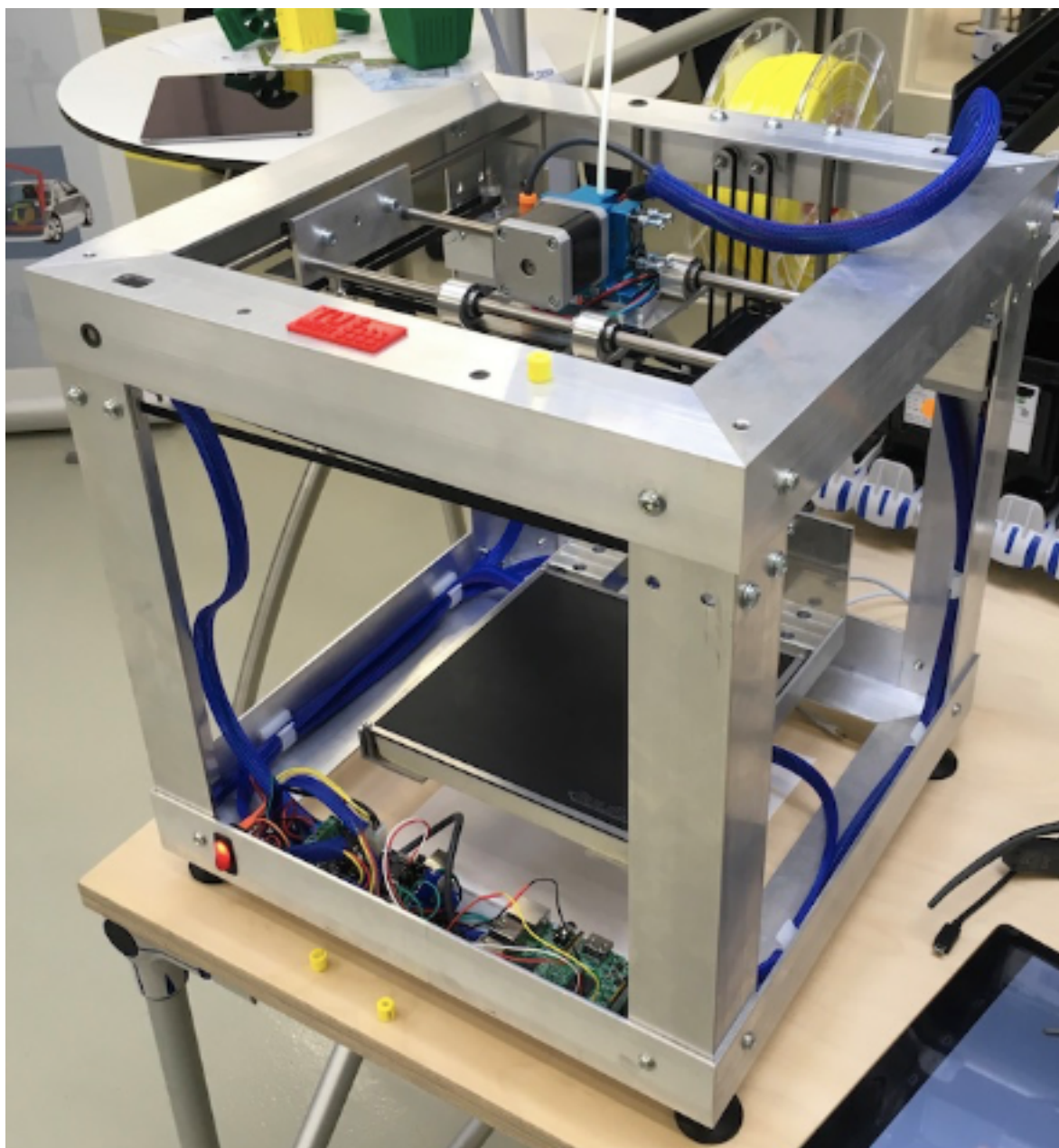


Abbildung 22: 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik

¹²⁹ vgl. <http://pilotfabrik.tuwien.ac.at> (27.02.2018)

4.2 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

4.2.1 Ziel der Studie

Mit Hilfe der durchgeführten Ökobilanz sollen die wesentlichen Treiber der Umweltwirkungen des 3D-Druckers aufgezeigt werden, um anschließend systematisch entsprechende Maßnahmen und Verbesserungsvorschläge bzgl. der Umweltverträglichkeit des Objekts ableiten zu können. Die Studie dient insbesondere den für die Konstruktion und Weiterentwicklung zuständigen Personen der TU Wien Pilotfabrik als Grundlage für mögliche Konstruktionsänderungen, Materialsubstitutionen oder energiebezogene Handlungen in Zusammenhang mit dem Drucker.

Des Weiteren sind die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertung nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt, jedoch soll diese transparente und auf aktueller Datengrundlage basierende ökologische Bewertung andere Hersteller bzw. Pilotfabriken motivieren, deren Produkte zu bewerten und in weiterer Folge ökologisch nachhaltiger zu gestalten.

4.2.2 Funktionelle Einheit und Verwendungsszenario

Als Basis wird im Rahmen dieser Studie folgende funktionelle Einheit verwendet:

„3D-drucken von kleinen (maximal 0,21 x 0,21 x 0,21 m) Kunststoffteilen.“

Die Referenz bildet dabei ein 3D-Drucker, welcher in der TU Wien Pilotfabrik gefertigt wird.

- Verwendungsszenario 1 (VS1):

Bei einer Nutzungsdauer von fünf Jahren werden an jährlich 184 Schultagen¹³⁰ jeweils drei TU Wien Logos 3D-gedruckt. Das ergibt gesamt 2760 Einsätze des Druckers. Dies entspricht einer Nutzung des 3D-Druckers als Anschauungs- bzw. Lernobjekt an Schulen.

¹³⁰ vgl. <http://www.arbeitstage.at/> (28.03.2018)



Abbildung 23: 3D-gedrucktes TU Wien Logo

- Verwendungsszenario 2 (VS2):

Bei der Verwendung als Ersatzteildrucker wird dieser sechs Stunden pro Tag, an jährlich 246 Arbeitstagen¹³¹ und über eine Nutzungsdauer von fünf Jahren betrieben. Das ergibt gesamt 1230 Einsätze des Druckers, wobei die Einsatzzeit mit 7380 Stunden gegenüber 1380 Stunden aus Szenario 1 deutlich höher ist.

4.2.3 Zu untersuchendes Produktsystem und die Systemgrenzen

Gegenstand der Studie ist der FDM 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik mit einem Gesamtgewicht (ohne PLA-Filament) von 9,48 kg. Die äußeren Abmessungen betragen 520 x 400 x 430 mm. Der Drucker besteht aus folgenden Hauptbestandteilen:

- Winkelprofile aus Aluminium,
- Bleche und Rundmaterial aus Aluminium,
- Führungsstangen aus Stahl,
- Elektrik- bzw. Elektronikteile,
- sonstige Zukaufteile,
- Normteile;

Die genauen Materialzusammensetzungen und Details folgen in der Sachbilanz.

Die durchgeführte Ökobilanz-Studie betrachtet die potentiellen ökologischen Auswirkungen des 3D-Druckers „von der Wiege bis zur Bahre“, also von der Verwendung

¹³¹ vgl. <http://www.arbeitstage.at/> (09.04.2018)

von Rohstoffen bis hin zur End of Life-Phase. In dieser Studie werden daher die folgenden Stufen des Lebensweges berücksichtigt:

- Herstellung der Fertigungsteile (Halbzeuge), Normteile und Zukaufteile,
- Transport der Teile zur TU Wien Pilotfabrik (Distribution A),
- Fertigung der Fertigungsteile, interner Transport und Montage in der Pilotfabrik,
- Transport des 3D-Druckers zum Endkunden (Distribution B),
- Nutzung des 3D-Druckers,
- End of Life-Behandlung des Druckers;

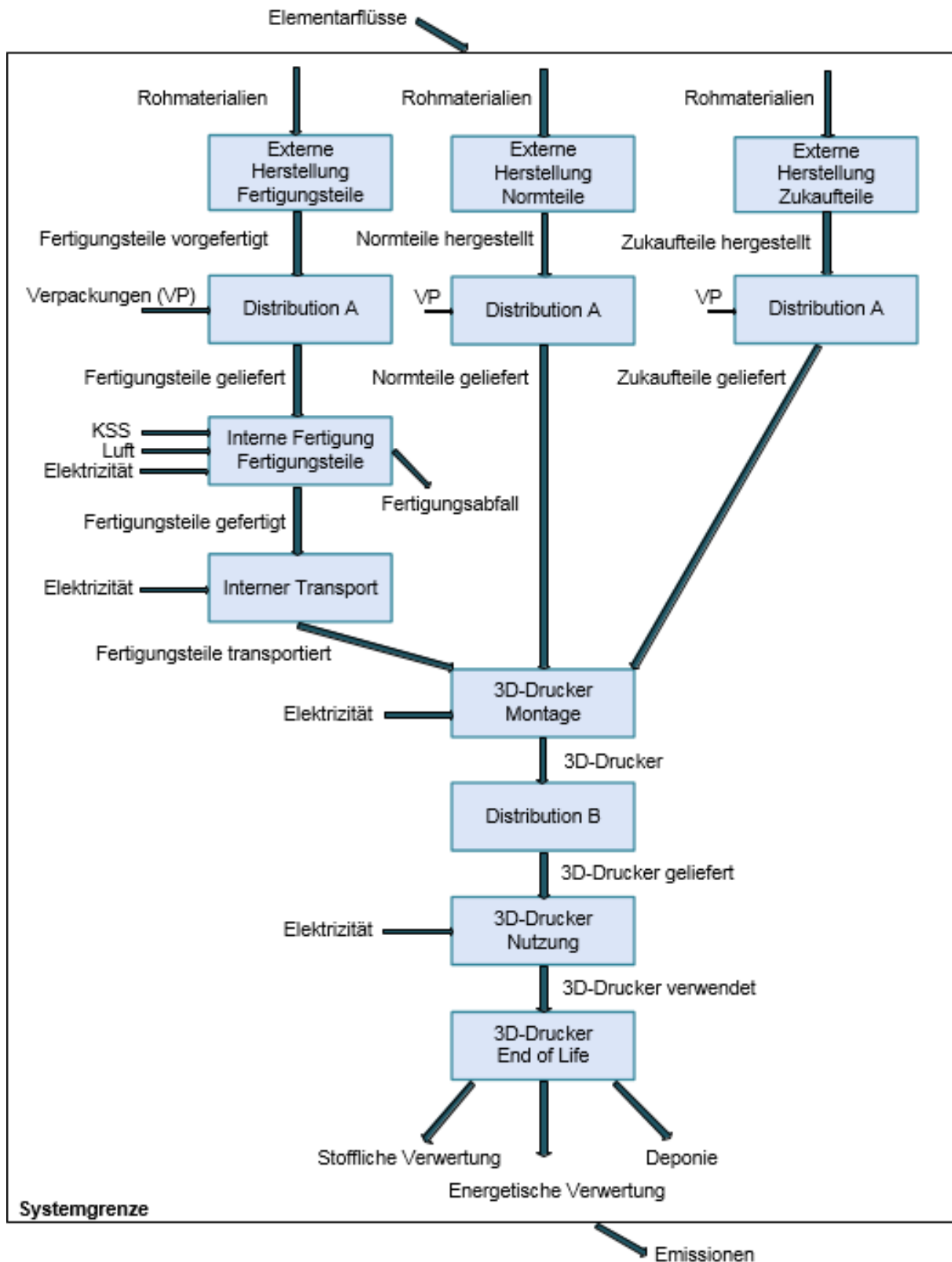


Abbildung 24: Berücksichtigte Stufen des Lebensweges

Wie in der obigen Abbildung zu erkennen ist, besteht das betrachtete System aus den drei Hauptsträngen der Fertigungsteile, der Normteile und der Zukaufteile. Dabei werden bei der jeweiligen externen Herstellung der Teile ausschließlich die verwendeten Materialien berücksichtigt. Zusätzliche externe Produktionsprozesse und Ener-

gieverbräuche werden nicht beachtet. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Norm- und Zukaufteile im Anschluss an die Distribution A ohne weitere zu beachtende Schritte am Drucker montiert werden.

Nicht in die Studie miteinbezogen werden:

- Das PLA-Filament,
- externes Netzteil, externe Datenübertragung und Datenspeicherung für die Verwendung des Druckers,
- Reparaturen und Wartung (Betrachtung nur in der Auswertungsphase),
- etwaige vorgelagerte Transporte von Materialien oder Bauteilen zu den direkten Lieferanten der Pilotfabrik,
- Herstellung und Entsorgung der Infrastruktur (Maschinen, Aggregate, Transportmittel),
- Umweltwirkungen durch Kühlschmierstoff (KSS)-Verlust des KSS-Kreislaufs während der Fertigung;

Da es sich bei der Bestimmung von, für die Studie relevanten, Inputs und Outputs des Produktsystems um einen iterativen Prozess handelt, können sich diese während der Ökobilanzerstellung durchaus ändern. Als Abschneideregeln werden die 1%- und die 5%-Regel auf Prozessebene festgelegt, was bedeutet, dass Inputmaterialien im Produktsystem berücksichtigt werden, wenn sie im jeweiligen Teilprozess des Lebensweges mehr als 1% der Masse des gewünschten Outputs in dem Prozess umfassen. Gesamt sollen die vernachlässigten Stoffmengen bei einem Prozess aber nicht mehr als 5% des Outputs betragen.¹³²

Der geographische Rahmen dieser Studie ist die Druckerherstellung in der TU Wien Pilotfabrik und die Verwendung und Entsorgung in Österreich. Die vorgefertigten Fertigungsteile, die Norm- und die Zukaufteile werden innerhalb Europas hergestellt und auf einem europaweiten Markt gehandelt und von dort bezogen. Der eigentliche Ursprung und die genaue Herstellung der Teile werden aufgrund des Fehlens von genauen Daten und wegen Datenbankeinschränkungen nicht berücksichtigt.

4.2.4 Methode für die Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien

Die verwendete Methode ist die CML-Methode (v4.4, Januar 2015) in der openLCA-Software. Mit Hilfe dieser Methode werden Stoff- und Energieflüsse in unterschiedlichen Wirkungskategorien bewertet. Ziel ist es dabei, alle direkten stofflichen und energetischen Austauschbeziehungen zwischen der natürlichen Umwelt und dem Produktsystem quantitativ abzubilden. Es wird davon ausgegangen, dass Emissio-

¹³² (vgl. Klöpffer and Grahl, 2009, S. 55).

nen mit gleicher Wirkung medienübergreifend zusammengefasst werden können und es erfolgt eine auswirkungsorientierte Klassifizierung von Stoff- und Energieströmen zur Wirkungsabschätzung.¹³³

Die in dieser Studie näher betrachteten Wirkungskategorien wurden auf Basis der Product Category Rules (PCR)¹³⁴, welche die Regeln und Anforderungen für die Umweltdeklaration einer bestimmten Produktkategorie definieren, ausgewählt und werden in nachstehender Tabelle gezeigt:

Wirkungskategorie	Einheit des Wirkungsindikators	Erläuterung
Treibhauspotential (GWP100)	kg CO ₂ -Äquivalente	Beinhaltet Treibhausgase (unterschiedliche Strahlungseigenschaften, Lebensdauern in der Atmosphäre), die entsprechend ihres auf 100 Jahre bezogenen globalen Erwärmungspotentials gewichtet sind; Gemeinsame Maßeinheit der THG auf Basis des Strahlungsantriebs von CO ₂ ¹³⁵ ;
Versauerung	kg SO ₂ -Äquivalente	Wirkung versauernder Emissionen auf Wasser- und Bodensysteme ausgedrückt in massebezogener SO ₂ -Äquivalente;
Eutrophierung	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente	Erhöhung der Konzentration von chemischen Nährstoffen in einem Ökosystem, was zu abnormaler Produktivität führt;
Ozonbildungspotential (Sommersmog)	kg C ₂ H ₄ -Äquivalente	Belastung der bodennahen Luft durch hohe Konzentration von Ozon und Photooxidantien; Entstehung durch eine Reaktion von Hitze und UV-Strahlung mit Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen;

Tabelle 17: Berücksichtigte Wirkungskategorien

Die gelisteten Wirkungskategorien sind in der Publikation „LCIA methods“ genauer beschrieben.¹³⁶

Als primäre Wirkungskategorie wird das Treibhauspotential (GWP 100) vertieft analysiert und diskutiert.

¹³³ vgl. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de> (13.03.2018)

¹³⁴ PCR für Spezialmaschinen (UN CPC 44) und PCR für Laserdrucker (UN CPC 45264) berücksichtigt – für 3D-Drucker per se derzeit keine PCR definiert (www.environdec.com)

¹³⁵ (vgl. Pachauri and IPCC, 2008, S. 40).

¹³⁶ (vgl. Acero, Rodríguez, and Ciroth, 2014, S. 16ff).

4.2.5 Methoden zur Auswertung

Hier werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet, wobei Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet bzw. Einschränkungen erläutert werden. Die Arbeitsschritte der Identifizierung signifikanter Parameter, Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und der Konsistenzprüfung werden dabei durchgeführt.

4.2.6 Daten und Datenqualität

In der openLCA-Software wird die ELCD (European Reference Life Cycle Database)-Datenbank (Version 3.2) verwendet, welche als Sachbilanzdatenbank eine Sammlung von etlichen Datensätzen bereitstellt.

Die Methoden zur Erkundung und die Eigenschaften der benötigten produktbezogenen Ausgangsdaten werden in folgender Tabelle dargestellt:

Bezeichnung	Methode	Einheit	Anmerkung
Fertigungsteile (Materialien)	Zuteilung der Werkstoffe und Berechnung der Massen mittels CAD-Modell;	kg;	
Normteile (Materialien)	Zuteilung der Werkstoffe und Berechnung der Massen mittels CAD-Modell, Bestelldokumente, Rechnungen;	kg;	
Zukaufteile (Materialien)	Zuteilung der Werkstoffe und Berechnung der Massen mittels CAD-Modell, Bestelldokumente, Rechnungen, Literatur;	kg;	
Transportwege	Erkunden der Lieferantenstandorte mit anschl. Berechnung der Entfernungen mit Google Maps, Annahmen;	km;	Lieferanten und deren Standorte aus den Bestelllisten;
Verpackungsmaterialien	Erfahrungswerte, Annahmen;	kg;	
Energieverbrauch (Fertigung, Montage, Verwendung)	Messungen, Annahmen, Berechnungen mit Hilfe von Datenblättern;	MJ;	
Betriebsstoffe	Datenblätter, Annahmen;	kg, l, m ³ ;	
Abfälle	Annahmen;	kg, l, m ³ ;	
Deponie, energetische und stoffliche Verwertung;	Datenblätter, Literatur, Annahmen;	kg;	

Tabelle 18: Dateneigenschaften

Die detaillierten Beschreibungen und Eigenschaften der Daten werden in der Sachbilanz durchgeführt.

Die verwendeten Daten sollen möglichst vollständig, konsistent und nachvollziehbar sein, was sowohl für die Datenerhebung und Prozessmodellierung als auch für die Auswertung der Daten und die Ergebnisse gilt. Des Weiteren sollen die Daten repräsentativ sein, d. h. einer gewissen Aktualität entsprechen.

4.2.7 Annahmen und Einschränkungen

Annahmen werden hauptsächlich bei der Bestimmung von produktbezogenen Daten, die nicht ganz eindeutig oder gar nicht vorhanden sind, getroffen. Dazu gehören auch Annahmen bzgl. Materialaufschläge, Prozesse und Verpackungen. Bei Einschränkungen der verwendeten Datenbank in Bezug auf zu modellierende Materialien werden ökologisch vergleichbare Materialien verwendet. Des Weiteren werden Annahmen bzgl. des Transportweges zum Endkunden (Distribution B) aufgrund von fehlenden Referenzdaten getroffen.

Wie schon im Abschnitt des zu untersuchenden Produktsystems und der Systemgrenzen erwähnt, sind verschiedene Einschränkungen notwendig. Wie oben beschrieben, sind des Weiteren Einschränkungen bezogen auf die Verfügbarkeit von diversen produktbezogenen Daten und die Begrenztheit der ELCD-Datenbank unvermeidlich.

Genauere Ausführungen und Beschreibungen der getroffenen Annahmen werden im Bereich der Sachbilanz angeführt.

4.3 Erstellung der Sachbilanz

Im Folgenden werden alle für die Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers notwendigen Daten gesammelt bzw. berechnet, den verschiedenen Prozessmodulen zugeordnet und anschließend in die openLCA-Software eingegeben.

4.3.1 Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Materialien und Transport

Vorab wurden die Stücklisten, die Bestelllisten und die Arbeitspläne des Druckers von den Datenbanken der TU Wien Pilotfabrik besorgt. Die bereitgestellten Stücklisten enthalten jedoch keine, zu den einzelnen Bauteilen zugeordneten Werkstoffe und Massen, was für die Erstellung der Ökobilanz aber unverzichtbar ist.

Die Werkstoffe wurden somit anhand der Bestelllisten und in Rücksprache mit den Mitarbeitern der Pilotfabrik den Einzelteilen zugeordnet und in die Stücklisten einge-

tragen. Mit dem Programm Catia V5 und mit Hilfe des CAD-Modells des Druckers wurden dann die benötigten Einzelmassen der Bauteile ermittelt.

Die genannten Stücklisten sind dabei in Normteile (NT, gelb), in Zukaufteile (ZT, blau) und in Fertigungsteile (FT, weiß) gegliedert, wobei bei den Fertigungsteilen die Halbzeuge extern besorgt werden und die Endfertigung mit den Maschinen der Pilotfabrik durchgeführt wird. Demgegenüber werden die NT und ZT in der Pilotfabrik nicht weiter bearbeitet, sondern direkt montiert.

Nr.:	PART NAME	DB PART DESC	Flow Name in openLCA	Anzahl/Drucker	Teile-Typ	Material / Kategorie	Masse in kg je Stück
1	000740/A	Sechskantmutter ISO 4032 M6	NT Stahl verzinkt	9	Normteil	Stahl verzinkt	0,0027
2	000930/A	Sechskantmutter ISO 4032 M3	NT X5CrNi18-10	13	Normteil	X5CrNi18-10	0,0004
3	000933/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 12	NT Stahl verzinkt	4	Normteil	Stahl verzinkt	0,0012
4	000945/A	Sechskantmutter DIN EN ISO 7040 - M3	NT Stahl verzinkt	17	Normteil	Stahl verzinkt	0,0007
5	001512/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 8	NT Stahl verzinkt	14	Normteil	Stahl verzinkt	0,001
6	001608/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M2 x 12	NT Stahl verzinkt	6	Normteil	Stahl verzinkt	0,0005
7	001649/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 25	NT Stahl verzinkt	9	Normteil	Stahl verzinkt	0,002
8	001727/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 35	NT Stahl verzinkt	2	Normteil	Stahl verzinkt	0,0025
9	001733/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 6	NT Stahl verzinkt	10	Normteil	Stahl verzinkt	0,0009
10	001777/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M6 x 10	NT Stahl verzinkt	3	Normteil	Stahl verzinkt	0,006
11	001807/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M3 x 40	NT Stahl verzinkt	6	Normteil	Stahl verzinkt	0,0027
12	001833/A	Raendelschraube DIN 464 M3 x 12	NT Stahl verzinkt	1	Normteil	Stahl verzinkt	0,0036
13	001874/A	Scheibe ISO 7089 - 5	NT Stahl verzinkt	10	Normteil	Stahl verzinkt	0,0004
14	001875/A	Scheibe ISO 7089 - 3	NT Stahl verzinkt	16	Normteil	Stahl verzinkt	0,0001
15	001876/A	Scheibe ISO 7089 - 6	NT Stahl verzinkt	38	Normteil	Stahl verzinkt	0,001
16	001899/A	Stellfuss M6 x 60 Spindel	NT Stahl verzinkt	4	Normteil	Stahl verzinkt	0,0014
17	001899/A	Stellfuss M6 x 60 Spindel / Gummifuß	NT Gummifuß	4	Normteil	Gummi	0,003
18	002017/A	Sicherungsring DIN 471 15 x 1	NT Sicherungsringe	24	Normteil	Stahl	0,0007
19	002046/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M6 x 55	NT Stahl verzinkt	2	Normteil	Stahl verzinkt	0,016
20	002150/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M5 x 8	NT Stahl verzinkt	14	Normteil	Stahl verzinkt	0,0035
21	002176/A	Linseflachkopfschraube ISO7380 M6x16	NT X5CrNi18-10	14	Normteil	X5CrNi18-10	0,006
22	002205/A	Flügelschraube M4x18	NT Stahl verzinkt	2	Normteil	Stahl verzinkt	0,005
23	002209/A	Linseflachkopfschraube ISO7380 M6x8	NT X5CrNi18-10	14	Normteil	X5CrNi18-10	0,004
24	002212/A	Flachkopfschraube mit Schlitz ISO1580-M3x30	NT Stahl verzinkt	4	Normteil	Stahl verzinkt	0,002
25	002216/A	Zylinderschraube mit Innensechskant DIN 912 M5 x 30	NT Stahl verzinkt	4	Normteil	Stahl verzinkt	0,0069
26	002217/A	Distanzmutter HTSN-M3-10-6-2	NT Distanzmutter	8	Normteil	PA	0,0003

Tabelle 19: Stückliste Normteile

Nr.:	PART NAME	DB PART DESC	Flow Name in openLCA	Anzahl/Drucker	Teile-Typ	Material / Kategorie	Masse in kg je Stück
1	000932/A	Kugellager_id329	ZT NIRO	26	Zukaufteil	v.a. Nichtrostender Stahl	0,0008
2	001242/A	Riemenrolle - GT2Pulley	ZT Riemenrolle	3	Zukaufteil	AlMgSi	0,005
3	001494/A	Luefter 40 x 40 x 10 Extruder/Minitronics	ZT PP	1	Zukaufteil	v.a. PP	0,012
4	001523/A	Luefter 30 x 30 x 10	ZT PP	1	Zukaufteil	v.a. PP	0,006
5	001671/A	Stepper Motor - NEMA 17	ZT Elektrik	4	Zukaufteil	Elektrik	0,36
6	001946/A	Platine Minitronics V1.1	ZT Elektronik	1	Zukaufteil	Elektronik	0,16
7	001955/A	Full metal cold end	ZT Eloxiertes Aluminium	1	Zukaufteil	Eloxiertes Aluminium	0,087
8	001958/A	Düse - E3D v6.3 Nozzle 1.75 - ALL	ZT Düse	1	Zukaufteil	Kupfer	0,003
9	001959/A	HotEnd HeatBlock - E3D v6	ZT AlMg3	1	Zukaufteil	AlMg3	0,007
10	001978/A	Heatsink - E3D v6 HotEnd	ZT AlMg3	1	Zukaufteil	AlMg3	0,023
11	001980/A	Heatbreak - E3D v6 HotEnd	ZT Heatbreak	1	Zukaufteil	X8CrNi18-9	0,004
12	001981/A	Luefterhalterung Hot End	ZT PP	1	Zukaufteil	PP	0,01
13	001991/A	Heizbett 214x214x3mm	ZT AlMg3	1	Zukaufteil	AlMg3 (angenommen)	0,4
14	001993/A	Kugellager 608	ZT NIRO	1	Zukaufteil	v.a. Nichtrostender Stahl	0,011
15	002000/A	Cold End Komponente	ZT Eloxiertes Aluminium	1	Zukaufteil	Eloxiertes Aluminium	0,012
16	002013/A	Buchse IGUS GFM-0809-08	ZT Buchse	6	Zukaufteil	PTFE	0,0002
17	002040/A	Endschalter Miniature Microswitch	ZT Elektrik	3	Zukaufteil	Elektrik	-
18	002050/A	D-Sub 15 Male Cable Connector	ZT Elektronik	1	Zukaufteil	Elektronik	-
19	002051/A	D-Sub 15 Female Cable Connector	ZT Elektronik	1	Zukaufteil	Elektronik	-
20	002053/A	Wippschalter-Stromversorgung	ZT Elektrik	1	Zukaufteil	Elektrik	-
21	002085/A	Isolierplatte Heizbett	ZT Isolierplatte HB	1	Zukaufteil	PUR Hartschaum	0,082
22	002125/A	Linearlager_LM8UU	ZT Linearlager	12	Zukaufteil	Kunststoff, v.a. Stahl	0,015
23	002211/A	Heizbett-Feder	ZT HB-Feder	4	Zukaufteil	Federstahl	0,001
24	002225/A	Feder - Endposition	ZT Feder-Endposition	2	Zukaufteil	X10CrNi18-8	0,0015
25	002225/A	RaspberryPi-3.0	ZT Elektronik	1	Zukaufteil	Elektronik	-
26	002254/A	Induktiver Sensor	ZT Elektronik	1	Zukaufteil	Elektronik	-
27		GT2 Zahnriemen 6mm; Länge: 5m	ZT Zahnriemen	1	Zukaufteil	Gummi	0,0333
28		GT2 Zahnriemen 6mm; Länge: 5m	ZT Zahnriemen	1	Zukaufteil	Fiberglasgeflecht	0,0166
29		PTFE Schlauch 4mm x 2mm	ZT PTFE Schlauch	1	Zukaufteil	PTFE	0,014
30		Kabel, Verdrahtungsleitungen 6m (angenommen)	ZT Kabel	-	Zukaufteil	Kupfer	0,06
31		Kabel, Verdrahtungsleitungen 6m (angenommen)	ZT Kabel	-	Zukaufteil	PVC	0,036
32		Sonstige Elektronik	ZT Elektronik	-	Zukaufteil	Elektronik	-

Tabelle 20: Stückliste Zukaufteile

Hier ist anzufügen, dass die Gewichtsaufteilungen beim Bauteil Zahnriemen¹³⁷ und beim Bauteil Kabel¹³⁸ aus der Literatur entnommen wurden.

Nr.:	PART NAME	DB PART DESC	Flow Name in openLCA	Anzahl/Drucker	Teile-Typ	Bearbeitung	Material / Kategorie	Masse in kg je Stück
1		Winkelprofil Rahmenunterseite Schalter	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,334
2		Winkelprofil Rahmen Vertikal	Winkelprofile	4	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,308
3		Winkelprofil Rahmenunterseite Stecker	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,286
4		Winkelprofil Rahmenoberseite	Winkelprofile	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,29
5	001232/A	Riemenrolle - GT2 Idler Pulley	Rundmaterial	13	Fertigungsteil	Drehen	AlMgSi	0,002
6		Fuehrungsstange_x Schlittenfuehrung	Fuehrungsstangen	2	Fertigungsteil	Drehen	X5CrNi18-10	0,15
7	001564/A	Fuehrungsstange Extruderfuehrung	Fuehrungsstangen	2	Fertigungsteil	Drehen	X5CrNi18-10	0,114
8		Fuehrungsstange Z	Fuehrungsstangen	2	Fertigungsteil	Drehen	X5CrNi18-10	0,151
9	001707/A	Winkelprofil Rollenhalterung Tischfuehrung	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,019
10	001793/A	Winkelprofil Tischeauflage links	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,152
11	001794/A	Winkelprofil Tischeauflage rechts	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,157
12	001797/A	Flachblech Tischeauflage Verbindung	Bleche	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,06
13	001911/A	Elektronik _Abdeckung/ Winkelprofil	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,3
14	001921/C	Biegeblech Tischfuehrung	Bleche	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,194
15	001987/A	Flachblech Extruderplattform	Bleche	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,117
16	002004/A	Winkelprofil Fuehrungsschlitten	Winkelprofile	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,072
17	002023/A	Winkelprofil Stepper Motor Boden	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,033
18	002024/A	Winkelprofil Halterung Umlenkrulle 1	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,027
19	002030/A	Winkelprofil Halterung Umlenkrulle 2	Winkelprofile	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,027
20	002038/A	Luefterhalterung Erzeugniskuehlung	Luefterhalterung	1	Fertigungsteil	3D-Druck	PLA	0,007
21	002095/A	Abstandhalter Endschalter XY 1	Bleche	1	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,002
22		Winkelprofil Rahmenunterseite/ -oberseite	Winkelprofile	4	Fertigungsteil	Fräsen	AlMgSi	0,293
23	002147/A	Lagerbock	Rundmaterial	12	Fertigungsteil	Drehen	AlMgSi	0,012
24	002156/A	Riemenhalter	Rundmaterial	2	Fertigungsteil	Drehen	AlMgSi	0,002
25	002172/A	Z-Profil_40x60x40x4	Bleche	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,05
26		Befestigungswinkel Filament	Bleche	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,038
27	002189/A	Filamentlagerung	Fuehrungsstangen	1	Fertigungsteil	Drehen	X5CrNi18-10	0,16
28	002200/A	Distanzhuelse d6x8	Rundmaterial	4	Fertigungsteil	Drehen	AlMgSi	0,0003
29	002203/A	Distanzhuelse d6x16	Rundmaterial	2	Fertigungsteil	Drehen	AlMgSi	0,0007
30	002206/A	Frästeil Drucktisch	Bleche	2	Fertigungsteil	Fräsen	AlMg3	0,105
31	002226/A	Pilotfabrik Logo	-	1	Fertigungsteil	3D-Druck	PLA	0,004

Tabelle 21: Stückliste Fertigungsteile

Anschließend wurden die einzelnen Bauteile zu passenden Bauteilgruppen zusammengefasst, damit eine übersichtliche Handhabung in openLCA möglich ist. Dabei wurde darauf geachtet, dass in einer Gruppe immer der gleiche Werkstoff und der gleiche Lieferant vorkommen. Wurden nun mehrere Bauteile zu einer Gruppe zusammengefasst, dann hat diese den Namen des Werkstoffs mit vorangestelltem NT für Normteile oder ZT für Zukaufteile. War keine Zusammenfassung von mehreren Bauteilen möglich, dann wurde der Name des Bauteils mit vorangestelltem NT oder ZT behalten. Die Fertigungsteile wurden zu Winkelprofilen, Rundmaterial, Führungsstangen, Blechen und Lüfterhalterung zusammengefasst. Dadurch ergibt sich folgende Einteilung für die weiteren Arbeitsschritte:

¹³⁷ vgl. <https://locxess.de/3D-Drucker-Zubehoer/> (05.01.2018)

¹³⁸ vgl. <http://www.meinhart.at/fileadmin/media/Downloads/> (05.01.2018)

openLCA						
relative Masse (gef.)	Bauteilgruppe	Masse in kg (gefertigt)	Masse in kg (Halbzeug)	Transport [km]	Transportmittel	Lieferant
3,20%	NT Stahl verzinkt	0,3036	0,3036	450	Klein - LKW	Schraubenking
1,53%	NT X5CrNi18-10	0,1452	0,1452	450	Klein - LKW	Schraubenking
0,13%	NT Gummifuß	0,012	0,012	345	Klein - LKW	Kipp GmbH
0,18%	NT Sicherungsringe	0,0168	0,0168	450	Klein - LKW	Schraubenking
0,03%	NT Distanzmutter	0,0024	0,0024	1200	LKW	rs-online (D-Bad H.)
0,34%	ZT NIRO	0,0318	0,0318	270	Klein - LKW	Skf-Steyr
0,16%	ZT Riemenrolle	0,015	0,015	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
0,30%	ZT PP	0,028	0,028	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
15,83%	ZT Elektrik/ Elektronik	1,5	1,5	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
1,04%	ZT Eloxiertes Aluminium	0,099	0,099	1800	LKW	reprapworld (NL)
0,03%	ZT Düse	0,003	0,003	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
4,54%	ZT AlMg3	0,43	0,43	1800	LKW	reprapworld (NL)
0,04%	ZT Heatbreak	0,004	0,004	1800	LKW	reprapworld (NL)
0,01%	ZT Buchse	0,0012	0,0012	375	Klein - LKW	IGUS (AT)
0,87%	ZT Isolierplatte HB	0,082	0,082	-	kein Transport	-
1,90%	ZT Linearlager	0,18	0,18	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
0,04%	ZT HB-Feder	0,004	0,004	1350	LKW	Febrotec (D-Halver)
0,03%	ZT Feder-Endposition	0,003	0,003	1350	LKW	Febrotec (D-Halver)
0,53%	ZT Zahnriemen	0,0499	0,0499	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
0,15%	ZT PTFE Schlauch	0,014	0,014	1320	LKW	roboter-bausatz (D)
1,01%	ZT Kabel	0,096	0,096	-	kein Transport	-
47,10%	Winkelprofile	4,463	4,865	105	Klein - LKW	BlechA (Neunk.)
1,86%	Rundmaterial	0,1766	0,2472	30	Klein - LKW	Fixmetall (B.a.G.)
10,45%	Führungsstangen	0,99	1,03	45	Klein - LKW	Frankstahl (Guntr.)
8,64%	Bleche	0,819	0,86	30	Klein - LKW	Fixmetall (B.a.G.)
0,07%	Lüfterhalterung	0,007	0,007	-	kein Transport	-
100,00%	Summe	9,4765	10,0301			

Tabelle 22: Einteilung in Bauteilgruppen

Die gefertigten Massen entsprechen dabei den Massen, die mit Hilfe des CAD-Modells bzw. der Bestelllisten erkundet wurden. Die Massen für die Halbzeuge sind aufgrund des gesetzten Untersuchungsrahmens ausschließlich für die Fertigungsteile relevant und wurden wiederum mittels CAD-Modell berechnet. Dafür wurden Referenzbauteile gewählt und der jeweilige unbearbeitete Zustand wurde nachkonstruiert. Damit konnte die relative Massenzunahme bestimmt werden. Mit dieser wurde dann die Gesamtmasse der Halbzeuge für jede FT-Bauteilgruppe extra berechnet.

Die Masse für die Position ZT Elektrik/ Elektronik wird mit 1,5 kg berechnet, wobei hier auch die Motoren inkludiert sind. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Die reale Gesamtmasse des Druckers sowie die Masse des Druckers ohne Elektrik/ Elektronik (CAD-Modell) sind bekannt. Die Differenz der beiden entspricht somit der Masse der Elektrik/ Elektronik-Komponenten. Für die Zuordnung und Aufteilung der Materialien wurde Literatur^{139 140 141} verwendet, welche sich mit den Bestandteilen von Elektroschrott befasst. Daraus lässt sich dann schließen, dass diese Bestandteile gleichermaßen in Elektrobauteilen vorhanden sein müssen. Basierend auf der Betrachtung der vorhandenen Bauteile und der vorliegenden Literatur wurden noch kleinere Anpassungen an der relativen Materialzusammensetzung vorgenommen. In folgender Tabelle ist die verwendete Zusammensetzung dargestellt:

¹³⁹ (vgl. Maurell-Lopez et al., o.J.).

¹⁴⁰ (vgl. Maurell-Lopez et al., 2011).

¹⁴¹ (vgl. Cui and Zhang, 2008).

Bestandteile in Elektrik/ Elektronikbauteilen	Relative Masse	Masse in kg
Kunststoffe	40,00%	0,6
Kupfer	27,00%	0,405
Silicium	9,00%	0,135
Eisen	6,00%	0,09
Aluminium	6,00%	0,09
Calcium	2,00%	0,03
Brom	2,00%	0,03
Blei	2,00%	0,03
Nickel	2,00%	0,03
Zink	1,00%	0,015
Zinn	1,00%	0,015
Fluor	0,80%	0,012
Chlor	0,40%	0,006
Antimon	0,40%	0,006
Magnesium	0,30%	0,0045
Silber	0,08%	0,0012
Gold	0,01%	0,00015
Palladium	0,01%	0,00015
Gesamt	100,00%	1,5

Tabelle 23: Materialzusammensetzung Elektrik/ Elektronik-Teile

Die Entfernungen der Lieferanten zur TU Wien Pilotfabrik wurden jeweils mit Google Maps¹⁴² erkundet und mit einem Faktor von 1,5 multipliziert. Dieser Faktor wird berücksichtigt, weil die Transportmittel wieder zu ihrem Ausgangspunkt zurückkehren müssen und dies teilweise leer und teilweise mit neuen Aufträgen bewältigen. Daher wird die Distanz nicht doppelt, sondern mit dem Faktor 1,5 berücksichtigt. Annahmen bzgl. der verwendeten Transportmittel wurden insofern getroffen, dass Lieferungen mit mehr als 500 km Entfernung mittels LKW (27 t maximale Nutzlast) und Lieferungen mit geringeren Distanzen mittels Klein-LKW (3,3 t maximale Nutzlast) durchgeführt werden. Wie bereits im Untersuchungsrahmen beschrieben, wird nicht berücksichtigt, ob der Lieferant der Hersteller oder ein Zwischenhändler der Bauteile ist. Somit werden etwaige weitere Transportwege der Bauteile nicht miteinbezogen.

Die verwendeten Verpackungsmaterialien der gelieferten Teile sind Karton, Kunststoffolie und Papier. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden die Verpackungen der einzelnen Teile zusammengefasst betrachtet. Die Gesamtmassen der jeweiligen Werkstoffe wurden auf Basis von Erfahrungswerten und Annahmen festgelegt. Die Verpackungsmaterialien werden im Transportvorgang (Distribution A) berücksichtigt und auf die durchschnittliche Transportentfernung bezogen.

¹⁴² <https://www.google.at/maps/>

		Verpackungsmaterialien	Masse [kg]
Transportentfernung ges. [km]	21090	Karton	1
Mittlere Transportentfernung [km]	917	Papier	0,3
		Kunststoffolie (PE)	0,2
		Gesamt	1,5

Tabelle 24: Verpackungsdaten

In welcher Form der 3D-Drucker zum Endkunden geliefert wird, steht zum jetzigen Zeitpunkt nicht fest. Daher wird eine mögliche Verpackung des Druckers für die Auslieferung (Distribution B) nicht berücksichtigt.

4.3.2 Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Fertigung und Montage

Die genauen Abläufe bei der Herstellung des 3D-Druckers in der Pilotfabrik werden in folgender Abbildung dargestellt:

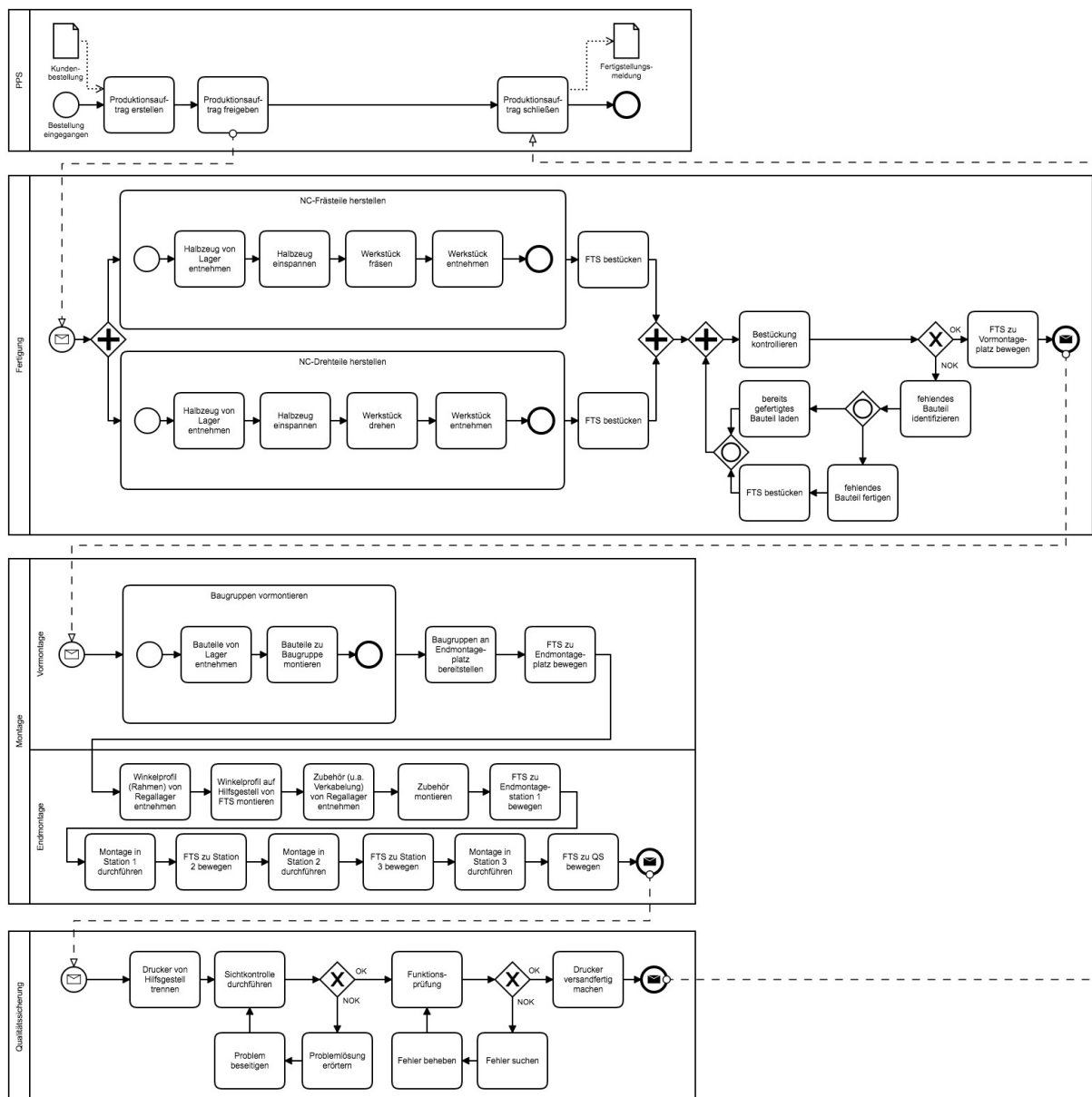


Abbildung 25: BPMN-Modell der Abläufe in der Pilotfabrik

Die für die Fertigung in der Pilotfabrik verwendeten Maschinen sind die emco MAXXMILL 500 und die emco MAXXTURN 45. Die technischen Eigenschaften dieser Maschinen sowie jene des Fahrerlosen Transportsystems (FTS) und des Roboterarms Universal UR5 sind in den Datenblättern im Anhang zu finden.

Die Fertigungsteile sind relativ einfach zu fertigende Werkstücke und daher werden, nach Recherche und nach Rücksprache mit dem Hersteller emco, deutlich geringere Leistungsaufnahmen bei den Fertigungsmaschinen angenommen, welche dann auch für die Berechnung des Energieverbrauchs herangezogen werden.

	Maximale Leistungsaufnahme der Maschine [kW]	Angenommene Leistungsaufnahme [kW]
emco MAXXMILL 500	34,5	11,5
emco MAXXTURN 45	25	8,3

Tabelle 25: Leistungsaufnahmen Fräs- bzw. Drehmaschine

Mit diesen Werten und mit Hilfe der Einzelzeiten aus den Arbeitsplänen wurde der Energieverbrauch für die Fertigung aller Fertigungsteile in der Pilotfabrik berechnet.

Artikelnummer	Materialbezeichnung Stückliste	Abmessungen	KLT-Größe	Fertigungslosgröße	Einzelzeit [sek]	Rüstzeit [min]	Anzahl in Stückliste	Arbeitsplatz	Energieverbrauch [MJ]
102095/A	Abstandhalter Endschalter XY 1	20x10x4	2115	1	60	20	2	MaxxMill500	1,38
102188/A	Befestigungswinkel Filament	18x50x120x5	3215	2	210	20	2	MaxxMill500	2,415
101921/C	Biegeblech Tischfuehrung	222x100x4	3215	1	270	50	1	MaxxMill500	3,105
102203/A	Distanzhülse d6x16	6x16x1	2115	1	45	30	2	MaxxTurn45	0,747
102200/A	Distanzhülse d6x8	6x16x1	2115	1	45	30	4	MaxxTurn45	1,494
101911/A	Elektronik_Abdeckung	386x50x68x2	4115	1	510	30	1	MaxxMill500	5,865
102189/A	Filamentlagerung	400x8	3215	1	120	30	1	MaxxTurn45	0,996
101987/A	Flachblech Extruderplattform	128x100x4	3215	1	270	50	1	MaxxMill500	3,105
101797/A	Flachblech Tischauflage Verbindung	222x20x4	3215	1	90	30	1	MaxxMill500	1,035
102206/A	Frästeil Drucktisch	48x47x22	4315	1	270	60	2	MaxxMill500	6,21
101564/A	Fuehrungsstange Extruderfuehrung	296x8	4315	1	90	40	2	MaxxTurn45	1,494
101563/A	Fuehrungsstange Schlittenfuehrung	394x8	zu klein	1	90	40	2	MaxxTurn45	1,494
	Fuehrungsstange Z			1	90	40	2	MaxxTurn45	1,494
102147/A	Lagerbock	25x15	4115	1	120	80	12	MaxxTurn45	11,952
102156/A	Riemenhalter2	10x17	3215	1	195	100	2	MaxxTurn45	3,237
101232/A	Umlenk-Riemenrolle - GT2 Idler Pulley	14x11	2115	1	120	50	13	MaxxTurn45	12,948
102004/A	Winkelprofil Fuehrungsschlitten	106x40x30x3	3215	1	120	30	2	MaxxMill500	2,76
102024/A	Winkelprofil Halterung Umlenkrolle 1	25x50x47x3	3215	1	90	60	1	MaxxMill500	1,035
102030/A	Winkelprofil Halterung Umlenkrolle 2	25x50x47x3	3215	1	90	60	1	MaxxMill500	1,035
100736/A	Winkelprofil Rahmen Vertikal	400x50x50x3	zu klein	2	210	40	4	MaxxMill500	4,83
100737/A	Winkelprofil Rahmenunterseite	400x50x50x3	zu klein	1	240	50	3	MaxxMill500	8,28
100741/A	Winkelprofil Rahmenoberseite	400x50x50x3	zu klein	2	330	10	2	MaxxMill500	3,795
100725/A	Winkelprofil Rahmenunterseite Elektr.abd	400x50x70x3	zu klein	1	390	60	1	MaxxMill500	4,485
101707/A	Winkelprofil Rollenhalterung Tischfuehrung	50x25x22x3	3215	1	60	40	1	MaxxMill500	0,69
102023/A	Winkelprofil Stepper Motor Boden	65x50x25x3	3215	1	120	50	1	MaxxMill500	1,38
101793/A	Winkelprofil Tischauflage links	265x50x25x3	4315	1	120	70	1	MaxxMill500	1,38
101794/A	Winkelprofil Tischauflage rechts	265x50x25x3	4315	1	120	70	1	MaxxMill500	1,38
102172/A	Z-Profil_40x60x40x4	42x40x60x4	3215	1	180	50	2	MaxxMill500	4,14
	Summe								94,161

Tabelle 26: Energieverbrauch Fertigung

Dies ergibt einen Energieverbrauch für die Fertigung aller Teile von 94,161 MJ.

Für den Montagevorgang des 3D-Druckers werden drei Positionen betrachtet. Das Fahrerlose Transportsystem ist während der Durchlaufzeit von 40 Minuten pro Drucker rund vier Minuten aktiv in Bewegung. Laut Hersteller beträgt hier die Stromaufnahme in Warteposition 1 A und in Bewegung 5 A, bei einer Nennspannung von 24 V. Der Roboterarm ist zehn Minuten und der Bosch Akkuschauber rund 120 Sekunden aktiv. In folgender Tabelle wird der Energieverbrauch für den Montagevorgang berechnet:

Montage	Einsatzzeiten	Leistungsaufnahme [W]	Energieverbrauch [MJ]
FTS	240 sek aktiv	120	0,288
	2160 sek passiv	24	0,05184
Universal URS	600 sek aktiv	150	0,09
Bosch Montageschr.	120 sek aktiv	800	0,096
	Summe		0,238

Tabelle 27: Energieverbrauch Montagevorgang

Die Leistungsaufnahme des Bosch Akkuschraubers wurde auf Basis von Recherchen mit 800 W angenommen. Der Energieverbrauch dieser Geräte während des Montagevorgangs beträgt somit 0,238 MJ.

4.3.3 Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. Nutzung des Druckers

Für die Nutzung des 3D-Druckers wird von den in Punkt 4.2.2 beschriebenen Verwendungsszenarios ausgegangen. Die Leistungsaufnahme des Druckers wurde bei Raumtemperatur in der Pilotfabrik während des Druckens eines TU Wien Logos gemessen. Diese beträgt durchschnittlich 107,5 W.

- Verwendungsszenario 1:

Der Druckvorgang für ein TU Wien Logo dauert 29 Minuten und 42 Sekunden. Mit diesen Angaben ergeben sich folgende Daten für die Nutzungsphase:

Verwendungsszenario 1	je TU Wien Logo	Hochrechnung auf Nutzungsdauer (5 J.)
PLA Verbrauch	4 g	11,04 kg
Energieverbrauch	0,192 MJ	529,92 MJ

Tabelle 28: Verbräuche Verwendungsszenario 1

Der 3D-Drucker verbraucht also mit diesen Daten 11,04 kg PLA und der Energieverbrauch bei einer Nutzungsdauer von fünf Jahren beträgt 529,92 MJ. Hier ist anzumerken, dass der Verbrauch von PLA nur als Information dienen soll und für die Lebenszyklusbewertung des Druckers nicht weiter von Bedeutung ist, sehr wohl jedoch der Energieverbrauch.

- Verwendungsszenario 2:

Für die durchschnittliche Leistungsaufnahme dieses Szenarios wird angenommen, dass sich diese gegenüber der gemessenen Leistungsaufnahme von Szenario 1 nicht unterscheidet. Mit den festgelegten Bedingungen ergeben sich folgende Daten für die Nutzungsphase:

Verwendungsszenario 2	je Druck	Hochrechnung auf Nutzungsdauer (5 J.)
PLA Verbrauch	nicht bekannt	nicht bekannt
Energieverbrauch	2,322 MJ	2856,06 MJ

Tabelle 29: Verbräuche Verwendungsszenario 2

Der Energieverbrauch bei einer Nutzungsdauer von fünf Jahren beträgt 2856,06 MJ.

Aufgrund der sehr guten Datenverfügbarkeit wurden alle Daten berücksichtigt und die Abschneideregeln im Bereich der Datenerhebung nicht angewendet.

4.3.4 Datenerhebung und Datenberechnung bzgl. End of Life des Druckers

In dieser Phase werden die Zerlegung des Druckers in seine Einzelteile, der Transport zu einer Entsorgungs- bzw. Verwertungseinrichtung und die restliche End of Life-Behandlung der einzelnen Werkstoffe berücksichtigt. Wie die Montage, wird auch die Zerlegung mittels Bosch Akkuschauber durchgeführt. Dabei wird von identischen Einsatzzeiten des Schraubers ausgegangen. Die Entfernung zu einer Entsorgungs- bzw. Verwertungseinrichtung wird pauschal mit 200 km angenommen.

Die ELCD-Datenbank stellt bei metallischen Werkstoffen Daten bereit, die bereits Recyclinganteile und End of Life-Behandlungen enthalten. Somit müssen diese in der Phase des End of Life nicht mehr berücksichtigt werden. Bei den Elektrik/ Elektronik-Bauteilen wird angenommen, dass diese vom Drucker demontiert und für eine mögliche Weiterverwendung aufbewahrt werden. Die restlichen Materialien werden in dieser Phase berücksichtigt und artgerecht behandelt. Die genauen Aufteilungen und detaillierten Eingaben in die Software können folgendem Unterpunkt entnommen werden.

4.3.5 Eingabe der Daten in openLCA

Die gesammelten Daten werden nun in die openLCA-Software eingegeben. Dabei wird mit den Sachbilanzdaten der ELCD-Datenbank (Version 3.2) gearbeitet. Der Aufbau wird hier so vorgenommen, dass im Anschluss eine Einteilung der Ergebnisse in die Lebenszyklusphasen

- Verwendung von Rohstoffen und Herstellung,
- Transport (Distribution A),
- Fertigung/ Montage,
- Transport (Distribution B),
- Nutzung und
- End of Life

möglich wird.

Der Vorgang ist hier genau so, wie im Untersuchungsrahmen beschrieben. Zunächst werden alle verwendeten Materialien den zuvor festgelegten und oben angeführten Bauteilgruppen zugeteilt. Dies wird unten am Beispiel der Winkelprofile gezeigt:

Process: Winkelprofile Produktion

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Uncert	Provider	
F Aluminium sheet	Materials production/Met...	4.86500	kg	none	P Aluminium sheet, production mix, at plant...	

Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Uncer	Avoided product	Data quality entr	Descripti
F Winkelprofile vorgefertigt	3D-Drucker	4.86500	kg	none			

Abbildung 26: Materialzuteilung Winkelprofile

Das Material Aluminium wird in der sogenannten Herstellung den Winkelprofilen zugeordnet und der Output lautet dann „Winkelprofile vorgefertigt“. Bei mehreren vorhandenen Datensätzen in der Datenbank werden diejenigen Daten verwendet, die repräsentativ für den europäischen Raum (RER) sind.

Anschließend werden alle vorgefertigten bzw. hergestellten Bauteilgruppen im Prozess „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ zum Output „verwendete Materialien“ zusammengefasst.

Process: Verwendung von Rohstoffen und Herstellung

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
F Bleche vorgefertigt	3D-Drucker	0.86000	kg	P Bleche Pr...		
F Führungsstangen vorgefertigt	3D-Drucker	1.03000	kg	P Führungs...		
F Lüfterhalterung vorgefertigt	3D-Drucker	0.00700	kg	P Lüfterhalt...		
F NT Distanzmutter hergestellt	3D-Drucker	0.00240	kg	P NT Distan...		
F NT Gummifuß hergestellt	3D-Drucker	0.01200	kg	P NT Gummi...		
F NT Sicherungsringe hergestellt	3D-Drucker	0.01680	kg	P NT Sicher...		
F NT Stahl verzinkt hergestellt	3D-Drucker	0.30360	kg	P NT Stahl v...		
F NT X5CrNi18-10 hergestellt	3D-Drucker	0.14520	kg	P NT X5CrNi...		
F Rundmaterial vorgefertigt	3D-Drucker	0.24720	kg	P Rundmate...		
F Winkelprofile vorgefertigt	3D-Drucker	4.86500	kg	P Winkelpro...		
F ZT AlMg3 hergestellt	3D-Drucker	0.43000	kg	P ZT AlMg3...		
F ZT Buchse hergestellt	3D-Drucker	0.00120	kg	P ZT Buchs...		
F ZT Düse hergestellt	3D-Drucker	0.00300	kg	P ZT Düse H...		
F ZT Elektrik/ Elektronik hergestellt	3D-Drucker	1.50000	kg	P ZT Elektri...		
F ZT eloxiertes Aluminium herge...	3D-Drucker	0.09900	kg	P ZT eloxier...		
F ZT Feder-Endposition hergestellt	3D-Drucker	0.00300	kg	P ZT Feder-...		
F ZT HB-Feder hergestellt	3D-Drucker	0.00400	kg	P ZT HB-Fe...		
F ZT Heatbreak hergestellt	3D-Drucker	0.00400	kg	P ZT Heatbr...		
F ZT Isolierplatte HB hergestellt	3D-Drucker	0.08200	kg	P ZT Isolierp...		
F ZT Kabel hergestellt	3D-Drucker	0.09600	kg	P ZT Kabel...		
F ZT Linearlager hergestellt	3D-Drucker	0.18000	kg	P ZT Linearl...		
F ZT NIRO hergestellt	3D-Drucker	0.03180	kg	P ZT NIRO H...		
F ZT PP hergestellt	3D-Drucker	0.02800	kg	P ZT PP Her...		
F ZT PTFE Schlauch hergestellt	3D-Drucker	0.01400	kg	P ZT PTFE S...		
F ZT Riemenrolle hergestellt	3D-Drucker	0.01500	kg	P ZT Rieme...		
F ZT Zahnriemen hergestellt	3D-Drucker	0.04990	kg	P ZT Zahnri...		

Outputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
F verwendete Materialien	3D-Drucker	10.03010	kg	

Abbildung 27: Zusammenfassung vorgefertigter bzw. hergestellter Bauteilgruppen

Dieser Output wird nun dem Prozess „Verwendung von Materialien + Distribution A“ zugefügt. Dazu kommen auch die unterschiedlichen Transportvorgänge der verschiedenen Lieferanten und die Verpackungsmaterialien.

Process: Verwendung von Materialien + Distribution A

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Provider	Description
F ₂ cartonboard boxes; mix...	Systems/Packaging	1.00000	kg	P cartonboa...	
F ₂ Graphic paper (typical E...	Materials production/Pap...	0.30000	kg	P Graphic P...	
F ₂ polyethylene low densit...	Materials production/Plas...	0.20000	kg	P Dummy_p...	
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0004656*300	t*km	P Small lorry...	Schraubenking
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.000012*230	t*km	P Small lorry...	Kipp GmbH
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.004865*70	t*km	P Small lorry...	BlechA
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.000007*900	t*km	P Lorry tran...	Febrotec
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0000012*250	t*km	P Small lorry...	IGUS
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.000533*1200	t*km	P Lorry tran...	reprapworld
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0011072*20	t*km	P Small lorry...	Fixmetall
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0032899*880	t*km	P Lorry tran...	roboter-bausatz
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.00103*30	t*km	P Small lorry...	Frankstahl
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0000318*180	t*km	P Small lorry...	skf-Steyr
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0000024*800	t*km	P Lorry tran...	rs-online
F ₂ transport in t*km	Transport services/Other...	0.0015*917	t*km	P Lorry tran...	Verpackungen...
F ₂ verwendete Materialien	3D-Drucker	10.03010	kg	P Verwendu...	

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
F ₂ verwendete Materialien + Distri...	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	

Abbildung 28: Verwendung von Materialien und Distribution A

Dann wird der Output des vorigen Prozesses der „Fertigung/ Montage (inkl. Vorstufen)“ hinzugefügt. Dazu kommen noch Positionen für die Fertigung bzw. Montage. Schließlich erhält man den montierten Drucker als Output. Zusätzlich fallen noch Produktionsrückstände von der Bearbeitung der Fertigungsteile an.

Process: Fertigung/ Montage (inkl. Vorstufen)

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Provider	Description
F ₂ process water	Materials pr...	1.00000	kg	P Process water,...	
F ₂ compressed air	Energy carr...	2.00000	m3	P Compressed ai...	Fertigung
F ₂ Electricity	Energy carr...	94.16100	MJ	P Electricity grid...	Fertigung
F ₂ Electricity	Energy carr...	0.23800	MJ	P Electricity grid...	Montage
F ₂ verwendete Materialien + Distribution A	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	P Verwendung v...	

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
F ₂ 3D-Drucker montiert	3D-Drucker	1.00000	Item(s)		none
F ₂ industrial waste (unspecified)	Wastes/Producti...	0.55360	kg		none

Abbildung 29: Fertigung/ Montage (inkl. Vorstufen)

Der montierte Drucker wird im Prozess „Distribution B (inkl. Vorstufen)“ zum Endkunden geliefert.

Process: Distribution B (inkl. Vorstufen)				
Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F _{3D} 3D-Drucker montiert	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	P Fertigung/ Monta...
F _{3D} transport in t*km	Transport service...	0.009477*300	t*km	P Small lorry transp...
Outputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
F _{3D} 3D-Drucker geliefert	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	

Abbildung 30: Distribution B (inkl. Vorstufen)

Der nun gelieferte Drucker wird der Phase der Nutzung beigefügt. Als einziger Input kommt hier noch der benötigte Energieverbrauch für die Dauer der Verwendung des Druckers hinzu. Da hier ausschließlich das Produkt 3D-Drucker bewertet wird, zählt, wie schon erwähnt, der Verbrauch des Druckwerkstoffs PLA nicht zur Sachbilanz.

An dieser Stelle wird nun zwischen den beiden Verwendungsszenarien unterschieden. Das heißt, dass hier unterschiedliche Input-Daten berücksichtigt werden.

Process: Nutzung (inkl. Vorstufen)				
Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F _{3D} 3D-Drucker geliefert	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	P Distributio...
F _{3D} Electricity	Energy carriers and tech...	529.92000	MJ	P Electricity...
Outputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
F _{3D} 3D-Drucker inkl. Verwendung	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	

Abbildung 31: Nutzung (inkl. Vorstufen) – Szenario 1

Process: Nutzung (inkl. Vorstufen)				
Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F _{3D} 3D-Drucker geliefert	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	P Distributio...
F _{3D} Electricity	Energy carriers and tech...	2856.06000	MJ	P Electricity...
Outputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
F _{3D} 3D-Drucker inkl. Verwendung	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	

Abbildung 32: Nutzung (inkl. Vorstufen) – Szenario 2

Das erhaltene Produktsystem des 3D-Druckers sieht wie folgt aus:

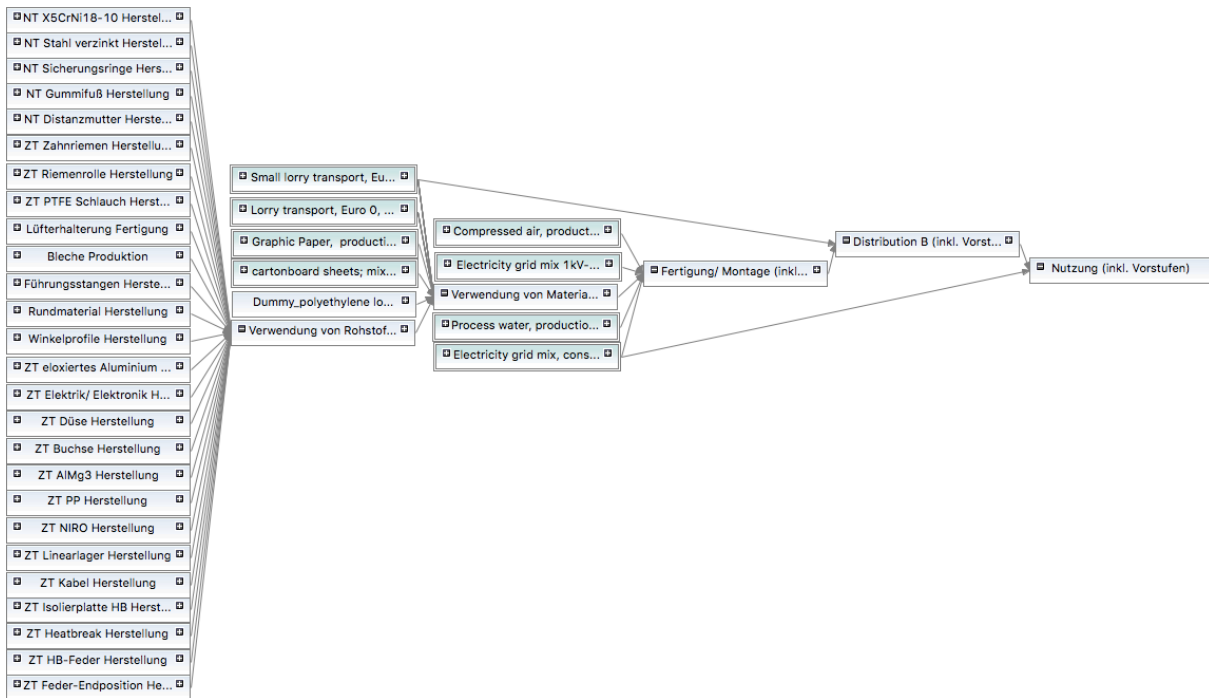


Abbildung 33: Produktsystem 3D-Drucker inkl. Nutzungsphase

Nicht inkludiert ist hier die End of Life-Phase, da diese gesondert betrachtet und bilanziert wird. Die Eingaben für die Modellierung dieses Abschnitts können folgender Abbildung entnommen werden und beruhen auf den derzeit üblichen Verwertungsmethoden.¹⁴³

Process: End of Life

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Provider
Electricity	Energy carriers...	0.09600	MJ	Electricity gr...
landfill of plastic waste	End-of-life treat...	0.01080	kg	Landfill of pl...
transport in t*km	Transport servic...	0.009477*200	t*km	Small lorry t...
waste incineration of plastics (Nylon 6, Nyl...	End-of-life treat...	0.00240	kg	Waste incine...
waste incineration of plastics (PE, PP, PS, PB)	End-of-life treat...	0.32070	kg	Waste incine...
waste incineration of plastics (unspecified)...	End-of-life treat...	0.09860	kg	Waste incine...

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues
3D-Drucker entsorgt	3D-Drucker	1.00000	Item(s)	

Abbildung 34: End of Life bestimmter Werkstoffe

Damit wurden alle Lebenszyklusphasen des 3D-Druckers modelliert und nun können die Umweltwirkungen abgeschätzt werden.

4.3.6 Datenvalidierung

Zur Überprüfung der Vollständigkeit der Daten wurden die Massenbilanzen der einzelnen Prozesse geprüft und diese werden als stimmig angesehen. Die Gesamtmas-

¹⁴³ (vgl. Lindner, 2015, S. 32ff).

se eines produzierten 3D-Druckers wurde in der Pilotfabrik mittels Waage bestimmt, wobei eine sehr gute Übereinstimmung mit den oben angeführten Massen festgestellt wurde. Die gemessenen, berechneten und angenommenen Daten wurden einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Dabei wurden diese mit Literaturdaten verglichen und darüber hinaus wurde qualitatives Expertenwissen berücksichtigt.

Die Qualität und die Repräsentativität der Daten dieser Ökobilanz werden als gut und der Zielsetzung der Studie angemessen eingestuft. Lediglich für die Bewertung der Elektrik/ Elektronik-Teile können mit Hilfe der ELCD-Datenbank nur vage Resultate erzielt werden, da die Datenbank für diese Teilkategorie nur unzureichend Daten zur Verfügung stellt. Daher werden die Elektrik/Elektronikteile zusätzlich mit dem Online Tool „LCA to go“¹⁴⁴ bewertet, worauf dann in der Auswertung Bezug genommen wird. Dies wird ausschließlich für die primäre Wirkungskategorie (GWP 100) durchgeführt.

Insgesamt werden die verwendeten Daten zur Beantwortung der in dieser Studie untersuchten Fragestellungen als geeignet gehalten.

4.4 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung und Auswertung der Betrachtungen basieren wie bereits oben beschrieben auf der Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“ (CML-Methode v.4.4, Januar 2015). Die dabei näher betrachteten Wirkungskategorien wurden schon im Untersuchungsrahmen festgelegt.

Die Berechnung wird auf Basis der eingegebenen Daten mit der openLCA-Software durchgeführt, wobei die Ergebnisse anschließend in Microsoft Excel übertragen und graphisch je Wirkungskategorie aufbereitet werden. Dies sieht für beide Verwendungsszenarien dabei wie folgt aus:

¹⁴⁴ <http://tool.lca2go.eu>

<u>Tabelle mit kumulierten Werten der Produktlebensphasen VS1</u>	GWP 100 [kg CO ₂ -eq]	Versauerung [kg SO ₂ -eq]	Eutrophierung [kg PO ₄ ³⁻ -eq]	Ozonbildungs- potential [kg C ₂ H ₄ -eq]
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	27,81	0,122	0,0079	0,0075
Distribution A	28,33	0,128	0,0127	0,0075
Fertigung/ Montage	37,28	0,149	0,0146	0,0091
Distribution B	37,67	0,151	0,015	0,0091
Nutzung	90,35	0,276	0,0259	0,0186
End of Life	-0,85	0,002	2,90E-04	1,30E-04
<u>Tabelle mit kumulierten Werten der Produktlebensphasen VS2</u>	GWP 100 [kg CO ₂ -eq]	Versauerung [kg SO ₂ -eq]	Eutrophierung [kg PO ₄ ³⁻ -eq]	Ozonbildungs- potential [kg C ₂ H ₄ -eq]
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	27,81	0,122	0,0079	0,0075
Distribution A	28,33	0,128	0,0127	0,0075
Fertigung/ Montage	37,28	0,149	0,0146	0,0091
Distribution B	37,67	0,151	0,015	0,0091
Nutzung	321,61	0,825	0,0738	0,0598
End of Life	-0,85	0,002	2,90E-04	1,30E-04

Tabelle 30: Kumulierte Werte der Wirkungsabschätzung

In der obigen Tabelle wurden die Werte direkt aus der Wirkungsabschätzung der CML-Methode übernommen. Die bis zur Verwendungsphase kumulierten Werte werden nun in Microsoft Excel in Einzelwerte aufgeteilt und je Lebensphase graphisch dargestellt.

<u>Tabelle mit Einzelwerten je Produktlebensphase VS1</u>	GWP 100 [kg CO ₂ -eq]	Versauerung [kg SO ₂ -eq]	Eutrophierung [kg PO ₄ ³⁻ -eq]	Ozonbildungs- potential [kg C ₂ H ₄ -eq]
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	27,81	0,122	0,0079	0,0075
Distribution A	0,52	0,006	0,0048	0
Fertigung/ Montage	8,95	0,021	0,0019	0,0016
Distribution B	0,39	0,002	0,0004	0
Nutzung	52,68	0,125	0,0109	0,0095
End of Life	-0,85	0,002	0,00029	0,00013
Gesamt	89,5	0,278	0,02619	0,01873
<u>Tabelle mit Einzelwerten je Produktlebensphase VS2</u>	GWP 100 [kg CO ₂ -eq]	Versauerung [kg SO ₂ -eq]	Eutrophierung [kg PO ₄ ³⁻ -eq]	Ozonbildungs- potential [kg C ₂ H ₄ -eq]
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	27,81	0,122	0,0079	0,0075
Distribution A	0,52	0,006	0,0048	0
Fertigung/ Montage	8,95	0,021	0,0019	0,0016
Distribution B	0,39	0,002	0,0004	0
Nutzung	283,94	0,674	0,0588	0,0507
End of Life	-0,85	0,002	0,00029	0,00013
Gesamt	320,76	0,827	0,07409	0,05993

Tabelle 31: Aufteilung der Wirkungsabschätzung in Einzelwerte je Lebensphase

Hier lässt sich schon gut erkennen, dass hinsichtlich der Umweltwirkungen des Produkts die Lebenszyklusphasen „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ und „Nutzung des Druckers“ am einflussreichsten sind und zwar für beide Verwendungs-

szenarien. Logischerweise unterscheiden sich die beiden Szenarien nur in der Nutzungsphase, da ausschließlich hier unterschiedliche Daten betrachtet wurden. Im Folgenden wird das VS1 in den Grafiken als blauer Balken und das VS2 als roter Balken in der Nutzungsphase dargestellt. Die Balken der restlichen Lebenszyklusphasen gelten für beide Szenarien gleichermaßen.

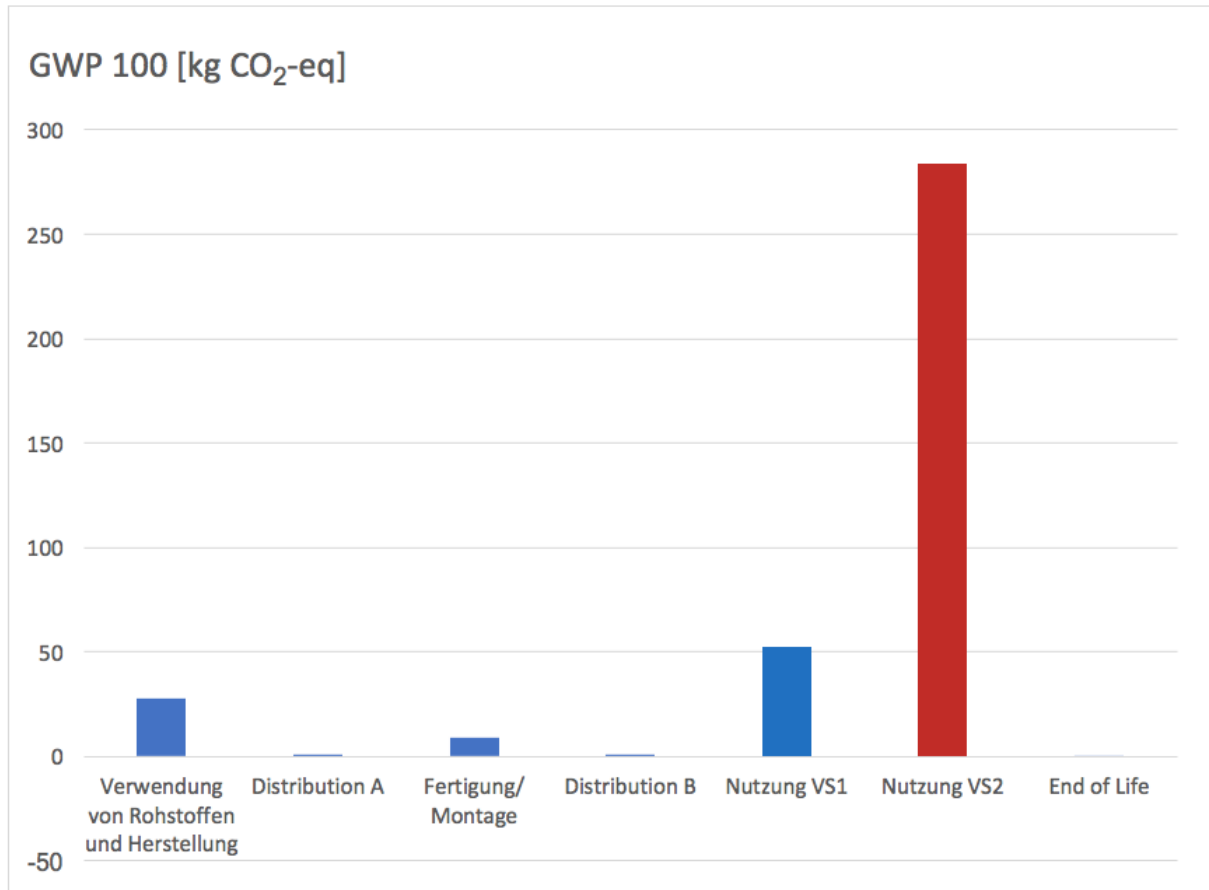


Abbildung 35: Wirkungskategorie GWP 100

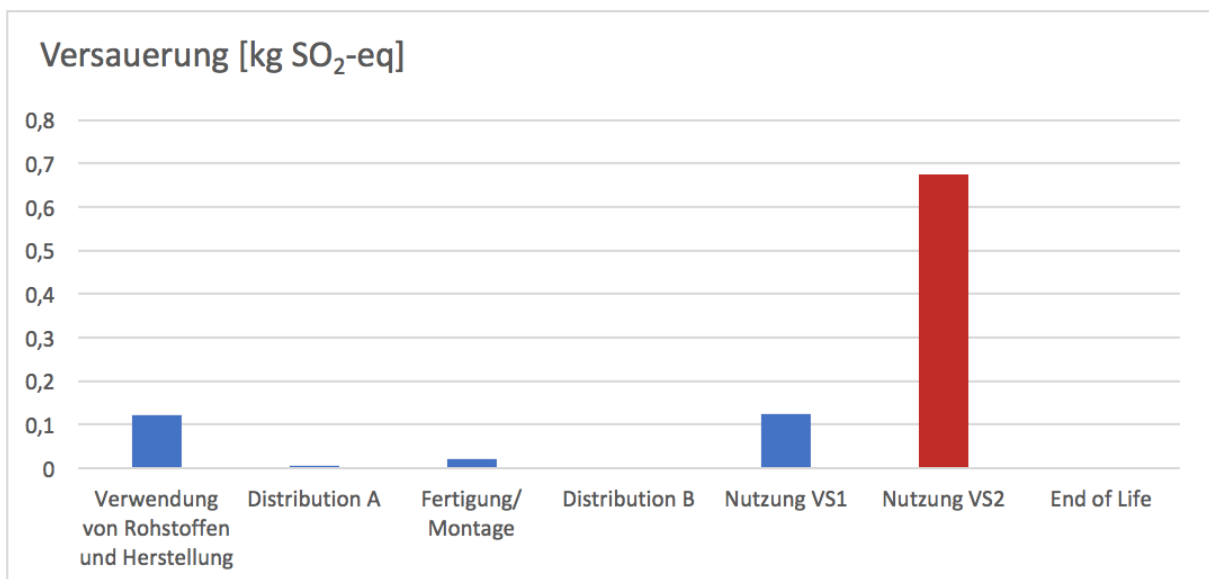


Abbildung 36: Wirkungskategorie Versauerung

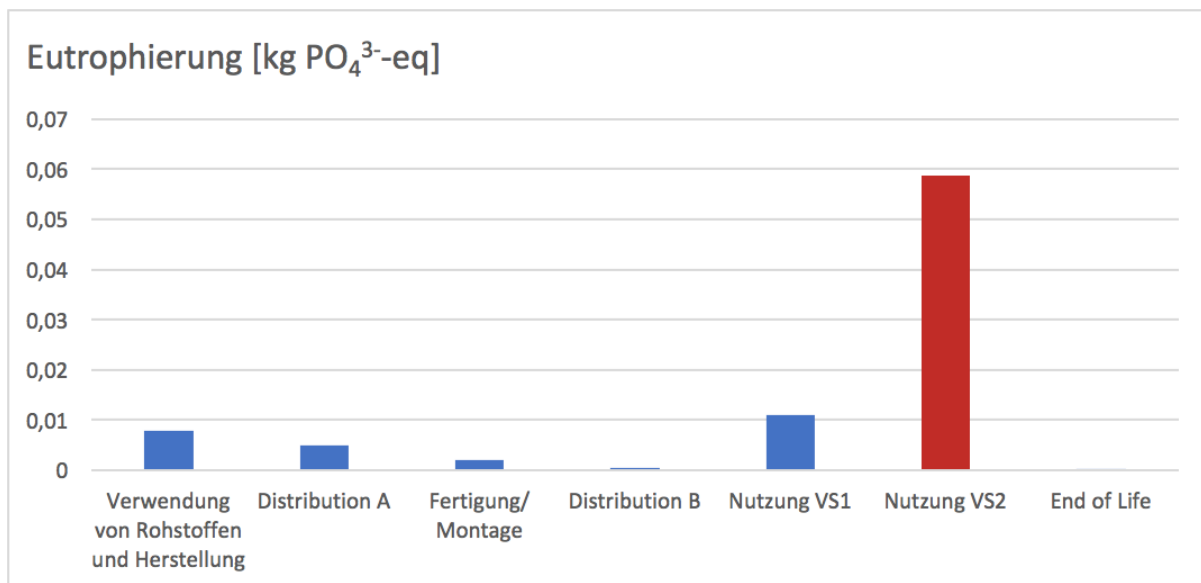


Abbildung 37: Wirkungskategorie Eutrophierung

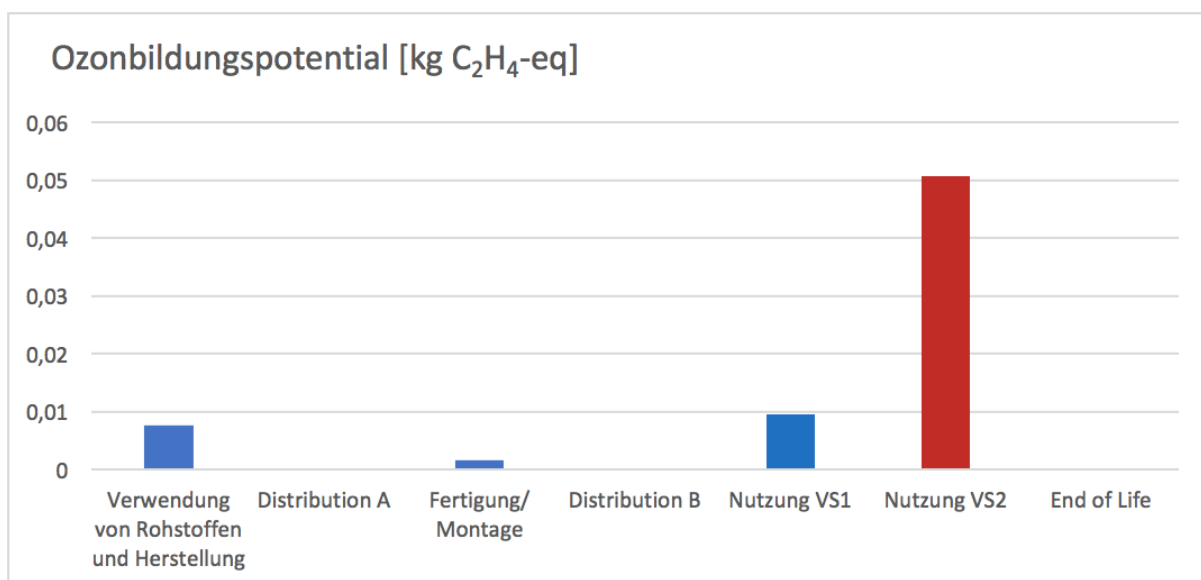


Abbildung 38: Wirkungskategorie Ozonbildungspotential

Die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung werden nun in der Auswertung der Ergebnisse diskutiert.

4.5 Auswertung

In allen betrachteten Wirkungskategorien haben die Phasen der „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ und „Nutzung des Druckers“ die größten Anteile am Ergebnis. Die Fertigung und die Montage in der Pilotfabrik haben auch in allen Kategorien nennenswerte Auswirkungen, wogegen die Transportvorgänge (Distribution A und Distribution B) nur in der Wirkungskategorie Eutrophierung erwähnenswert sind. Dass die Transporte ansonsten keinen großen Einfluss auf die Umweltwirkungen des Produkts haben, liegt u. a. daran, dass keine großen Massen über weite Strecken

transportiert werden, und kein Lufttransport, der wesentlich größere Wirkungen verursachen würde, berücksichtigt werden muss. Aus der Wirkungsabschätzung lässt sich also schließen, dass die größten Optimierungspotentiale hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeit bei der Verwendung der Materialien und in der Nutzungsphase des 3D-Druckers liegen. Daher wird auf diese beiden Positionen in der Auswertung besonderes Augenmerk gelegt.

4.5.1 Die Ergebnisse im Detail

Das GWP 100 bspw. beträgt gesamt für VS1 89,5 kg CO₂-eq und für VS2 320,76 kg CO₂-eq. Mit dem VS2 hat der Drucker also bei der um 435% höheren Nutzungsintensität gegenüber VS1 ein um 258% höheres Treibhauspotential.

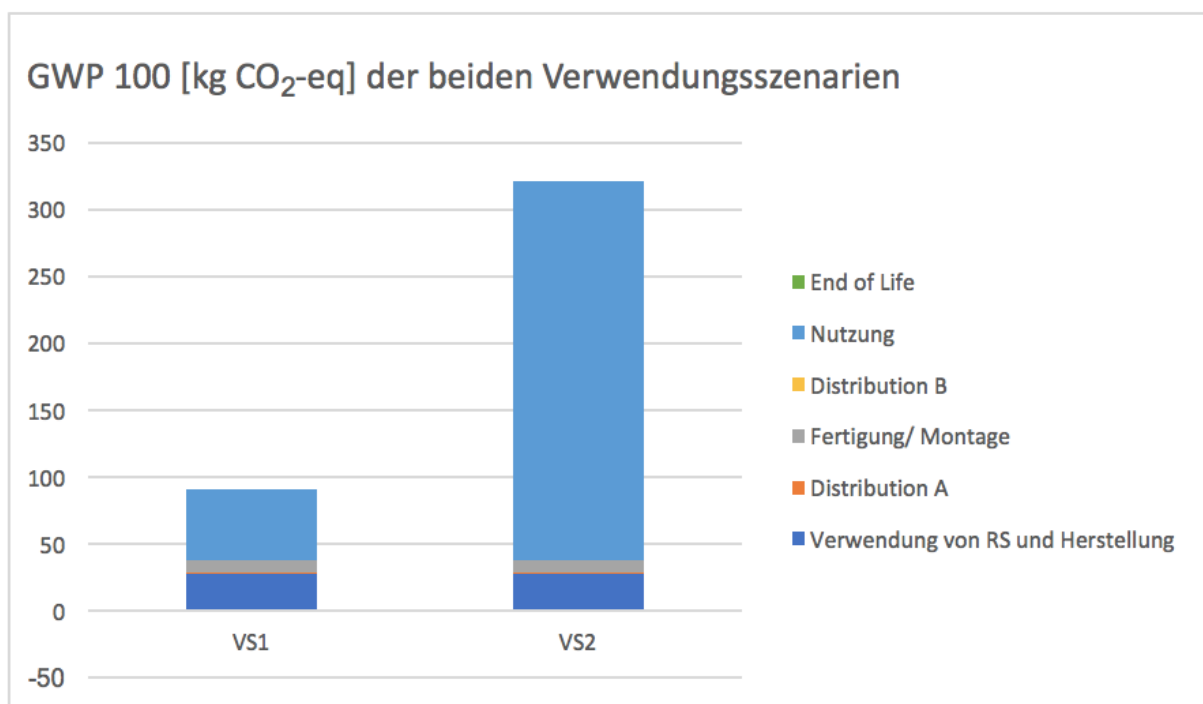


Abbildung 39: Treibhauspotential der beiden Verwendungsszenarien

Betrachtet man eine Service-Einheit, also einen Druckvorgang (2760 bzw. 1230 Druckvorgänge gesamt), so ergibt sich pro Service-Einheit ein Treibhauspotential für VS1 von 0,0324 kg CO₂-eq und für VS2 von 0,261 kg CO₂-eq. Sieht man sich nun die prozentuellen Anteile der Lebenszyklusphasen für die beiden Verwendungsszenarien am gesamten GWP 100 an, dann verdeutlicht dies die oben getroffenen Aussagen zu den einflussreichsten Positionen.

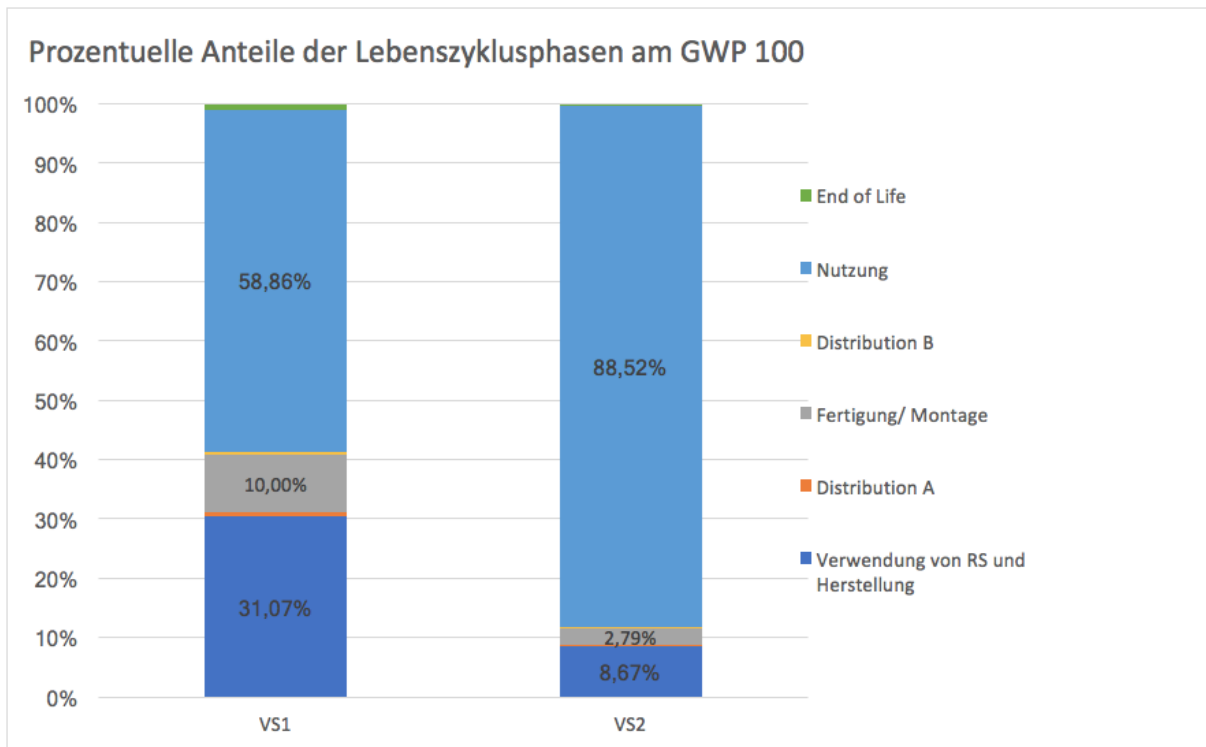


Abbildung 40: Prozentuelle Anteile der Lebenszyklusphasen am GWP 100

Im Folgenden werden die Zusammensetzungen bzw. Details bzgl. GWP der dominierenden Lebensphasen „Nutzung des Druckers“, „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ und „Fertigung/ Montage“ dargestellt und erläutert.

Electricity grid mix, consu... 52.68417 kg CO2 eq.

Abbildung 41: GWP der Nutzungsphase VS1

Electricity grid mix, consu... 283.94691 kg CO2 eq.

Abbildung 42: GWP der Nutzungsphase VS2

Der einzige Input in der Nutzungsphase ist Elektrizität und daher verursacht diese 100% der Umweltwirkungen in dieser Phase.

Winkelprofile Herstellung	15.54603 kg CO2 eq.
ZT Elektrik/ Elektronik Hers...	4.09586 kg CO2 eq.
Bleche Produktion	2.74812 kg CO2 eq.
ZT AlMg3 Herstellung	1.37406 kg CO2 eq.
Führungsstangen Herstellung	1.25928 kg CO2 eq.
Rundmaterial Herstellung	0.78992 kg CO2 eq.
NT Stahl verzinkt Herstellung	0.41401 kg CO2 eq.
ZT eloxiertes Aluminium H...	0.31635 kg CO2 eq.

Abbildung 43: GWP der Verwendung von Rohstoffen und Herstellung

Hier ist ganz klar ersichtlich, dass die Teile aus Aluminium mit Abstand den größten Anteil am GWP 100 in dieser Phase haben, gefolgt von den Elektrik/ Elektronik-Bauteilen und den Teilen aus Stahl.

■	Electricity grid mix 1kV-60...	8.80627 kg CO2 eq.
	Compressed air, productio...	0.10992 kg CO2 eq.
	Electricity grid mix, consu...	0.02366 kg CO2 eq.
	Process water, production...	0.00649 kg CO2 eq.

Abbildung 44: GWP der Fertigung und Montage

Bei der Fertigung und Montage in der Pilotfabrik sind die Umweltauswirkungen der betrachteten Positionen des Montagevorgangs gegenüber der Fertigung mit den em-co-Maschinen vernachlässigbar gering.

Weitere durchgeführte Auswertungen zeigen, dass ähnliche Trends auch für die anderen berücksichtigten Umweltwirkungskategorien gelten. Daher werden diese in weiterer Folge nicht extra betrachtet. Das Treibhauspotential kann somit für den Untersuchungsgegenstand als guter Indikator für andere Umweltwirkungskategorien herangezogen werden.

4.5.2 Beurteilung der Vollständigkeit, Konsistenz und Datenqualität

Die für die Auswertung des in der Studie untersuchten 3D-Druckers relevanten Informationen und Daten lagen vor. Innerhalb des gesetzten Untersuchungsrahmens sind keine ergebnisrelevanten Fehlstellen zu verzeichnen. Eine gewisse Einschränkung der Repräsentativität besteht hinsichtlich der Wirkungsabschätzung der Elektrik/Elektronik-Bauteile, da die ELCD-Datenbank hier keine spezifischen Herstellungsprozesse bereitstellt. Dieser Sachverhalt wird im Punkt der Einschränkungen näher betrachtet.

Auf die Qualität und Aktualität der Daten und Annahmen in den ergebnisrelevanten Bereichen wurde besonders Gewicht gelegt. Diese wurden gemessen bzw. mit Herstellerinformationen belegt. Die darauf beruhenden Ergebnisse werden daher als belastbar angesehen. Trotzdem sind Unsicherheiten bzgl. der Genauigkeit und Repräsentativität der Daten in einem gewissen Maße unvermeidlich. Insgesamt können die Datenkonsistenz und die Datenqualität dieser Ökobilanz aber als gut eingestuft werden.

4.5.3 Einschränkungen

Die Ergebnisse der Untersuchung des 3D-Druckers und die darauf basierenden Folgerungen und Empfehlungen sind innerhalb der definierten Randbedingungen belastbar. Bei Abweichungen von diesen Randbedingungen sollten beim Heranziehen der Ergebnisse dieser Studie die unten beschriebenen Einschränkungen berücksichtigt werden:

- Die Ergebnisse dieser Studie gelten unter Verwendung der in Punkt 4.3 beschriebenen Datensätze.

- Die Ergebnisse basieren des Weiteren auf den verfügbaren Daten in der ELCD-Datenbank (Version 3.2). Bei Datenlücken wurden vergleichbare Datensätze der Datenbank verwendet.
- Einschränkungen sind bzgl. der Verwendung der CML-Methode (v4.4, Januar 2015) in der openLCA-Software zu berücksichtigen.
- Die Ergebnisse gelten für die beschriebenen Verwendungsszenarien und die getroffenen Annahmen. Bei Abweichungen von den genannten Daten wird man gegebenenfalls andere Ökobilanzergebnisse erhalten.
- Bezug auf die Gegenwart: Fragen zum zukünftigen ökobilanziellen Abschneiden des Druckers sind nicht Gegenstand der Studie.
- Wie weiter oben beschrieben, konnten nicht alle Energieverbräuche der verwendeten Maschinen in der Fertigung/ Montage gemessen werden. Daher beruhen diese auf Annahmen bzw. Herstellerinformationen.
- Die angenommene Transportstrecke zum Endkunden (Distribution B) wurde frei gewählt und beruht auf keinerlei Referenzwerten.
- Die in der Pilotfabrik durchgeführte Funktionsprüfung der gefertigten 3D-Drucker wird in der Ökobilanz nicht berücksichtigt.

Wie vorher schon erklärt, wird eine zusätzliche Bewertung der Elektrik/ Elektronik-Teile mittels „LCA to go“ durchgeführt und die Auswirkungen auf die Ergebnisse des GWP 100 werden mittels Sensitivitätsanalyse geprüft. Die Eingabedaten in „LCA to go“ sind dem Anhang zu entnehmen. In folgender Tabelle sind die Ergebnisse des Vergleichs für das VS1 dargestellt:

Verfahren	GWP 100 [kg CO ₂ -eq] ZT Elektrik/ Elektronik	GWP 100 [kg CO ₂ -eq] Drucker
openLCA	4,1	89,5
LCA to go	8,04	93,44
Abweichung	96,10%	4,40%

Tabelle 32: Sensitivitätsanalyse des GWP 100 der Elektrik/ Elektronik-Teile

Die Bewertung mittels Online Tool ergibt eine deutliche Erhöhung der Umweltwirkungen bzgl. GWP 100 der Elektrik/ Elektronik-Teile. Das gesamte GWP 100 erhöht sich für VS1 von 89,5 kg CO₂-eq auf 93,44 kg CO₂-eq. Das entspricht einer signifikanten Änderung des Gesamtergebnisses. Auch für die anderen Wirkungskategorien sind daher signifikante Veränderungen zu erwarten. Für VS2 ist die Abweichung des Gesamtergebnisses aufgrund der größeren Dominanz der Nutzungsphase deutlich geringer. Da diese Studie vorwiegend zum Aufzeigen von Verbesserungspotentialen bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit des 3D-Druckers und in erster Linie nicht für vergleichende Zwecke bestimmt ist, kann diese Einschränkung hingenommen werden.

4.5.4 Schlussfolgerungen

Hier werden die besonderen Aspekte dieser Studie diskutiert und die aus den Ergebnissen abgeleiteten Erkenntnisse präsentiert. Folgende wichtige Punkte werden vorab noch einmal hervorgehoben:

1. In der erstellten Studie werden die ökologischen Umweltwirkungen des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik für zwei unterschiedliche Nutzungsszenarien ermittelt.
2. Die der Studie zugrundeliegenden Materialdaten wurden von den Mitarbeitern der Pilotfabrik zur Verfügung gestellt. Die Energieverbräuche in der Fertigung/ Montage wurden nicht gemessen, sondern beruhen auf Herstellerinformationen und Annahmen.
3. Der geographische Rahmen beschränkt die Bewertungen ausschließlich auf den europäischen Raum. Daher wurden in der ELCD-Datenbank für dieses Gebiet repräsentative Daten verwendet.
4. Die oben beschriebenen Einschränkungen in Bezug auf die Elektrik/ Elektronik-Bauteile sind bei der Verwendung der Studie stets zu beachten.
5. Die in dieser Studie angewendete Auswertestrategie behandelt das Ziel bzw. richtet sich an die festgelegte Zielgruppe der Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers.

Die Ergebnisse der durchgeführten Ökobilanz werden nachfolgend zusammengefasst:

1. Wie zu erwarten ist die Nutzungsphase die dominierende Phase bzgl. ökologischer Umweltwirkungen des Druckers, gefolgt von der „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ und der „Fertigung/ Montage“ in der Pilotfabrik.
2. Transportvorgänge haben ausschließlich in der Wirkungskategorie Eutrophierung nennenswerte Einflüsse.
3. Die Dominanz der Nutzungsphase verstärkt sich mit der Zunahme der Nutzungsintensität. Dies ist v. a. auch bei der Betrachtung der beiden Verwendungsszenarien ersichtlich.
4. Die größten umweltrelevanten Einflüsse im Bereich der verwendeten Materialien haben Aluminium, Elektrik/ Elektronik-Bauteile und Stahl.
5. Aufgrund von fehlenden Referenz- bzw. Vergleichswerten von Ökobilanzen anderer 3D-Drucker, sind vergleichende Performanceeinschätzungen bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit nicht möglich und waren auch nicht Ziel dieser Studie. Will man nachhaltigkeitsbezogene Vergleiche von verschiedenen Maschinen mittels der Methode der Ökobilanz durchführen, dann ist stets von der gleichen funktionellen Einheit für alle betrachteten Maschinen auszugehen. Wie in Punkt 3.2.2 beschrieben, haben Faludi et al. (2015) solch einen Vergleich zwischen 3D-Druckern und einer CNC-Maschine angestellt.

Die identifizierten ergebnisrelevanten Faktoren für die Ökobilanz des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik werden nachstehend aufgelistet:

- Das Verwendungsszenario innerhalb der Nutzungsdauer von fünf Jahren hat großen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit des Druckers. Die zu berücksichtigenden Faktoren sind dabei:
 - Häufigkeit und
 - Art der Nutzung und
 - Energieverbrauch der im Drucker verbauten Komponenten;
- Auch die „Verwendung von Rohstoffen und die Herstellung“ bestimmen die Systemlasten des untersuchten Objekts. Einfluss auf diesen Bereich haben dabei die Stellschrauben:
 - Eigenschaften der verwendeten Materialien per se,
 - Menge bzw. Masse der verwendeten Materialien und
 - Herstellungs-, Bearbeitungsaufwand für das jeweilige Material;
- Etwas geringeren, aber doch nennenswerten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat die „Fertigung/ Montage“ in der Pilotfabrik. Hier wurden folgende Stellschrauben identifiziert:
 - Einzelzeiten für die zu fertigenden Teile und
 - Energieverbrauch der Fertigungsmaschinen inkl. deren Zusatzeinrichtungen;

Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Produkt-Ökobilanz und der in der Schlussfolgerung genannten und zu berücksichtigenden Aspekte werden nun Empfehlungen für die in der Zieldefinition genannten Stakeholder abgeleitet.

4.5.5 Empfehlungen

Umweltziele der TU Wien Pilotfabrik sind u. a., die ablaufenden Produktionsprozesse und die gefertigten Produkte im Hinblick auf bestmögliche ökologische Nachhaltigkeit zu gestalten. Empfehlungen für die diesbezügliche Verbesserung des Produkts 3D-Drucker sind nachfolgend angeführt.

Die Studie zeigt, dass die Phase der „Nutzung“ des Druckers und die „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ den größten Einfluss auf das ökobilanzielle Ergebnis des 3D-Druckers haben.

Bezüglich der Stellschrauben hinsichtlich der Phase der „Nutzung“ sei den zuständigen Personen in der TU Wien Pilotfabrik empfohlen:

- Den Stromverbrauch der einzelnen im Drucker verbauten Elektrik/ Elektronik-Bauteile zu messen und diese gegebenenfalls durch energieeffizientere Komponenten zu ersetzen.

- Wärme- und somit Energieverluste durch mögliche Baumaßnahmen zu minimieren (bspw. Einhausung relevanter Komponenten oder des gesamten Druckers) – Ökobilanz darf jedoch durch möglichen Materialmehraufwand nicht verschlechtert werden.

Bezüglich der Stellschrauben hinsichtlich der „Verwendung von Rohstoffen und Herstellung“ sei den zuständigen Personen der TU Wien Pilotfabrik empfohlen:

- Materialien, die relativ hohe negative Umweltwirkungen gegenüber anderen Materialien haben, zu substituieren. Im Fall des Druckers sollte man sich eine umweltfreundlichere Alternative zu Aluminium überlegen – sofern dies für die betroffenen Bauteile möglich ist.
- Kontrollen durchzuführen, ob Bauteile, die keine Funktion haben verbaut sind oder ob Materialeinsparungen möglich sind – unter Berücksichtigung der zu wahrenen Funktion und der Stabilität des Druckers.
- Stets zu berücksichtigen ist der Grundsatz, dass je länger die maximale Nutzungsdauer des Objekts ist, desto weniger Hardware muss insgesamt produziert werden – u. a. abhängig von der Qualität der verbauten Komponenten.

Bezüglich der Stellschrauben hinsichtlich der „Fertigung/ Montage“ sei den zuständigen Personen der TU Wien Pilotfabrik empfohlen:

- Die Fertigungsmaschinen auf eine energieeffizientere Verwendung zu prüfen - – bspw. trochoidales statt konventionelles Fräsen.
- Effiziente Nutzung der Zusatzaggregate (Druckluft, KSS-Kreislauf) prüfen.
- Die Schraubkonstruktion des Druckers wird als sehr positiv gegenüber einer möglichen Schweißkonstruktion gesehen und daher wird empfohlen, diese weiter zu behalten – Vorteile bei Reparaturen, Ersatzteilaustausch und vor allem in der End of Life-Phase (einfache Zerlegung).

Bei Bedarf der exakten Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, bspw. für zukünftige Vergleiche mit anderen bewerteten 3D-Druckern, wird den Stakeholdern aufgrund der beschriebenen Einschränkungen der ELCD-Datenbank empfohlen, eine weitreichendere Ökobilanz-Datenbank zu verwenden. Des Weiteren wird in diesem Zusammenhang empfohlen, die tatsächlichen Energieverbräuche in der TU Wien Pilotfabrik zu messen und nicht auf Herstellerinformationen und Annahmen zu vertrauen.

5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz

Das Ziel der Studie, die wesentlichen Treiber der Umweltwirkungen des 3D-Druckers aufzuzeigen, um anschließend systematisch entsprechende Maßnahmen und Verbesserungsvorschläge bzgl. der Umweltverträglichkeit des Objekts abzuleiten, wurde mit der Durchführung dieser Ökobilanz zur Gänze erreicht.

Diese Arbeit stellt somit einen Mehrwert für die Umweltbemühungen der Pilotfabrik dar und beinhaltet darüber hinaus eine der ersten durchgeführten Produkt-Ökobilanzen in Bezug auf 3D-Drucker.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik werden im Folgenden noch einmal komprimiert tabellarisch dargestellt.

5.1 Wesentliche Treiber der ökologischen Belastungen für die Umwelt

Lebenszyklusphase	Treiber
Nutzung des Druckers	<ul style="list-style-type: none"> • Häufigkeit und Art der Nutzung, • Energieverbrauch der Komponenten;
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften der Materialien, • Menge bzw. Masse der Materialien, • Herstellungs-/ Bearbeitungsaufwand;
Fertigung/ Montage in der Pilotfabrik	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelzeiten für die zu fertigenden Teile, • Energieverbrauch der Maschinen;

Tabelle 33: Treiber der ökologischen Belastungen für die Umwelt

5.2 Einflussmöglichkeiten am Produkt

Lebenszyklusphase	Einflussmöglichkeiten
Nutzung des Druckers	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizientere Komponenten verbauen, • Wärme- bzw. Energieverluste minimieren;
Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Materialien mit hohen negativen Umweltwirkungen ersetzen (Aluminium), • Materialeinsparungen, • Verbauen qualitativ hochwertiger Komponenten;

Fertigung/ Montage in der Pilotfabrik	<ul style="list-style-type: none">• Energieeffiziente Verwendung der Fertigungsmaschinen,• Zusatzaggregate (Druckluft, KSS) effizient nutzen,• Schraubkonstruktion des Druckers beibehalten;
---------------------------------------	--

Tabelle 34: Einflussmöglichkeiten am Produkt

6 Diskussion und Ausblick

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit zeigt die ökologischen Umweltwirkungen des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik unter besonderer Berücksichtigung des Treibhauspotentials auf und weist auf die wesentlichen Treiber der durch den Drucker hervorgerufenen Belastungen für die Umwelt hin. Die daraus abgeleiteten Einflussmöglichkeiten am Produkt und die Empfehlungen für die Stakeholder sollen einen Beitrag zur Erreichung der Umweltziele der Pilotfabrik leisten. Wie in der Recherche zu Beginn der Diplomarbeit gezeigt wurde, gibt es zahlreiche Methoden und Ansätze zur Bewertung der ökologischen Umweltwirkungen von Produkten. Derzeit sind aber noch keine detaillierten Studien zu Umweltbewertungen des Produkts 3D-Drucker per se bekannt. Die hier mit Hilfe der Methode der Ökobilanz durchgeführte Lebenszyklusbewertung des 3D-Druckers der TU Wien Pilotfabrik soll ein erster Schritt für das Schließen dieser Forschungslücke sein und ermöglicht somit eine detaillierte ökologische Betrachtung der Nachhaltigkeit und der diesbezüglichen möglichen Verbesserungen des bewerteten Objekts. Die anfangs definierten Forschungsfragen dieser Diplomarbeit konnten damit zur Gänze beantwortet werden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit wurden durchaus auch überraschende Erkenntnisse gewonnen. Entgegen der anfänglichen persönlichen Meinung, dass neben dem Prozess 3D-Druck bereits auch unterschiedliche 3D-Drucker in verschiedenen Studien ökologisch bewertet wurden, hat sich bei der systematischen Literaturrecherche, wie oben schon erwähnt, Anderes herausgestellt. Bei der Erstellung der Sachbilanz für die Ökobilanzstudie des Druckers der TU Wien Pilotfabrik war des Weiteren auch überraschend und ist durchaus positiv herauszuheben, dass, bis auf wenige Ausnahmen, die Hersteller der in der Pilotfabrik verwendeten Maschinen detaillierte Informationen bzgl. der Energieverbräuche preisgaben.

Die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zeigen in erster Linie, dass die ökologischen Umweltwirkungen des 3D-Druckers sehr stark von der Nutzungsphase und dem damit einhergehenden Verwendungsszenario abhängen. Dass in der Phase der „Verwendung von Rohstoffen und der Herstellung“ das Material Aluminium eine dominierende Position einnimmt, war in diesem Ausmaß vielleicht nicht zu erwarten, ist jedoch auf den hohen relativen Masseanteil im Drucker und die aufwändige Herstellung von Aluminium zurückzuführen. Da die verwendete ELCD-Datenbank keine Prozesse bzw. Daten für die Herstellung von Elektrik/- Elektronik-Bauteilen bereitstellt, wird hier darauf hingewiesen, dass eine gewisse Unsicherheit bei der Bewertung der Elektrik/ Elektronik-Bauteile des Druckers in dieser Phase des Produktlebenszyklus bestehen bleibt. Trotzdem kann das Ergebnis der Ökobilanz, auch aufgrund der sehr guten Datenverfügbarkeit, für den in dieser Arbeit vorgesehenen Verwendungszweck als robust angesehen werden.

Die Resultate der im Zuge der Literaturrecherche betrachteten Fallstudien unterstreichen das Ergebnis dieser Diplomarbeit, indem auch sie die Abhängigkeit der ökologischen Nachhaltigkeit von den jeweiligen Nutzungsprofilen herausheben.

In Bezug auf Limitierungen und Eingrenzungen dieser Diplomarbeit muss erwähnt werden, dass die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Ökobilanzstudie ausschließlich für die in der Sachbilanz transparent dargestellten und beschriebenen Daten und Verwendungsszenarien gelten. Darüber hinaus können die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung bei der Verwendung einer anderen bzw. weitreichenderen Datenbank durchaus von den hier präsentierten Ergebnissen abweichen. Zudem beschränkt sich diese Studie auf die ökologische Nachhaltigkeit des 3D-Druckers und grenzt ökonomische und soziale Aspekte zur Gänze aus. Will man diesen Drucker für weitere Forschungszwecke mit anderen Maschinen bzgl. Nachhaltigkeit vergleichen, so wird an dieser Stelle empfohlen, eine in Bezug auf die Elektrik/ Elektronik-Bauteile weitreichendere Ökobilanz-Datenbank, im Vergleich zur ELCD-Datenbank, zu verwenden, um möglichst genaue Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zu erhalten. Des Weiteren sollten zu diesem Zweck die realen Energieverbräuche der Maschinen der Pilotfabrik gemessen und herangezogen werden.

Basierend auf dieser Diplomarbeit sollen die Verbesserungsmöglichkeiten bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit am 3D-Drucker geprüft und im besten Fall umgesetzt werden. Die ausgesprochenen Empfehlungen sollen bei der Weiterentwicklung des Produkts stets berücksichtigt werden. Diese Arbeit soll darüber hinaus andere Hersteller von 3D-Druckern dazu motivieren, deren Produkte bzgl. ökologischer Nachhaltigkeit zu bewerten bzw. zu verbessern und kann gleichzeitig auch als Vorlage oder Leitfaden für die Durchführung einer solchen Bewertung dienen.

7 Literaturverzeichnis

- Acero, Aitor P., Cristina Rodríguez, and Andreas Ciroth. 2014. LCIA methods. *Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Version 1* (4).
- Belculfine, Eliseu. 2016. The Environmental Impact of Desktop 3D Printing in a Distributed Manufacturing Model: Analyzing Spare Plastic Parts Fabricated by Home Users. Harvard University. Available at <<http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:33797342>>. Accessed 30 December 2017.
- Bourell, D. L., M. C. Leu, D. W. Rosen. 2009. Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Fabrication. Roadmap for Additive Manufacturing Workshop. Arlington, University of Texas.
- Bühner, M. 2013. First LCA on 3D Printer Sustainability Green Manufacturing Revolution or Overrated Gadget? Available at: <<http://www.knowtheflow.com/2013/first-lca-on-3d-printer-sustainability-green-manufacturing-revolution-or-overratedgadget/>>. Accessed 17 February 2018.
- Butterbrodt, D. 1997. Praxishandbuch umweltorientiertes Management. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Campbell, T., C. Williams, O. Ivanova, B. Garrett. 2011. Could 3D Printing Change the World, Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Atlantic Council, Strategic Foresight Report.
- Cerdas, Felipe, Max Juraschek, Sebastian Thiede, and Christoph Herrmann. 2017. Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System. *Journal of Industrial Ecology* 21 (S1): 80–93.
- Cui, Jirang, and Lifeng Zhang. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* 158 (2–3): 228–256.
- Dubey, Rameshwar, Angappa Gunasekaran, Stephen J. Childe, Samuel Fosso Wamba, and Thanos Papadopoulos. 2016. The impact of big data on world-class sustainable manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84 (1–4): 631–645.
- Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. 2016. 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine* 49 (29): 103–110.
- Emerald Publishing. How to conduct a systematic or evidence-based literature review. Available at <http://www.emeraldgrouppublishing.com/authors/guides/write/evidence_based.htm?action=gu&PHPSESSID=r8dlb1vu79gqa3q21aoc5inbh4> Accessed 19 December 2017.

- European Commission JRC. 2012. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Institute for Environment and Sustainability.
- Faludi, Jeremy, Cindy Bayley, Suraj Bhogal, and Myles Iribarne. 2015. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal* 21 (1): 14–33.
- Fastermann, Petra. 2014. *3D-Drucken*. Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-40964-6>>. Accessed 8 March 2018.
- Filimonau, Viachaslau. 2016. The Life Cycle Thinking Approach and the Method of Life Cycle Assessment (LCA). In *Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Analysis in Tourism*, 9–42. Cham: Springer International Publishing. Available at <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26224-6_2>. Accessed 14 March 2018.
- Finkbeiner, Matthias. 2014. Product environmental footprint—breakthrough or breakdown for policy implementation of life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (2): 266–271.
- Finkbeiner, Matthias, Atsushi Inaba, Reginald Tan, Kim Christiansen, and Hans-Jürgen Klüppel. 2006. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11 (2): 80–85.
- Finnveden, G., A. Moberg. 2005. Environmental systems analysis tools – an overview. *Journal of Cleaner Production* 13 (12): 1165–1173.
- Ford, Simon, and Mélanie Despeisse. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137: 1573–1587.
- Fraunhofer IAO. Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Available at <http://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft-Industrie_4_0.pdf> Accessed 11 December 2017.
- Gebler, Malte, Anton J. M. Schoot Uiterkamp, and Cindy Visser. 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74 (Supplement C): 158–167.
- Gechter, D., M. Nothacker, A. Blümle, J. J. Meerpohl, ... I. Kopp. 2013. Manual Systematische Literaturrecherche für die Erstellung von Leitlinien. Deutsches Cochrane – Zentrum, Arbeitsgemeinschaft Der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften – Institut Für Medizinisches Wissensmanagement, Ärztliches Zentrum Für Qualität in Der Medizin, 1. Auflage: 7–20.
- Grunwald, Armin. 2010. Technikfolgenabschätzung: eine Einführung. Available at <<https://books.google.at/books?hl=de&lr=&id=arBKiyYELMcC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Herausforderungen+technikfolgenabsch%C3%A4tzung&ots=izaJRvrQ>>

YF&sig=IUbvUIEFyyMCvdW3D0upPqf5NQk#v=onepage&q=Herausforderungen&f=false>. Accessed 16 March 2018.

- Hellweg, Stefanie, and Llorenç Milà i Canals. 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science* 344 (6188): 1109–1113.
- Hofmann, Erik, and Katrin Oettmeier. 2016. 3D-Druck: Wie additive Fertigungsverfahren die Wirtschaft und deren Supply Chains revolutionieren. *Zeitschrift Führung + Organisation* 85 (2): 84–90.
- Huang, S. H., L. Peng, A. Mokasdar, L. Hou. 2012. Additive Manufacturing and Its Societal Impact: a literature Review. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62: 1–13.
- Hunt, R. G., W. E. Franklin. 1996. LCA – How it came about. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Volume 1: 4–7.
- Isenburg, Thomas. 2013. 3D-Drucker im Aufwind: Hype oder industrielle Revolution. *MM MaschinenMarkt Magazine* 25: 24–27.
- Kaltschmitt, Martin, and Liselotte Schebek, eds. 2015. *Umweltbewertung für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-36989-6>>. Accessed 8 March 2018.
- Klipper, Sebastian. 2015. *Information Security Risk Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Available at <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-08774-6>>. Accessed 8 March 2018.
- Klöpffer, Walter, and Birgit Grahl. 2009. *Ökobilanz (LCA): ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Kollenberg, Wolfgang. 2014. Keramik und multi-material 3D-druck. *Keram. Z* 66 (4): 233–236.
- Kramer, Matthias. 2010. *Integratives Umweltmanagement: Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik*. Springer-Verlag.
- Kreiger, Megan, and Joshua M. Pearce. 2013. Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 1 (12): 1511–1519.
- Kunnari, Esa, Jani Valkama, Marika Keskinen, and Pauliina Mansikkamäki. 2009. Environmental evaluation of new technology: printed electronics case study. *Journal of Cleaner Production* 17 (9): 791–799.

- Lachmayer, Roland, Rene Bastian Lippert, and Thomas Fahlbusch, eds. 2016. *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-49056-3>>. Accessed 20 March 2018.
- Läzer, Katrin Luise, Mareike Sonntag, Roxanne Drazek, Richard-Ismael Jaeschke, and Carolin Hogreve. 2010. Einführung in die systematische Literaturrecherche mit den Datenbanken "PsycINFO", "Pubmed" und "PEP-Psychoanalytic Electronic Publishing" sowie in das Literaturverwaltungsprogramm "Citavi". Universität Kassel: 4–11.
- Le Bourhis, Florent, Olivier Kerbrat, Jean-Yves Hascoët, and Pascal Mognol. 2013. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (9–12): 1927–1939.
- Lehmann, Annekatriin, Vanessa Bach, and Matthias Finkbeiner. 2016. Product Environmental Footprint (PEF). Fortschritt oder Rückschritt für die Ökobilanzforschung? *uwf UmweltWirtschaftsForum* 24 (1): 83–87.
- Liedtke, Christa, Katrin Bienge, Klaus Wiesen, Jens Teubler, Kathrin Greiff, Michael Lettenmeier, and Holger Rohn. 2014. Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. *Resources* 3 (4): 544–574.
- Lindner, Christoph. 2015. Consultic ist Spezialist für b2b-Marktforschung und Beratung mit annähernd 20 Jahren Erfahrung im Bereich Kunststoffproduktion, -verarbeitung und Abfallmanagement.
- Magerholm Fet, A. 1999. Environmental management tools and their application: a review with references to cases studies.
- Mallée, T. 2015. Großes Potential im Ersatzteilgeschäft: Wie 3D-Druck Logistik und Produktion verändert. *Markt&Technik*: 32–33.
- Manfredi, Simone, Karen Allacker, Nathan Pelletier, Erwin Schau, Kirana Chomkamsri, Rana Pant, and David Pennington. 2015. Comparing the European Commission product environmental footprint method with other environmental accounting methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (3): 389–404.
- Maurell-Lopez, S., S. Gül, B. Friedrich, M. Ayhan, M. Eschen, Metals Recycling, and A. G. Aurubis. 2011. Metallurgical fundamentals for an autothermal melting of WEEE in a top blown rotary converter. In *Proceedings of EMC*.
- Maurell-Lopez, Sebastian, Mehmet Ayhan, Marcus Eschen, and Bernd Friedrich. n.d. Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott. *Recycling und Rohstoffe*.
- Morris, A. S. 2004. ISO 14000 environmental management standards: engineering and financial aspects. John Wiley & Sons.

- zur Muehlen, Michael, and Jianwen Su, eds. 2011. *Business Process Management Workshops*. Vol. 66. Lecture Notes in Business Information Processing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20511-8>>. Accessed 8 March 2018.
- Ngo, Tuan D., Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, and David Hui. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* 143: 172–196.
- Norm DIN EN ISO 14001:2015. Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung.
- Norm DIN EN ISO 14031:2013. Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines.
- Norm DIN EN ISO 14040:2009. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- Norm DIN EN ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- Ojala, Emma, Ville Uusitalo, Terhi Virkki-Hatakka, Antti Niskanen, and Risto Soukka. 2016. Assessing product environmental performance with PEF methodology: reliability, comparability, and cost concerns. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (8): 1092–1105.
- Pachauri, Rajendra K., and IPCC, eds. 2008. *Climate change 2007: contribution of ... to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 4: Synthesis report: [a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]*. Geneva: IPCC.
- Paschen, Herbert. 1999. Technikfolgenabschätzung in Deutschland–Aufgaben und Herausforderungen. *Technikfolgenabschätzung in Deutschland. Bilanz und Perspektiven*. Frankfurt aM/New York: Campus: 47–62.
- Peng, Tao. 2016. Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes. *Procedia CIRP* 40 (Supplement C). 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use: 62–67.
- Plattform Industrie 4.0. Österreich nützt industriellen Wandel als Chance, Available at <http://plattformindustrie40.at/wpcontent/uploads/2016/03/OTS_20150626_OT_S0049_Gründung-Plattform.pdf> Accessed 30 May 2017.
- Petschow, Ulrich, Jan-Peter Ferdinand, Sascha Dickel, Heike Flämig, and Michael Steinfeldt, eds. 2014. *Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit: Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Ma-*

- ker-Bewegung und Industrie 4.0*. Neue Ausg. Schriftenreihe des IÖW 206. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin.
- Reckmann, M. 2001. Umweltmanagementsysteme—Ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung. *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik* 118 (4): 204–207.
- Renn, Ortwin. 1993. Risikoabschätzung: 181–186.
- Renn, Ortwin. 1998. Three decades of risk research: accomplishments and new challenges. *Journal of Risk Research* 1 (1): 49–71.
- Ritthoff, Michael, Holger Rohn, and Christa Liedtke. 2002. *MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen*. Wuppertal spezial 27. Wuppertal: Wuppertal-Inst. für Klima, Umwelt, Energie.
- Scheer, August-Wilhelm. 2013. Industrie 4.0: Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus. *IMC AG*.
- Schmidt, Mario, and Achim Schorb. 2013. *Stoffstromanalysen: in Ökobilanzen und Öko-Audits*. Springer-Verlag.
- Schwarz, Therese. 2014. Qualitative Umweltbewertung von komplexen Produkten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 66 (11–12): 392–397.
- Spangenberg, J.H., F. Hinterberger, S. Moll, and H. Schutz. 1999. Material flow analysis, TMR and the MIPS concept: a contribution to the development of indicators for measuring changes in consumption and production patterns. *International Journal of Sustainable Development* 2 (4).
- Springer Gabler Verlag. Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: CML-Methode. Available at <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/222023/cml-methode-v9.html> Accessed 13 March 2018.
- Stahl, B. 1998. Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen. Universität Bremen.
- Szendiuch, Ivan. 2007. Importace of eco-design implementation in engineering education. *World Innovations in Engineering Education*: 55–63.
- Tixt. Wie Investitionen Digitale Transformation beschleunigen. Available at <https://www.tixt.com/de/studie-wie-investitionen-digitale-transformationbeschleunigen/> Accessed 11 December 2017.
- Tschandl, Martin, and Alfred Posch. 2012. Integriertes Umweltcontrolling. Available at <https://books.google.at/books?id=8NMhBgAAQBAJ&pg=PA108&lpg=PA108&dq=abc-methode+umwelt&source=bl&ots=gVKQyDgr2a&sig=cg0mwqR9Px1aRTaWXdJYs6C-LFo&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwiH7c3ChvnZAhUQaFAKHS4CBRsQ6AEIPzAD#v=snippet&q=abc&f=false>. Accessed 22 March 2018.

- Umweltbundesamt. Risikobewertung von Chemikalien. Available at <<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/chemikalien/Risikobewertung.pdf>> Accessed 17 January 2018.
- Van Berkel, René, Esther Willems, and Marije Lafleur. 1997. Development of an industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises—I. *Journal of Cleaner Production* 5 (1–2): 11–25.
- Welt der Fertigung. 2015. Bionik und Leichtbau bei Airbus: Flugzeugteile aus dem 3D-Drucker. Available at <<http://www.weltderfertigung.de/downloads/interview-drei-herren-lasersintern.pdf>> Accessed 17 February 2018.
- Wiesen, Klaus, Mathieu Saurat, and Michael Lettenmeier. 2014. Calculating the Material Input per Service Unit using the Ecoinvent Database. *International journal of performability engineering* 10 (4).
- Wimmer, W., H. Ostad-Ahmad-Ghorabi, R. Pamminer, and M. Huber. 2008. Product innovation through ecodesign. *International Journal of Sustainable Design* 1 (1): 75–92.
- WKO. Maßnahmenpaket rund um den Umweltfußabdruck von Produkten und Organisationen. Available at <https://www.wko.at/service/umweltenergie/EU_legt_Massnahmenpaket_rund_um_den_Umweltfussabdruck_von_.html> Accessed 18 March 2018.
- World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press.
- Wuppertal-Institut. MIPS – Datenbanken und Berechnungshilfen. Available at <<https://wupperinst.org/>> Accessed 19 March 2018.
- Yoon, Hae-Sung, Jang-Yeob Lee, Hyung-Soo Kim, Min-Soo Kim, Eun-Seob Kim, Yong-Jun Shin, Won-Shik Chu, and Sung-Hoon Ahn. 2014. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1 (3): 261–279.
- Zhai, Yuwei, Diana A. Lados, and Jane L. LaGoy. 2014. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. *JOM* 66 (5): 808–816.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick Vorgehensweise	10
Abbildung 2: Vorgehensweise bei einer Risikoabschätzung	20
Abbildung 3: Vorgehensweise bei einer UVP	24
Abbildung 4: Phasen eines UMS	27
Abbildung 5: Struktur eines TA-Projekts	30
Abbildung 6: Lebenszyklus eines Produktes	32
Abbildung 7: Phasen einer Ökobilanz	34
Abbildung 8: Ablauf einer Sachbilanz	36
Abbildung 9: Wirkungsabschätzung	37
Abbildung 10: Beziehungen zwischen den Bestandteilen der Ökobilanz	38
Abbildung 11: Vorgehensweise bei einer MIPS-Berechnung	42
Abbildung 12: Identifikation von relevanten Veröffentlichungen	52
Abbildung 13: 3D-Druck-Prozess	54
Abbildung 14: Treibhauspotentiale der Handyschale	62
Abbildung 15: Treibhauspotentiale für das Flugzeugersatzteil	64
Abbildung 16: Treibhauspotentiale des Flugzeugersatzteils inkl. Gebrauchsphase ..	65
Abbildung 17: Zwei verschiedene Teile als funktionelle Einheit	66
Abbildung 18: Ökologische Auswirkungen, FDM-Maschine	67
Abbildung 19: Ökologische Auswirkungen, Inkjet	68
Abbildung 20: Ökologische Auswirkungen, CNC-Maschine	68
Abbildung 21: LCA, Vergleichende Darstellung der drei Szenarien	69
Abbildung 22: 3D-Drucker der TU Wien Pilotfabrik	73
Abbildung 23: 3D-gedrucktes TU Wien Logo	75
Abbildung 24: Berücksichtigte Stufen des Lebensweges	77
Abbildung 25: BPMN-Modell der Abläufe in der Pilotfabrik	87
Abbildung 26: Materialzuteilung Winkelprofile	91
Abbildung 27: Zusammenfassung vorgefertigter bzw. hergestellter Bauteilgruppen	91
Abbildung 28: Verwendung von Materialien und Distribution A	92
Abbildung 29: Fertigung/ Montage (inkl. Vorstufen)	92
Abbildung 30: Distribution B (inkl. Vorstufen)	93
Abbildung 31: Nutzung (inkl. Vorstufen) – Szenario 1	93
Abbildung 32: Nutzung (inkl. Vorstufen) – Szenario 2	93
Abbildung 33: Produktsystem 3D-Drucker inkl. Nutzungsphase	94
Abbildung 34: End of Life bestimmter Werkstoffe	94
Abbildung 35: Wirkungskategorie GWP 100	97
Abbildung 36: Wirkungskategorie Versauerung	97
Abbildung 37: Wirkungskategorie Eutrophierung	98
Abbildung 38: Wirkungskategorie Ozonbildungspotential	98

Abbildung 39: Treibhauspotential der beiden Verwendungsszenarien	99
Abbildung 40: Prozentuelle Anteile der Lebenszyklusphasen am GWP 100	100
Abbildung 41: GWP der Nutzungsphase VS1	100
Abbildung 42: GWP der Nutzungsphase VS2	100
Abbildung 43: GWP der Verwendung von Rohstoffen und Herstellung	100
Abbildung 44: GWP der Fertigung und Montage	101

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herausforderungen für Umweltbewertungsmethoden	16
Tabelle 2: Begriffsdefinitionen	19
Tabelle 3: Beispiele für Risikominimierung/ -begrenzung	23
Tabelle 4: Verwendung von Ökobilanzen.....	39
Tabelle 5: Hauptkategorien der Material-Inputs bei der MIPS-Methode	42
Tabelle 6: MET-Matrix	45
Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung der Methoden.....	47
Tabelle 8: Auswahltable für geeignete Methode	48
Tabelle 9: 3D-Druck, Google Scholar.....	50
Tabelle 10: 3D-Druck, Science Direct	50
Tabelle 11: 3D-Druck, TU Wien CatalogPlus	51
Tabelle 12: 3D-Druck, Emerald Insight	51
Tabelle 13: 3D-Druck-Technologien.....	56
Tabelle 14: Positive und negative Aspekte bzgl. Nachhaltigkeit von 3D-Druck	59
Tabelle 15: Szenarien und Daten bei der Bewertung des Flugzeigersatzteils.....	63
Tabelle 16: Befragungsergebnis Testzentren I 4.0 Deutschland	72
Tabelle 17: Berücksichtigte Wirkungskategorien	79
Tabelle 18: Dateneigenschaften.....	80
Tabelle 19: Stückliste Normteile	82
Tabelle 20: Stückliste Zukaufteile.....	82
Tabelle 21: Stückliste Fertigungsteile.....	83
Tabelle 22: Einteilung in Bauteilgruppen	84
Tabelle 23: Materialzusammensetzung Elektrik/ Elektronik-Teile	85
Tabelle 24: Verpackungsdaten.....	86
Tabelle 25: Leistungsaufnahmen Fräs- bzw. Drehmaschine	88
Tabelle 26: Energieverbrauch Fertigung	88
Tabelle 27: Energieverbrauch Montagevorgang	88
Tabelle 28: Verbräuche Verwendungsszenario 1	89
Tabelle 29: Verbräuche Verwendungsszenario 2	89
Tabelle 30: Kumulierte Werte der Wirkungsabschätzung	96
Tabelle 31: Aufteilung der Wirkungsabschätzung in Einzelwerte je Lebensphase ...	96
Tabelle 32: Sensitivitätsanalyse des GWP 100 der Elektrik/ Elektronik-Teile.....	102
Tabelle 33: Treiber der ökologischen Belastungen für die Umwelt.....	106
Tabelle 34: Einflussmöglichkeiten am Produkt.....	107

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Material-Input pro Serviceeinheit	41
---	----

11 Abkürzungsverzeichnis

3D	3-dimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CAD	computer-aided design
CNC	Computerized Numerical Control
CPS	Cyber-physische Systeme
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPG	Digitales Produktgedächtnis
ebd.	ebenda
EMAS-VO	europäische Verordnung zum Umweltmanagement
EE	Erzeugnisenergieverbrauch
ELCD	European Life Cycle Database
et al.	und andere
etc.	et cetera
FDM	Fused Deposition Modeling
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FT	Fertigungsteil
FTS	Fahrerloses Transportsystem
ggf.	gegebenenfalls
GWP	Global Warming Potential
ID	identification
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnologie
KSS	Kühlschmierstoff
LCA	Life Cycle Assessment

LCIA	Life Cycle Inventory Analysis
LKW	Lastkraftwagen
MET	Materials-Energy-Toxicity
MI	Material Input
MIPS	Material Input pro Serviceeinheit
MLS	Metall Laser Sintern
NT	Normteil
PCR	Product Category Rules
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PEF	Product Environmental Footprint
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PLA	Poly lactide
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
RFID	radio-frequency identification
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
TA	Technikfolgenabschätzung
TU	Technische Universität
UMS	Umweltmanagementsystem
UV	ultraviolet
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VS1	Verwendungsszenario 1
VS2	Verwendungsszenario 2
ZT	Zukaufteil

12 Anhang

12.1 Technisches Datenblatt: emco MAXXTURN 45

EMCO MAXXTURN 45

Arbeitsbereich		Werkzeugwender	
Umlaufdurchmesser über Bett	430 mm	Anzahl der Werkzeugpositionen	12
Umlaufdurchmesser über Planschlitten	300 mm	Aufnahmeschaft nach VDI (DIN 69890)	VDI 25
Abstand Hauptspindel – Gegenspindel	720 mm	Werkzeugquerschnitt für Merkmalwerkzeuge	16 x 16 mm
Max. Drehdurchmesser	300 mm	Schaltdurchmesser für Bohrstangen	25 mm
Max. Teillelänge	480 mm	Revolverwechselzeit	0,2 sek
Max. Stangendurchmesser (optional)	Ø 45 (51) mm	Angetriebene Werkzeuge	
Verfahrbereich		Drehzahlbereich	0 – 6000 U/min
Schlittenverfahrwege in X / Z	160 / 510 mm	Max. Drehmoment	16 Nm
Schlittenverfahrweg in Y	+40 / -30 mm	Max. Leistung	4 kW
Hauptspindel		Anzahl der angetriebenen Werkzeuge	12
Drehzahlbereich	0 – 6300 (5000) U/min	Vorschubantriebe	
Drehmoment an der Spindel (optional)	78 (100) Nm	Eilganggeschwindigkeit X / Y / Z	24 / 10 / 30 m/min
Spindelanschluss DIN 55026	KK 5	Vorschubkraft in der X / Y-Achse	4000 / 4000 N
Spindelager (Innendurchmesser)	80 mm	Vorschubkraft in den Z-Achsen	6000 N
Spindelbohrung	53 mm	Beschleunigungszeit von 0 auf Eilgang X / Z	0,1 sek
Gegenspindel		Positionsstrebereite nach VDI 3441 in X / Y / Z	3 / 3 / 3 µm
Drehzahlbereich	0 – 6300 U/min	Kühlmitteleinrichtung	
Drehmoment an der Spindel (Siemens / Fanuc)	42 / 43 Nm	Behältervolumen	250 Liter
Spindelanschluss DIN 55026	KK 4	Pumpenleistung	0,57 (2,2) kW
Spindelager (Innendurchmesser)	70 mm	Fördermenge bei 3,5 bar / 1 bar	15 / 65 l/min
C-Achsen		Fördermenge bei 10 bar / 5 bar (optional)	5 / 50 l/min
Auflösung der Rundachse	0,001°	Leistungsaufnahme	
Eilganggeschwindigkeit	1000 U/min	Anschlusswert	25 kVA
Spindelindexierung (Scheibenbremse)	0,01°	Druckluftanschluss	6 bar
Reitstock		Abmessungen und Gewicht	
Reitstock Verfahrweg	510 mm	Höhe der Drehachse über Flur	1100 mm
Max. Anpresskraft	6000 N	Höhe der Maschine	1958 mm
Max. Verfahrgeschwindigkeit	ca. 20 m/min	Aufstellfläche der Maschine B x T	2575 x 1790 mm
Innenkonus zur Aufnahme des Rotkörpers	MK 4	Gesamtgewicht	4000 kg
Antriebsleistung		Sicherheitseinrichtungen	
Hauptspindel	13 kW	gem. CE	
Gegenspindel (Siemens / Fanuc)	10 / 7,5 kW		



DE-4990 - 09/16 Technische Änderungen vorbehalten. Keine Haftung für Druck- und Zeichfehler.

www.emco-world.com

EMCO GmbH
Salzburger Str. 80 · 5400 Hallein-Taxach · Austria
Telefon +43 6245 891-0 · Fax +43 6245 86965 · info@emco.at

12.2 Technisches Datenblatt: emco MAXXMILL 500

MAXXMILL 500

Verfahrwege und Toleranzen		Hauptspindel (Motorspindel)	
Verfahrweg X-Achse (ohne 100 mm Extraweg für den Werkzeugwechsel)	650 mm	Spindeldrehzahl	50 - 15000 U/min
Verfahrweg Y-Achse	550 mm	Maximales Drehmoment	110 Nm
Verfahrweg Z-Achse	500 mm	Maximale Leistung	34,5 kW
Abstand Spindelnase-Tischoberfläche (min. - max.)	150/650 mm	Werkzeugmagazin	
Schwenkbereich B-Achse	+/-100°	Anzahl der Werkzeugstationen	30
Drehbereich C-Achse (Rundtisch)	0 - 360°	Werkzeugwechselfprinzip	Wechselarm
Positioniergenauigkeit P entsprechend VDI 3441 *	16 µm	Werkzeugverwaltung	random
Wiederholgenauigkeit Ps entsprechend VDI 3441 *	3 µm	Werkzeugwechselzeit (Wkg. - Wkg.)	1,6 sec
Positioniergenauigkeit B-Achse (schwenken - mit Motordrehgeber)	10 sec.	Max. Werkzeugdurchmesser	80 mm
Positioniergenauigkeit C-Achse (Rundtisch - mit Motordrehgeber)	20 sec.	Max. Werkzeugdurchmesser (ohne Nachbarwerkzeug)	125 mm
Vorschub		Max. Werkzeuglänge	250 mm
Eilgang XY-Z-Achse	30 m/min	Max. Werkzeuggewicht	8 kg
Max. Rotationsgeschwindigkeit B-Achse	25 U/min	Max. Trommelbestückungsgewicht	100 kg
Max. Rotationsgeschwindigkeit C-Achse	25 U/min	Kühlmittel	
Max. Motor Vorschubkraft X-Achse	5000 N	Füllmenge Kühlmittelank	250 l
Max. Motor Vorschubkraft Y-Achse	5000 N	Standard-Kühlmittelndruck	2 bar
Max. Motor Vorschubkraft Z-Achse	5000 N	Max. Betriebsmenge bei 2 bar	40 l/min
Max. Beschleunigung XY-Z-Achse	3 m/s²	Pneumatik	
Schwenktisch		Min. Versorgungsdruck	5,5 bar
Tischabmessungen	600 x 600 mm	Min. Versorgungsvolumen	200 Nl/min
Tischhöhe vom Boden	776 mm	Schmier system	
Anzahl der T-Nuten	5	Spindel	Fett
Nutenabstand	100 mm	Kugelhüftführungen	Öl / Zentralschmierung
Max. zulässiges Werkstückgewicht (gleichmäßig verteilt)	250 kg	Kugelumlaufspindel	Öl / Zentralschmierung
Hauptspindel (mechanische Spindel)		Abmessungen	
Spindeldrehzahl	50 - 10000 U/min	Gesamthöhe	3000 mm
Maximales Drehmoment	70 Nm	Aufstellfläche B x T	2430 x 3500 mm
Maximale Leistung	11 kW	Gewicht	9200 kg
Werkzeugkegel	ISO 40 DIN 69871		
Anzugsbolzen	ISO 7388/2 Type B		
Antrieb	direkt mit Kupplung		

* Die Werte wurden bei einer Temperatur von 22° C gemessen. Die Maschine war am Boden befestigt. Gemessen wurde eine Standardmaschine ohne Linearmaßstäbe und externen Drehgebern an den Tischachsen.



DE 7175 - 02/11 Technische Änderungen vorbehalten. Keine Haftung für Druck- und Siebfehler

www.emco-world.com

EMCO MAIER Ges.m.b.H.
Salzburger Str. 80 · 5400 Hallein-Taxach · Austria
Tel. +43 6245 891-0 · Fax +43 6245 869 65 · Info@emco.at

12.3 Technisches Datenblatt: Universal UR5

Technische Daten

UR3

UR5

UR10

Leistung			
Wiederholgenauigkeit	±0,1 mm / ±0,0039 in (4 mils)	±0,1 mm / ±0,0039 in (4 mils)	±0,1 mm / ±0,0039 in (4 mils)
Umgebungstemperaturbereich	0-50°*	0-50°*	0-50°*
Stromverbrauch	Min. 90 W, typisch 125 W, max. 250 W	Min. 90 W, typisch 150 W, max. 325 W	Min. 90 W, typisch 250 W, max. 500 W
Kollaborationsbetrieb	15 erweiterte Sicherheitsfunktionen. Vom TÜV NORD genehmigte Sicherheitsfunktion Test in Übereinstimmung mit: EN ISO 13849-2:2008 PL d	15 erweiterte Sicherheitsfunktionen. Vom TÜV NORD genehmigte Sicherheitsfunktion Test in Übereinstimmung mit: EN ISO 13849-2:2008 PL d	15 erweiterte Sicherheitsfunktionen. Vom TÜV NORD genehmigte Sicherheitsfunktion Test in Übereinstimmung mit: EN ISO 13849-2:2008 PL d

Spezifikation			
Taglast	3 kg	5 kg	10 kg
Reichweite	500 mm	850 mm	1300 mm
Freiheitsgrade	6 rotierende Gelenke	6 rotierende Gelenke	6 rotierende Gelenke
Programmierung	Polyscope grafische Benutzerschnittstelle auf 12" Touchscreen mit Halterung	Polyscope grafische Benutzerschnittstelle auf 12" Touchscreen mit Halterung	Polyscope grafische Benutzerschnittstelle auf 12" Touchscreen mit Halterung

Bewegungen			
Achsbewegung, Roboterarm			
Fuß	Arbeitsradius ± 360°	Arbeitsradius ± 360°	Arbeitsradius ± 360°
Schulter	Max. Geschwindigkeit ± 180°/Sek.	Max. Geschwindigkeit ± 180°/Sek.	Max. Geschwindigkeit ± 120°/Sek.
Ellenbogen	± 360°	± 360°	± 360°
Gelenk 1	± 180°/Sek.	± 180°/Sek.	± 180°/Sek.
Gelenk 2	± 360°	± 360°	± 360°
Gelenk 3	± 180°/Sek.	± 180°/Sek.	± 180°/Sek.
Typisches Werkzeug	Unendlich	1 m/Sek.	1 m/Sek.

Eigenschaften			
IP-Klassifikation	IP64	IP64	IP64
ISO Reiraum Klassifizierung	5	5	5
Lärmbelastung	70dB	72dB	72dB
Roboterbefestigung	Jede	Jede	Jede
I/O-Anschlüsse	2 Digital ein 2 Digital aus 2 Analog ein 0 Analog aus	2 Digital ein 2 Digital aus 2 Analog ein 0 Analog aus	2 Digital ein 2 Digital aus 2 Analog ein 0 Analog aus
I/O-Stromversorgung im Werkzeug	12 V/24 V 600 mA in Werkzeug	12 V/24 V 600 mA in Werkzeug	12 V/24 V 600 mA in Werkzeug

Technische Daten			
Grundfläche	Ø 120mm	Ø 140mm	Ø 190mm
Material	Aluminium, PP-Kunststoff	Aluminium, PP-Kunststoff	Aluminium, PP-Kunststoff
Werkzeugverbindung, Typ	M8	M8	M8
Kabellänge, Roboterarm	6 m	6 m	6 m
Gewicht einschl. Kabel	11 kg	18,4 kg	25,9 kg

*Der Roboter kann in einem Temperaturbereich von 0-50°C arbeiten. Bei höher anhaltender Gelenkgeschwindigkeit wird die Umgebungstemperatur gesenkt.

SCHALTKASTEN

Eigenschaften		
IP-Klassifikation	IP20	IP20
ISO Reiraum Klassifizierung	6	6
Lärmbelastung	<65dB(A)	<65dB(A)
I/O-Anschlüsse	16 Digital ein 16 Digital aus 2 Analog ein 2 Analog aus	16 Digital ein 16 Digital aus 2 Analog ein 2 Analog aus
I/O-Stromversorgung	24V 2A	24V 2A
Kommunikation	TCP/IP 100 Mbit, Modbus TCP Profinet, Ethernet®	TCP/IP 100 Mbit, Modbus TCP Profinet, Ethernet®
Stromquelle	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz
Umgebungstemperaturbereich	0-50°*	0-50°*

Technische Daten		
Maße Schaltkasten	475 mm x 423 mm x 268 mm	475 mm x 423 mm x 268 mm
Gewicht	UR3, UR5 UR10	15 kg 17 kg
Material	Stahl	Stahl

TEACH PANEL

Eigenschaften		
IP-Klassifikation	IP20	IP20
Technische Daten		
Material	Aluminium, PP	Aluminium, PP
Gewicht	1,5 kg	1,5 kg
Kabellänge	4,5 m	4,5 m



12.4 Technisches Datenblatt: FTS NEOBOTIX MP-400

NEOBOTIX

12.2 Elektrische Kennwerte und sonstige Daten

Eigenschaften der internen Komponenten

Alle Daten entstammen den entsprechenden Datenblättern.

Beschreibung	Einheit	Wert
Motorleistung	W	300
Nenn Drehzahl	U/min	3000
Maximale Drehzahl	U/min	5000
Erreichbare Drehzahl (bei Batteriespannung)	U/min	1800
Nennmoment der Motoren	Nm	0.95
Maximales Moment der Motoren	Nm	2.85
Bremsmoment (statisch)	Nm	1.47
Encoderauflösung	Flanken/Umdrehung	4096
Getriebeuntersetzung	1	8:1
Nennspannung der Batterien	V	24
Maximale unregelte Spannung	V	29
Batteriekapazität	Ah	50

Erfassungsbereiche der Sensoren

Alle Daten entstammen den entsprechenden Datenblättern. Abstände sind in Metern angegeben, Winkel in Grad.

Sensor	Auflösung	Min. Abst.	Max. Abst.	Hor. Winkel	Vert. Winkel
Laserscanner	0.5°	0	30	±135	0
Ultraschallsensoren	~±0.01 m	0.25	1.5	±60	±30

Sonstige Eigenschaften

Beschreibung	Einheit	Wert
Gewicht	kg	70
Erwartete Gebrauchsdauer	a	10

12.5 Eingabedaten und Bewertung der Elektrik/ Elektronik-Bauteile in „LCA to go“

12.5.1 Eingabedaten

Teil	Material/Komponente	Menge	Einheit	Alter (y)	Gesamtlebensdauer (y)	
Connectivity	WLAN	1.00	units	0.0	5.0	✖
Connectivity	HDMI	1.00	units	0.0	5.0	✖
Connectivity	USB	4.00	units	0.0	5.0	✖
Housing & internal structural elements	PC/ABS	600.00	g	0.0	5.0	✖
Housing & internal structural elements	steel	90.00	g	0.0	5.0	✖
Housing & internal structural elements	aluminium	90.00	g	0.0	5.0	✖
Cables	cable	42.00	g	0.0	500.0	✖
Printed Circuit Board Assemblies	Tablets (7" range), mainboard (50 cm ²)	2.00	units	0.0	500.0	✖

12.5.2 Bewertung

	CF	Cu	Au	Ta	oREm	In	Co	Al	Stl	Nd	Pt,Ru,Pd	Datenqualitätsindex
	kg CO ₂ -eq	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	
TOTAL per product lifecycle	8,04	26,62	0,01	-	-	-	-	55,80	55,80	-	-	
MANUFACTURING	8,77	31,04	0,01	-	-	-	-	90,00	90,00	-	-	
Housing & internal structural elements	4,61	-	-	-	-	-	-	90,00	90,00	-	-	
Display	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Printed Circuit Board Assemblies	3,32	10,04	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tantalum capacitors	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Memory	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Processor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Storage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Optical Disc Drive	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Connectivity	0,67	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	
Power supply	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Cables	0,18	21,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Battery	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Overhead miscellaneous parts	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DISTRIBUTION	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Packaging	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Transport	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
USE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Power consumption	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Replacement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
END-OF-LIFE	-0,74	-4,42	0,00	-	-	-	-	-34,20	-34,20	-	-	
Reuse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Recycling	-0,74	-4,42	0,00	-	-	-	-	-34,20	-34,20	-	-	