

Svenja Ehmsen  
**Untersuchung der Nachhaltigkeit  
des Hochgeschwindigkeits-  
Laserauftragschweißens – ein  
Modell zur Prognose spezifischer  
Umweltauswirkungen**

---

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

Band 02 | 2025

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>.

**Produktionstechnische Berichte aus dem FBK**

Wissenschaftliche Schriftenreihe des  
Lehrstuhls für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation  
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau

Herausgeber: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation  
Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich  
Postfach 3049  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
67653 Kaiserslautern

Verlag: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Druck: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
Dezernat 5 Technik  
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 2025  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau  
Erwin-Schrödinger-Straße  
67663 Kaiserslautern

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0937-9061

**Untersuchung der Nachhaltigkeit des  
Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißens –  
ein Modell zur Prognose spezifischer Umweltauswirkungen**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von

**Svenja Ehmsen, M.Sc.**

aus Weinheim

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Februar 2025

Promotionskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

2. Berichterstatterin: Prof. Dr.-Ing. habil. Barbara S. Linke

Kaiserslautern, 2025

## Vorwort des Verfassers

*„Ein Gelehrter in seinem Laboratorium ist nicht nur ein Techniker;  
er steht auch vor den Naturgesetzen wie ein Kind vor der Märchenwelt.“*

*Marie Curie*

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau. Für diese sehr schöne Zeit möchte ich mich bei allen Beteiligten herzlich bedanken.

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Möglichkeit bedanken, meine Dissertation am FBK anzufertigen und hierbei verschiedene Aufgabenbereiche des Lehrstuhls übernehmen und in unterschiedlichen Themenfeldern arbeiten zu dürfen. Bedanken möchte ich mich auch für die persönlichen und fachlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die mir im Rahmen des IRTG 2057 und durch die beiden Forschungsaufenthalte an der University in California, Davis ermöglicht wurden und die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hier gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. Barbara Linke für die inspirierende Zusammenarbeit sowie für die Übernahme der Berichterstattung. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Darüber hinaus danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem IRTG 2057 und dem FBK, insbesondere dem Team Produktionssysteme, für die gemeinsame Zeit, in der viele Kolleginnen und Kollegen zu Freunden geworden sind. Den offenen Austausch sowie die freundschaftliche und engagierte Arbeitsatmosphäre habe ich sehr geschätzt. Mein besonderer Dank gilt stellvertretend Jonas Pollak, Michael Lutzke, Rosemarie Schleret und Britta Ziehmer für ihre wertvolle Unterstützung im technisch-administrativen Lehrstuhlbetrieb. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Hiwis, die mich während meiner Zeit am Lehrstuhl engagiert unterstützt haben.

Weiterhin möchte ich mich bei dem gesamten Team der ponticon GmbH für die Unterstützung bei der Untersuchung des additiven Fertigungssystems sowie bei Janosch Conrads für die spannende Zusammenarbeit im Bereich der Pulverherstellung bedanken.

Zum größten Dank bin ich jedoch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder verpflichtet, die immer an mich geglaubt und mich bedingungslos unterstützt haben. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Freund Patrick bedanken, der mich zur Anfertigung dieser Arbeit ermutigt und mich sowohl fachlich als auch besonders in schwierigen Phasen stets emotional unterstützt hat. Ihr habt einen großen Beitrag zu meinem Werdegang und zum Gelingen dieser Arbeit geleistet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>2</b>
2.1 Grundlagen der additiven Fertigung .....	2
2.1.1 Terminologie und Grundlagen .....	3
2.1.2 Potenziale und Herausforderungen der additiven Fertigung .....	6
2.1.3 Energetische und ökologische Aspekte der additiven Fertigung .....	8
2.2 Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen als Verfahren der additiven Fertigung .....	10
2.2.1 Additive Fertigung mittels Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung .....	10
2.2.2 Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen .....	12
2.2.3 Potenziale und Herausforderungen .....	15
2.3 Die Prozesskette der Bauteilherstellung mittels Hochgeschwindigkeits- Laserauftragschweißen .....	17
2.3.1 Grundlagen der HS DED-LB-Prozesskette .....	17
2.3.2 Rohmaterialherstellung am Beispiel des Edelstahl 316L .....	18
2.3.3 Herstellung von Pulver für die additive Fertigung .....	22
2.3.4 Materialbedarf während des HS DED-LB-Prozesses .....	25
2.3.5 Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen .....	26
2.3.6 Zwischenfazit .....	28
2.4 Die Methode der Ökobilanz .....	29
2.4.1 Energetische Grundlagen .....	29
2.4.2 Grundlagen der Methode der Ökobilanz .....	31
2.4.3 Ausgewählte Wirkungskategorien im Rahmen einer Ökobilanz .....	34
2.4.4 Zwischenfazit .....	36
2.5 Bestehende Ansätze zur energetischen und ökologischen Analyse der Prozesskette additiver Fertigungsverfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung .....	36
2.5.1 Herstellung von Edelstahl .....	37
2.5.2 Herstellung von Pulver für die additive Fertigung .....	37
2.5.3 Analyse additiver Fertigungsverfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung .....	39
2.5.4 Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen .....	43
2.5.5 Ansätze zur Erstellung eines Energieprognosemodells .....	47
2.6 Erkenntnisse aus dem Stand der Technik .....	48
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b> .....	<b>51</b>
3.1 Ziel und Aufgaben .....	51
3.2 Anforderungen .....	52
3.3 Aufbau der Arbeit .....	54
<b>4 Energieprognosemodell für das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen ....</b>	<b>56</b>
4.1 Entwicklung des Energieprognosemodells für das HS DED-LB .....	56
4.1.1 Betrachtetes additives Fertigungssystem .....	56
4.1.2 Experimentalplan .....	57
4.1.3 Ablauf eines HS DED-LB-Prozesses .....	59
4.1.4 Energetische Analyse des HS DED-LB .....	61
4.1.5 Modell zur Prognose des Energiebedarfs des HS DED-LB .....	80
4.1.6 Validierung und anforderungsbezogene Diskussion .....	94

4.2	Vorgehen zur Entwicklung eines Energieprognosemodells .....	99
4.2.1	Erfassung der Systemstruktur .....	100
4.2.2	Prozessanalyse .....	101
4.2.3	Analyse der Prozessparameter .....	103
4.2.4	Erstellung des Prognosemodells .....	104
<b>5</b>	<b>KEA- und GWP-Prognosemodell für mittels HS DED-LB gefertigte Bauteile .....</b>	<b>111</b>
5.1	Entwicklung des Prognosemodells .....	111
5.1.1	Übersicht über das Gesamtmodell .....	111
5.1.2	Teilmodellentwicklung der Rohstoffgewinnung .....	115
5.1.3	Teilmodellentwicklung der Pulverherstellung .....	120
5.1.4	Teilmodellentwicklung des HS DED-LB .....	128
5.1.5	Teilmodellentwicklung der Nachbearbeitung .....	131
5.1.6	Teilmodellentwicklung des Transports .....	134
5.2	Beispielhafte Anwendung des Prognosemodells .....	135
5.2.1	Fallbeispiele .....	135
5.2.2	Anwendung des Teilmodells der Rohstoffgewinnung .....	137
5.2.3	Anwendung des Teilmodells der Pulverherstellung .....	137
5.2.4	Anwendung des Teilmodells des HS DED-LB .....	139
5.2.5	Anwendung des Teilmodells der Nachbearbeitung .....	141
5.2.6	Anwendung des Teilmodells des Transports .....	142
5.2.7	Gesamtbewertung und anforderungsbezogene Diskussion .....	143
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>147</b>
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	147
6.2	Ausblick auf weiterführende Forschung .....	149
<b>7</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>152</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>170</b>
8.1	Anhang A: Experimentalplan zur Untersuchung des Verhaltes der Leistungsaufnahme des HS DED-LB-Fertigungssystems .....	170
8.2	Anhang B: Energetische Analyse der Lasereinheit .....	171
8.3	Anhang C: Energetische Analyse des Pulverförderers .....	173
8.4	Anhang D: Energetische Analyse des Entstaubungssystems .....	175
8.5	Anhang E: Energetische Analyse des Antriebs der Bauplattform .....	176
8.6	Anhang F: Datengrundlage des Modells zur Prognose des Energiebedarfs eines HS DED-LB Prozesses .....	177
8.7	Anhang G: Ergebnisse der Ökobilanzierung von Rohstahl sowie der Legierungselemente des Edelstahl 316L .....	179
8.8	Anhang H: Charakterisierungsfaktoren des KEA und GWP für die Pulverherstellung .....	182

## **Zusammenfassung**

Das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (HS DED-LB) ist ein Verfahren der additiven Fertigung, bei dem Metallpulver durch einen Laserstrahl oberhalb der Substratoberfläche aufgeschmolzen und somit im flüssigen Aggregatzustand zum Geometrieaufbau aufgetragen wird. Aufgrund der zunehmenden Relevanz und Notwendigkeit von nachhaltigen Fertigungsverfahren gilt es, insbesondere junge Technologien hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu analysieren, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren und eine Möglichkeit zur Einbeziehung der Umweltauswirkungen als Entscheidungsfaktor zur Prozessgestaltung zu schaffen. Ziel ist somit, die Umweltauswirkungen der Bauteilherstellung mittels HS DED-LB transparent zu machen, indem die individuelle Prognose des resultierenden kumulierten Energieaufwands (KEA) und Treibhausgaspotenzials (GWP) der Herstellung eines Bauteils von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Produkt ermöglicht wird. Hierfür wird, ausgehend von einer energetischen Analyse des HS DED-LB-Fertigungssystems und -prozesses, zunächst ein Modell zur Prognose des Energiebedarfs, der während der Fertigung mittels HS DED-LB benötigt wird, entwickelt. Dieses Prognosemodell wird anschließend um die Stoffflüsse sowie um die dem HS DED-LB-Prozess vor- und nachgelagerten Prozessschritte der Rohmaterial- und Pulverherstellung sowie der Nachbearbeitung erweitert und mit Charakterisierungsfaktoren verknüpft, die nach der Methode der Ökobilanzierung erstellt werden. Hierdurch ist nun die prognostische Bestimmung des KEA sowie des GWP eines Bauteils, das mittels HS DED-LB gefertigt wird, entlang der gesamten Herstellungskette möglich. Die Analyse des KEA und des GWP der gesamten Prozesskette zeigen, dass in Abhängigkeit von der individuellen Prozessgestaltung alle vier Prozessschritte einen signifikanten Einfluss auf die betrachteten Wirkungskategorien aufweisen. Welcher Prozessschritt hierbei die größten Auswirkungen hat, ist individuell, sodass die Vernachlässigung eines oder mehrerer Prozessschritte zu einer unzureichenden Abbildung der resultierenden Umweltauswirkungen führen kann.

## Abstract

High-Speed Laser Directed Energy Deposition (HS DED-LB) is an additive manufacturing process in which metal powder is melted by a laser beam above the substrate surface and deposited in a liquid state to create the part. Due to the increasing relevance and necessity of sustainable manufacturing processes, it is particularly important to analyze new technologies with regard to their environmental impact in order to identify potential for improvement and to create an opportunity to include environmental impact as a decision-making factor in process design. Thus, the aim of this work is to provide transparency on the environmental impact of the production of parts using HS DED-LB by allowing the individual prediction of the Cumulative Energy Demand (CED) and Global Warming Potential (GWP) of the manufacturing of a part from raw material extraction to the finished product. For this purpose, first a model is developed to predict the energy required during production using HS DED-LB, based on an energy analysis of the HS DED-LB manufacturing system and process. This predictive model is then extended to include the material flows and process steps upstream and downstream of the HS DED-LB process, including raw material production, powder production, and post-processing. They are then linked to characterization models developed using the Life Cycle Assessment method. This allows the predictive determination of the CED and GWP of a part manufactured using HS DED-LB along the entire process chain. The analysis of CED and GWP along the process chain shows that, depending on the individual process design and the part, all four process steps can have a significant influence on the impact categories analyzed. Which process step has the greatest impact depends on the individual case, so that neglecting one or more process steps leads to an inadequate representation of the resulting environmental impact.

## Abkürzungen

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
C	Kohlenstoff
CCA	Closed-Coupled-Verdüsung (Closed-coupled atomization)
CO <sub>2</sub> -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Emissionsäquivalent
Cr	Chrom
DED	Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (Directed energy deposition)
DEW	Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG
Fe	Eisen
FFA	Free-Fall-Verdüsung (Free-fall atomization)
G-Code	Programmiersprache für numerische Computersteuerung (Geometrie-Code)
GWP	Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential)
HIP	Heißisostatisches Pressen (Hot Isostatic Pressing)
HS DED-LB	Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (High-speed laser directed energy deposition)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LKW	Lastkraftwagen
MgO	Magnesiumoxid
MMS	Minimalmengenschmierung
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MRO	Wartung (Maintenance), Reparatur (Repair) und Überholung (Overhaul)
N	Stickstoff
Ni	Nickel
P	Phosphor
PGV	Partikelgrößenverteilung
PREP	Plasma-Rotating-Electrode-Process
S	Schwefel
SEC	Spezifischer Energiebedarf (Specific energy consumption)
Si	Silizium
UV	Ultraviolett

# Symbolverzeichnis

$a_{ac}$	Positive Beschleunigung der HS DED-LB-Bauplatzform
$a_{dec}$	Negative Beschleunigung der HS DED-LB-Bauplatzform
$b$	Legierungselement
$b_{Bauteil}$	Breite eines Bauteils
$C_0$	Erster maschinenspezifischer Koeffizient zur Energiebedarfsermittlung beim Fräsen
$C_1$	Zweiter maschinenspezifischer Koeffizient zur Energiebedarfsermittlung beim Fräsen
$C_{Argon}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor für Argon
$C_{Bauplatte}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Bauplatte für das HS DED-LB
$C_{Draht,Schlichten}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Drahterosion beim Schlichten
$C_{Draht,Schruppen}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Drahterosion beim Schruppen
$C_{Druckluft}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor für die Drucklufterzeugung
$C_{el}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor von elektrischer Energie
$C_{Legierung,b}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Legierungselements $b$
$C_{Pulver,Behälter}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der gewählten Pulververpackung
$C_{Pulver,Behälter,Fass}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Edelstahlbehälters als Pulververpackung
$C_{Pulver,Behälter,Kunststoff}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Kunststoffbehälters als Pulververpackung
$C_{Pulver,Behälter,Weißblech}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Weißblechbehälters als Pulververpackung
$C_{Pulver,fix}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung
$C_{Pulver,fix,CCA}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung mittels Closed-Coupled-Verdüsung
$C_{Pulver,fix,FFA}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung mittels Free-Fall-Verdüsung
$C_{Pulver,Gas}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs der Pulverherstellung
$C_{Pulver,Gas,CCA,HG,Ar}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit vorgewärmtem Argon
$C_{Pulver,Gas,CCA,HG,N}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit vorgewärmtem Stickstoff
$C_{Pulver,Gas,CCA,KG,Ar}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Argon
$C_{Pulver,Gas,CCA,KG,N}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Stickstoff
$C_{Pulver,Gas,FFA,HG,Ar}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit vorgewärmtem Argon
$C_{Pulver,Gas,FFA,HG,N}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit vorgewärmtem Stickstoff
$C_{Pulver,Gas,FFA,KG,Ar}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Argon
$C_{Pulver,Gas,FFA,KG,N}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Stickstoff
$C_{Rohstahl}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Rohstahlherstellung
$C_{Rohstahl,Primär}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Rohmaterialherstellung von Primärmaterial durch die Hochofen-Konverter-Route
$C_{Rohstahl,Sekundär}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor der Rohmaterialherstellung von Sekundärmaterial durch die Elektroschmelz-Route
$C_{Strangguss}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor des Stranggießens

$C_{Transportmittel}$	Treibhauspotenzial als Charakterisierungsfaktor eines Transportmittels
$d_L$	Laserspotdurchmesser beim HS DED-LB
$E$	Energiebedarf eines betrachteten Systems
$E_A$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme
$E_{A,B}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während der Verfahrbewegung
$\bar{E}_{A,lin}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während einer linearen Verfahrbewegung
$E_{A,ac,lin}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während einer linearen Verfahrbewegung zum Beschleunigen
$E_{A,dec,lin}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während einer linearen Verfahrbewegung zum Abbremsen
$\bar{E}_{A,B,lin}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während einer linearen Verfahrbewegung zum Halten der Geschwindigkeit
$E_{A,rot}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme während einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung
$E_{A,stand-by}$	Energiebedarf des Antriebssystems der Bauplattform und der peripheren Subsysteme im Stand-by-Modus
$\bar{E}_{Fräsen}$	Maschinenunspezifischer Energiebedarf beim Fräsen
$E_{Fräsen,individuell}$	Individualisierter Energiebedarf beim Fräsen
$E_{HIP,individuell}$	Energiebedarf für das heißisostatische Pressen mit Elektroöfen
$E_{HS DED-LB,total}$	Gesamtenergiebedarf eines HS DED-LB-Prozesses
$E_i$	Energiebedarf einer Systemeinheit $i$
$E_{i,ps}$	Energiebedarf einer Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$
$E_{i,ps,pp}$	Energiebedarf einer Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ in Abhängigkeit des Prozessparameters $pp$
$E_{i,ps,n}$	Energiebedarf einer Systemeinheit $i$ während Abschnittes $n$ der Prozessstufe $ps$
$E_L$	Energiebedarf der Lasereinheit eines HS DED-LB-Fertigungssystems
$E_{L,B}$	Energiebedarf der Lasereinheit, während der Laserstrahl aktiv ist und Pulver aufschmilzt
$\bar{E}_{L,B,kurz}$	Energiebedarf der Lasereinheit während der Laserstrahl aktiv ist und Pulver aufschmilzt, wenn die Dauer des Aktivseins kleiner oder gleich $t_{L,an}$ ist
$\bar{E}_{L,B,lang}$	Energiebedarf der Lasereinheit während der Laserstrahl aktiv ist und Pulver aufschmilzt, wenn die Dauer des Aktivseins größer als $t_{L,an}$ ist
$\bar{E}_{L,B,lang,an/aus}$	Energiebedarf der Lasereinheit zum Anfahren und Herunterfahren
$\bar{E}_{L,B,lang,halten}$	Energiebedarf der Lasereinheit zum Halten des geforderten Leistungsniveaus
$\bar{E}_{L,bereit}$	Energiebedarf der Lasereinheit, während sie zwischen einzelnen Impulsen im Bereit-haltmodus ist
$\bar{E}_{L,stand-by}$	Energiebedarf der Lasereinheit im Stand-by-Modus
$E_{PF}$	Energiebedarf des Pulverförderers eines HS DED-LB-Fertigungssystems
$E_{PF,an}$	Energiebedarf des Pulverförderers während des Anfahrens
$E_{PF,aus}$	Energiebedarf des Pulverförderers während des Herunterfahrens
$E_{PF,B}$	Energiebedarf des Pulverförderers während des Betriebs
$E_{PF,stand-by}$	Energiebedarf des Pulverförderers im Stand-by-Modus
$E_S$	Energiebedarf des Entstaubungssystems
$E_{total}$	Energiebedarf eines Gesamtsystems
$E_{Ultra}$	Energiebedarf der Ultraschallreinigung
$E_{Ultra,individuell}$	Individualisierter Energiebedarf der Ultraschallreinigung
$f_{Argon}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor für Argon
$f_{Bauplatte}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Bauplatte für das HS DED-LB
$f_{Draht,Schlichten}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Drahterosion beim Schlichten
$f_{Draht,Schruppen}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Drahterosion beim Schruppen

$f_{\text{Druckluft}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor für die Drucklufterzeugung
$f_{\text{el}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor von elektrischer Energie
$f_{\text{HS DED-LB,Pulver,Wiederverwendung}}$	Wiederverwendungsfaktor von im HS DED-LB-Prozess nicht aufgetragenem Pulver
$f_i$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor eines Inputstroms $i$
$f_{\text{Legierung,b}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Legierungselements $b$
$f_{\text{Pulver, Behälter}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der gewählten Pulververpackung
$f_{\text{Pulver, Behälter, Fass}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Edelstahlbehälters als Pulververpackung
$f_{\text{Pulver, Behälter, Kunststoff}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Kunststoffbehälters als Pulververpackung
$f_{\text{Pulver, Behälter, Weißblech}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Weißblechbehälters als Pulververpackung
$f_{\text{Pulver, fix}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung
$f_{\text{Pulver, fix, CCA}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung mittels Closed-Coupled-Verdüsung
$f_{\text{Pulver, fix, FFA}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des fixen Bestandteils der Pulverherstellung mittels Free-Fall-Verdüsung
$f_{\text{Pulver, Gas}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs der Pulverherstellung
$f_{\text{Pulver, Gas, CCA, HG, Ar}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit vorgewärmtem Argon
$f_{\text{Pulver, Gas, CCA, HG, N}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit vorgewärmtem Stickstoff
$f_{\text{Pulver, Gas, CCA, KG Ar}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Argon
$f_{\text{Pulver, Gas, CCA, KG N}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Closed-Coupled-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Stickstoff
$f_{\text{Pulver, Gas, FFA, HG, Ar}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit vorgewärmtem Argon
$f_{\text{Pulver, Gas, FFA, HG, N}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit vorgewärmtem Stickstoff
$f_{\text{Pulver, Gas, FFA, KG Ar}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Argon
$f_{\text{Pulver, Gas, FFA, KG N}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Schutzgasbedarfs in einer Free-Fall-Verdüsung mit nicht vorgewärmtem Stickstoff
$f_{\text{Rohstahl}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Rohstahlherstellung
$f_{\text{Rohstahl, Primär}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Rohmaterialherstellung von Primärmaterial durch die Hochofen-Konverter-Route
$f_{\text{Rohstahl, Sekundär}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor der Rohmaterialherstellung von Sekundärmaterial durch die Elektroschmelz-Route
$f_{\text{Strangguss}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor des Stranggießens
$f_{\text{Transportmittel}}$	Primärenergiefaktor als Charakterisierungsfaktor eines Transportmittels
$G$	Scanpfad der Bauplatzform des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB}}$	Erderwärmungspotenzial des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB, Bauplatte}}$	Erderwärmungspotenzial der Bauplatte des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB, Druckluft}}$	Erderwärmungspotenzial des Druckluftbedarfs des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB, el. Energie}}$	Erderwärmungspotenzial des Bedarfs an elektrischer Energie des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB, Pulver}}$	Erderwärmungspotenzial des Pulverbedarfs des HS DED-LB-Prozesses
$GWP_{\text{HS DED-LB, Schutzgas}}$	Erderwärmungspotenzial des Schutzgasbedarfs des HS DED-LB-Prozesses

$GWP_{Nachbearbeitung}$	Erderwärmungspotenzial der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Druckluft}$	Erderwärmungspotenzial der Reinigung durch Druckluft im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Ultra}$	Erderwärmungspotenzial der Ultraschallreinigung im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,HIP}$	Erderwärmungspotenzial des heißisostatischen Pressens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,HIP,individuell}$	Individualisiertes Erderwärmungspotenzial des heißisostatischen Pressens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Draht}$	Erderwärmungspotenzial der Drahterosion im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Draht,Schichten}$	Erderwärmungspotenzial der Drahterosion durch Schichten im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Draht,Schruppen}$	Erderwärmungspotenzial der Drahterosion durch Schruppen im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{NB,Fräs}$	Erderwärmungspotenzial des Fräsens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$GWP_{Pulver}$	Erderwärmungspotenzial der Pulverherstellung
$GWP_{Pulver,Verpackung}$	Erderwärmungspotenzial der Verpackung des hergestellten Pulvers
$GWP_{Rohmaterial}$	Erderwärmungspotenzial der Rohmaterialherstellung
$GWP_{Transport}$	Erderwärmungspotenzial des Transports
$h_{Bauteil}$	Höhe eines Bauteils
$h_{Lage}$	Definierte Schichtdicke, d. h. Höhe einer Lage im HS DED-LB-Prozess
$KEA$	Kumulierter Energiebedarf
$KEA_i$	Kumulierter Energiebedarf eines Inputstroms $i$
$KEA_{HS DED-LB}$	Kumulierter Energiebedarf des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{HS DED-LB,Bauplatte}$	Kumulierter Energiebedarf der Bauplatte des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{HS DED-LB,Druckluft}$	Kumulierter Energiebedarf des Druckluftbedarfs des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{HS DED-LB,el. Energie}$	Kumulierter Energiebedarf des Bedarfs an elektrischer Energie des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{HS DED-LB,Pulver}$	Kumulierter Energiebedarf des Pulverbedarfs des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{HS DED-LB,Schutzgas}$	Kumulierter Energiebedarf des Schutzgasbedarfs des HS DED-LB-Prozesses
$KEA_{Nachbearbeitung}$	Kumulierter Energiebedarf der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Druckluft}$	Kumulierter Energiebedarf der Reinigung durch Druckluft im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Ultra}$	Kumulierter Energiebedarf der Ultraschallreinigung im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,HIP}$	Kumulierter Energiebedarf des heißisostatischen Pressens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,HIP,individuell}$	Individualisierter kumulierter Energiebedarf des heißisostatischen Pressens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Draht}$	Kumulierter Energiebedarf der Drahterosion im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Draht,Schichten}$	Kumulierter Energiebedarf der Drahterosion durch Schichten im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Draht,Schruppen}$	Kumulierter Energiebedarf der Drahterosion durch Schruppen im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{NB,Fräs}$	Kumulierter Energiebedarf des Fräsens im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$KEA_{Pulver}$	Kumulierter Energiebedarf der Pulverherstellung

$KEA_{\text{Pulver, Verpackung}}$	Kumulierter Energiebedarf der Verpackung des hergestellten Pulvers
$KEA_{\text{Rohmaterial}}$	Kumulierter Energiebedarf der Rohmaterialherstellung
$KEA_{\text{Transport}}$	Kumulierter Energiebedarf des Transports
$l_{\text{Bahn}}$	Länge einer Bahn in einem HS DED-LB-Prozess
$L_{\text{Bahnen}}$	Gesamtlänge der Bahnen, in einem HS DED-LB-Prozess
$l_{\text{Materialauftrag}}$	Länge eines Materialauftrags im HS DED-LB-Prozess
$L_{\text{Materialauftrag}}$	Gesamtlänge der Materialaufträge im HS DED-LB-Prozess
$l_{\text{Puffer, ac}}$	Distanz der Vorlaufstrecke, die mit definierter Vorschubgeschwindigkeit abgefahren wird
$l_{\text{Puffer, dec}}$	Distanz der Nachlaufstrecke, die mit definierter Vorschubgeschwindigkeit abgefahren wird
$l_{\text{Vorlauf}}$	Definierte Vorlaufstrecke eines HS DED-LB-Scanpfads
$l_{\text{Nachlauf}}$	Definierte Nachlaufstrecke eines HS DED-LB-Scanpfads
$m_{\text{Bauplatte}}$	Masse der Bauplatte
$m_{\text{HIP, Bauteil}}$	Bauteilgewicht vor dem heißisostatischen Pressen
$m_{\text{HS DED-LB, Bauteil}}$	Masse eines mittels HS DED-LB gefertigten Bauteils
$M_{\text{HS DED-LB, Pulver}}$	Eingesetzte Pulvermenge im HS DED-LB-Prozess
$m_{\text{Legierung, b}}$	Menge des Legierungselements $b$ im Rohmaterial
$\dot{m}_{\text{HS DED-LB, Pulver}}$	Pulvermassenstrom im HS DED-LB-Prozess
$M_{\text{HS DED-LB, Pulver, Bestellung}}$	Pulvermasse je Pulverbestellung
$M_{\text{HS DED-LB, Pulver, Verlust}}$	Pulver, das im HS DED-LB-Prozess nicht im Bauteil resultiert (Pulververlust)
$M_{\text{HS DED-LB, Pulver, Verlust, masch.}}$	Maschinenbedingte Pulververluste während des HS DED-LB-Prozesses
$M_{\text{HS DED-LB, Pulver, Verlust, proz.}}$	Prozessbedingte Pulververluste während des HS DED-LB-Prozesses
$M_{\text{Pulver, Fassungsvermögen}}$	Fassungsvermögen des Verpackungsbehälters für Pulver
$M_{\text{Pulver, Fassungsvermögen, Fass}}$	Fassungsvermögen des Edelstahlbehälters als Verpackungsbehälter für Pulver
$M_{\text{Pulver, Fassungsvermögen, Kunststoff}}$	Fassungsvermögen des Kunststoffbehälters als Verpackungsbehälter für Pulver
$M_{\text{Pulver, Fassungsvermögen, Weißblech}}$	Fassungsvermögen des Weißblechbehälters als Verpackungsbehälter für Pulver
$m_{\text{Rohmaterial}}$	Masse des eingesetzten Rohmaterials
$m_{\text{Rohstahl}}$	Masse des Rohstahls im Rohmaterial
$MRR$	Materialabtragsrate beim Fräsen
$m_{\text{Transportgut}}$	Transportierte Masse
$N_{\text{Bahnen pro Lage}}$	Anzahl der Bahnen je Lage eines HS DED-LB-Scanpfads
$n_F$	Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe des Pulverförderers
$N_{\text{Lagen}}$	Anzahl der Lagen eines HS DED-LB-Scanpfads
$n_R$	Rotationsgeschwindigkeit des Rührers des Pulverförderers
$N_{\text{Wenden}}$	Anzahl der Wendepunkte eines HS DED-LB-Scanpfads
$P$	Leistungsaufnahme eines Systems während eines Prozesses
$P_{A, B, lin}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung
$P_{A, ac, lin}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Beschleunigen
$P_{A, ac, lin, max}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Beschleunigen auf die maximale Geschwindigkeit
$P_{A, ac, lin, min}$	Theoretische mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Beschleunigen auf die minimale Geschwindigkeit
$P_{A, ac, lin, 50\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Beschleunigen auf die Geschwindigkeit, die 50 % der maximalen Geschwindigkeit entspricht
$P_{A, dec, lin}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Abbremsen

$P_{A,dec,lin,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Abbremsen von der maximalen Geschwindigkeit
$P_{A,dec,lin,min}$	Theoretische mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung beim Abbremsen von der minimal möglichen Geschwindigkeit
$P_{A,dec,lin,50\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Abbremsen von der Geschwindigkeit, die 50 % der maximalen Geschwindigkeit entspricht
$P_{A,B,lin}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Halten der Geschwindigkeit
$P_{A,B,lin,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Halten der maximalen Geschwindigkeit
$P_{A,B,lin,min}$	Theoretische Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Halten der minimalen Geschwindigkeit
$P_{A,B,lin,50\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer linearen Verfahrbewegung zum Halten der Geschwindigkeit, die 50 % der maximalen Geschwindigkeit entspricht
$P_{A,B,rot}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung
$P_{A,B,rot,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit
$P_{A,B,rot,min}$	Theoretische mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung bei minimaler Vorschubgeschwindigkeit
$P_{A,B,rot,50\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung bei einer Vorschubgeschwindigkeit, die 50 % der maximalen Vorschubgeschwindigkeit entspricht
$P_{A,B,rot,75\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme bei einer rotationssymmetrischen Verfahrbewegung bei einer Vorschubgeschwindigkeit, die 75 % der maximalen Vorschubgeschwindigkeit entspricht
$P_{A,Stand-by}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme im Stand-by-Modus
$P_{Fräsen}$	Leistungsaufnahme während eines Fräsprozesses
$P_{HIP}$	Gemessene Leistungsaufnahme für das heißisostatische Pressen
$P_{HIP,Ofen,nenn}$	Nennleistung des Ofens für das heißisostatische Pressen
$P_{i,ps}$	Leistungsaufnahme einer Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$
$P_{i,ps,basis}$	Basisleistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$
$P_{i,ps,pp}$	Von Prozessparameter $pp$ bedingte Leistungsaufnahme einer Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$
$P_{i,ps,pp,Fall 1}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ in Abhängigkeit von Prozessparameter $pp$ bei Fall 1 einer Fallunterscheidung
$P_{i,ps,pp,Fall C}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ in Abhängigkeit von Prozessparameter $pp$ bei Fall C einer Fallunterscheidung
$P_{i,ps,pp,Fall u}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , wenn der Prozessparameter $pp$ unterhalb eines Schwellenwerts $S_{i,ps,pp,n}$ liegen
$P_{i,ps,pp,Fall o}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , wenn der Prozessparameter $pp$ oberhalb eines Schwellenwerts $S_{i,ps,pp,n}$ liegen
$P_{i,ps,pp,Fall n}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ bei einer Fallunterscheidung ohne Schwellenwert Unter- oder Überschreitung des Prozessparameters $pp$

$P_{i,ps,pp,max}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , wenn Prozessparameter $pp$ bei seiner maximalen Einstellung ist
$P_{i,ps,pp,min}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , wenn Prozessparameter $pp$ bei seiner minimalen Einstellung ist
$P_{i,ps,pp,50\%}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , wenn Prozessparameter $pp$ bei 50 % seiner maximalen Einstellung ist
$P_{i,ps,pp,S}$	Leistungsaufnahme von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ , in Abhängigkeit von Prozessparameter $pp$ und des Schwellenwerts $S$
$P_{i,ps,n}$	Leistungsaufnahme einer Systemeinheit $i$ während Abschnittes $n$ der Prozessstufe $ps$
$P_{L,an}$	Leistungsaufnahmen der Lasereinheit für das Anfahren auf das geforderte Leistungsniveau
$P_{L,an,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit während des Anfahrens auf die maximale Laserleistung
$P_{L,an,min}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit während des Anfahrens auf die minimale Laserleistung
$P_{L,aus}$	Leistungsaufnahmen der Lasereinheit für das Herunterfahren von dem geforderten Leistungsniveau
$P_{L,aus,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit für das Herunterfahren von der maximalen Laserleistung
$P_{L,aus,min}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit für das Herunterfahren von der minimalen Laserleistung
$P_{L,B}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit bei aktivem Laserstrahl mit nahezu konstanter Leistungsaufnahme
$P_{L,B,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit bei maximaler Laserleistung
$P_{L,Pendel}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit beim Einpendeln auf die eingestellte Laserleistung
$P_{L,bereit}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit im Bereithaltemodus
$P_{L,set}$	Eingestellte Laserleistung der Lasereinheit des HS DED-LB-Fertigungssystems
$P_{L,set,max}$	Maximal einstellbare Laserleistung
$P_{L,stand-by}$	Mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit im Stand-by-Modus
$P_{PF,B}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Pulverförderers während des Betriebs
$P_{PF,B,F}$	Durch die Rotation der Förderscheibe bedingte Leistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,B,F,basis}$	Durch die Rotation der Förderscheibe bedingte Basisleistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,B,F,max}$	Durch die Rotation der Förderscheibe bedingte maximale Leistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,B,R}$	Durch die Rotation des Rührers bedingte Leistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,B,R,basis}$	Durch die Rotation des Rührers bedingte Basisleistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,B,R,max}$	Durch die Rotation des Rührers bedingte maximale Leistungsaufnahme des Pulverförderers
$P_{PF,stand-by}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Pulverförderers im Stand-by-Modus
$P_{S,an}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems während des Anfahrens
$P_{S,aus}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems während des Herunterfahrens
$P_{S,B}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems während des Betriebs
$P_{S,basis}$	Basisleistungsaufnahme des Entstaubungssystems
$P_{S,max}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems bei maximalem Absaugungsvolumen $\dot{V}_{S,set,max}$
$P_{S,50\%}$	Mittlere Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems bei einem eingestellten Absaugungsvolumen $\dot{V}_{S,set}$ von 50 % am maximalen Absaugungsvolumen $\dot{V}_{S,set,max}$
$P_{Ultra,nenn}$	Anschlussleistung des Ultraschallreinigungsgeräts
$P_{WZM,fix}$	Grundleistungsaufnahme der Werkzeugmaschine beim Fräsen

$P_{WZM,var}$	Variable Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine beim Fräsen
$Q_{Nut}$	Querschnittsfläche der Nut in der Förderscheibe
$R$	Verfahrrichtung der Bauplattform des HS DED-LB-Prozesses
$S$	Schwellenwert einer Prozessparametereinstellung, der eine markante Änderung des Verhaltens der Leistungsaufnahme markiert
$SEC_{Fräsen}$	Spezifischer Energiebedarf beim Fräsen
$SEC_{HIP}$	Spezifischer Energiebedarf für das heißisostatische Pressen
$SEC_{Ultra}$	Spezifischer Energiebedarf der Ultraschallreinigung
$S_{i,ps,pp}$	Schwellenwert von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ in Abhängigkeit von Prozessparameter $pp$ mit der Einstellung $n$
$S_{i,ps,pp,max}$	Schwellenwert von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$ bei maximaler Einstellung von Prozessparameter $pp$
$S_{Transport}$	Transportstrecke
$t$	Dauer eines Prozesses
$t_{A,B,rot}$	Dauer zum Abfahren eines rotationssymmetrischen Scanpfads während eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{ac}$	Gesamtdauer zur Beschleunigung der Bauplattform auf die geforderte Vorschubgeschwindigkeit zu Beginn eines Bauzyklus oder nach Wendepunkten bei einem HS DED-LB-Prozess
$t_{ac}$	Dauer eines einzelnen Beschleunigungsvorgangs während eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{Bahn}$	Gesamtdauer zum Abfahren einer Bahn während eines HS DED-LB-Prozesses
$t_{Bahn}$	Dauer zum Abfahren einer Bahn mit konstanter Geschwindigkeit beim HS DED-LB
$T_{dec}$	Gesamtdauer zum vollständigen Abbremsen der Bauplattform von der definierten Vorschubgeschwindigkeit am Ende eines HS DED-LB-Bauzyklus oder vor Wendepunkten
$t_{dec}$	Dauer eines Abbremsvorgangs der Bauplattform in einem HS DED-LB-Prozesses
$T_{Draht,Schlichten}$	Prozessdauer des Schlichtens beim Drahterodieren
$T_{Draht,Schruppen}$	Prozessdauer des Schruppens beim Drahterodieren
$T_{Fräsen}$	Dauer eines Fräsprozesses
$T_{HIP}$	Prozessdauer für das heißisostatische Pressen
$T_{HIP,Zone}$	Temperaturprofil beim heißisostatischen Pressen
$T_{HIP,nem}$	Maximale Nenntemperatur beim heißisostatischen Pressen
$t_{i,ps}$	Dauer der Aktivität von Systemeinheit $i$ während der Prozessstufe $ps$
$t_{i,ps,n}$	Dauer der Aktivität von Systemeinheit $i$ während Abschnitt $n$ der Prozessstufe $ps$
$T_{in}$	Dauer des In-Steps eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{L,an}$	Gesamtdauer, die die Lasereinheit des HS DED-LB-Fertigungssystems während eines Prozesses benötigt, um das konstante Leistungsniveau zur Bereitstellung der geforderten Laserleistung zu erreichen
$t_{L,an}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um das konstante Leistungsniveau zur Bereitstellung der geforderten Laserleistung zu erreichen
$t_{L,an,max}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um die maximale Laserleistung zu erreichen
$t_{L,an,min}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um die minimal einstellbare Laserleistung zu erreichen
$T_{L,aus}$	Gesamtdauer, die die Lasereinheit während eines Prozesses benötigt, um von der Bereitstellung der geforderten Laserleistung das Niveau im Bereithaltemodus zu erreichen
$t_{L,aus}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um von der Bereitstellung der geforderten Laserleistung das Niveau des Bereithaltemodus zu erreichen
$t_{L,aus,max}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um von der Bereitstellung der maximalen Laserleistung das Niveau des Bereithaltemodus zu erreichen

$t_{L,aus,min}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um von der Bereitstellung der minimalen Laserleistung das Niveau des Bereithaltemodus zu erreichen
$t_{L,B}$	Dauer, die die Lasereinheit aktiv bei einer konstanten Leistungsaufnahme den Laserstrahl aufrecht erhält
$t_{L,Pendel}$	Dauer, die die Lasereinheit benötigt, um sich auf die maximale Laserleistung einzupendeln
$t_{Luftstrom}$	Dauer des Luftstroms des Drucklufteinsatzes im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$t_{Materialauftrag}$	Dauer eines Materialauftrags während eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{Materialauftrag}$	Dauer aller Materialaufträge während eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{PF,an}$	Dauer für das Anfahren des Pulverförderers
$T_{PF,aus}$	Dauer für das Herunterfahren des Pulverförderers
$T_{PF,z}$	Einschaltverzögerungen mit der der Pulverförderer nach Beginn des Pre-Steps zugeschaltet wird, d. h. zeitlicher Abstand zwischen Einschalten der Schutzgasvolumenströme und des Pulverförderers.
$T_{post}$	Dauer des Post-Steps eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{pre}$	Dauer des Pre-Steps eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{Puffer,ac}$	Gesamtdauer zum Abfahren der Vorlaufstrecke in der definierten Vorschubgeschwindigkeit beim HS DED-LB-Prozess ohne Materialauftrag
$t_{Puffer,ac}$	Dauer für das Abfahren einer Pufferdistanz nach Beschleunigungsvorgängen während eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{Puffer,dec}$	Gesamtdauer zum Abfahren der Nachlaufstrecke in der definierten Vorschubgeschwindigkeit beim HS DED-LB-Prozess ohne Materialauftrag
$t_{Puffer,dec}$	Dauer für das Abfahren einer Pufferdistanz vor Abbremsvorgängen während eines HS DED-LB-Prozesses
$t_{S,an}$	Dauer des Anfahrens des Entstaubungssystems
$T_{total}$	Gesamtdauer eines HS DED-LB-Prozesses
$T_{Ultra}$	Gesamtdauer eines Ultraschallreinigungsprozesses
$T_{Wechsel}$	Gesamtdauer zum Wechsel von einer Lage auf die darauffolgende Lage in einem HS DED-LB-Prozess
$t_{Wechsel}$	Mittlere Dauer eines Lagenwechsels eines HS DED-LB-Scanpfads
$U_{Nut}$	Umfang der Nut der Förderscheibe
$v_A$	Definierte Vorschubgeschwindigkeit der Bauplattform
$v_{A,max}$	Maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit der Bauplattform
$\Delta v_A$	Geschwindigkeitsdifferenz während eines Beschleunigungsvorgangs
$\dot{V}_{NB,Druckluft}$	Volumenstrom der Druckluft im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$V_{NB,Druckluft}$	Druckluftbedarf im Rahmen der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen
$V_G$	Gesamtbedarf an Schutzgas eines HS DED-LB-Prozesses
$V_{G,S}$	Gesamtbedarf an Schutzgas eines HS DED-LB-Prozesses durch den Schutzgasstrom
$V_{G,T}$	Gesamtbedarf an Schutzgas eines HS DED-LB Prozesses durch den Trägergasstrom
$\dot{V}_{G,S}$	Volumenstrom des Schutzgasstroms des HS DED-LB Prozesses
$\dot{V}_{G,T}$	Volumenstrom des Trägergasstroms des HS DED-LB Prozesses
$\dot{V}_{HS\ DED-LB,Druckluft}$	Druckluftvolumenstrom des HS DED-LB-Prozesses
$V_{HS\ DED-LB,Druckluft}$	Druckluftbedarf während eines HS DED-LB-Prozesses
$\dot{V}_{S,set}$	Eingestelltes Absaugungsvolumen des Entstaubungssystems beim HS DED-LB
$\dot{V}_{S,set,max}$	Maximal einstellbares Absaugungsvolumen des Entstaubungssystems beim HS DED-LB
$w_{Element,b}$	Anteil des Legierungselements $b$ in der zur Edelstahlherstellung eingesetzten Ferroverbindung
$w_{Legierung,b}$	Massenanteil des Legierungselement $b$ am resultierenden Edelstahl

---

$W_{\text{Rohmaterial, Primär}}$	Anteil an primärem Rohmaterial
$W_{\text{Rohstahl, Primär}}$	Anteil an primärem Rohstahl in der Rohmaterialherstellung
$W_{\text{Rohstahl, Sekundär}}$	Anteil an sekundärem Rohstahl in der Rohmaterialherstellung
<b>Griechisch</b>	
$\eta_L$	Wirkungsgrad der Lasereinheit
$\rho_{\text{Schütt, 316L}}$	Schüttdichte des Pulvers in der Nut der Förderscheibe



# 1 Einleitung und Motivation

Die stetig wachsende Weltbevölkerung und der steigende Lebensstandard verursachen einen zunehmenden Ressourcen- und Energiebedarf, der seit ca. 1970 die Regenerationsfähigkeit der Erde übersteigt [Suth20, Dong19]. Das industrielle Wachstum wirkt sich gesamtheitlich bewertet negativ auf die Umwelt und auch auf die Menschen aus [Gupt19]. Im Zuge einer sich verstärkenden Klimakrise und einem daraus resultierenden wachsenden Umweltbewusstsein steigt zum einen die Nachfrage von Endanwendern und -verbrauchern nach nachhaltig produzierten Produkten und zum anderen nimmt die Anzahl an politischen Regulatorien zu [Duf12]. Zusätzlich können Unternehmen durch die Stärkung ihres Fokus auf umweltbezogene Themen Kostensenkungspotenziale erschließen, bspw. durch die Reduktion des Energie- und Ressourcenbedarfs, sowie durch Imageverbesserungen Wettbewerbsvorteile erlangen [Wats11, Sark95]. Daher streben Unternehmen nach einer nachhaltigen Produktion mit ressourcen- und energieeffizienten Fertigungsverfahren [Dube15].

Der additiven Fertigung wird ein großes Potenzial zugesprochen, den Ressourcenbedarf zu reduzieren. Sie wird daher häufig als umweltschonende Fertigungstechnologie bezeichnet [Kell17a, LeBo14]. Grundlage hierfür bildet das Verfahrensprinzip des schichtweisen Materialauftrags. Hierdurch wird zum einen lediglich das Material verwendet, das schlussendlich im Bauteil verbleibt, und zum anderen erlaubt es die Fertigung von Geometrien, die durch formative oder subtraktive Fertigungsverfahren nicht oder nur unter großem Aufwand hergestellt werden können [Morr07]. Dies ermöglicht das Fertigen von Leichtbaustrukturen, die zu einem reduzierten Energie- und Ressourcenbedarf in der Nutzungsphase der Bauteile führen können [Huan16]. Ob durch den Einsatz der additiven Fertigung die Umweltauswirkungen eines Bauteils tatsächlich reduziert werden können, ist jedoch individuell und abhängig von den verwendeten Materialien, vom Verfahren und seinen Prozessparametern sowie von der Anwendung des Bauteils. Um die Umweltauswirkungen zusätzlich zu technischen und ökonomischen Aspekten als Faktor zur Entscheidung, welches Fertigungsverfahren genutzt wird, berücksichtigen zu können, ist eine präzise Prognose der individuellen, aus dem Energie- und Materialbedarf resultierenden Umweltauswirkungen eines Bauteils vor der Fertigung notwendig.

Das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (engl. high-speed laser directed energy deposition – HS DED-LB) ist ein additives Fertigungsverfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung (engl. Directed Energy Deposition – DED) und besitzt aufgrund der kurzen Prozesszeiten großes Potenzial für industrielle Anwendungen [Scha21]. Insbesondere bei solch jungen Verfahren mit guten Entwicklungsmöglichkeiten ist es daher wichtig, die Energie- und Materialbedarfe und daraus resultierende Umweltauswirkungen zu analysieren, um frühzeitig geeignete Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung zu identifizieren und zu nutzen.

Diese Arbeit widmet sich daher der Frage, wie die Umweltauswirkungen von HS DED-LB bewertbar gemacht werden können. Hierfür wird die Prozesskette der Bauteilherstellung, die die Prozessschritte der Rohstoffgewinnung, der Pulverherstellung, der additiven Fertigung mittels HS DED-LB sowie der Nachbearbeitung umfasst, basierend auf der Methode der Ökobilanz analysiert. Darauf aufbauend wird ein Modell zur Prognose des individuellen Erderwärmungspotenzials, des sogenannten "Global Warming Potential" (GWP), sowie des kumulierten Energieaufwands (KEA) entwickelt. Hierdurch können die Umweltauswirkungen eines Bauteils vor der Fertigung abgeschätzt und Ansatzpunkte für Reduktionsmaßnahmen abgeleitet werden.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Um die Umweltauswirkungen der Bauteilfertigung mittels HS DED-LB zu analysieren, werden im Stand der Wissenschaft und Technik zunächst die Grundlagen der additiven Fertigung, insbesondere des Verfahrens des HS DED-LB, erläutert und potenzielle Umweltauswirkungen diskutiert. Für eine umfassende ökologische Analyse wird darauf aufbauend die gesamte Prozesskette der Bauteilherstellung, d. h. dem HS DED-LB-Prozess vor- und nachgelagerte Prozessschritte, analysiert. Diese umfasst die Rohmaterialherstellung, die Pulverherstellung, den HS DED-LB-Prozess sowie die Nachbearbeitung der Bauteile.

Als mögliche Methode zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen wird die Methode der Ökobilanz vorgestellt. Anschließend werden bestehende Ansätze zur energetischen und ökologischen Beurteilung von additiven Fertigungsverfahren und der dazugehörigen Prozesskette analysiert und abschließend vergleichend gegenübergestellt. Die nachfolgende Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht des Aufbaus des Kapitels.

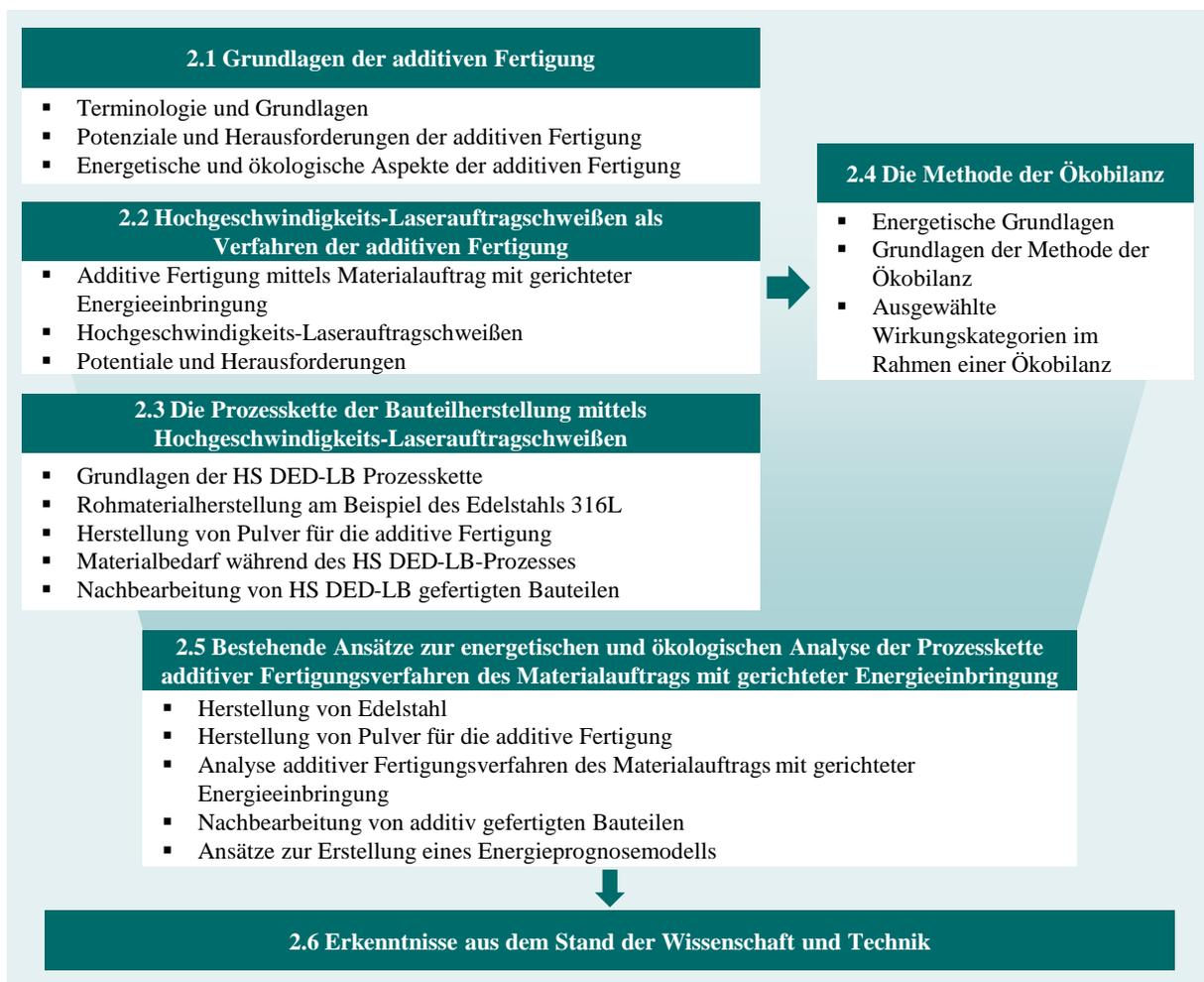


Abbildung 2-1: Aufbau des Kapitels 2: Stand von Wissenschaft und Technik

### 2.1 Grundlagen der additiven Fertigung

In diesem Kapitel werden das Verfahren der additiven Fertigung einführend erläutert sowie die dazugehörigen Technologien vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Diskussion technologischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte der additiven Fertigung.

### 2.1.1 Terminologie und Grundlagen

Die *additive Fertigung* ist ein Allgemeinbegriff für Technologien, die Körper wie bspw. Bauteile „basierend auf einer geometrischen Darstellung (...) durch die sukzessive Zugabe von Werkstoff“ erzeugen [DIN17]. Die Werkstoffzugabe und somit der Aufbau erfolgt in einzelnen aufeinander gefügten Schichten [Gebh13]. Zur Erzeugung einer Schicht wird dabei ein Werkstoff ausgelegt oder ausgebreitet, sodass er eine Oberfläche bildet. Anschließend werden die einzelnen Schichten verschmolzen, wodurch eine Verbindung geschaffen wird. Das Verschmelzen ist dabei der „Vorgang der Vereinigung von zwei oder mehr Werkstoffeinheiten zu einer einzigen Werkstoffeinheit“ [DIN17].

Gemäß der DIN 8580 werden Fertigungsverfahren in die sechs Hauptgruppen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern unterteilt [DIN22]. Seit der Normrevision 2022 wird die additive Fertigung dabei als urformendes Verfahren eingeordnet, da der Schwerpunkt des Verfahrens auf dem Schaffen einer Form liegt und Bauteile aus einem formlosen oder -neutralen Ausgangsmaterial wie einer Flüssigkeit, einem Pulver oder einem Filament hergestellt werden [DIN22, Frit18, Klah18, Gebh13, Kalp10]. Je nach eingesetztem Verfahren und Anwendung kann die additive Fertigung jedoch auch zu den beschichtenden Verfahren, z. B. Beschichten durch Schweißen, und den fügenden Verfahren, z. B. Fügen durch Schweißen, zugeordnet werden [DIN22, Kumk18, Gebh13].

Alternativ können Fertigungsverfahren auch in subtraktive, formative und additive Verfahren unterteilt werden, wie in Abbildung 2-2 dargestellt. Bei der subtraktiven Fertigung wird die Geometrie eines Körpers durch das Abtragen definierter Bereiche erzeugt. Beispiele für subtraktive Verfahren sind Drehen und Fräsen. Bei der formativen Fertigung wird ein definiertes Volumen in eine definierte Geometrie umgeformt. Beispielhafte formative Fertigungsverfahren sind Schmieden und Tiefziehen. Additive Fertigungsverfahren erzeugen Körper durch das Aneinanderfügen von Volumenelementen [Gebh13].

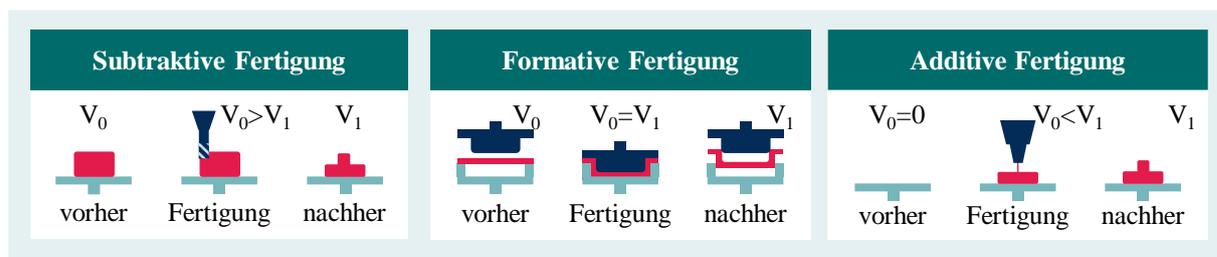


Abbildung 2-2: Unterscheidung subtraktiver, formativer und additiver Fertigungsverfahren nach [Yi21a]

Die Ursprünge der additiven Fertigung entstanden ab 1860, als Objekte manuell durch das Aneinanderfügen mehrerer Schichten hergestellt wurden. Bereits ab 1970 wurden erste maschinenbetriebene additive Fertigungsprozesse entwickelt, die somit bereits einige Merkmale moderner additiver Fertigungstechnologien aufweisen [Bour16]. Die stetige Weiterentwicklung der Technologie sowie die Integration von Computern und digitalen Technologien führte ab Mitte der 1980er Jahre zur zunehmenden Kommerzialisierung und der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen additiven Fertigungsanlage 1987 [Yi21a, Wohl19, Bour16].

In der Industrie wurden additive Fertigungsverfahren zunächst insbesondere zur Herstellung von Prototypen eingesetzt. Aufgrund des Verfahrensprinzips konnte der bisher zeitaufwändige Prozess der Prototypenerstellung deutlich verkürzt werden, sodass sich zunächst der Begriff

des Rapid Prototypings für sämtliche additive Fertigungsverfahren etablierte. Mit fortlaufender Verbesserung des Prozesses und der Materialeigenschaften wurde die additive Fertigung zunehmend auch für Anwendungen eingesetzt, die über die Prototypenherstellung hinausgehen [Gibs15]. Daher wird heute zwischen den Anwendungsbereichen Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing sowie Maintenance, Repair und Overhaul (MRO) unterschieden:

- Das *Rapid Prototyping* beschreibt den Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Modellen und Prototypen, d.h. von physischen Bauteilen im Entwicklungsstadium. Ziel ist die schnelle und einfache Herstellung von aussagekräftigen Modellen, mit denen möglichst frühzeitig Produkteigenschaften definiert und erprobt werden [Breu13, Gebh13]. Das Rapid Prototyping kann weiter untergliedert werden in das Concept Modeling oder Solid Imaging, wenn der Prototyp lediglich zur physischen Visualisierung dient, und in das Functional Prototyping, bei dem Prototypen bereits einzelne Funktionen des späteren Endprodukts aufweisen [Gebh13].
- Das *Rapid Manufacturing* beschreibt den Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen, die bereits die Eigenschaften von Endprodukten aufweisen [Breu13, Gebh13]. Weiter untergliedert werden kann das Rapid Manufacturing in Direct Manufacturing, wenn es sich bei den Bauteilen um Endprodukte handelt, und in Direct Tooling, wenn Werkzeuge, Werkzeugeinsätze, Lehren und Formen hergestellt werden [Gebh13].
- Beim *MRO* wird die additive Fertigung zur Wartung (Maintenance), Reparatur (Repair) und Überholung (Overhaul) von bereits bestehenden Bauteilen eingesetzt. Ziel ist dabei entweder die Nutzungsphase des Bauteils zu verlängern oder das Bauteil einem neuen Lebenszyklus zuzuführen [Wits16]. Jedoch können hierfür nur wenige additive Fertigungsverfahren eingesetzt werden. Am weitesten verbreitet ist das DED [Graf12].
- Eine Querschnittsanwendung besitzt das *Rapid Tooling*, das Herstellen von Werkzeugen und Formen durch additive Fertigungsverfahren, das teilweise auch als eigene Anwendungskategorie angesehen wird. Wird das Werkzeug als Bauteil verstanden und ist somit ein Endprodukt, dann wird es dem Direct Tooling und somit dem Rapid Manufacturing zugeordnet. Handelt es sich jedoch um ein Prototypenwerkzeug wird es dem Prototype Tooling und somit dem Rapid Prototyping zugeordnet. [Kumk18, Breu13].

Eine Übersicht der Einteilung der Anwendungsbereiche der additiven Fertigung ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

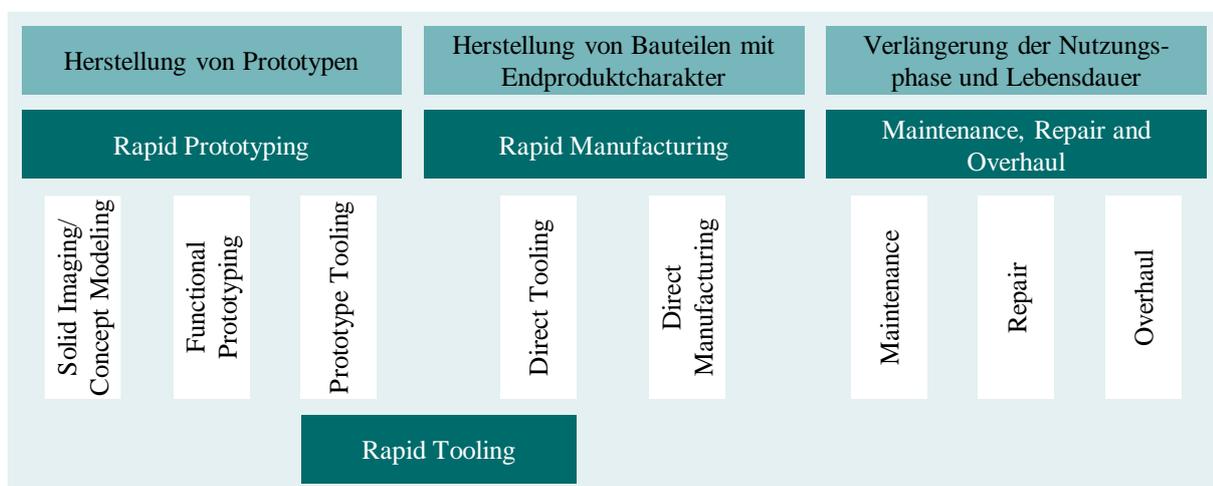


Abbildung 2-3: Einteilung der Anwendungsbereiche der additiven Fertigung in Anlehnung an [Wits16, Gebh13]

In der additiven Fertigung existieren verschiedene Verfahrensprinzipien und daraus resultierende Fertigungstechnologien. Diese können nach DIN EN ISO 17296 in sieben Kategorien unterteilt werden:

❑ **Badbasierte Photopolymerisation (engl. Vat Photopolymerization)**

Die badbasierte Photopolymerisation ist das erste patentierte additive Fertigungsverfahren [Wohl19, Frit18]. Hierbei wird ein „flüssiges Photopolymer in einer Wanne gezielt durch Licht-aktivierte Polymerisation ausgehärtet“ [DIN16]. Bei den Photopolymeren handelt es sich um photoreaktive Kunstharze. [DIN16]. Als Quelle für die Strahlen im ultravioletten (UV) Lichtspektrum fungieren Laser oder spezielle UV-Lampen [Wohl19].

❑ **Schichtlaminiierung (engl. Sheet Lamination)**

Bei der Schichtlaminiierung wird die Kontur der aktuellen Schicht durch einen Laser, ein Messer oder ein anderes Schneidwerkzeug aus dem Material ausgeschnitten [Gebh13]. Anschließend werden die Bauteile durch das Verbinden der einzelnen, aufeinanderfolgenden Werkstoffschichten geformt [DIN16]. Mit diesem Verfahren können Plattenwerkstoffe oder Folien aus Papier, Metall, Polymeren und Verbundwerkstoffen, bestehend aus Metallen und Keramikpulver, verarbeitet werden [DIN16].

❑ **Materialextrusion (engl. Material Extrusion)**

Bei der Materialextrusion wird ein Werkstoff zunächst erwärmt und dadurch plastifiziert. Das Material wird anschließend mit einer Düse oder einer anderen Öffnung gezielt auf dem zu fertigenden Bauteil dosiert. Die Wärme des Werkstoffs reicht dabei aus, um das bereits aufgetragene Material auf dem Bauteil leicht aufzuschmelzen, sodass nach dem Abkühlen und Verfestigen eine dauerhafte Verbindung entsteht [Gebh13]. Ausgangswerkstoffe sind Thermoplaste oder Strukturkeramiken, die als Filament oder Paste vorliegen [DIN16]. Daneben können auch weitere Werkstoffe wie Metalle verarbeitet werden, wenn diese als Partikel in einem Bindemittel aus Thermoplast eingebettet sind [Wohl19, Ning15].

❑ **Freistrah-Materialauftrag (engl. Material Jetting)**

Der Werkstoff wird von einem Auftragskopf tropfenweise gezielt auf dem aufzubauenden Bauteil abgesetzt und anschließend mithilfe einer UV-Lampe ausgehärtet [Yap17, DIN16]. Bisher kommerzialisierte Ausgangsmaterialien sind flüssige Photopolymere auf Acrylbasis, wachsartige Polymere und geschmolzenes Wachs. [DIN16, Gibs15]. Inzwischen können aber auch Metalle, Keramiken und weitere Polymere eingesetzt werden [Gülç21].

❑ **Freistrah-Bindemittelauftrag (engl. Binder Jetting)**

Für das Verfahren des Bindemittelauftrags wird auf einen pulverförmigen Werkstoff in einem Bett ein flüssiges Bindemittel gezielt aufgetragen, sodass sich der Werkstoff verbindet [DIN16]. Als Pulverwerkstoff kann zwischen einer Vielzahl an möglichen Materialien gewählt werden, wie bspw. Metalle, Polymere, Keramiken und Sand. Das eingesetzte Bindemittel muss dabei auf den Pulverwerkstoff abgestimmt sein. Meist werden hier wasserbasierte Bindemittel eingesetzt, aber auch polymerbasierte Bindemittel sind möglich [Gibs15].

❑ **Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. Powder Bed Fusion)**

Der Prozess des pulverbettbasierten Schmelzens umfasst Verfahren, bei denen Wärmeenergie durch einen Laser, Elektronenstrahl oder eine Infrarotlampe gezielt in Bereiche eines Pulverbetts einwirkt und es lokal schmilzt [DIN16]. Als Ausgangswerkstoff können grundsätzlich alle Materialien verwendet werden, die sich thermoplastisch verhalten, d.h. bei Wärmezufuhr schmelzen und sich bei Abkühlung wieder verfestigen [Gebh13]. Dazu

gehören Pulver aus reinen oder legierten Metallen, thermoplastische Polymere und Keramiken [DIN16].

#### ❑ **Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (engl. Direct Energy Deposition – DED)**

Das Verfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung beschreibt einen additiven Fertigungsprozess, „in dem eine fokussierte Wärmeenergie verwendet wird, um Werkstoffe, so wie sie zugeführt werden, durch Schmelzen zu vereinen“ [DIN16]. Mögliche Werkstoffe sind sowohl Reinmetalle als auch Metalllegierungen, die meist als Pulver oder aber auch als Draht eingesetzt werden [Ma17, Gu12]. Je nach Anwendung können auch Keramikpartikel dem Grundwerkstoff zugegeben werden [DIN16].

### **2.1.2 Potenziale und Herausforderungen der additiven Fertigung**

Die additive Fertigung hat sich in den vergangenen Jahren mit steigender Geschwindigkeit verbreitet und etabliert sich zunehmend in der Industrie [Wohl19]. Dies ist auf eine Reihe von technologischen und ökonomischen Potenzialen zurückzuführen, die im Folgenden zusammengefasst sind:

#### **Technologische Potenziale**

- ❑ Die additive Fertigung bietet große konstruktive Freiheiten, sodass komplexe Geometrien oder Strukturen gefertigt werden können, die mit anderen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit großem Aufwand realisierbar sind [Popr15]. Somit kann bspw. eine Funktionsintegration, Leichtbau und die Fertigung von einteiligen Lösungen erfolgen [Fred19, Diet16]. Dadurch können gezielt bestimmte Oberflächen oder Formen erzeugt werden, Material und Gewicht eingespart sowie die Montage erleichtert oder verkürzt werden.
- ❑ Die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren ermöglichen die Verarbeitung einer Vielzahl an Materialien. So können Metalle, Polymere, Keramik sowie Verbundwerkstoffe genutzt werden [Krut98]. Zudem bietet eine wachsende Zahl von Herstellern Ausgangsmaterialien für die additive Fertigung an, die aus rezyklierten Rohstoffen hergestellt werden, bspw. Metallschrott, rezyklierte Polymere und biologisch abbaubare Materialien wie Holz [Ford16].
- ❑ Die Verwendung mehrerer Materialien innerhalb eines Bauteils ist vergleichsweise einfach möglich, bspw. indem verschiedene Metallpulver verwendet werden, sodass lokal gezielte Zusammensetzungen und Legierungen hergestellt werden können [Gebh13].
- ❑ Es sind zur additiven Fertigung keine bauteilspezifischen Werkzeuge oder Matrizen erforderlich, wie sie für eine Vielzahl von anderen Fertigungsverfahren notwendig sind [Huan16].

#### **Ökonomische Potenziale**

- ❑ Die additive Fertigung ermöglicht aufgrund der großen Freiheiten in der Produktgestaltung die schnelle Fertigung von individualisierten Produkten [Desp15, Huan15]. Hierdurch kann sich der Nutzen des Kunden steigern und somit auch seine Zufriedenheit, wodurch Wettbewerbspotenziale erschlossen werden können [Peng18, Kell17a].
- ❑ Durch das Wegfallen von produktspezifischen Werkzeugen und Hilfsstoffen sind zum einen die Kosten pro Bauteil nahezu unabhängig von der produzierten Stückzahl [Kumk18, Tuck08], zum anderen können darüber hinaus weitere Kostenreduzierungspotenziale erschlossen werden, da vergleichsweise schnell und aufwandsarm kundenindividuelle

Produkte möglich sind [Guto17, Kell17a, Slot15]. Dies unterstreicht die Vorteile des Einsatzes der additiven Fertigung in der Einzel- oder Kleinserienfertigung [Peng18, Kell17a].

- ❑ Die additive Fertigung ermöglicht eine digitale, flexible und weitestgehend ortsunabhängige Produktion [Fred19, Pérè06]. Somit kann eine schnellere Markteinführung neu entwickelter Produkte erreicht werden [Geb14, Petr11].
- ❑ Die additive Fertigung hat das Potenzial Lieferketten zukünftig zu verändern [Fred19, Pérè06]. Die Lieferkette kann zum einen durch eine endverbrauchernahe Fertigung verkürzt werden [Slot15]. Zum anderen ermöglichen die einteiligen Lösungen der additiven Fertigung eine Reduktion der Produktbaugruppen. Dies senkt innerhalb der Lieferketten die Anzahl der Akteure und Stufen und verringert die notwendigen Interaktionen [Desp15]. Hierdurch können zudem die Abhängigkeiten innerhalb der Lieferkette reduziert und so die Resilienz gegenüber Lieferengpässen erhöht werden.
- ❑ Die additive Fertigung ermöglicht das Wiederaufbereiten von kaputten oder verschlissenen Bauteilen, was gegenüber einer Entsorgung und Neufertigung Ressourcen einsparen und Kosten senken kann [Slot15].

Jedoch stehen der additiven Fertigung auch einige Nachteile und Herausforderungen entgegen, die im Folgenden erläutert werden.

### **Technologische Herausforderungen**

- ❑ Bisher ermöglicht die additive Fertigung fast ausschließlich die Schaffung einer Form. Das Einbringen von Funktionalität erfolgt meist in nachfolgenden Prozessschritten, der Nachbearbeitung [Desp15]. Jedoch existieren bereits einige Forschungsansätze zur Funktionsintegration bspw. dem additiven Fertigen von Sensoren [Yi21b, Lehm16].
- ❑ Die additive Fertigung weist bisher einen noch geringen Grad an Automatisierung auf [Guto17]. So muss der Prozess meist manuell vorbereitet sowie gestartet werden [Kumk18]. Auch die anschließende Bauteilentnahme weist bisher einen geringen Automatisierungsgrad auf und beinhaltet meist noch manuelle Schritte [Glat21]. Zudem sind additive Fertigungsverfahren bisher nur unzureichend in bestehende Fertigungsabläufe integriert [Kumk18].
- ❑ Ein großer Kritikpunkt an der additiven Fertigung ist die vergleichsweise niedrige Prozessgeschwindigkeit sowie die daraus resultierende Prozessproduktivität [Guto17, Kell17a, Ford16]. Je nach Verfahren und Bauteil können die Fertigungszeiten mehrere Stunden, aber auch mehrere Tag betragen [Yi21a]. Aufgrund der daraus resultierenden langen Fertigungszeiten galt die additive Fertigung lange Zeit für den Einsatz in der Massenproduktion als ungeeignet [Huan16]. Jedoch zeigen aktuelle Studien, dass inzwischen, insbesondere für kleine und komplexe Bauteile, auch größere Losgrößen wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft mittels additiver Fertigung hergestellt werden können [Jung23].
- ❑ Die Oberflächenrauheit ist aufgrund des durch den schichtweisen Aufbau verursachten Treppenstufeneffekts hoch, was eine niedrige Oberflächenqualität bedingt [Kell17a, Ford16]. Zudem ist die geometrische Genauigkeit und Wiederholbarkeit bei manchen additiven Fertigungsverfahren niedrig [Guto17, Huan16]. Daher ist je nach geplanter Anwendung eine Nachbearbeitung erforderlich [Ford16].

### **Ökonomische Herausforderungen**

- ❑ Die additive Fertigung ist je nach gewählter Technologie meist mit hohen Investitionen verbunden [Wohl19].

- Die Kosten für das spezifische Material der additiven Fertigung sind vergleichsweise hoch, was insbesondere bei einem Einsatz der additiven Fertigung für mittlere bis große Chargen zur Unrentabilität führen kann [Fred19, Kell17a].

Die Stärken der additiven Fertigung gegenüber subtraktiven und formativen Fertigungsverfahren liegen somit insbesondere in der Herstellung von individuellen Produkten und komplexen Geometrien. Da spezifische Werkzeuge und Vorrichtungen nicht notwendig sind, ist sie zudem insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung rentabel. Demgegenüber weist sie vergleichsweise langsame Prozessgeschwindigkeiten, hohe spezifische Kosten und einen geringen Automatisierungsgrad auf. Daher gilt sie noch weitestgehend als ungeeignet für die Großserien- oder Massenproduktion [Huan16]. Dennoch wird ihr auch hier ein Potenzial zugesprochen [Jung23, Kell17a].

Vor dem Hintergrund von zunehmendem gesellschaftlichem Druck und politischen Regulierungen, rücken, neben den technischen und ökonomischen Aspekten von Fertigungsverfahren, die durch den Fertigungsprozess hervorgerufenen Umweltauswirkungen zunehmend in den Fokus. Durch die Inklusion von Nachhaltigkeitsaspekten in unternehmerische Entscheidungen können neue Möglichkeiten der Kostensenkung und neue Innovationsquellen erschlossen sowie Wettbewerbsvorteile erzielt werden [Wats11, Sark95]. Daher gilt es, Fertigungsverfahren nicht nur aus technischer und ökonomischer Sicht zu bewerten, sondern ebenfalls hinsichtlich ihres Energie- und Ressourcenbedarfs sowie ihrer Umweltauswirkungen zu analysieren.

### 2.1.3 Energetische und ökologische Aspekte der additiven Fertigung

Der additiven Fertigung wird ein großes Potenzial zur Reduktion des Ressourcenbedarfs zugesprochen, weshalb sie in der Vergangenheit häufig als umweltschonende Fertigungstechnologie bezeichnet wurde [Kell17a, LeBo14]. Jedoch zeigen Studien auch einige Aspekte der additiven Fertigung auf, die sich potenziell negativ auf die Umwelt auswirken. Die ökologischen Potenziale und Defizite der additiven Fertigung werden daher im Folgenden gegenübergestellt und diskutiert.

Durch die additive Fertigung kann eine Reduktion der Umweltauswirkungen während der Nutzungsphase erreicht werden. Neuartige Geometrien, die durch additive Fertigungstechnologien ermöglicht werden, und die Gewichtseinsparungen durch Leichtbau, können je nach Einsatzbereich zu Leistungs- und Umweltvorteilen führen [Huan15]. Bspw. kann durch den Einbau verschiedener additiv gefertigter Komponenten das Gewicht eines Flugzeugs reduziert werden, wodurch der Treibstoffbedarf und die damit verbundenen Umweltauswirkungen gesenkt werden können [Huan16]. Der Energiebedarf der zur additiven Fertigung eines Bauteils notwendig ist, ist für jedes additive Fertigungsverfahren und jedes gefertigte Bauteil individuell [Chen15]. Er ist jedoch meist höher als der von subtraktiven oder formativen Verfahren [Bamb17, Kell17b, Chen15, Yoon14]. Somit besteht die Möglichkeit, dass die angestrebten geringeren Umweltauswirkungen während der Nutzungsphase des Bauteils durch den höheren Energiebedarf der Herstellung kompensiert werden oder diese gar übersteigen [Kell17b].

Die additive Fertigung gilt ebenfalls als Fertigungsverfahren mit hoher Materialeffizienz, da lediglich das für die Endkontur notwendige Material, inklusive einer vergleichsweise geringen Zugabe für die Nachbearbeitung oder Stützstrukturen, d. h. zusätzliche additiv gefertigte Geometrien am oder innerhalb des Bauteils, die Überhänge oder Hohlräume abstützen, verarbeitet wird [Liu18a, LeBo13]. Weitere Materialeinsparungen gegenüber anderen Fertigungsverfahren

werden durch Leichtbau und topologische Optimierungen, d. h. die Optimierung der Bauteilgestaltung basierend auf der mechanischen Belastung unter Berücksichtigung bestimmter Optimierungsziele wie bspw. dem Bauteilgewicht, erzielt [Yi21a, Huan16]. Aus dem geringeren Bedarf an Material resultiert einerseits eine in Summe geringere Umweltbelastung aus der Gewinnung und Verarbeitung des Rohmaterials [Slot15] und andererseits entsteht insgesamt weniger technischer Schrott und Abfall [Liu18a, Morr07]. Jedoch ist die Materialeffizienz stark abhängig vom betrachteten additiven Fertigungsverfahren. Bei pulverbettbasierten Verfahren trägt durchschnittlich weniger als 30 % des eingesetzten Metallpulvers zum Formaufbau bei. Die restlichen 70 % müssen nach Prozessende entfernt werden [Ma17]. Ähnlich verhält es sich bei Verfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung, da hier ein Teil des Pulvers durch den thermischen Energieeintrag verdampft oder Pulverpartikel nicht ausreichend mit dem Schmelzbad interagieren und somit nicht aufgetragen werden. Ein Teil des Pulvers kann nach einem Siebvorgang zur Aufbereitung wiederverwendet werden [Muth16]. Die Wiederverwendung ist jedoch aufgrund der abnehmenden Pulverqualität und einer daraus resultierenden abnehmenden Bauteilqualität begrenzt [Sing20]. Weiterhin entstehen trotz der reduzierten Abfallmenge auch bei der additiven Fertigung Abfälle, bspw. durch notwendige Stützstrukturen, die nach der Fertigung entfernt und entsorgt werden müssen [Peng18].

Da keine oder nur wenige produktspezifische Werkzeuge wie Matrizen und Schneidwerkzeuge benötigt werden, entfallen die damit verbundenen Umweltauswirkungen zur Gewinnung, Herstellung und Entsorgung [Morr07]. Jedoch werden für einige additive Fertigungsverfahren Hilfs- und Betriebsstoffe wie Schutzgas, Druckluft und Kühlmedien benötigt, die nur vereinzelt kreislaufgeführt werden können [Ehms23a]. Eine Kreislaufführung umfasst hierbei die alternative Wiederverwendung, Recycling und Rückgewinnung von Materialien in Produktionsprozessen [Kirc17]. Zudem muss der Rohstoff des Ausgangsmaterials eine spezifische Form aufweisen und bspw. pulver- oder drahtförmig vorliegen [Bour17]. Um die Materialien in der geforderten Form herzustellen sind somit zusätzliche Ressourcen- und Energieaufwände notwendig [Ehms23a, Chen15].

Verglichen mit subtraktiven und formativen Fertigungsverfahren werden während der additiven Fertigung weniger umweltbedenkliche Hilfs- und Betriebsstoffe, wie Schneidflüssigkeiten beim Zerspanen oder Trennmittel für das Gießen benötigt [Colo20]. Dadurch können Umweltauswirkungen bei der Gewinnung und Herstellung sowie mögliche gesundheitliche und ökologische Risiken vermieden werden [Yi21a]. Diese treten jedoch bei der häufig erforderlichen Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile auf. Denn trotz der endkonturennahen Fertigung ist diese meist noch zur Erreichung der geforderten Geometrie- und Oberflächentoleranzen und zum Abtrennen der Bauplatte vom Bauteil notwendig. Die hierbei notwendigen Hilfs- und Betriebsstoffe, Werkzeuge sowie der zusätzliche Energiebedarf und die dadurch entstehenden Umweltauswirkungen werden oftmals vernachlässigt [Kell17a].

Die durch die Zentralisierung der Fertigung verkürzte Lieferkette führt zu einer Reduktion des Logistikaufwands und somit des Transports, was neben einer Kostensenkung auch eine Verringerung der Umweltbelastung zur Folge haben kann [Baum17]. Zudem kann durch die Fertigung auf Abruf, z. B. von Ersatzteilen, die Lagerhaltung sowie die Überproduktion reduziert werden [Kell17a, Ford16]. Jedoch können aufgrund der eingeschränkten Eignung der additiven Fertigung für die Großserien- oder Massenproduktion mögliche Skaleneffekte nicht ausgeschöpft werden, was wiederum zu höheren Kosten und Umweltauswirkungen führen kann.

Aufgrund des Verfahrensprinzips des schichtweisen Aufbaus kann Material auf bestehende Bauteile aufgetragen werden. Die additive Fertigung kann daher im Rahmen des MRO zur Aufbereitung von verschlissenen oder anderweitig defekten Bauteilen eingesetzt werden. Hierdurch kann das Bauteil in den ursprünglichen Zustand versetzt und einer neuen Nutzungsphase zugeführt werden [Wits16]. Dies führt im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu einer Reduzierung des Ressourceneinsatzes. Hierbei ist jedoch auf die Erfüllung der technischen und sicherheitsorientierten Anforderungen zu achten, da es durch unpassend gewählte Prozesseinstellungen zu Qualitäts- und Festigkeitsmängeln kommen kann [Schm22, Wils14]. Zudem ist ein additives MRO nicht immer ökologisch vorteilhaft, da der Energie- und Ressourcenbedarf den einer Neufertigung übersteigen kann [Wils14].

Aufgrund der konstruktiven Freiheiten additiv gefertigter Bauteile können durch die Konsolidierung von Baugruppen der Einsatz von Verbindungselementen und die Anzahl unterschiedlicher Materialarten reduziert werden [Al-M18]. Die Bauteile können somit einfacher demontriert und wieder zielgerichtet neuen Kreisläufen zugeführt werden [Desp17].

Es wird deutlich, dass der Ruf der additiven Fertigung als umweltschonende Fertigungstechnologie Diskussionsgegenstand ist. Hervorzuheben ist insbesondere die mögliche Energie- und Ressourceneinsparung während der Nutzungsphase additiv gefertigter Bauteile aufgrund von Leichtbau und Funktionsintegration. Jedoch deuten einige Untersuchungen darauf hin, dass der Energie- und Ressourcenbedarf zur Herstellung additiv gefertigter Teile den von formativen und subtraktiven Verfahren übersteigt. Zumal zum einen das für die additive Fertigung benötigte Material vorher hergestellt werden muss und zum anderen meist eine Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile mit formativen oder subtraktiven Verfahren notwendig ist. Um die additive Fertigung ganzheitlich zu bewerten, müssen die potenziellen Ressourcen- und Energieeinsparungen der Nutzungsphase dem zur Herstellung des Bauteils notwendigen Ressourcen- und Energiebedarf gegenübergestellt werden.

## **2.2 Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen als Verfahren der additiven Fertigung**

Die erläuterten Vorteile heben die additive Fertigung von subtraktiven und formativen Fertigungsverfahren ab und schaffen neue Anwendungsfelder, wie die Wiederaufbereitung von defekten Bauteilen durch direkten Materialauftrag und können so eine Schlüsseltechnologie der Kreislaufwirtschaft darstellen. Jedoch sind additive Fertigungsverfahren meist wesentlich langsamer als subtraktive und formative Fertigungsverfahren. Die additiven Verfahren des DED, d. h. des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung, auch Laserauftragschweißen genannt, gehören zu den jüngsten additiven Fertigungstechnologien. Sie sind bisher die einzigen kommerzialisierten Verfahren für das MRO und bieten aufgrund ihrer vergleichsweise kurzen Fertigungszeiten und möglicher großer Bauvolumen Vorteile für industrielle Anwendungen. Daher bildet das DED-Verfahren den Fokus dieser Arbeit und wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

### **2.2.1 Additive Fertigung mittels Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung**

Beim *DED* erzeugt eine Energiequelle, meist ein Laser, ein Elektronenstrahl oder ein Plasmabogen, auf dem zu fertigenden Bauteil ein Schmelzbad (typischerweise 0,25 mm bis 1 mm im Durchmesser und 0,1 mm bis 0,5 mm tief), in das der Werkstoff als Pulver oder Draht zugeführt wird, wie in Abbildung 2-4 gezeigt [DIN16, Gibs15, Clay14]. Der Auftragskopf und somit die

Energiequelle sowie das Bauteil werden kontinuierlich relativ zueinander bewegt [Kloc15]. Dadurch wandert das Schmelzbad entlang der gewünschten Kontur und verfestigt sich gemeinsam mit dem hinzugegebenen Werkstoff, wodurch nach und nach eine neue Schicht entsteht. Je nach Maschinensystem bewegt sich der Auftragskopf, die Bauplattform und somit auch das Bauteil oder es bewegen sich beide Einheiten. Die Laseroptik der Energiequelle ist dabei gemeinsam mit der Pulverdüse und der Schutzgasdüse im Auftragskopf integriert [Gibs15]. Das Pulver wird im Behälter durch Schutzgas oder einen Rührer fluidisiert, anschließend durch einen Schutzgasstrom, dem sogenannten Trägergasstrom (engl. carrier gas flow), zum Auftragskopf transportiert und dort gebündelt, sodass es gezielt auf das Bauteil aufgetragen werden kann. Ein weiterer Schutzgasstrom (engl. shielding gas flow), schafft am Ort des Materialauftrags eine Schutzgasatmosphäre und beugt so einem Oxidieren des Materials vor [LeBo14]. Da die kinetische Energie der Pulverpartikel größer ist als die Wirkung der Schwerkraft, ist ein vertikales Auftragen von vergleichbarer Effektivität wie ein horizontales Auftragen. Nach jeder fertigen Schicht entfernt sich der Auftragskopf vom Bauteil oder die Bauplattform vom Auftragskopf um jeweils eine Schichtdicke [Gibs15].

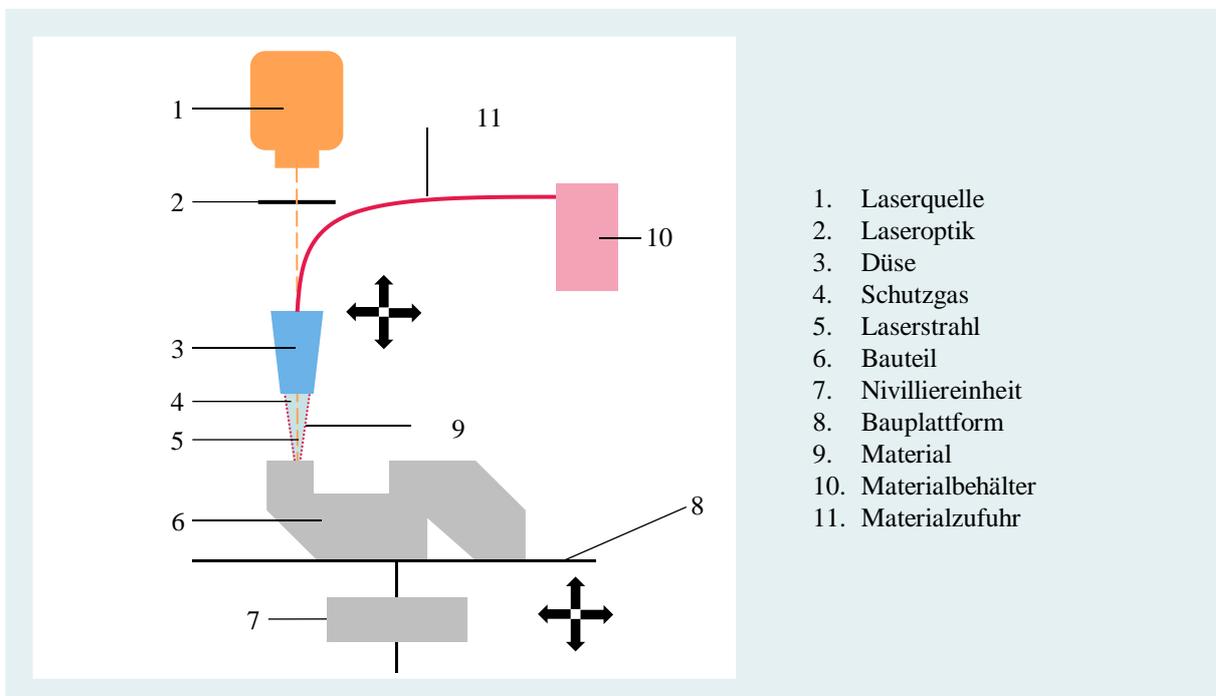


Abbildung 2-4: Prinzip der additiven Fertigung mittels Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED-Verfahren) (nach [DIN16])

Einige wesentliche Vorteile des DED sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die gefertigten Bauteile zeichnen sich durch eine hohe Dichte und Festigkeit aus [Liu18a, Kloc15].
- Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren weist DED größere mögliche Bauvolumen auf, sodass entsprechend große Bauteile gefertigt werden können [Yan15].
- Das Verfahren ermöglicht größere Materialauftragsraten, sodass kürzere Prozesszeiten erzielt werden können [Herz16].
- Es können mehrere Werkstoffe gleichzeitig oder auch nacheinander innerhalb eines Fertigungsprozesses eingesetzt werden, je nach gewünschter Funktionalität des Bauteils

[Wohl19]. Dadurch können in-situ funktional gradierte Materialien erzeugt werden [Gibs15].

- ❑ Besitzt das Maschinensystem ein 4- oder 5-Achsen-Bewegungssystem, können auch vertikale Schichten realisiert werden [Wohl19]. Weiterhin kann dadurch in Abhängigkeit vom Bauteil gewählt werden, welche Maschinenkomponente, Auftragskopf oder Bauplattform während des Prozesses bewegt wird [Gibs15].
- ❑ Es ist eine Integration von subtraktiven Maschinenkomponenten innerhalb des additiven Fertigungssystems möglich, sodass das Bauteil nach dem DED-Prozess direkt spanend nachbearbeitet werden kann [Gibs15].
- ❑ DED kann zum MRO und dem sogenannten Remanufacturing von defekten Bauteilen oder anderen Komponenten wie z. B. von Turbinenschaufeln eingesetzt werden [Gibs15].
- ❑ Durch DED können dünne Schichten aus korrosionsbeständigen und verschleißfesten Werkstoffen auf Komponenten aufgetragen werden, um deren Leistung und Lebensdauer zu verbessern [Gibs15].

Diese Vorteile stehen jedoch den folgenden Nachteilen gegenüber:

- ❑ Durch DED gefertigte Bauteile weisen eine vergleichsweise geringe Oberflächenqualität und Formgenauigkeit auf [Gibs15]. Daher ist eine anschließende Nachbearbeitung häufig notwendig.
- ❑ Feine und komplexe Strukturen, bspw. Gitterstrukturen, wie sie beim pulverbettbasierten Schmelzen möglich sind, können durch das DED nicht gefertigt werden, da aufgrund des Schmelzbads kleinskalige Geometrien nicht realisiert werden können [Gibs15].

Das DED bietet somit neben einigen wenigen Nachteilen, viele Vorteile gegenüber anderen metallbasierten Verfahren der additiven Fertigung. Aufgrund ihres geringeren Reifegrades z. B. gegenüber pulverbettbasierten Verfahren sind DED-Verfahren in der Industrie jedoch vergleichsweise wenig verbreitet. Die kontinuierliche Weiterentwicklung des Verfahrens, insbesondere hinsichtlich der Reduktion der Prozesszeiten und der Erweiterung der Bauvolumina, führt zu einer steigenden Attraktivität der Technologie für industrielle Anwendungen [Ehms21].

### 2.2.2 Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Die Technologie des *Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen* (high speed laser directed energy deposition – HS DED-LB) gehört zu den Verfahren des DED und zeichnet sich durch einen modifizierten Pulverstrahlfokus aus [Scha21, Li19]. Der pulverförmige Werkstoff wird dabei gezielt oberhalb des Schmelzbads durch den Laserstrahl aufgeschmolzen und wird daher im Vergleich zu anderen Verfahren des DED im flüssigen Zustand aufgetragen [Scho20, DE12]. Aufgrund dieses Verfahrensprinzips können mit dem HS DED-LB höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erreicht werden. Mit dem in dieser Arbeit betrachteten HS DED-LB-Fertigungssystem *pE3D* der *ponticon GmbH* können beispielsweise Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min und eine Auftragsrate von bis zu 600 cm<sup>3</sup>/h realisiert werden, was etwa dem fünf- bis zehnfachen anderer DED-Verfahren entspricht [Pont24, Shen19, DE12].

Ursprünglich wurde das HS DED-LB zum Aufbringen von verschleißfesten und korrosionsbeständigen Beschichtungen auf rotationssymmetrischen Teilen eingesetzt [Scha21, DE12]. Ziel war die Verbesserung der Defizite von herkömmlichen Verfahren der Beschichtungstechnik und Reparatur wie thermischem Spritzen und Hartverchromen. Durch die

Oberflächenbehandlung mit HS DED-LB können Schichten im Zehntelmillimeterbereich auf große Flächen flexibel, effizient und schnell aufgetragen werden [Scho17]. Davon ausgehend wurde das Verfahren für die additive Fertigung weiterentwickelt. Hierbei war das Ziel, die Herstellung von hochindividualisierten Bauteilen mit hohen Volumenaufbauzeiten und feinerer Strukturauflösung, verglichen mit bisherigen DED-Verfahren, zu ermöglichen [Scha21].

Die für das HS DED-LB-Verfahren spezifische Düse und das damit verbundene Verfahrensprinzip wird im Patent der Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung und der RWTH Aachen aus dem Jahr 2011 beschrieben und ist schematisch in Abbildung 2-5 im Vergleich zum DED dargestellt [DE12].

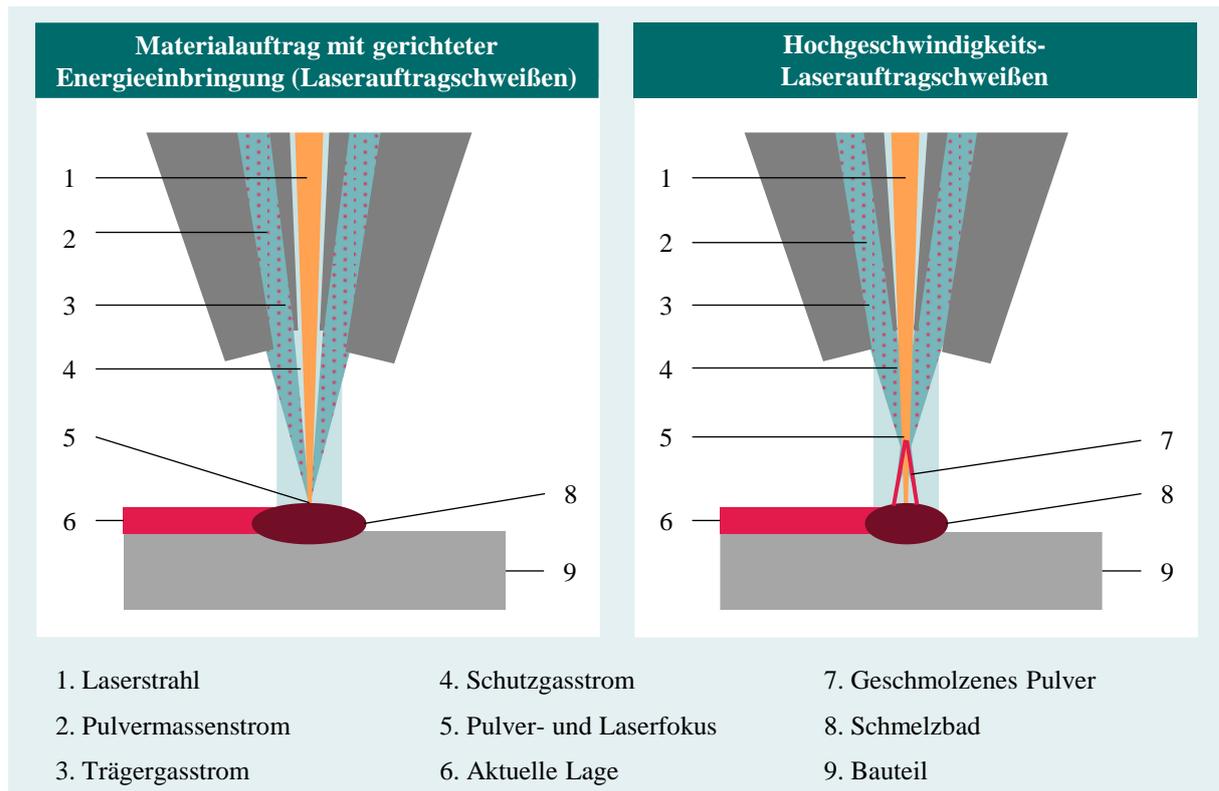


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Unterschieds des Werkstoffauftrags zwischen DED (links) und HS DED-LB (rechts) (in Anlehnung an [DE12])

Bei der additiven Fertigung mittels HS DED-LB wird der Werkstoff in Pulverform mit einem definierten Abstand zum Werkstück, dem Arbeitsabstand, durch den Laserstrahl aufgeschmolzen und anschließend dem Schmelzbad in vollständig geschmolzener Form zugeführt [Scho20, DE12]. Das Pulver wird dabei von der Förderscheibe im Pulverförderer durch einen Gasstrahl aus Schutzgas, dem sogenannten Trägergasstrom transportiert und bildet mit ihm den Pulvermassenstrom, einen dispergierten Zweiphasen-Feststoffstrom [Scho20, DE12]. Der Pulvergasstrom wird durch eine koaxiale Düse im Auftragskopf geleitet und erhält dadurch eine Kegelform, dessen Spitze der Fokus des Pulvergasstroms ist. Dieser Fokus ist im Idealfall im gleichen Punkt wie der Fokus des Laserstrahls. Das Pulver wird während es den Laserstrahl durchquert aufgeschmolzen und bewegt sich dann in flüssiger Form zum Schmelzbad [DE12]. Da das Schmelzbad auf dem Werkstück vom selben Laserstrahl erzeugt wird, muss der Wärmeeintrag des Laserstrahls ausreichend groß sein, um sowohl das Pulver vollständig aufzuschmelzen, als auch das Schmelzbad zu erzeugen [Scho20, DE12]. Wie lange das Aufschmelzen des Pulvers dauert, ist abhängig vom gewählten Material, von der Partikelgröße, dem

Pulvermassenstrom, der Aufenthaltsdauer des Partikels im Laserstrahl und der Laserintensität. So bedingt bspw. eine hohe Laserleistung und eine damit verbundene hohe Intensität ein ausreichend schnelles Aufschmelzen des Pulvers. Jedoch kann dies ebenfalls zu einem zu starken Wärmeeintrag in das Schmelzbad sowie zum Verdampfen der Pulverpartikel führen. Wichtiger Prozessparameter ist daher der Pulvermassenstrom, d. h. die je Zeiteinheit geförderte Menge an Pulver. Je höher der Pulvermassenstrom und die damit verbundene Pulverpartikeldichte ist, desto mehr Laserleistung wird durch das Pulver absorbiert oder reflektiert, was die auf das Schmelzbad einwirkende Laserleistung verringert. Gleichzeitig beeinflusst der gewählte Volumenstrom des Trägergases die Geschwindigkeit der Partikel und somit die Aufenthaltsdauer des Partikels im Laserstrahl [DE12]. Für ein qualitativ hochwertiges Prozessergebnis müssen die Pulverpartikel ausreichend aufgeschmolzen werden, ohne dass in die Pulverpartikel und das Schmelzbad ein zu großer Wärmeeintrag erfolgt. Hierfür werden der Pulvermassenstrom, der Trägergasvolumenstrom sowie die Laserleistung aufeinander und auf das zu verarbeitende Material und seine Partikelgröße abgestimmt. Um zudem eine Oxidation des Materials während des Schmelzprozesses zu vermeiden, wird durch das Zentrum der Düse ein weiterer Gasstrom, der sogenannte Schutzgasvolumenstrom, geleitet. Er schafft an der Prozessstelle eine Schutzgasatmosphäre und schützt zusätzlich die Laseroptik vor Verunreinigungen durch Materialanhaftungen [Scho20b].

Beim hier betrachteten HS DED-LB-Fertigungssystem *pE3D* wird zur Schaffung definierter Geometrien die Bauplattform relativ zur Laseroptik und somit zum Laserstrahl und Pulvermassenstrom bewegt. Die Bauplattform ist hier auf einem Tripod-System, ein parallelkinematisches System mit drei vertikalen Säulen, die an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet sind, montiert. Das Tripod-System wird durch drei Linearmotoren über umlaufende Riemen mit beweglichen Gleitschienen bewegt. Die drei Säulen ermöglichen drei Freiheitsgrade und somit die Bewegung der Bauplattform in drei kartesischen Dimensionen. Der Aufbau ist in Abbildung 2-6 dargestellt [DE19].

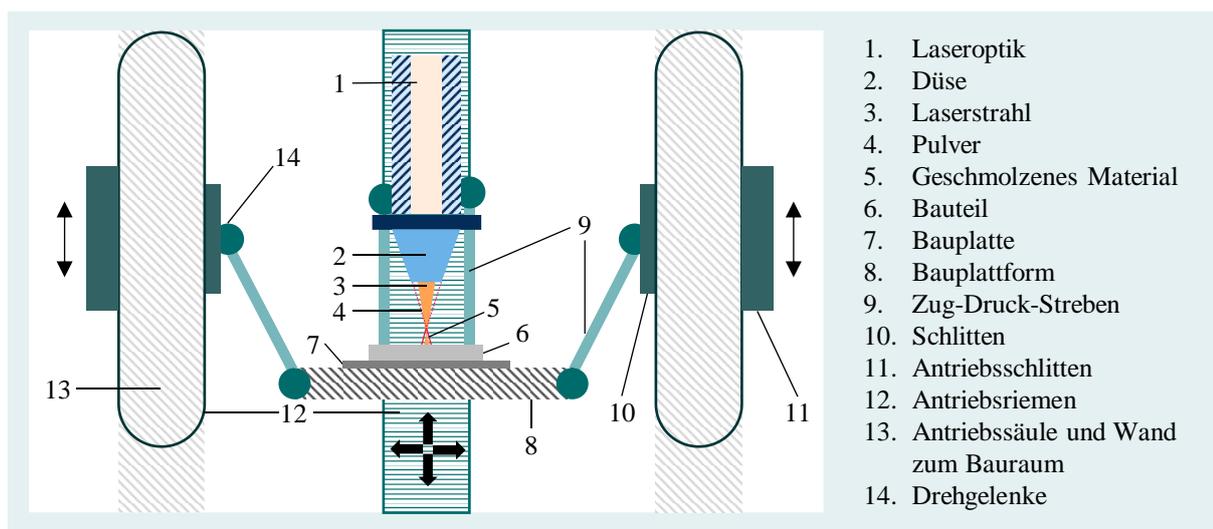


Abbildung 2-6: Antriebssystems des betrachteten HS DED-LB-Fertigungssystems (nach [DE19])

Alternativ kann im betrachteten Fertigungssystem statt der beweglichen Bauplattform ein Dreh-Kipp-Tisch als Bauplattform genutzt werden, der sich unterhalb der beweglichen Bauplattform befindet. Der Drehteller mit einem Durchmesser von 500 mm kann um  $110^\circ$  geneigt werden. Hierdurch können sowohl rotatorische Bewegung also auch Anstellwinkel realisiert werden.

Dies ermöglicht die Bewegung der Laseroptik und somit des Laserstrahls und des Pulvermassenstroms mit geringen Vorschubgeschwindigkeiten relativ zur Bauplattform des Dreh-Kipp-Tisches, wodurch fünf Freiheitsgrade ermöglicht werden [DE19].

Im Betrieb mit drei Freiheitsgraden sind aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Bauplattform Distanzen zum Beschleunigen und Abbremsen der Bauplattform vor einem Richtungswechsel im Scanpfad, der Geometrie, die die Bauplattform zur Formgebung abfährt, notwendig. Der Laserstrahl ist hierbei ausgeschaltet, sodass kein Material aufgetragen wird. Das Zu- und Abschalten des Pulvermassenstroms unterliegt hierfür jedoch einer zu hohen Latenz, sodass er während des gesamten Prozesses aufrecht erhalten bleibt. Dies führt dazu, dass Teile des Pulvers nicht aufgetragen werden. Dieses Pulver wird größtenteils durch ein Entstaubungssystem, das durch eine Öffnung im Boden mit dem Bauraum verbunden ist, aus dem Bauraum entfernt und gesammelt. Das Pulver wird anschließend i. d. R. entsorgt. Eine Aufbereitung und Wiederverwendung des nicht aufgetragenen Pulvers sind jedoch ebenfalls möglich [Dawe15].

### 2.2.3 Potenziale und Herausforderungen

Der Hauptvorteil des HS DED-LB gegenüber anderen DED-Verfahren ist die hohe Prozessgeschwindigkeit [DE12]. Da die Pulverpartikel bereits oberhalb des Schmelzbads den Laserstrahl durchqueren, wirkt auf sie eine große Energie, sodass sie bereits den Schmelzpunkt erreicht haben und flüssig sind, bevor sie am Schmelzbad ankommen, das durch die verbliebene übertragene Energie des Laserstrahls erzeugt wird [Scho16]. Dadurch entfällt das Aufschmelzen der Pulverpartikel im Schmelzbad, was die Zeit zur Bildung einer Schmelzverbindung und somit für die Schichtbildung verringert und folglich eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit ermöglicht [DE12]. Dadurch können höhere Vorschubgeschwindigkeiten und Materialauftragsraten erreicht werden, was zu wesentlich kürzeren Prozesszeiten führt. Aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeiten sind ebenfalls sehr dünne Schichten von bis zu 25  $\mu\text{m}$  möglich. Zudem sinkt aufgrund des kleineren Schmelzbads der spezifische Wärmeeintrag in das Bauteil [Scha21, Li19].

Ein Vergleich der erzielbaren Prozessparameter von HS DED-LB und DED ist in Tabelle 2-1 gegeben. Hierbei sind die Prozessparameter des in dieser Arbeit verwendeten additiven Fertigungssystems *pE3D* der *ponticon GmbH* für HS DED-LB und beispielhaft von der *TruLaser Cell 3000* von *Trumpf SE + Co. KG*, dessen technische Daten mit allgemeinen Informationen zu DED-Prozessen ergänzt sind, für einen laserbasierten DED-Prozess gegenübergestellt.

Tabelle 2-1: Vergleich erzielbare Prozessparameter von HS DED-LB und DED [Trum24, Scho17, Herz16]

	HS DED-LB	DED
Vorschubgeschwindigkeit	Bis zu 200 m/min	Bis zu 50 m/min
Auftragsrate	Bis zu 600 $\text{cm}^3/\text{h}$	Bis zu 300 $\text{cm}^3/\text{h}$
Schichtdicke	25 $\mu\text{m}$ – 250 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$ – 1.000 $\mu\text{m}$
Wärmeeinflusszone	5 $\mu\text{m}$ – 10 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$ – 1.000 $\mu\text{m}$

Aufgrund der reduzierten Prozesszeit und der neuen technologischen Möglichkeiten ist HS DED-LB eine aufstrebende Technologie mit großem Potenzial für industrielle Anwendungen. Jedoch existieren aufgrund des vergleichsweise geringen Reifegrads der Technologie einige Aspekte, die in der Prozessvorbereitung bei der Wahl der Prozessparameter und des Scanpfads berücksichtigt werden müssen:

- Je nach Bauteilgeometrie und Aufbaustrategie muss eine Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen, da zum einen der mögliche Kurvenradius mit zunehmender Geschwindigkeit zunimmt und zum anderen zum Erreichen der maximalen Geschwindigkeit ein bestimmter Beschleunigungsweg notwendig ist [Scha21].
- Je größer die eingestellte Laserleistung ist, desto größer wird die Partikeltemperatur und damit auch der Anteil derjenigen Partikel, die die Verdampfungstemperatur überschreiten und dadurch von ihrer geradlinigen Flugbahn abgelenkt werden. Diese abgelenkten Partikel erreichen nicht mehr das Schmelzbad und tragen somit nicht zum Schichtaufbau bei [Scho20a].
- HS DED-LB reagiert empfindlicher auf Unterschiede in der Pulvercharakteristik als andere DED-Verfahren. So führt bspw. Pulver mit einer geringeren Sphärizität, also Kugelförmigkeit, zu einer höheren Porosität, da diese Partikel mehr Gas in das Schmelzbad einbringen, das sich dort als Poren mit verfestigen kann [Zhon16a].

Die Weiterentwicklung des Verfahrens fokussiert sich aktuell hauptsächlich auf technologische Fragestellungen. Energie- und Materialeffizienz des Verfahrens sowie weitere Umweltauswirkungen sind bisher noch kaum erforscht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass in diesem Bereich noch signifikante Potenziale erschlossen werden können.

Aus energetischer Sicht ist im Vergleich zum DED-Verfahren für das HS DED-LB-Verfahren aufgrund der höheren Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten von einer höheren Leistungsaufnahme während eines Fertigungsprozesses auszugehen. Demgegenüber ist der Prozess wesentlich kürzer, was die höheren Leistungsaufnahmen ausgleichen kann [Ehms23b]. Ergebnisse zur Analyse und Quantifizierung des Energiebedarfs eines DED-Prozesses können somit nicht oder nur sehr eingeschränkt auf den HS DED-LB-Prozess übertragen werden. Eine detaillierte Analyse der Zusammensetzung des Energiebedarfs sowie der auf ihn wirkenden Faktoren und Abhängigkeiten ist jedoch eine notwendige Voraussetzung für eine effektive Steigerung der Effizienz.

Zentrale Ressourcen für beide Prozesse sind das Material in Pulverform sowie das Schutzgas [Ehms23c]. Der kurze HS DED-LB-Prozess kann zwar zu einer Reduktion des Schutzgasbedarfs im Vergleich zum DED-Prozess führen. Demgegenüber ist aufgrund der notwendigen Beschleunigungs- und Abbremsstrecken im Scanpfad des HS DED-LB-Prozesses die Pulverauftragsrate, also das Verhältnis zwischen aufgetragenem und gefördertem Pulver, meist wesentlich schlechter [Scha21, Ma17]. Erste Untersuchungen zeigen, dass der Pulverbedarf sich maßgeblich auf die resultierenden Umweltauswirkungen des HS DED-LB-Prozesses auswirkt [Ehms23c]. Für eine präzise Beurteilung der aus dem Pulverbedarf resultierenden Umweltauswirkungen müssen die vorgelagerten Prozesse der Rohmaterialherstellung und der Pulverherstellung somit ökologisch analysiert und in die Evaluation der Umweltauswirkungen des HS DED-LB-Prozesses integriert werden. Weiterhin müssen Bauteile, die mittels HS DED-LB gefertigt werden, in Abhängigkeit von ihrer späteren Anwendung und den an sie gestellten Anforderungen i. d. R. nachbearbeitet werden. Die angewendeten Prozesse und der jeweilige Nachbearbeitungsaufwand können sich für verschiedene Bauteile stark unterscheiden. Diese Nachbearbeitungsverfahren verursachen zusätzlich zur Materialbereitstellung und zum HS DED-LB-Prozess weitere Energie- und Ressourcenaufwände und daraus resultierende Umweltauswirkungen [Ehms23c]. Die Nachbearbeitungsprozesse sind jedoch meist für eine Anwendung des Bauteils unabdingbar und führen daher bei einer Vernachlässigung in der ökologischen

Analyse zu einem unpräzisen Ergebnis. Der Energie- und Ressourcenbedarf eines mittels HS DED-LB gefertigten Bauteils ist somit hochgradig individuell und erfordert die Inklusion aller zu seiner Fertigung notwendigen Prozessschritte von der Rohmaterialgewinnung, über die Pulverherstellung, den HS DED-LB-Prozess selbst sowie mögliche Nachbearbeitungsprozesse.

## 2.3 Die Prozesskette der Bauteilherstellung mittels Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Für eine umfassende Analyse des HS DED-LB aus ökologischer Sicht muss die gesamte Prozesskette möglichst vollständig analysiert werden. Im folgenden Kapitel werden daher die notwendigen Schritte der Prozesskette, die ein mit HS DED-LB hergestelltes Bauteil durchläuft, und die dafür benötigten Rohstoffe bis zur Fertigstellung des Bauteils erläutert.

### 2.3.1 Grundlagen der HS DED-LB-Prozesskette

Ein Prozess ist ein „Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet“ [DIN15] und ist somit „die Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem System“ [DIN13]. Bei dem vorgesehenen Ergebnis des Prozesses kann es sich dabei um eine Dienstleistung, die häufig immateriell ist und eine Tätigkeit zwischen Anbietendem und Kunden erfordert, oder um ein materielles Produkt, das ohne jegliche Transaktion zwischen Anbietendem und Kunden erzeugt werden kann, handeln. Prozessergebnisse dienen häufig als Eingaben, d.h. Inputfaktoren für einen nachgeschalteten Prozess [DIN15]. Prozesse können in die folgenden Kategorien unterteilt werden [Gada17, Beck05]:

- ❑ Steuerungsprozesse, die durch aktives Eingreifen das Zusammenspiel der Prozesse regeln.
- ❑ Kernprozesse, die alle Aktivitäten mit direktem Bezug zur Leistungserstellung umfassen und somit wertschöpfend sind.
- ❑ Unterstützungsprozesse, die Basisdienste und Querschnittleistungen für Kernprozesse anbieten.

Die zeitlich und räumliche verbundene Folge dieser Prozesse bildet eine Prozesskette [Klau08]. Innerhalb dieser Arbeit werden lediglich Kernprozesse betrachtet und somit nur diejenigen Prozesse, die direkt zur Wertschöpfung beitragen. Daher setzt sich die in Abbildung 2-7 dargestellte Prozesskette der additiven Fertigung durch HS DED-LB aus den Kernprozessen der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, der Pulverherstellung, der Fertigung mittels HS DED-LB sowie der Nachbearbeitung zusammen. Zwischen diesen Prozessschritten erfolgt ein Transport des jeweiligen Prozessergebnisses, sodass diese im nachfolgenden Prozess als Inputfaktor eingehen können.



Abbildung 2-7: Prozesskette HS DED-LB

Somit ist der erste Prozessschritt die Gewinnung und Verarbeitung des Rohstoffs. Ein Rohstoff ist hierbei ein „primäres oder sekundäres Material, das zur Herstellung eines Produktes verwendet wird“ [DIN09]. Ein weitverbreitetes Material in der additiven Fertigung ist aufgrund seiner

mechanischen Eigenschaften sowie seines Temperaturverhaltens der Edelstahl 316L (Werkstoffnummer: 1.4404) [Zhan14]. Für die Verarbeitung des Materials im HS DED-LB Prozess muss der Werkstoff als Pulver vorliegen. Die Herstellung von Pulver für die additive Fertigung erfolgt meist durch Verdüsung. Nach der Fertigung des Bauteils mit HS DED-LB besteht meist, in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Bauteil, die Notwendigkeit verschiedener Nachbearbeitungsprozesse. Die einzelnen Kernprozesse werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

### 2.3.2 Rohmaterialherstellung am Beispiel des Edelstahls 316L

Der Edelstahl 316L ist durch die Zugabe von Chrom (Cr), Nickel (Ni), und Molybdän (Mo) sowie der optionalen Bestandteile Kohlenstoff (C), Silizium (Si), Mangan (Mn), Phosphor (P), Schwefel (S) und Stickstoff (N) ein hochlegierter Stahl, dessen Hauptbestandteil Eisen (Fe) ist [DIN14]. Die Anteile der Legierungselemente im Edelstahl 316L sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung von 316L (Massenanteil in %) [DIN14]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
min	-	-	-	-	-	16,500	2,000	10,000	-
max	0,030	1,000	2,000	0,045	0,030	18,500	2,500	13,000	0,100

Die Herstellung des Rohstahls erfolgt weitestgehend durch zwei Verfahren. Weltweit werden 70,8 % des Rohstahls durch die Hochofen-Konverter-Route und somit aus Primärmaterialien sowie 28,7 % durch die Elektrostahlerzeugung hergestellt, wobei dieses Verfahren hauptsächlich zum Einschmelzen und Recycling von Stahlschrott, d.h. Sekundärmaterial, angewendet wird [Schl21, WSA20, Madi13]. Andere Verfahren finden zur Rohstahlherstellung mit einem Anteil von 0,5 % kaum Berücksichtigung [WSA20].

Zur Herstellung von *Rohstahl aus Primärmaterialien* werden abgebaute Erze gemahlen und anschließend durch Flotation oder Magnetabscheider von einem Großteil ihrer Begleitelemente, der sogenannten Gangart, getrennt [Zhan21]. Das hierdurch gewonnene Eisenerz wird anschließend gemahlen und gesintert. Der Sinterkuchen wird abgekühlt, gemahlen und gesiebt [Fern17]. In der Weiterverarbeitung des gesinterten Materials wird es im Hochofen zu Roheisen reduziert, indem es gemeinsam mit Eisenerz, Koks und weiteren Zuschlägen wie bspw. Kalkstein stark erhitzt wird. Durch die Reaktion des im Koks enthaltenen Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff der zugeführten Luft, entsteht ein Gas mit Reduktionspotenzial, dass im Hochofen aufsteigt und während des Schmelzvorgangs das eisenhaltige Material zu Roheisen reduziert. Die im Eisenerz enthaltenen Begleitstoffe werden durch die Zuschläge zu Schlacke umgewandelt und können getrennt vom Roheisen abgestochen werden [Schl21, Fu14, Reic11]. Da der Rohstahl noch einen zu hohen Kohlenstoffgehalt aufweist, wird im Sauerstoffblaskonverter der Kohlenstoffgehalt reduziert. Durch das Zuführen von Sauerstoff zum flüssigen Rohstahl wird Kohlenstoff herausoxidiert. Dieser Vorgang wird auch als Frischen bezeichnet. Hierbei können zum einen, um eine Überhitzung der Schmelze zu vermeiden, ca. 20 % Stahlschrott hinzugegeben werden, und zum anderen die enthaltenen Eisenbegleitstoffe durch die Zugabe von Kalk verschlackt werden [Schl21].

*Rohstahl aus Sekundärmaterial* wird häufig durch Elektrostahlerzeugungsverfahren wie dem Elektrolichtbogenofen recycelt und aufbereitet [Madi13, Ghos10]. Bei diesem Verfahren wird

der Elektrolichtbogenofen mit Stahlschrott beladen. Anschließend werden im geschlossenen Ofen Elektroden gezündet, wodurch ein Lichtbogen entsteht, der den Stahlschrott schmilzt. Nach dem Schmelzvorgang wird die Schlacke vom Rohstahl getrennt, der anschließend weiterverarbeitet wird [Schl21]. Die Herstellung von Rohstahl und dafür notwendige Inputflüsse sind beispielhaft in Abbildung 2-8 zusammengefasst.

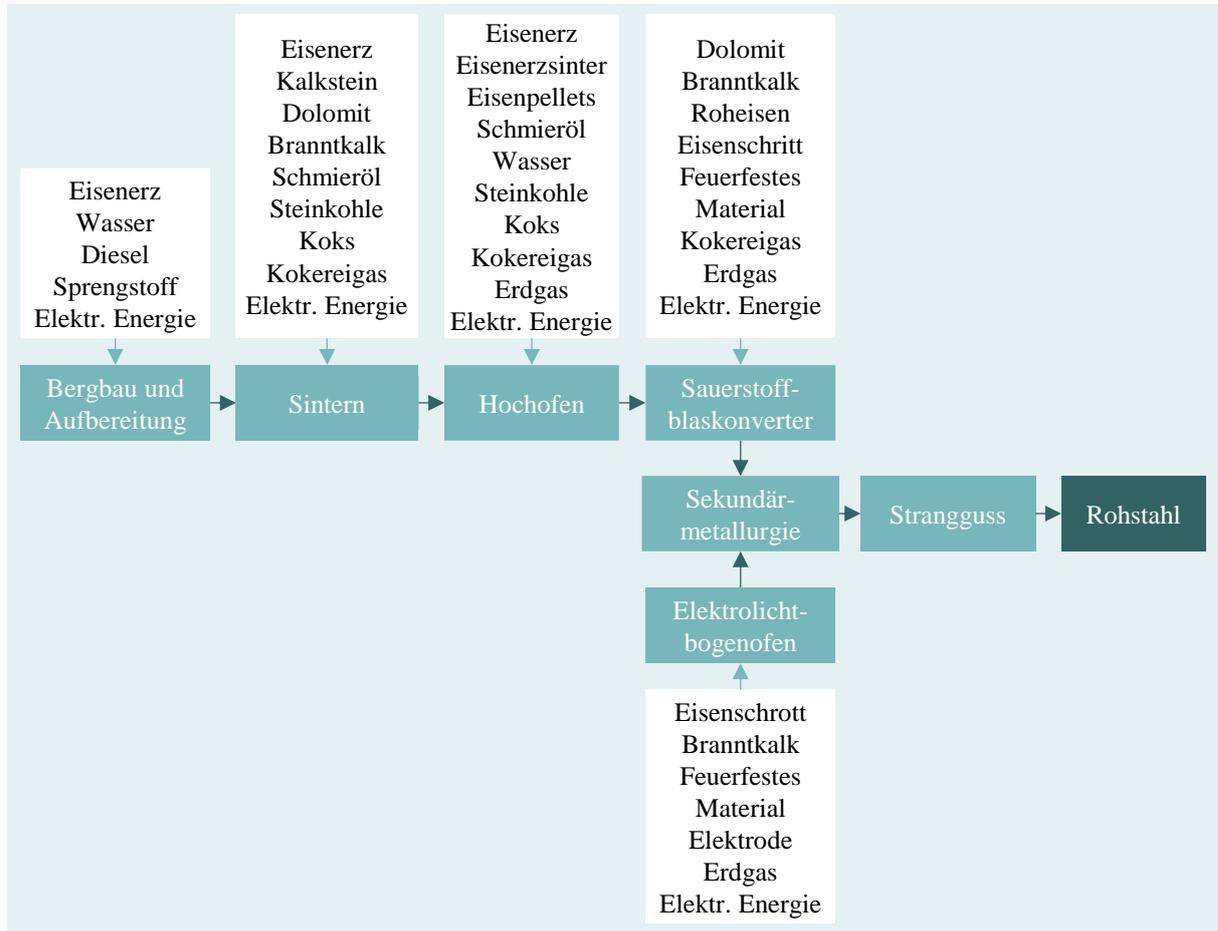


Abbildung 2-8: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Rohstahl (nach [Buc13])

Aus dem primären und sekundären Rohstahl entsteht nun durch die Zugabe der Legierungselemente die gewünschte Stahlsorte, hier 316L. Die zugegebenen Legierungselemente werden individuell abgebaut und verarbeitet, bevor sie in der Stahlherstellung eingesetzt werden.

Das Legierungselement mit dem mengenmäßig größten Anteil ist *Chrom*. Häufig wird Chrom in Form von Ferrochrom zur Stahlherstellung eingesetzt, der in Schmelzreduktionsöfen hergestellt wird. Aufgrund von unterschiedlichen Herstellungsverfahren entstehen jedoch unterschiedliche Chrom- und Eisengehalte [Bass13]. Zur Herstellung von Ferrochrom wird Chromerz abgebaut und anschließend getrocknet und gemahlen. Danach erfolgt die Pelletierung des Chromerzes, das anschließend vorgewärmt und vorreduziert und gemeinsam mit Koks und Kalk im Schmelz-Reduktionsofen geschmolzen wird [Hamu21]. Die Herstellung von Ferrochrom und hierfür eingesetzte Inputflüsse sind beispielhaft in Abbildung 2-9 skizziert.

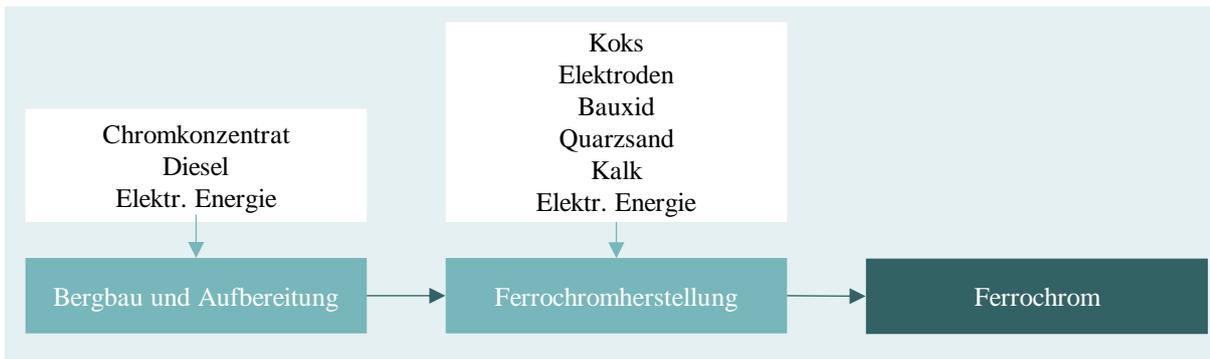


Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Ferrochrom (nach [Haqu13])

*Nickel* wird allgemein aus sulfidischen und lateritischen Erzen gewonnen [Szur21, Wei20a, Bart15]. Nach dem Abbau des Nickelerzes wird es zunächst zerkleinert und anschließend getrocknet. Beim darauffolgenden Kalzinieren wird dem Nickelerz neben Wasser auch Kohlenstoffdioxid entzogen und vorreduziert. Erst danach erfolgt ein reduzierendes Schmelzen im Elektroofen bei einer Temperatur von ca. 1600° C. Anschließend wird der Ferronickel pyrometallurgisch veredelt, indem ihm Phosphor und Schwefel entzogen wird [Szur21, Wei20a]. Das resultierende Ferronickel kann einen Nickelanteil zwischen 15 % und 80 % aufweisen. Für die Stahlherstellung wird üblicherweise Ferronickel mit einem Nickelanteil zwischen 20 % und 40 % eingesetzt [Szur21, DIN21a, Vast21]. Die Prozesskette zur Herstellung von Ferronickel ist beispielhaft in Abbildung 2-10 skizziert.

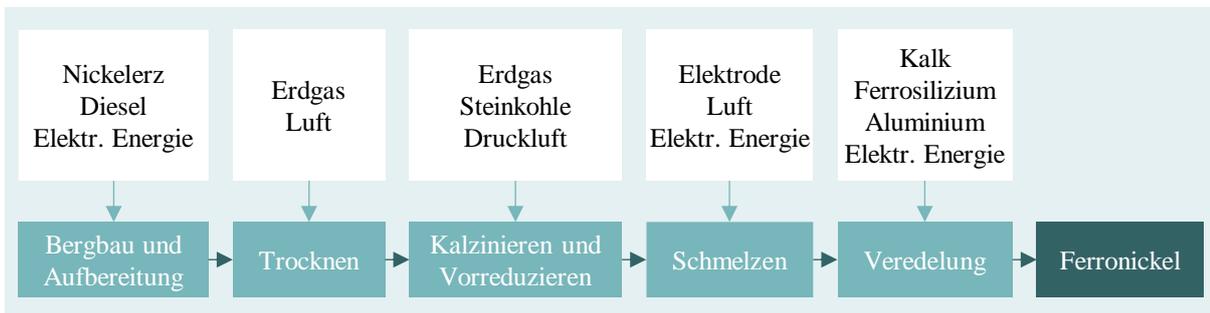


Abbildung 2-10: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Ferronickel (nach [Wei20a])

Auch das Legierungselement *Molybdän* wird hauptsächlich als Ferromolybdän dem Rohstahl zugegeben [Schl21, Wei20b]. Molybdän kann hierbei aus mineralischen Erzen wie Molybdänit gewonnen werden und fällt zudem als Nebenprodukt in der Kupferherstellung an. In beiden Fällen wird das Erz abgebaut, anschließend zerkleinert und gemahlen. Da die Konzentration des Molybdäns in den abgebauten Erzen lediglich zwischen 0,3 % und 0,05 % liegt, wird in mehreren Flotationsprozessen das Molybdän von der Gangart getrennt [Wei20b, Volk53]. Das konzentrierte Molybdänerz wird anschließend im Röstprozess von Ölen und Feuchtigkeit befreit. Nachfolgend findet eine exotherme Reaktion statt, in der das Molybdänerz in Molybdänoxid umgewandelt wird [Wei20b, Volk53]. Im abschließenden Schritt wird das Molybdänoxid in einem Elektroofen geschmolzen. Durch die Zugabe von Reduktionsmitteln wird es in einem metallothermischen Prozess reduziert [Wei20b, Gasi13]. Das daraus resultierende Ferromolybdän hat einen Molybdängehalt zwischen 58 % und 75 % [DIN04]. Die für die Herstellung notwendigen Inputflüsse sowie die Prozesskette sind beispielhaft in Abbildung 2-11 zusammengefasst.

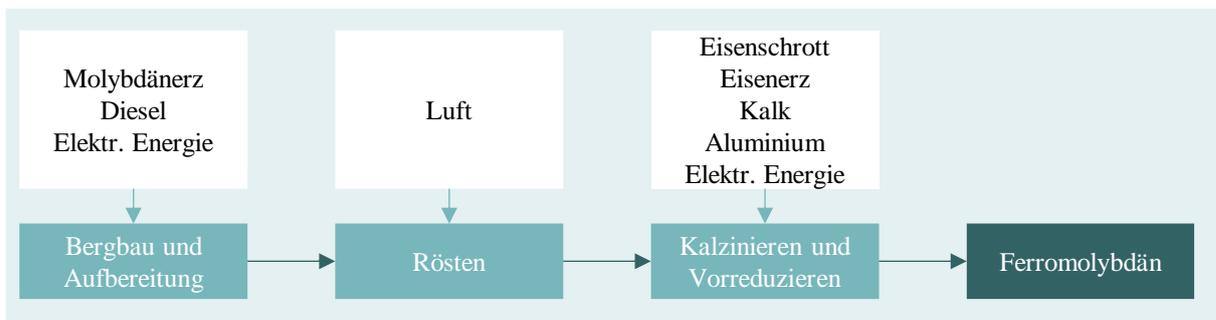


Abbildung 2-11: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Ferromolybdän (nach [Wei20b])

In der Stahlindustrie wird *Mangan* häufig als Ferromangan, das einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist und aus oxidischem Manganerzen gewonnen wird, eingesetzt [Schl21, Olse07]. Zur Herstellung des Ferromangans wird meist das Schmelz-Reduktionsofen-Verfahren eingesetzt, wobei zwei Verfahren unterschieden werden können, die Praxis der Wegwerfeschlacke sowie die Praxis mit hohem Manganoxidschlackenanteil [Olse07]. Die Praxis mit hohem Manganoxidschlackenanteil wird häufiger angewendet. Das Manganerz wird hierbei stufenweise reduziert. Das gewonnene Ferromangan wird gemeinsam mit der Schlacke abgestochen. Pro Tonne Ferromangan entstehen zwischen 500 kg bis 1.000 kg Schlacke, die einen Mangangehalt von etwa 30 % bis 35 % aufweist und in weiteren Prozessen zur Herstellung von Siliziummangan eingesetzt werden kann [Kero19, Olse07]. Die Prozesskette zur Herstellung von Ferromangan sowie dafür notwendigen Inputflüsse sind beispielhaft in Abbildung 2-12 skizziert.

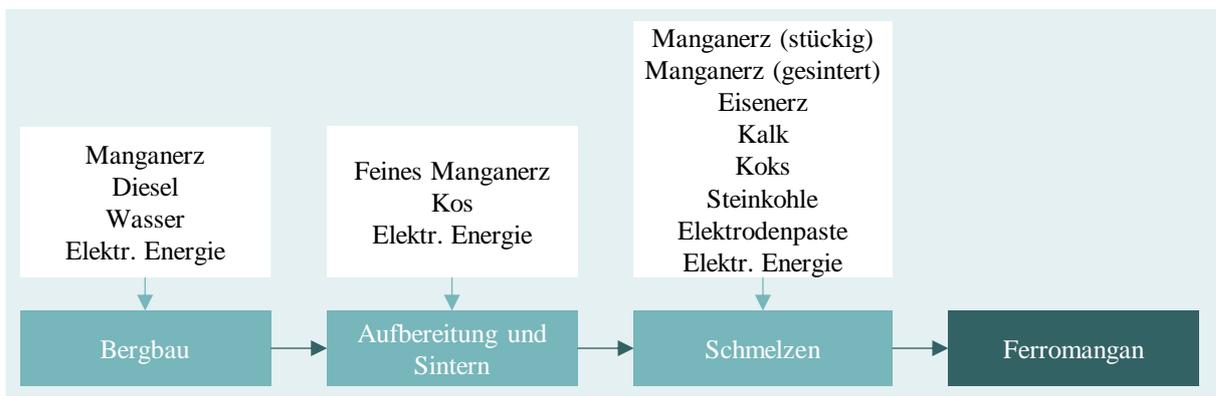


Abbildung 2-12: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Ferromangan (nach [Haqu13])

In der Stahlindustrie wird *Silizium* häufig in Form von Ferrosilizium mit einem Siliziumgehalt von 75 % eingesetzt [Haqu13]. Ferrosilizium wird durch das gemeinsame Schmelzen von Eisenschrott und Siliziumdioxid bspw. in Form von Kieselerde oder Quarz in einem Dreiphasen-Schmelz-Reduktionsofen hergestellt [Haqu13, Büch00]. Die Prozessschritte und beispielhafte Inputflüsse sind in Abbildung 2-13 skizziert.

Das Rohmaterial wird in der hier betrachteten Prozesskette der additiven Fertigung anschließend zur Pulverherstellung verwendet. Hierbei kann das Rohmaterial in bereits legierter Form eingesetzt werden. Üblich ist jedoch die Verwendung von Metallschrotten, die gemeinsam mit den Legierungselementen zur Erreichung der gewünschten Ziellegierung, eingeschmolzen werden.

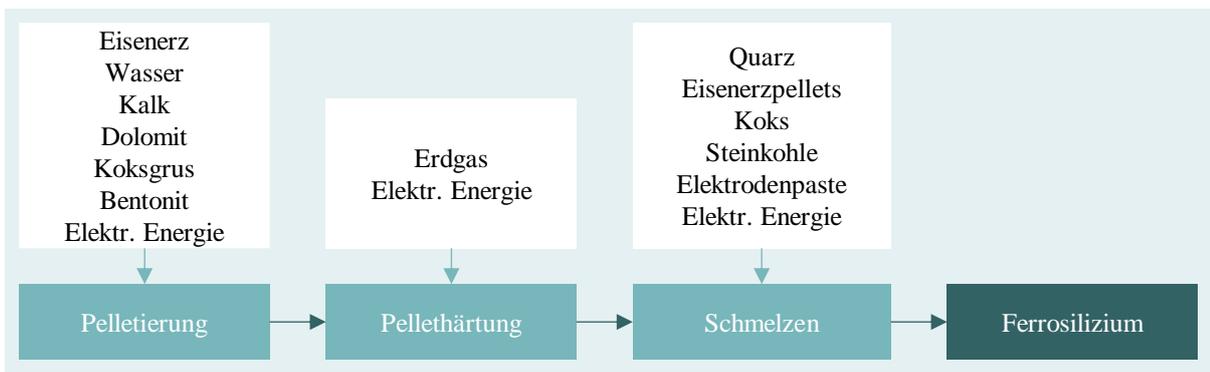


Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Herstellung von Ferrosilizium (nach [Haqu13])

### 2.3.3 Herstellung von Pulver für die additive Fertigung

Für metallbasierte additive Fertigungsverfahren wie für das HS DED-LB ist Metallpulver das am häufigsten eingesetzte Rohmaterial, das durch Verdüsung hergestellt wird. Die Verdüsung ist ein Prozess, bei dem flüssiges Metall in Tröpfchen zerteilt wird, die während des Fluges in einer Kammer erstarren [Sun17]. Die Eigenschaften des Pulvers beeinflussen dabei, wie sich das Pulver in der additiven Fertigungsanlage und während des Prozesses verhält und definieren somit auch wichtige Eigenschaften des späteren Bauteils [Dawe15, Clay14]. Daher muss ein Pulver für die additive Fertigung sehr spezifische Anforderungen erfüllen [Guo20]. Die Anforderungen bestehen hauptsächlich hinsichtlich der folgenden Aspekte:

#### ❑ Morphologie

Allgemein sollte Pulver für die additive Fertigung eine hohe Sphärizität, also Kugelförmigkeit, aufweisen, um die Fließfähigkeiten und somit den kontinuierlichen Transport des Pulvers innerhalb der additiven Fertigungsanlage zu garantieren [Hoeg17, Sun17].

#### ❑ Partikelgrößenverteilung (PGV)

Damit das Pulver gleichmäßig aufgeschmolzen und somit aufgetragen werden kann, müssen die Pulverpartikel innerhalb eines definierten Größenbereichs liegen [Hoeg17, Kaki16]. Zudem nimmt die Fließfähigkeit mit abnehmender Partikelgröße ab [Sun17].

#### ❑ Chemische Zusammensetzung

Die chemischen Eigenschaften des Pulvers beeinflussen direkt die Eigenschaften des hergestellten Bauteils [Hoeg17, Dawe15]. Eine Oxidation des Pulvers kann dieses sogar unbrauchbar für die additive Fertigung machen [Diet16].

Die Partikelgröße ist entscheidend für die Prozessstabilität und somit auch für die Qualität des Bauteils. Daher hat jedes additive Fertigungsverfahren mit Metallpulver einen definierten Partikelgrößenbereich [Dawe15]. Für DED ist eine Partikelgröße zwischen 45  $\mu\text{m}$  und 180  $\mu\text{m}$  und für HS DED-LB von 30  $\mu\text{m}$  bis 60  $\mu\text{m}$  erforderlich [Guo20, Sun17]. Die Eigenschaften des Pulvers werden maßgeblich durch das eingesetzte Verdüungsverfahren und die gewählten Prozessparameter bestimmt [Herz16, Kloc15]. Allgemein werden sechs Verfahren zur Herstellung von Pulver für die additive Fertigung unterschieden [Dawe15]:

- ❑ Die **Wasserverdüsung** ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren, bei dem Metall aufgeschmolzen wird, anschließend durch die Zerstäubungskammer fällt und dort durch Wasserstrahlen zerstäubt wird. Aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit von Wasser erfolgt eine schnelle Abkühlung, wodurch die entstehenden Pulverpartikel jedoch meist unregelmäßig geformt sind [Herz16].

- ❑ Die **Gasverdüsung** verfolgt ein ähnliches Wirkprinzip wie die Wasserverdüsung. Die Metallschmelze wird hier durch Hochdruck-Gasstrahlen, die aus Luft oder Schutzgas bestehen, zerstäubt. Durch den Einsatz von Gas haben die Pulverpartikel eine längere Erstarrungsdauer, wodurch höhere Sphärizitäten erreicht werden [Dawe15].
- ❑ Bei der **Plasmaverdüsung** wird das Material als Draht oder grobes Pulver in die Zerstäubungskammer eingeführt und dort gleichzeitig geschmolzen und durch koaxiale Plasma-brenner und Gasstrahlen zerstäubt. Das Plasma entsteht durch die Ionisierung eines Gases durch ein elektromagnetisches Feld einer Spule [Dawe15, Boul04]. Dadurch wird hochgradig sphärisches Pulver gewonnen [Herz16].
- ❑ Bei der **Zentrifugalzerstäubung** wird die Metallschmelze durch eine Hochgeschwindigkeitsrotationsscheibe in tangentialer Richtung geschert, wodurch feines Metallpulver entsteht. Je höher die Rotordrehzahl, desto kleiner ist die resultierende Partikelgröße [Anto03].
- ❑ Beim **Plasma-Rotativ-Electrode-Process (PREP)** wird ein Metallelektrodenstab durch Plasma aufgeschmolzen. Der Stab rotiert, sodass sich aufgrund der Zentrifugalkraft kleine Tröpfchen ablösen, die sich zu Pulverpartikeln verfestigen. Da kein Kontakt zu anderen Materialien besteht und keine Kollision der Partikel untereinander während der Abkühlung stattfindet, wird eine hohe Reinheit und Sphärizität erzielt [Sun17].
- ❑ Ein vergleichsweise neuer Ansatz ist die **Ultraschallzerstäubung**, bei der Ultraschall-schwingungen die Metallschmelze trennen, wodurch sich feine Metalltröpfchen bilden, die anschließend zu feinen sphärischen Pulverpartikeln erstarren. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für kleine Produktionsmengen und für hoch reaktive Metalle [Kust23].

In Tabelle 2-3 sind die Verfahren mit ihren Anwendungsbereichen sowie Vor- und Nachteilen aufgeführt.

Tabelle 2-3: Übersicht der Verdüsungsverfahren zur Herstellung von Pulver für die additive Fertigung (basierend auf [Kust23, Dawe15])

Verfahren	PGV	Materialien	Vorteile	Nachteile
Wasserverdüsung	Bis 500 µm	Nicht reaktive Materialien wie Eisen und Stahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hoher Durchsatz</li> <li>▪ Breiter Partikelgrößenbereich</li> <li>▪ Rohmaterial in Blockform möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachbearbeitung zur Entfernung von Wasser erforderlich</li> <li>▪ Unregelmäßige Partikelmorphologie</li> <li>▪ Großer Partikelgrößenbereich</li> </ul>
Gasverdüsung	Bis 500 µm	Ni, Co, Fe, Ti, Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geeignet für reaktive Legierungen</li> <li>▪ Rohmaterial in Blockform</li> <li>▪ Hoher Durchsatz</li> <li>▪ Sphärische Partikel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Satellitenformen vorhanden</li> <li>▪ Großer Partikelgrößenbereich</li> </ul>
Plasmaverdüsung	Bis 200 µm	Ti	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extrem kugelförmige Partikel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erfordert Ausgangsmaterial in Draht- oder Pulverform</li> <li>▪ Hohe Kosten</li> </ul>
Zentrifugalzerstäubung	Bis 600 µm	Zinklegierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Großer Partikelgrößenbereich mit sehr enger PGV möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung feiner Pulver schwierig, da nur bei hohen Geschwindigkeiten möglich</li> </ul>
PREP	Bis 100 µm	Ti	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herstellung sehr feiner Pulver</li> <li>▪ Hochgradig sphärische Partikel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringe Produktivität</li> <li>▪ Hohe Kosten</li> </ul>
Ultraschallzerstäubung	Bis 100 µm	metallisches Glas, Al, Ti, Cu, Fe,	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Enge PGV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufgrund kleiner Anlagengröße nur kleine Produktionsmengen</li> </ul>

Die Herstellung von Pulver für die additive Fertigung erfolgt für die meisten Materialien durch *Gasverdüsung* [Hoeg17, Herz16, Slot15]. Dies ist maßgeblich in der hohen Qualität des resultierenden Pulvers bei vergleichsweise einfachem Anlagenaufbau und Verfahrensprinzip begründet [Nasr02]. Das zu verdüsende Metall oder die Legierung wird in Induktionsöfen oder Gasöfen geschmolzen und überhitzt, d. h. weiter über den Schmelzpunkt erhitzt. Die überhitzte Schmelze wird in einen zweiten, kleineren Tiegel oder einen Eingießtrichter überführt, sodass die Schmelze in einem kontinuierlichen und kontrollierten Strahl senkrecht in die Verdüsungskammer fällt [Scha07, Anto03]. Um den Eintrittspunkt der Schmelze befinden sich die Düsen für die Hochdruck-Gasstrahlen, die den Strahl der Schmelze zerstäuben [Liu18a, Anto03]. Als Verdüsungsgas werden meist Schutzgase wie Stickstoff oder Argon verwendet [Kloc15, Nasr02]. Die erzeugten Tröpfchen erstarren in der Bewegung und bilden feine Pulverpartikel. Um dabei die Abkühlgeschwindigkeit zu erhöhen, wird die Verdüsungskammer von außen durch Wasser gekühlt. Die Pulverpartikel werden anschließend in einer nachgeschalteten Gasreinigungsanlage wie einem Zyklon vom Trägergas getrennt und anschließend gesammelt [Scha07]. Der Prozess der Gasverdüsung ist in Abbildung 2-14 dargestellt.

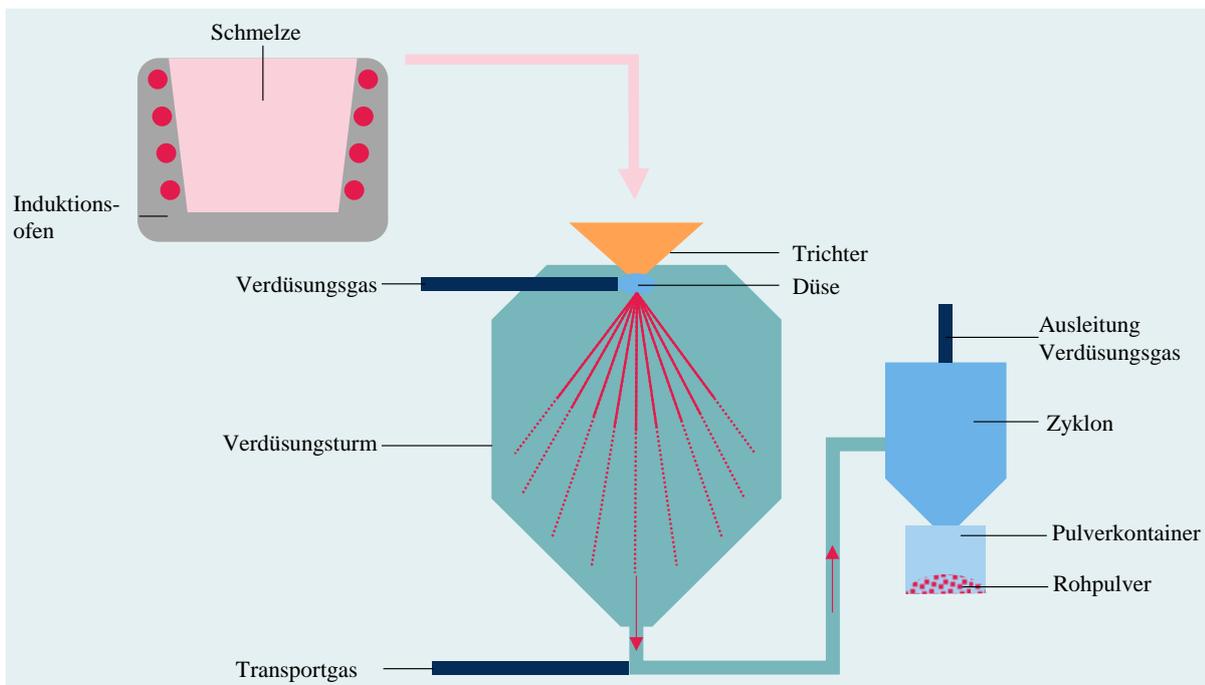


Abbildung 2-14: Schematischer Aufbau einer Anlage zur Gasverdüsung (nach [DEW21])

Abhängig von der relativen Position vom Eintrittspunkt der Schmelze und den Hochdruck-Gasstrahlen wird die sogenannte *Free-Fall-Verdüsung* (engl. free-fall atomization – FFA) und die *Closed-Coupled-Verdüsung* (engl. closed-coupled atomization – CCA) unterschieden, die in Abbildung 2-15 schematisch dargestellt sind [Mora10, Nasr02]. Bei der FFA fällt die Schmelze durch Gravitationskräfte eine bestimmte Strecke durch die Zerstäubungskammer, bevor sie von Gasstrahlen verdüst wird [Sun17, Anto03]. Die mittlere resultierende Partikelgröße liegt hierbei i. d. R. bei ca. 50  $\mu\text{m}$  [Diet16]. Bei der CCA befinden sich die Gasstrahlen direkt unterhalb der Düsenöffnung [Sun17, Anto03]. Dadurch sind höhere Strömungsgeschwindigkeiten möglich und die resultierenden Pulverpartikel sind dadurch mit einem Durchmesser ab 10  $\mu\text{m}$  i. d. R. feiner als die der FFA [Diet16, Nasr02]. Dagegen besteht bei der CCA-Verdüsung ein erhöhtes Risiko des Verstopfens des Eingießtrichters durch Erstarren der Schmelze, da aufgrund des geringeren Abstands zwischen Schutzgasdüsen und Eintrittspunkt der Schmelze eine

direkte Kühlung der Schmelze erfolgt. Dieses Risiko kann durch eine Vorwärmung des Schutzgases gesenkt werden, da hierdurch die Temperaturdifferenz zwischen Verdüsungsgas und Schmelze reduziert wird [Dunk13, Nasr02]. Eine Verdüsung mit vorgewärmtem Schutzgas wird demnach auch *Heißgasverdüsung* genannt. Bei einer Verdüsung mit Schutzgas bei Umgebungstemperatur wird von einer *Kaltgasverdüsung* gesprochen.

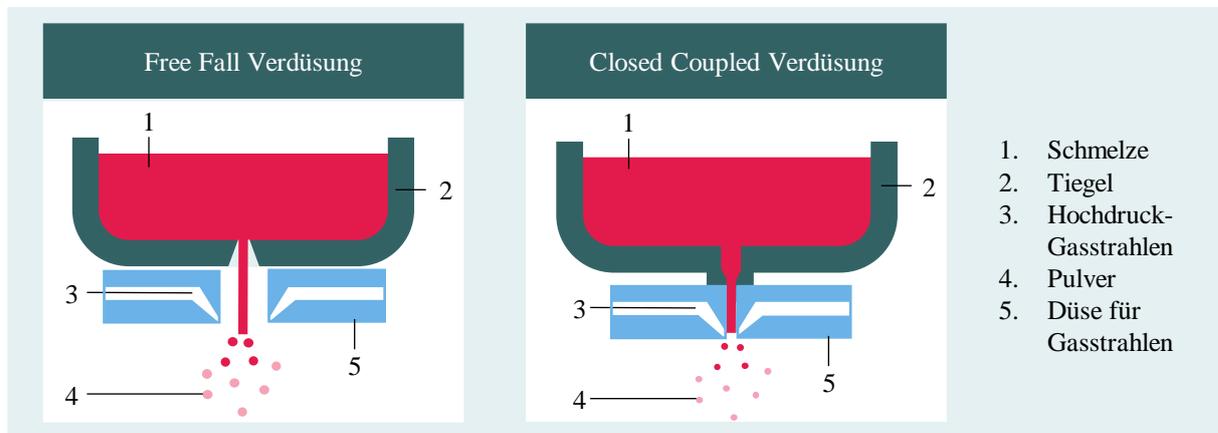


Abbildung 2-15: Vergleich der Verfahrensprinzipien von FFA und CCA (nach [Sun17, Mora10])

Abhängig vom verwendeten Verdüungsverfahren und von den Anforderungen an das Pulver entsprechend der späteren Verwendung in der additiven Fertigung kann eine Nachbehandlung des Pulvers notwendig sein, um die geforderten Pulvereigenschaften zu erreichen. Bspw. kann durch Hochgeschwindigkeitsmischen oder Mahlen die Fließfähigkeit von unregelmäßig geformten Pulverpartikeln verbessert werden [Sun16]. Pulver, deren Partikeloberflächen oxidiert sind, was bei der Wasserzerstäubung oder einer langen oder nicht sachgerechten Lagerung bei erhöhter Feuchtigkeit und Temperatur auftreten kann, werden zur Aufbereitung reduziert [Guo20, Scha07]. Da mit keinem Verfahren die für ein spezifisches additive Fertigungsverfahren erforderliche PGV erzielt werden kann, ist eine *Klassifizierung* des Pulvers zwingend notwendig [Dawe15]. Dies kann durch die folgenden Verfahren erfolgen, die auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen [Scha07]:

- Sieben: Trennen in Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen
- Schlämmen: Trennen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit in bewegter Flüssigkeit
- Schichten: Trennen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit in einem Gas, z.B. ein Luftstrom

Durch die Klassifizierung werden jedoch nicht nur die gewünschte PGV abgetrennt, sondern es findet auch eine Entmischung des Pulvers innerhalb der gewünschten PGV statt. Um eine gleichmäßige Verteilung der Partikelgrößen innerhalb des Pulvers wieder zu erzeugen, werden an die Klassifizierungsprozesse *Mischprozesse* zur erneuten Homogenisierung angeschlossen. Das gemischte Pulver kann anschließend für additive Fertigungsprozesse eingesetzt werden.

### 2.3.4 Materialbedarf während des HS DED-LB-Prozesses

Theoretisch wird für die additive Fertigung nur die Menge an Pulver benötigt, die für das Bauteil notwendig ist. Tatsächlich wird beim HS DED-LB-Prozess jedoch ein signifikanter Anteil des Pulvers nicht aufgetragen [Ehms23c, Ma17]. Der Anteil des für den Geometrieaufbau verwendeten Pulvers an der gesamten durch den Pulverförderer geförderten Pulvermenge während

eines Fertigungsprozesses ist die Pulverauftragsrate [Scha21]. Beim HS DED-LB entstehen sowohl *maschinenbedingte* als auch *prozessbedingte Pulververluste*. Prozessbedingt wird Pulver nicht aufgetragen, wenn die Partikel verdampfen oder nicht richtig mit dem Schmelzbad und dem Laserstrahl interagieren und zurückprallen, anstatt zur Spurbildung beizutragen. Die prozessbezogene Pulverauftragsrate beschreibt somit den Wirkungsgrad der Pulvernutzung bei eingeschalteter Lasereinheit. Maschinenbedingt kommt es zu nicht aufgetragenem Pulver, wenn aufgrund der Bauteilgeometrie Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecken im Scanpfad vorhanden sind, bei denen der Laserstrahl ausgeschaltet ist, die Pulverförderung jedoch weiterhin erfolgt. Die maschinenbezogene Pulverauftragsrate ist somit definiert als das Verhältnis der Zeit, während der der Laserstrahl zugeschaltet ist und der Zeit, während der das Pulver gefördert wird [Scha21].

Aus ökologischer Sicht sinkt mit abnehmender Pulverauftragsrate auch die Ressourceneffizienz und somit auch einer der entscheidenden ökologischen Vorteile der additiven Fertigung [Ma17]. Teile des Pulvers, die bspw. verdampfen, können nicht gesammelt werden [Azev18]. Jedoch können ab einer bestimmten nicht aufgetragenen Pulvermenge maschinenbedingte Pulververluste aufgefangen und gesammelt werden [Scha21].

Nicht nur aus ökologischer Sicht sollte nicht aufgetragenes Pulver aufgefangen und nach Möglichkeit wiederverwendet werden. Auch aus ökonomischer Sicht kann aufgrund der hohen Pulverpreise hierdurch eine Senkung der Rohmaterialkosten erreicht werden [Dawe15, Clay14]. Jedoch erfahren die Pulverpartikel häufig während des Prozesses aufgrund der Kammertemperatur und der einwirkenden Laserenergie eine physikalische und chemische Veränderung [Dawe15]. So können sich einerseits Partikelagglomerationen bilden und andererseits ist eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts der Partikeloberfläche je nach Material möglich [Qian16, Dawe15]. Beides führt zu schlechteren Fließeigenschaften des Pulvers [Clay14]. Daher ist eine Aufbereitung des nicht aufgetragenen Pulvers vor einem erneuten Einsatz notwendig [Pria17]. So können bspw. durch Sieben Agglomerationen, die außerhalb der erforderten PGV liegen, aussortiert werden [Kerb16]. Dennoch ist eine Abnahme der Pulverqualität nach mehrmaligen Wiederverwenden zu beobachten [Ma17]. Für das HS DED-LB existiert bisher noch keine ausreichende Forschung im Bereich des Recyclings und der Wiederverwendung von nicht aufgetragenem Pulver und bezüglich der Auswirkungen auf das resultierende Bauteil und dessen Qualität [Kell17a, Kerb16, Dawe15, Slot15].

### **2.3.5 Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen**

Die additive Fertigung ermöglicht zwar eine endkonturnahe Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien und individuellen Eigenschaften, die gefertigten Bauteile müssen jedoch häufig nachfolgend weiterbearbeitet werden. Dies führt zu zusätzlichen Umweltauswirkungen innerhalb der HS DED-LB-Prozesskette. Die der additiven Fertigung nachfolgenden Bearbeitungsschritte werden häufig unter dem Begriff Nachbearbeitung zusammengefasst. In Abhängigkeit von der geplanten Anwendung und den daraus resultierenden Anforderungen an das Bauteil werden die Nachbearbeitungsverfahren ausgewählt. Hierbei können die Nachbearbeitungsschritte allgemein in vier Kategorien unterteilt werden, deren Reihenfolge und Intensität hierbei stark variieren können [Gibs21, Kara20]:

- ❑ Reinigung des Bauteils zur Entfernung von Schmutz und Pulverresten
- ❑ Entfernung des Bauteils von der Bauplatte, meist eine Metallplatte, auf die das Bauteil aufgebaut wird
- ❑ Mechanische Verfahren zur Erhöhung der geometrischen Genauigkeit und Oberflächenqualität sowie ggf. zur Entfernung von Stützstrukturen
- ❑ Behandlung der Materialeigenschaften und Strukturform

Nach Beendigung des additiven Fertigungsprozesses muss eine *Reinigung* des Bauteils erfolgen, um Verunreinigungen, die chemisch, physikalisch oder mechanisch an der Oberfläche haften können, zu entfernen. Bei den Verunreinigungen handelt es sich zum einen um Pulverrückstände von nicht oder nur angeschmolzenem Pulver, die zu einer gesundheitlichen Gefährdung der Mitarbeitenden führen können sowie um mögliche angelagerte Fremdstoffe aus der Prozessumgebung [Awad08]. Der Reinigungsprozess besteht meist aus mehreren Schritten. Eine erste initiale Reinigung erfolgt noch im Bauraum, bei der mit einem Pinsel oder einer Bürste lose Pulverrückstände von der Bauteiloberfläche entfernt werden. Nach der Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum können durch Druckluft oder Ultraschallreinigung leicht anhaftende oder schwer erreichbare Pulverrückstände auf der Bauteiloberfläche oder in Hohlräumen entfernt werden [Pate19]. Reinigungsschritte erfolgen häufig auch zwischen anderen Nachbearbeitungsschritten, um dort entstehende Verunreinigungen zu entfernen und das Bauteil für den nachfolgenden Schritt vorzubereiten.

Aufgrund von wiederholtem schnellem Erwärmen und Abkühlen der Bauteilschichten entstehen Eigenspannungen im Bauteil, die beim Ablösen des Bauteils von der Bauplatte zu einem Bruch oder einem Verzug des Bauteils führen können [Dieg19, Sham17]. Um die entstandenen Eigenspannungen zu verringern, wird bei der *Wärmebehandlung* das Bauteil langsam gleichmäßig erhitzt und die Temperatur anschließend so lange gehalten, bis sich ein Temperaturgleichgewicht im Bauteil eingestellt hat. Die Dauer ist hierbei abhängig von der maximalen Wandstärke des Bauteils. Schlussendlich wird das Bauteil gleichmäßig abgekühlt. Durch die Wärmebehandlung werden Eigenspannungen und mögliche Rissbildungen reduziert und somit die mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften verbessert [Shiy21, Ye21]. Neben den Eigenspannungen kann das Bauteil zudem eine unerwünschte Porosität und Mikrostruktur aufweisen [Ye21, Cook20, Choi16]. Um diese Materialeigenschaften gezielt zu verbessern, kann die Wärmebehandlung unter verschiedenen Druckbedingungen, z. B. unter hohem oder auch niedrigem Druck erfolgen [Gibs21]. Ein gängiges Verfahren zur Eliminierung von Poren ist das heißisostatische Pressen (engl. hot isostatic pressing – HIP). Aufgrund der hohen Temperaturen und des isostatischen Drucks erhöht sich die Fließfähigkeit des Materials, wodurch sich die Poren vollständig schließen, und eine homogene Materialstruktur entsteht [Ye21]. Durch das HIP kann eine Bauteildichte von nahezu 100 % erreicht werden, was zu hochfesten Bauteilen mit einer verbesserten Duktilität und Verschleißfestigkeit führt [Gibs21, Peng21].

Werden mittels DED oder HS DED-LB neue Bauteile gefertigt, ist eine Bauplatte notwendig. Bauplatten sind i. d. R. Metallplatten, auf die die erste Materialschicht aufgetragen und das Bauteil anschließend aufgebaut wird. Die Bauplatten werden demontierbar auf der Bauplattform angebracht und können daher nach Prozessende entnommen werden [DIN21b]. Je nach Bauteilgeometrie und späterer Anwendung, kann eine *Trennung von Bauplatte und Bauteil* notwendig werden. Dies erfolgt meist per Bandsäge oder Drahterosion [Dieg19]. Das Ablösen mittels Bandsäge zeichnet sich durch die vergleichsweise kurzen Prozesszeiten und geringen Kosten

aus und eignet sich insbesondere für Bauteile mit einem dünnen Querschnitt. Mit zunehmendem Querschnitt steigt das Risiko einer Beschädigung des Sägeblatts und des Bauteils [Pate19]. Der Prozess der Drahterosion ist zwar bedeutend langsamer und kostenintensiver, jedoch ist die resultierende Oberflächengüte i. d. R. wesentlich besser [Dieg19, Pate19]. Additiv gefertigte Bauteile weisen häufig eine schlechte Oberflächenqualität und Geometriegenauigkeit auf, so dass eine direkte Anwendung des Bauteils je nach Einsatzgebiet nicht möglich ist [Male21]. Die unzureichende Oberflächenqualität wird durch mehrere Effekte, bedingt durch das Verfahrensprinzip, verursacht. Zum einen entsteht durch den schichtweisen Aufbau der Treppenstufeneffekt, der zu einer stufenartigen und unregelmäßigen Oberflächenmorphologie führt [Dieg19, Kumb18]. Weiterhin kann beim DED und somit auch beim HS DED-LB aufgrund der Verwendung von Metallpulver der Baling-Effekt auftreten, der das Anhaften von kleinen Metallpartikeln und -agglomeraten an der Bauteiloberfläche beschreibt, die wiederum die Oberflächenrauigkeit erhöhen sowie zu verminderter Geometrieinhaltung führen. Gleichzeitig kann er auch zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Pulvers in der entstandenen Schicht führen. Dieser Defekt kann sich in den darauffolgenden Schichten fortführen und verstärken [Gu09]. Zudem können Pulverrückstände an der Bauteiloberfläche anhaften [Kara20]. Ursachen des Baling-Effekts sind bspw. eine zu geringe Energiedichte der Wärmequelle oder ein inhomogenes Schmelzen des Materials [Gu09]. Sie können beim HS DED-LB nicht gänzlich vermieden werden. Zur *Verbesserung der Oberflächengüte sowie der geometrischen Genauigkeit* können eine Vielzahl an Nachbearbeitungsprozessen eingesetzt werden. Gängig sind spanende Verfahren wie insbesondere das Fräsen, Schleifen und Sandstrahlen [Gibs21]. Möglich ist auch das gezielte Umschmelzen der Oberfläche durch das Laserpolieren direkt im Anschluss an den additiven Fertigungsprozess noch im Bauraum des additiven Fertigungssystems [Peng21].

Eine Übersicht möglicher Nachbearbeitungsverfahren ist in Abbildung 2-16 gegeben. Die Auswahl der Verfahren sowie die Reihenfolge ist hierbei abhängig von der Bauteilgeometrie, den Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften und der Oberflächengüte sowie der vorhandenen Infrastruktur.

### 2.3.6 Zwischenfazit

Um ein Bauteil mittels HS DED-LB zu fertigen, wird als Rohstoff Metallpulver benötigt. Die benötigten Rohmaterialien zur Herstellung der gewünschten Legierung werden zunächst abgebaut und aufbereitet, ehe sie in metallurgischen Prozessen zur Ziellegierung verhüttet und weiterverarbeitet werden. Die Herstellung des Pulvers erfolgt meist in Verdünnungsprozessen, bei denen das Metall geschmolzen und anschließend in feine Partikel zerstäubt wird. Das so hergestellte Metallpulver ist der einzige Rohstoff, der direkt in das zu fertigende Bauteil eingeht. Je nach geplanter Anwendung und daraus resultierenden Anforderungen an das Bauteil, kann es im Anschluss an den HS DED-LB-Prozess nachbearbeitet werden, wobei aus einer Vielzahl an möglichen Nachbearbeitungsprozessen individuell gewählt werden kann. Um den HS DED-LB-Prozess gesamtheitlich aus ökologischer Sicht zu bewerten, müssen alle Prozessschritte gleichwertig berücksichtigt werden. Dies bedarf einer einheitlichen Bewertungsmethode, auf deren Basis die ökologischen Auswirkungen, die aus dem Energie- und Materialbedarf des jeweiligen Prozessschritts resultieren, quantifiziert und anschließend verknüpft werden können.



Abbildung 2-16: Übersicht möglicher Nachbearbeitungsverfahren für additiv gefertigte Bauteile [Gibs21, Kara20, Dieg19, Kumb18]

## 2.4 Die Methode der Ökobilanz

Die Methode der Ökobilanz ermöglicht die Evaluation potenzieller Umweltwirkungen, die innerhalb eines Lebenswegs eines Produktes auftreten [DIN09]. Sie kann somit zur ökologischen Bewertung einer Prozesskette eines durch HS DED-LB gefertigten Bauteils eingesetzt werden. Daher wird im nachfolgenden Kapitel zunächst der Begriff der Energie definiert und anschließend die Methode der Ökobilanz aufgezeigt sowie ausgewählte Wirkungskategorien, d. h. umweltbezogene Wirkungspunkte, erläutert.

### 2.4.1 Energetische Grundlagen

Energie ist eine extensive Zustandsgröße eines physikalischen Systems und kann weder vernichtet noch erzeugt werden, d. h. es gilt der Energieerhaltungssatz [Baeh16, Maye42]. Daher ist sie innerhalb eines abgeschlossenen Systems konstant und kann nur durch den Transport über die Systemgrenzen hinweg geändert werden (*erster Hauptsatz der Thermodynamik*). Diese Energietransporte können durch das Verrichten von Arbeit, durch den Übergang von Wärme und durch den Transport von Materie erfolgen [Baeh16]. Wird bspw. Arbeit am System verrichtet, so wird dem System Energie zugeführt, sodass sich seine Energie erhöht. Verrichtet das System Arbeit, so wird dem System Energie abgeführt und seine Energie verringert [Müll09]. Es existieren die folgenden Energieformen [Sche19, Müll09]:

- Die *mechanische Energie* kann weiter unterteilt werden in die potenzielle Energie, die ein Körper aufgrund seiner Position und Lage in einem Kraftfeld hat und daher auch Lageenergie genannt wird, und in die kinetische Energie, die in einem bewegten Körper enthalten ist.

- ❑ Die *thermische Energie* ist die durch eine untergeordnete Bewegung der Atome oder Moleküle gespeicherte Energie und wird auch innere Energie oder Enthalpie genannt.
- ❑ Die *elektrische Energie* ist eine potenzielle Energie in einem elektrostatischen Feld.
- ❑ Die *magnetische Energie* ist eine potenzielle Energie in einem magnetischen Feld.
- ❑ Die *chemische Energie* ist die in der chemischen Bindung von Atomen und Molekülen enthaltene Energie, die bspw. durch eine chemische Reaktion wie die Verbrennung freigesetzt wird und daher auch den Brennwert von Brennstoffen beschreibt.
- ❑ *Kernenergie* beschreibt die Bindungsenergie der Protonen und Neutronen im Atomkern, die bei kerntechnischen Reaktionen wie bspw. Kernspaltung, Kernfusion oder radioaktiver Zerfall, auftritt.
- ❑ Die *Strahlungsenergie* wird als Energie im elektromagnetischen Feld definiert.

Die Energieformen können ineinander umgewandelt werden, wobei jedoch Asymmetrien in der Richtung der Energieumwandlung existieren (*Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik*). So können bspw. elektrische oder mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt werden, jedoch kann thermische Energie unter irdischen Bedingungen niemals vollständig in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden [Baeh16].

Um die Energie für Menschen nutzbar zu machen, wird sie entlang der in Abbildung 2-17 dargestellten Energieumwandlungskette meist mehrmals umgewandelt. Ausgangspunkt dabei sind Energieträger, also Quellen oder Stoffe, in denen Energie in einer der oben genannten Energieformen gespeichert ist [Müll09].



Abbildung 2-17: Energietechnische Umwandlungskette in Anlehnung an [Müll09]

- ❑ *Primärenergie* ist dabei der Energieinhalt von natürlich vorkommenden Energieträgern, die noch nicht durch menschliches Einwirken verändert wurden, wie bspw. solare Einstrahlung, Wasserkraft und fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas [VDI12, Müll09].
- ❑ *Sekundärenergie* ist der aus den Primärenergieträgern durch menschliches Einwirken gewonnene Energieinhalt, wie bspw. elektrische Energie (Strom), Benzin und Koks [Zaho19, Müll09].
- ❑ *Endenergie* ist der Energieinhalt der Primär- oder Sekundärenergieträger, die dem Nutzer letztendlich zur Verfügung gestellt wird. Der Energieinhalt wird an dem Zeitpunkt und Ort gemessen, an dem der Energieträger physisch an den Nutzer übergeht. Beispiele sind das Betanken eines Fahrzeuges an der Tankstelle und das Einspeisen von elektrischem Strom an der Grundstücksgrenze [VDI12, Müll09]. Demnach entspricht die Endenergie der um sämtliche Umwandlungs- und Transportverluste verminderten Sekundärenergie [VDI12].
- ❑ Die *Nutzenergie* umfasst alle technischen Formen der Energie, die Nutzende letztendlich benötigen und die somit Ziel der Nutzung sind, wie bspw. Licht, Schall und mechanische Energie [Zaho19, VDI12].

Eine wichtige Kenngröße zum Beurteilen von Systemen ist die *Energieeffizienz*. Sie bezeichnet dabei das Verhältnis von Energie- oder Leistungsertrag zum Energieeinsatz [EU12]. Ist der Output energetisch nicht bewertbar, kann die Energieeffizienz entweder nach THIEDE als Verhältnis zwischen Produktionsergebnis und Energieeinsatz [Thie12] oder nach AZEVEDO et al. als Verhältnis des theoretischen und realen spezifischen Energiebedarfs berechnet werden [Azev18]. Der *spezifische Energiebedarf* (specific energy consumption – SEC) ist dabei die zur Herstellung von einer Outputeinheit (z. B. 1 kg) benötigte Energie [Kell17a].

## 2.4.2 Grundlagen der Methode der Ökobilanz

Eine *Ökobilanz* (auch Lebenszyklusanalyse oder engl. Life Cycle Assessment) evaluiert „die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes“ [DIN09, Tukk00]. Ziele der Erstellung einer Ökobilanz können bspw. das Aufzeigen von Verbesserungspotenzialen der untersuchten Produkte innerhalb der verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus, das Erhalten einer Grundlage für strategische Entscheidungen oder die Verwendung als Marketinginstrument sein [DIN09].

Zur Evaluierung werden innerhalb der Ökobilanz die Input- und Outputflüsse sowie die damit verbundenen potenziellen Umwelteinwirkungen eines Produktsystems, d. h. innerhalb des modellierten Lebenswegs des betrachteten Produktes, erfasst und beurteilt. Hierbei werden die einzelnen Prozessmodule, also der kleinste innerhalb einer Sachbilanz berücksichtigte Bestandteil, betrachtet und die jeweiligen Input- und Outputdaten erhoben. Ein Input ist dabei „ein Produkt-, Stoff-, oder Energiefluss, der einem Prozessmodul zugeführt wird“ und ein Output „ein Produkt-, Stoff-, oder Energiefluss, der von einem Prozessmodul abgegeben wird“ [DIN09]. Ein Produktfluss beschreibt das Ab- und Zuführen von fertigen Produkten vom einem Produktsystem in ein anderes Produktsystem, umfasst aber auch das Zu- und Abführen von Zwischenprodukten von einem Prozessmodul zur Weiterverarbeitung in das darauffolgende Prozessmodul innerhalb eines Produktsystems. Ein Stofffluss bezeichnet die einem Produktsystem oder Prozessmodul zugeführten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Energieflüsse umfassen die in Energieeinheiten quantifizierten Inputs und Outputs [DIN09].

Die Methode der Ökobilanz ist in der DIN EN ISO 14040 definiert. Zur Erstellung einer Ökobilanzstudie werden die folgenden vier Phasen durchlaufen, deren Zusammenhang in Abbildung 2-18 dargestellt ist [Haus18, DIN09].

Die erste Phase umfasst die *Festlegung des Ziels* und das *Definieren des Untersuchungsrahmens*. Zur Festlegung des Ziels werden die Gründe und die beabsichtigte Anwendung der Ökobilanz beschrieben, die Zielgruppe definiert und eine mögliche Veröffentlichung geplant [DIN09]. Bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens werden die wesentlichen Inhalte, wie das zu untersuchende Produktsystem und Allokationsverfahren, festgelegt sowie Annahmen getroffen. Weiterhin wird die funktionelle Einheit definiert, auf die sich im Verlauf der Studie alle Berechnungen beziehen. Bei der Festlegung der Systemgrenzen wird definiert, welche Prozessmodule Teil des Produktsystems sind [DIN18a, Herr10, DIN09]. Hierbei wird i. d. R. die Ökobilanz von Cradle-to-Grave, d. h. von der Rohstoffgewinnung bis zum Ende des Produktlebenszyklus oder von Cradle-to-Cradle, d. h. entlang des gesamten Produktlebenszyklus inklusive Kreislaufführung des Produkts oder von Teilen des Produkts, durchgeführt [Bjør18, Matt18]. Jedoch können entsprechend des Ziels der Ökobilanz auch Lebenswegabschnitte

weggelassen werden [DIN18a]. Eine hierfür häufig gewählte Systemgrenze ist von Cradle-to-Gate, d. h. von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Endprodukt sowie eine Gate-to-Gate Betrachtung, d. h. vom Wareneingang- bis zum Warenausgang eines Herstellers [Bjør18]. Die Definition des Ziels sowie des Untersuchungsrahmens wirkt sich wesentlich auf die spätere Interpretation der Ergebnisse der Ökobilanz aus, da hier die Datenerhebung, die Modellierung und Bewertung des Systems entscheidend beeinflusst wird [Haus18].

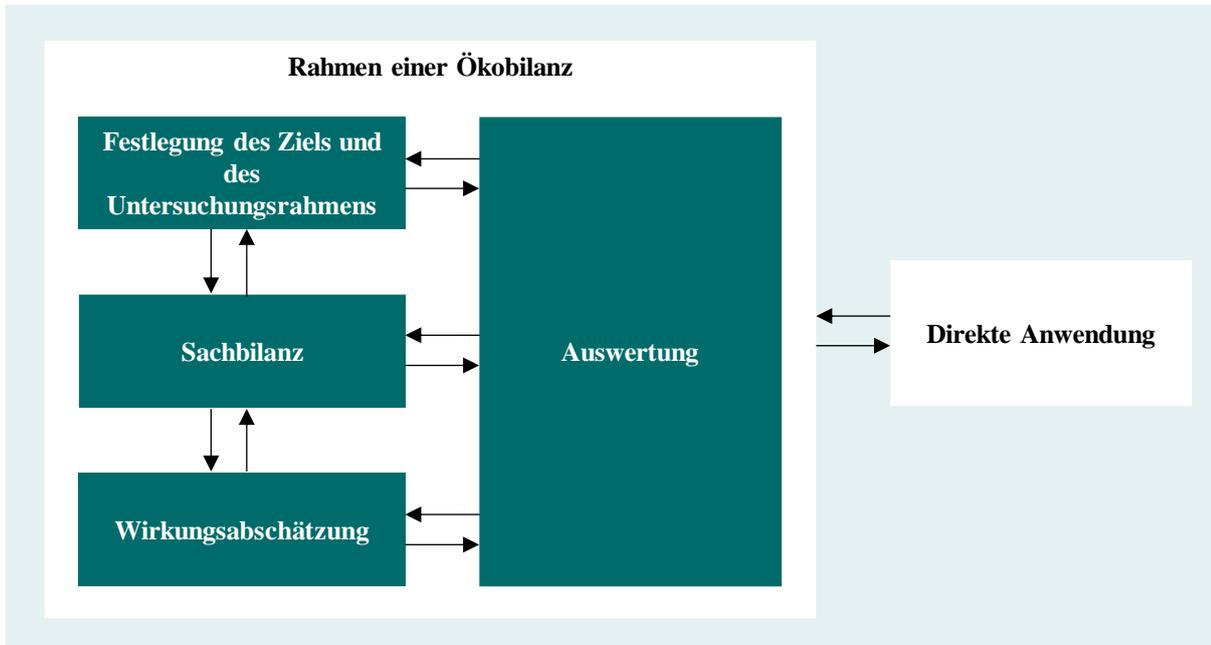


Abbildung 2-18: Phasen einer Ökobilanz [DIN09]

In der Phase der *Sachbilanz* werden alle relevanten Input- und Outputflüsse innerhalb des betrachteten Produktsystems quantifiziert. Dies umfasst zum einen die Datenerhebungen für jedes Prozessmodul innerhalb der Systemgrenze und zum anderen Berechnungsverfahren, um die erhobenen Daten für jedes Prozessmodul entsprechend der funktionellen Einheit zu modellieren. [DIN09]. In vielen Prozessen entstehen mehrere Produkte (Haupt-, Koppel- oder Nebenprodukte) sowie Abfall, die genutzt oder weiterverarbeitet werden können [Fris20, Herr10]. In solchen Fällen sollten die entsprechenden Prozessmodule in Teilprozesse unterteilt werden oder das Produktsystem erweitert werden. Ist dies aufgrund der Prozessmodulstruktur nicht möglich, so erfolgt eine Allokation, d. h. die Inputflüsse werden anteilig zugerechnet, bspw. basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie der Masse oder anderen Gesetzmäßigkeiten wie ökonomischen Kenngrößen [DIN18a, Herr10].

In der *Wirkungsabschätzung* werden basierend auf den Ergebnissen der Sachbilanz die potenziellen Umweltwirkungen des Produktsystems beurteilt [DIN09]. Dabei werden zunächst die Wirkungskategorien (Klassen wichtiger Umweltthemen), Wirkungsindikatoren (quantifizierte Darstellung einer Wirkungskategorie) und Charakterisierungsmodelle (Berechnungsmodell zur Umwandlung der zugeordneten Sachbilanzergebnisse in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators) verknüpft. Danach werden in der Klassifizierung die Sachbilanzergebnisse den Wirkungskategorien zugeordnet. Anschließend erfolgt in der Charakterisierung die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte. Optional können die Ergebnisse im Anschluss normiert, geordnet oder gewichtet werden [Herr10, DIN09]. Häufig verwendete Umweltwirkungsindikatoren sind hierbei die Verstärkung des Treibhauseffekts und somit des Klimawandels, der Abbau

der stratosphärischen Ozonschicht, die Versauerung von Boden und Gewässern, die Ökotoxizität, Biodiversitätsverluste sowie der kumulierte Energieaufwand [Fris20].

In der *Auswertung* werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam analysiert, verglichen, bewertet und zusammengefasst, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen aufzuzeigen. Jedoch können aufgrund des relativen Ansatzes keine tatsächlichen Wirkungen auf Menschen und Umwelt vorausgesagt werden. Insgesamt dient die Auswertung der verständlichen und nachvollziehbaren Darstellung der Ökobilanzergebnisse [Herr10, DIN09].

Die Ökobilanz ist eine iterative Methode, d. h. während der Durchführung der Studie kommt es immer wieder zu Iterationsschleifen, in denen vorangegangene Festlegungen überarbeitet und angepasst werden [Haus18, DIN09]. So können bspw. bei zu großen Unsicherheiten weitere Daten gesammelt werden oder, wenn die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für eine Auswertung nicht ausreichend sind, die vorherigen Schritte wiederholt werden [Curr13].

Die größte Stärke der Ökobilanz ist die umfassende Analyse der Umweltauswirkungen eines Produkts, Prozesses oder des menschlichen Handelns von der Rohstoffbeschaffung über die Produktions- und Nutzungsphasen bis hin zur Abfall- und Kreislaufwirtschaft [Curr13]. Durch den integrierenden Ansatz wird die zeitliche und räumliche Verlagerung von Umweltproblemen wie bspw. Emissionen in andere Medien wie bspw. Luft, Wasser und Boden sowie mögliche Zielkonflikte von Umweltproblemen analysiert und aufgedeckt [Curr14, Herr10, Schm95]. Durch das Hervorheben dieser Umweltkonflikte wird das Bewusstsein für die Komplexität integrierter industrieller Systeme und Ökosysteme geschärft [Curr14]. Gemeinsam mit der Integration eines ganzheitlichen Denkens in Bezug auf die Folgenabschätzung wurde hierdurch die Ökobilanz zu einem wichtigen Werkzeug, um Informationen als Grundlage für Analysen, Diskussionen, Maßnahmen und Entscheidungen bereitzustellen [Curr14]. Dabei bietet die Ökobilanz ein methodisches Vorgehen, dass auch auf eine möglichst große Unabhängigkeit von den Präferenzen des Bearbeitenden abzielt [Ausb15].

Jedoch wird nach CURRAN die Ökobilanz häufig dafür kritisiert, dass sie für scheinbar gleiche Produkte unterschiedliche Ergebnisse liefert [Curr14]. Ein Grund hierfür ist, dass während der Ökobilanz sich zwischen verschiedenen, ähnlich bis gleich geeigneten Modellierungsalternativen entschieden werden muss, was je nach Entscheidung zu variierenden Ergebnissen führen kann [Curr14]. Im Allgemeinen ist eine Ökobilanz vergleichsweise komplex, da die Wahl von geeigneten Systemgrenzen und notwendigen Annahmen, die Erhebung der Sachbilanz sowie die Durchführung der Wirkungsabschätzung und die Interpretation der Auswertung mit der Vielzahl an Wirkungskategorien ein hohes Maß an Kompetenz und Übersicht erfordern und zudem sehr zeitintensiv sein können. Hinzu kommt, dass die Wirkungskategorien nur eingeschränkt oder lediglich unter hinzuziehen eines subjektiven Bewertungsschemas miteinander verglichen werden können [Xion08].

Nach DIN EN ISO 14040 kann die Methode der Ökobilanz entsprechend der vorgesehenen Anwendungen sowie an die Anforderungen und Bedürfnisse des Bearbeitenden angepasst werden [DIN09]. So kann eine Ökobilanz mit Fokus auf vorher definierte Wirkungskategorien, wie bspw. den kumulierten Energieaufwand (KEA) und das Erderwärmungspotenzial, auch Treibhauspotenzial (GWP) genannt, die beide im folgenden Kapitel näher erläutert werden, durchgeführt werden.

## 2.4.3 Ausgewählte Wirkungskategorien im Rahmen einer Ökobilanz

### 2.4.3.1 Kumulierter Energieaufwand

Der KEA ist in der VDI-Richtlinie 4600 definiert und gibt „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“ [VDI12]. Er ermöglicht dabei die energetische Beurteilung sowie den Vergleich von Gütern. Zudem kann der KEA als Basis zur Identifikation von Energieeinsparpotenzialen dienen [VDI12].

Zur Ermittlung des KEA im Rahmen einer Ökobilanz sind alle Stoff- und Energieflüsse innerhalb der Systemgrenze sowie alle grenzüberschreitenden Elementarflüsse zu quantifizieren. Dabei sind alle Aufwendungen an Primärenergieträgern sowie primären und sekundären Rohstoffen zu berücksichtigen, die einem Produkt oder mit ihm anfallenden Koppelprodukten zugeordnet werden können. Die Energieträger und Rohstoffe können weiterführend in Fertigungsverfahren, die i. d. R. Bestandteil des Produkts werden, Betriebsmittel, die die technische Voraussetzung zur betrieblichen Leistungserstellung bilden und Betriebsstoffe, die die Nutzung der Betriebsmittel ermöglichen, unterteilt werden. Nicht berücksichtigt werden menschliche Arbeit, metabolische Energie wie der Nährwert von Lebensmitteln, Umweltenergie wie die natürliche Beleuchtung durch Sonneneinstrahlung, Luft die bspw. zur Verbrennung benötigt wird, Wasser wie Kühlwasser sowie Boden in Form von Flächenbedarf für Anlagen und Gebäude. Als Output verlassen das Produkt sowie gegebenenfalls Koppelprodukte die Systemgrenzen. Nicht direkt genutzt werden die Outputs Ab- und Fortwärme, Abfälle sowie Emissionen [VDI12]. Da der KEA eine Input-orientierte Wirkungskategorie ist, werden Outputs ohne energetische Relevanz oder solche, die im weiteren Prozess nicht weiterverarbeitet werden, nicht berücksichtigt [Ausb15]. Eine Übersicht der berücksichtigten Stoff- und Energieflüsse ist in Abbildung 2-19 gegeben.

Der KEA wird oftmals als Kurzökobilanz angesehen, da einerseits viele der Auswirkungen auf die Umwelt durch den Energiebedarf verursacht werden und daher mit dem KEA verbunden sind, und andererseits die Energieanalyse eine der zentralen Bestandteile der Sachbilanz ist [VDI12, Klöp09]. Wird im Rahmen der Wirkungsabschätzung lediglich der KEA analysiert, so ist die Durchführung der Sachbilanz im Vergleich zu einer umfassenden Ökobilanz weniger komplex, da sich lediglich auf die energetischen Inputs und Outputs konzentriert wird. Dies führt weiterhin zu einem erheblich geringeren Arbeitsaufwand. Zudem ist auch die Auswertung des Sachbilanzergebnisses aufgrund der eindimensionalen Kennzahl als Vergleichsbasis leichter zu interpretieren. Diese Eindimensionalität führt jedoch zu einem eingegrenzten Betrachtungsraum, sodass das betrachtete Produkt lediglich energetisch bewertet werden kann. Andere Umweltwirkungen werden durch den KEA nicht abgedeckt [Herr10].

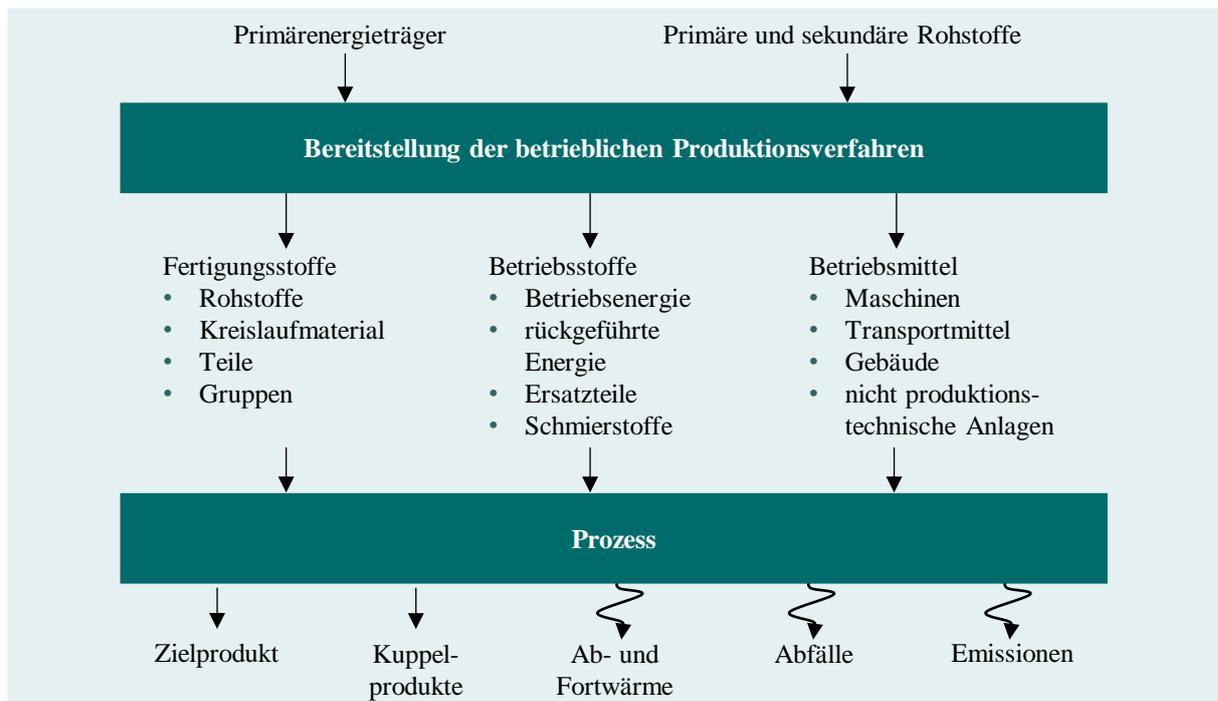


Abbildung 2-19: Energie- und Stoffflüsse für einen Prozess zur Ermittlung des KEA im Rahmen einer Ökobilanz [VDI12]

#### 2.4.3.2 Erderwärmungspotenzial

Eine weitere Wirkungskategorie ist das GWP, das im Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiert ist [IPCC21, DIN18b]. Das GWP ist ein Maß für die Treibhauswirkung von Emissionen, die direkt und indirekt durch eine Aktivität verursacht oder über die Lebensphasen eines Produkts akkumuliert werden [DIN18a, Wied08]. Treibhausgase wirken aufgrund der Verstärkung der Infrarotstrahlung und der dadurch bedingten veränderten atmosphärischen Wärmeaufnahme maßgeblich auf das Klima [IPCC21, DIN18a]. Jedes Treibhausgas trägt aufgrund der individuellen Intensität und Verweildauer in der Atmosphäre unterschiedlich zum Treibhauseffekt bei [IPCC21]. Das GWP berücksichtigt diese kombinierte Wirkung der Verweildauer und der Intensität. Um verschiedene Treibhausgase vergleichbar zu machen, erfolgt die Angabe des GWP in Kohlenstoffdioxid-Emissionsäquivalenten ( $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ ), d. h. das Treibhauspotenzial eines Gases wird auf die Treibhauswirkung von  $\text{CO}_2$  umgerechnet [Matt21]. So weist 1 kg Methan bspw. für einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ein GWP von 84 kg  $\text{CO}_2\text{-Äq.}$  auf, was dem Treibhauspotenzial von 84 kg  $\text{CO}_2$  entspricht. Für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren beträgt das GWP von Methan 28 kg  $\text{CO}_2\text{-Äq.}$  Methan weist zwar eine höhere Intensität der Treibhauswirkung im Vergleich zu  $\text{CO}_2$  auf, verbleibt jedoch aufgrund natürlicher Abbauprozesse wesentlich kürzer in der Atmosphäre als  $\text{CO}_2$ . Daher hat es in kurzen Betrachtungszeiträumen ein höheres GWP, das sich mit zunehmender Länge des Betrachtungszeitraums reduziert [Myhr13].

Innerhalb der Sachbilanzerstellung werden für jedes Prozessmodul innerhalb des zu untersuchenden Systems durch Messung, Berechnung oder Schätzung die Input- und Outputflüsse, bei denen Treibhausgase abgegeben oder entzogen werden, quantifiziert [DIN18b]. Methodisch kann dies durch eine Prozesskettenanalyse oder durch eine energetische Input-Output Analyse erfolgen [Wied08]. In der anschließenden Wirkungsabschätzung werden die potenziellen Auswirkungen der quantifizierten Input- und Outputflüsse auf die Klimaänderungen berechnet,

indem die jeweiligen Mengen eines Treibhausgases mit dem entsprechenden Treibhauspotenzial multipliziert werden [DIN18a, DIN18b].

Aufgrund des eingänglichen und leicht verständlichen Ergebnisses der Auswertung, das meist in kg oder t CO<sub>2</sub>-Äq. angegeben wird, sowie seiner großen Relevanz für die Mitigation des Klimawandels, ist das GWP in der Wirtschaft sowie im privaten Bereich weit verbreitet [Weid08]. Mithilfe der Ökobilanz können die wichtigsten Emissionsquellen identifiziert werden, wodurch Maßnahmen zur Emissionsreduktion und der Effizienzsteigerung zielgerichtet entwickelt und umgesetzt werden können, die neben einer Schonung der Umwelt meist auch Potenzial zur Kostensenkung bergen. Zudem sind bereits einige Unternehmen aufgrund politischer Regelungen zur Bilanzierung ihrer Treibhausgasemissionen bspw. im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems oder der Corporate-Social-Responsibility-Berichtspflicht verpflichtet [EU22, Pand11].

Jedoch wird, wie beim KEA, die Kritik am GWP geäußert, dass eine eindimensionale Kennzahl nicht die komplexen Zusammenhänge der Auswirkungen auf die Umwelt widerspiegeln kann. Die Fokussierung auf die Treibhausgasemissionen alleine ist nur ein grober Ansatz, der in bestimmten Fällen ein irreführendes Bild der Auswirkungen geben kann, verglichen mit dem Ansatz von mehreren Indikatoren der umfassenden Ökobilanz [Weid08].

#### **2.4.4 Zwischenfazit**

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Bestimmung und Analyse der Umweltauswirkungen von Produkten. Die betrachteten Umweltauswirkungen zielen dabei auf eine Vielzahl von Wirkungskategorien ab. Häufig werden der KEA und das GWP als die zentrale Wirkungskategorien der Ökobilanz eingeordnet [Weid08]. Die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen ist politisch und gesellschaftlich aufgrund zunehmender Reglementierungen von hoher Relevanz, da die Treibhausgase unmittelbar zur Klimaerwärmung beitragen. Der KEA wird als Methode zur energetischen Bewertung eines Produkts herangezogen. Daher ist der KEA insbesondere für Prozesse oder Produkte geeignet, deren Umweltauswirkungen maßgeblich durch den Energiebedarf dominiert werden [Herr10]. Die additive Fertigung ist ein solches Verfahren, sodass hier der KEA zur Analyse der Umweltauswirkungen herangezogen werden kann [Yi20].

Innerhalb einer Ökobilanz wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes evaluiert. Je nach Zielsetzung kann der betrachtete Lebenszyklus auch eingegrenzt werden, bspw. indem lediglich die Herstellung des Produktes analysiert wird, d. h. die Ökobilanz erfolgt dann von Cradle-to-Gate. Die Ökobilanz eignet sich somit als Methode zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen eines Bauteils, das mittels HS DED-LB gefertigt wird.

### **2.5 Bestehende Ansätze zur energetischen und ökologischen Analyse der Prozesskette additiver Fertigungsverfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung**

In der nachfolgend vorgestellten Literaturanalyse werden bestehende Ansätze und Ergebnisse aufgezeigt, in denen die Umweltauswirkungen von laserbasierten DED-Verfahren und der in Kapitel 2.3 beschriebenen dazugehörigen Prozesskette zur Herstellung des Rohstoffs und Pulvers aus dem Edelstahl 316L sowie der Nachbearbeitung untersucht wurden.

### 2.5.1 Herstellung von Edelstahl

JOHNSON et al. und NORGATE et al. führen jeweils eine Ökobilanz der Edelstahlherstellung durch. Beide untersuchen hierbei die Umweltauswirkungen der Herstellung von austenitischem nichtrostendem Stahl 304 (Werkstoffnummer 1.4301).

Die Untersuchung von JOHNSON et al. umfasst den Abbau und die Weiterverarbeitung der Legierungselemente Ferrochrom, Ferronickel und Eisenerz sowie das anschließende Schmelzen und die Weiterverarbeitung zu Stahl im Rahmen einer Ökobilanz durch eine Input-Output Analyse. In drei Szenarien werden die Annahmen einer Rohstoffherkunft vollständig aus rezyklierten Materialien, ausschließlich aus Primärmaterialien sowie dem mittleren globalen Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärmaterialien untersucht. Es zeigt sich, dass mit steigendem Anteil an Sekundärmaterialien die ermittelten Umweltauswirkungen im Vergleich zum Einsatz von Primärmaterial sinken [John08].

In einer Studie von NORGATE et al. wird neben der Rohmaterialgewinnung und -weiterverarbeitung von Roheisen, Ferronickel, Ferrochrom, und Eisenerz zusätzlich auch der Strangguss im Rahmen einer Ökobilanz bewertet. Für den Standort Australien wird für die Herstellung von rostfreiem Stahl ein GWP von 6,8 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg und einen KEA von 75 MJ/kg ermittelt [Norg07]. Die Ergebnisse beider Studien sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst.

Tabelle 2-4: Ökobilanzergebnisse von JOHNSON et al. und NORGATE et al. für den austenitischen rostfreien Stahl 304 [John08, Norg07]

	KEA MJ/kg	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg
JOHNSON et al.		
Globaler Durchschnitt	53,0	3,6
Sekundärmaterial	26,0	1,6
Primärmaterial	79,0	5,3
NORGATE et al.	75,0	6,8

### 2.5.2 Herstellung von Pulver für die additive Fertigung

Bisher existieren lediglich vereinzelt Ansätze, die den Energiebedarf oder die Umweltauswirkungen der Pulverherstellung, insbesondere die der Gasverdüsung für die additive Fertigung, untersuchen. Pulverproduzierende Unternehmen schützen aus Wettbewerbsgründen ihre Daten zu angewendeten Technologien und damit verbundenen Prozessparametern sowie daraus resultierenden Umweltauswirkungen. Ein Großteil der in der Literatur angegebenen Daten zu Umweltauswirkungen der Pulverherstellung basieren daher auf theoretischen Berechnungen der Prozessleistung sowie aus Datensätzen unter Laborbedingungen [Kell17a].

Auf Grundlage von theoretischen und experimentellen Analysen untersuchen KRUSHANOV und ARNHOLD den minimalen Energiebedarf, der bei der Herstellung pulvermetallurgischer Bauteile entsteht. Innerhalb dieser Untersuchung wird u. a. der Energiebedarf der Eisenpulverherstellung mittels Wasserverdüsung quantifiziert. Hierbei wird für die Erhitzung und das Schmelzen des Materials ein minimaler Energiebedarf von 0,3 kWh/kg berechnet. Für die Verdüsung von 1 kg Material werden 10 l Wasser bei einem Druck von 100 bar benötigt, für dessen Bereitstellung 0,03 kWh/kg an elektrischer Energie aufgewendet werden muss. Für die anschließende Trocknung wird ein Mindestenergiebedarf von 0,1 kWh/kg berechnet. Die

Wärmebehandlung erfolgt anschließend bei einer Temperatur von 1.000° C, wofür ein Mindestenergiebedarf von 0,13 kWh/kg bis 0,25 kWh/kg berechnet wurde. Der Großteil des Energiebedarfs entfällt somit auf die Wärmebehandlung zur Nachbehandlung des Pulvers, gefolgt vom Schmelzprozess und dem Verdünnungsprozess. Die Autoren weisen darauf hin, dass die berechneten minimalen Bedarfe von realen Energiebedarfen stark abweichen und berechnen einen Gesamtwirkungsgrad der Pulverherstellung von unter 50 % [Kruz12].

BOCCHINI vergleicht den Energiebedarf der Bauteilherstellung mittels pulvermetallurgischen Verfahren mit der Herstellung durch andere Produktionsverfahren. Für die Pulverherstellung werden für den Verdünnungsprozess Energiebedarfe zwischen 0,67 kWh/kg und 1,67 kWh/kg und für das anschließende Trocknen und die Wärmebehandlung 0,74 kWh/kg ermittelt [Bocc83].

In einer Studie von HERRMANN und VETTER zur Beurteilung des Ressourcenaufwands additiver Fertigungsverfahren werden für die Herstellung von 1 kg Pulver ein Argonbedarf von 1,3 m<sup>3</sup>/kg sowie ein Energiebedarf von 9,8 MJ/kg, was 2,72 kWh/kg entspricht, bestimmt [Herr21]. Wird dies in einer kurzen Ökobilanz verwendet, so entsteht ein spezifisches GWP von 4,72 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg und ein spezifischer KEA von 105,96 MJ/kg.

DOPLER und WEIß untersuchen den Einfluss von Prozessparametern auf den Energiebedarf und die -effizienz einer Gasverdünnung. Hierfür variieren die Autoren Verdünnungsgasdruck und -temperatur sowie verschiedene Überhitzungen der Schmelze. Der Energiebedarf zur Bereitstellung des Schutzgases ist abhängig von der im Prozess benötigten Menge und Art des eingesetzten Gases. Eine Übersicht der Energiebedarfe ist in Tabelle 2-5 zusammengefasst. Allgemein kommen die Autoren zu dem Schluss, dass der Wirkungsgrad des Prozesses sehr niedrig ist. Insbesondere die Bereitstellung des Schutzgases führt in der Gesamtbetrachtung zu einem hohen Energieaufwand, sodass dieses nach Möglichkeit kreislaufgeführt werden sollte. Hierbei weist Argon als Schutzgas einen über drei Mal höheren SEC auf als Stickstoff und führt somit auch in der Gesamtbilanz zu einem höheren Energiebedarf. Die Erhöhung der Schutzgastemperaturen durch Vorwärmung senkt wiederum den Energiebedarf. Außerdem kann durch Überhitzung der Schmelze ein höherer Anteil an feinem Pulver erzeugt werden, was den Energiebedarf bezogen auf das Gutpulver ebenfalls reduzieren kann [Dopl21].

Tabelle 2-5: Energiebedarf zur Herstellung von 1 kg Metallpulver mittels Gasverdünnung nach DOPLER und WEIß [Dopl21]

Energiebedarf durch Verdünnungsgas										
Verdünnungsgas		Luft			Stickstoff			Argon		
Massenverhältnis Gas zu Schmelze		2,4	4,1	7,9	2,4	4,1	7,9	2,4	4,1	7,9
Bereitstellung Verdünnungsgas	kJ	561	970	2.303	3.533	6.105	11.746	12.284	21.228	40.841
Vorwärmung Verdünnungsgas auf 600° C	kJ	1.385	-	-	1.430	-	-	717	-	-
Energiebedarf zur Metallschmelze										
Überhitzung der Schmelze	°C	100					250			
Schmelzenergie	kJ	1.193					1.388			

### 2.5.3 Analyse additiver Fertigungsverfahren des Materialauftrags mit gerichteter Energieeinbringung

Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, die die Umweltauswirkungen sowie den Energiebedarf von DED-Verfahren untersuchen. Darüber hinausgehend gibt es noch zahlreiche Untersuchungen des Energiebedarfs und der Umweltauswirkungen anderer Verfahren der additiven Fertigung wie bspw. von FREDRIKSON, KELLENS et al., FALUDI et al. und BAUMERS et al. [Fred19, Baum17, Falu17, Kell17a]. Die DED spezifischen Studien können dabei in drei Kategorien eingeteilt werden. In der ersten Kategorie erfolgt eine Analyse des Energiebedarfs von DED-Prozessen und die Ermittlung eines SEC, der eine gewisse Bauteil- und Prozessunabhängigkeit suggeriert. In der zweiten Kategorie erfolgt eine umfassendere Analyse der Umweltauswirkungen im Rahmen von Ökobilanzen für DED-Prozesse und damit produzierte Bauteile. Zudem existieren Energieprognosemodelle, die für additive Fertigungsverfahren entwickelt wurden und somit auch für DED-Verfahren angewendet werden können. Diese sind in der dritten Kategorie zusammengefasst.

#### 2.5.3.1 Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs

BAMBACH et al. untersuchen in zwei Fallstudien den Energiebedarf von DED in Kombination mit formativen und subtraktiven Fertigungsverfahren von Cradle-to-Gate. Die Autoren stellen dabei fest, dass der größte Teil des Energiebedarfs für die Herstellung des Rohmaterials entsteht, der zweitgrößte durch die Pulverherstellung mittels Gasverdüsung, gefolgt vom DED-Prozess und den Nachbearbeitungsprozessen Umformen und Stanzen. Somit hat die Materialherkunft einen großen Einfluss auf den Energiebedarf. Hierbei beträgt der SEC von Pulver, das zu 85 % aus Sekundäraluminium hergestellt wird, ungefähr nur ein Drittel des SECs von Pulver, das durch den Einsatz von ausschließlich Primäraluminium hergestellt wird [Bamb17].

BAUMERS et al. vergleichen den mittleren Energiebedarf sowie den SEC verschiedener additiver Fertigungsverfahren für unterschiedliche Kapazitätsauslastungen. Der SEC der Herstellung eines Einzelbauteils ist bei DED ca. 29 % höher als der bei voller Kapazitätsauslastung. Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren, wie der Materialextrusion oder pulverbettbasierten Verfahren, weist das DED einen ähnlichen Energiebedarf auf [Baum11].

JACKSON et al. stellen den Energiebedarf von pulver- und drahtbasiertem DED von Cradle-to-Gate gegenüber. Hierfür fassen die Autoren die SECs der notwendigen Prozessschritte, für DED vornehmlich aus Literaturangaben, zusammen und leiteten daraus ein Modell zur Berechnung des Energiebedarfs der Herstellung eines Bauteils ab. Innerhalb der anschließenden Fallstudie zeigt sich, dass der Energiebedarf des pulverbasierten DED lediglich ca. 5 % höher ist, als der des drahtbasierten DED und somit beide Energiebedarfe sehr nah beieinander liegen. Beim drahtbasierten DED dominiert der Energiebedarf der Materialherstellung deutlich. Demgegenüber besitzt beim pulverbasierten DED der Bedarf an elektrischer Energie den größten Anteil am SEC. Die Energiebedarfe der Rohstoff- und Pulverherstellung liegen jedoch nur leicht darunter [Jack16].

WIPPERMANN et al. vergleichen den Energie- und Materialbedarf der hybriden Bauteilherstellung, durch pulverbasiertes DED und Fräsen als Nachbearbeitung, mit einer reinen spanenden Herstellung und einer reinen additiven Fertigung mit pulverbettbasierten Verfahren und drahtbasiertem DED. Hierbei werden auch verschiedene Maschinenzustände wie Vorbereitung, Nachbereitung und Leerlauf berücksichtigt. Die Studie ergibt, dass der SEC sowie die

Prozessdauer von DED geringer sind als bei pulverbettbasierten Verfahren. Die Analyse der verschiedenen Maschinenzustände zeigt, dass der Großteil des Energiebedarfs während des Fertigungsprozesses entsteht und der Energiebedarf der dem Prozess vor- und nachgelagerten Phasen nur gering ist [Wipp20].

Der Energiebedarf ist eine zentrale Größe in Nachhaltigkeitsbetrachtungen von additiven Fertigungsverfahren. Für eine umfassende Analyse der Umweltauswirkungen werden nachfolgend Ökobilanzen von DED-Verfahren vorgestellt.

### 2.5.3.2 Durchführung von Ökobilanzen

MORROW et al. vergleichen die Umweltauswirkungen von DED mit formativen und subtraktiven Herstellungsverfahren. Hierfür werden in drei Fallstudien der Energiebedarf sowie das GWP von Cradle-to-Gate erhoben und vergleichend gegenübergestellt. Entlang der betrachteten Prozesskette zeigt sich, dass der größte Anteil des Energiebedarfs auf den DED-Prozess entfällt, wobei hier insbesondere die Lasereinheit sowie die Kühlung dominieren. Weiterhin deuten die Resultate darauf hin, dass einfache Bauteilformen mit einem hohen Festkörper-zu-Hohlraum-Verhältnis zu einer geringeren Umweltbelastung führen, wenn sie mittels subtraktiver Fertigungsverfahren hergestellt werden, während Bauteilformen mit einem niedrigen Festkörper-zu-Hohlraum-Verhältnis zu einer geringeren Umweltbelastung führen, wenn sie durch DED hergestellt werden. Eine der Fallstudien zeigt zudem, dass der Energiebedarf der Wiederaufbereitung im Rahmen des Remanufacturing durch DED weniger als die Hälfte des Energiebedarfs aus dem Materialbedarf für ein Neuprodukt beträgt [Morr07].

HUANG et al. vergleichen den Primärenergiebedarf sowie das GWP der Herstellung von Flugzeugkomponenten durch verschiedene additive Fertigungsverfahren sowie subtraktive und formative Verfahren von Cradle-to-Gate. Die Autoren kommen dabei zu dem Ergebnis, dass die Herstellung des Pulvers inkl. der Rohstoffherstellung den größten Anteil am Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen hat. Beim Vergleich der verschiedenen additiven Fertigungsverfahren weist das DED den höchsten SEC auf. Jedoch ist die Vergleichbarkeit nur eingeschränkt, da unterschiedliche Bauteile gefertigt werden. Im Vergleich der additiven Fertigung zu formativen und subtraktiven Fertigungsverfahren können Energie- und Emissionseinsparungen maßgeblich durch den geringeren Materialbedarf erzielt werden. Dieser führt in einem anschließenden Vergleich mit der Nutzungsphase der Bauteile zudem zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs aufgrund des geringeren Gewichts der Bauteile [Huan16].

LE BOURHIS et al. und KERBRAT et al. untersuchen mit einer abgewandelten Ökobilanz, der Eco-Indikator 99 Methode, die Umweltauswirkungen von DED und vergleichen dabei zwei Düsen, die sich in der Breite der aufgetragenen Schmelzbahn und somit in der Materialauftragsrate unterscheiden. Hierbei berücksichtigen sie sowohl den DED-Prozess als auch die Pulverherstellung. Das Ergebnis zeigt, dass die Umweltauswirkungen maßgeblich durch den Materialbedarf und somit aus der Pulverherstellung resultieren. Eine Düse mit einer geringeren Materialauftragsrate kann aufgrund der geringeren geförderten Pulvermenge dieses Verhältnis jedoch umkehren, sodass hier der Energiebedarf dominiert. Innerhalb des DED-Prozesses übersteigen die Energiebedarfe der Lasereinheit und des Kühlsystems die des Antriebs der Bauplattform und weiterer Subsysteme deutlich [Kerb16, LeBo14].

SERRES et al. führen eine Ökobilanz für das DED mit der Titanlegierung  $Ti_6Al_4V$  von Cradle-to-Gate durch und stellen sie vergleichend mit einer Ökobilanz der spanenden Herstellung des

Bauteils gegenüber. Sie kommen dabei zu dem Ergebnis, dass die spanende Herstellung des Bauteils eine größere Gesamtumweltbelastung verursacht. Dabei sind die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Ressourcen am größten, während die Schädigung des Ökosystems bei beiden Verfahren ähnlich ist. Innerhalb des Lebenszyklus entstehen nach ihren Ergebnissen 90 % der Umweltauswirkungen durch die Rohstoffgewinnung und -herstellung sowie die Pulverherstellung. Lediglich 10 % der Umweltauswirkungen werden durch den DED-Prozess hervorgerufen [Serr11].

Innerhalb einer Fallstudie vergleichen JIANG et al. die Ergebnisse einer Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus von DED mit denen von kombinierten formativen und subtraktiven Fertigungsverfahren. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass aus ökologischer Sicht das DED nachhaltiger als formative oder subtraktive Fertigungsverfahren ist, was maßgeblich durch die geringeren Einflüsse während der Herstellungsphase aufgrund des geringeren Materialbedarfs begründet ist [Jian19].

LIU et al. vergleichen die Umweltauswirkungen der Herstellung eines Metallbauteils durch DED mit denen einer formativen und subtraktiven Herstellung im Rahmen einer Ökobilanz von Cradle-to-Gate. Die Daten für die Rohstoff- und Pulverherstellung sowie der Nachbearbeitung stammen dabei aus Datenbanken und der Literatur. Für den DED-Prozess werden innerhalb der Studie Daten erhoben. Die Autoren stellen fest, dass die Umweltauswirkungen der Bauteilherstellung durch DED die der Herstellungsalternative übersteigen. Dies wird insbesondere auf die geringe Pulverauftragsrate und den daraus resultierenden hohen Materialbedarf zurückgeführt. Allgemein werden die Umweltauswirkungen primär durch den Bedarf an elektrischer Energie in den verschiedenen Prozessstufen hervorgerufen. Hierbei ist auch der SEC sowie der Gesamtenergiebedarf von DED größer als der des gegenübergestellten Fräsprozesses [Liu18a].

WILSON et al. stellen die Ökobilanzen des Remanufacturing einer einzelnen, freistehenden Turbinenschaufel mit DED und der Neufertigung der Turbinenschaufel mit Feinguss vergleichend gegenüber. Die Ökobilanz erfolgt lediglich für die betrachteten Prozesse, wobei auch Materialien wie bspw. das Pulver und die zu seiner Herstellung entstehenden Umweltauswirkungen berücksichtigt werden. Die Autoren stellen fest, dass die Umweltauswirkungen von Remanufacturing durch DED wesentlich geringer sind, solange weniger als 18 % des Gesamtvolumens aufgetragen werden. Ab diesem Punkt sind die Umweltauswirkungen der Neufertigung durch Feinguss geringer [Wils14].

XIONG et al. vergleichen die Herstellung eines Bauteiles durch DED mit der durch pulvermetallurgische Verfahren im Rahmen einer verkürzten Ökobilanz. Die Autoren stellen fest, dass der Energie- sowie Kühlwasserbedarf für das DED-Verfahren höher, der Schutzgasbedarf jedoch niedriger ist. Insgesamt ist das DED-Verfahren aus ökologischer Sicht vorteilhafter als die pulvermetallurgischen Verfahren, wenn kleine oder komplexe Bauteile gefertigt werden [Xion08].

Die Ergebnisse der Untersuchungen des SEC und des GWP von DED-Prozessen ist in Tabelle 2-6 zusammengefasst. Hierbei ist festzustellen, dass große Divergenzen zwischen den ermittelten SEC existieren. Insbesondere die ermittelten SEC von MORROW et al. und WILSON et al. sind wesentlich höher als die der anderen Ansätze. Diese Divergenzen deuten auf eine große Abhängigkeit des Energiebedarfs und der resultierenden Umweltauswirkungen vom spezifischen eingesetzten Verfahren, vom verwendeten additiven Fertigungssystem, von der

Prozessgestaltung sowie vom zu fertigenden Bauteil hin. Die Ergebnisse sind somit nur eingeschränkt übertragbar. Dies führt zu einer Notwendigkeit von anpassbaren und individualisierbaren Prognosemodellen.

Tabelle 2-6: Ergebnisübersicht der Studien zur Untersuchung des SEC und GWP von DED

Studie	Inkludierte Prozessschritte	SEC	GWP
BAMBACH et al. [Bamb17]	DED	14,09 MJ/kg	
BAUMERS et al. [Baum11]	DED	241,00 MJ/kg – 339,00 MJ/kg	
JACKSON et al. [Jack16]	DED	66,90 MJ/kg	
LE BOURHIS et al. und KERBRAT et al. [Kerb16, LeBo14]	DED	21,67 MJ/kg	
MORROW et al. [Morr07]	DED	7.708,00 MJ/kg	1.950 kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg
WILSON et al. [WILS14]	Rohmaterial, Pulver und DED	2,06 MJ/kg	129,49 kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg
WIPPERMANN et al. [Wipp20]	DED	25,51 MJ/kg	

### 2.5.3.3 Energieprognose für additive Fertigungsprozesse

LE BOURHIS et al. entwickeln eine Methodik zur Ermittlung der Umweltauswirkungen von DED basierend auf der Methode des Eco-Indikator 99. Hierbei stellen sie getrennte Berechnungsmodelle für den Schutzgasbedarf, den Materialbedarf und den Bedarf an elektrischer Energie untergliedert nach den strombeziehenden Systemkomponenten auf. Das Modell wird anschließend in einer Fallstudie angewendet [LeBo13].

WATSON und TAMINGER entwickeln ein Berechnungsmodell, mit dem sich feststellen lässt, ob die additive Fertigung oder die subtraktive Fertigung für die Herstellung eines Metallbauteils energieeffizienter ist. Innerhalb des Modells wird der Energiebedarf für die Material- und Pulverherstellung, der Energiebedarf für die additive Fertigung, die Nachbearbeitung und der Transport an den verschiedenen Stellen innerhalb des Lebenszyklus berücksichtigt. Die Systemgrenzen des Modells umfassen somit Cradle-to-Grave [Wats15].

WEGENER entwickelt ein umfassendes Modell zur Berechnung des Energie- und Ressourcenbedarfs von DED. Innerhalb des Energiemodells werden die Energiebedarfe der einzelnen Prozessschritte berechnet und dabei bereits die individuellen Leistungsaufnahmen der einzelnen Subsysteme berücksichtigt. Das Modell kann jedoch nur eingeschränkt zur Prognose des Energiebedarfs eingesetzt werden, da die Leistungsaufnahme nicht in Abhängigkeit von den gewählten Prozessparametern ermittelt werden kann [Wege16].

MA et al. entwickeln physikbasierte Energieprognosemodelle für Verfahren der Materialextrusion, Stereolithografie sowie Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens, indem jeweils Teilmodelle für die Antriebseinheit, die Energiequellen sowie der peripheren Subsysteme wie u. a. Kühlsysteme oder Vorwärmung der Bauplattform erstellt werden. Die Modelle zeigen eine Abweichung von maximal 7,36 % und deuten somit auf eine gute Eignung für die Energiebedarfsvorhersage der untersuchten Systeme hin. Es zeigt sich, dass bei Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens und für die Stereolithografie die peripheren Subsysteme mit 65,72 % bzw. 94,64 % den größten Anteil am Energiebedarf aufweisen [Ma21].

QIN et al. entwickeln ein Modell zur Prognose und Reduzierung des Energiebedarfs von additiven Fertigungsverfahren ausgehend von der Bauteilgeometrie und validieren die Methode im Rahmen einer Fallstudie mit pulverbettbasiertem Schmelzen. Mithilfe von Deep Learning,

einem Teilbereich des Machine Learnings, werden ausgehend von der Bauteilgeometrie und zuvor erhobenen Prozessdaten die Prozessparameter ermittelt und darauf aufbauend der Energiebedarf prognostiziert. Anschließend erfolgt eine Optimierung des Energiebedarfs durch ein Deep-Learning gesteuertes Partikelschwarm-Optimierungsverfahren [Qin20].

AL-GHAMDI et al. analysieren den Einfluss der Prozessparameter auf Verfahren der Materialextrusion im Rahmen von vollfaktoriellen Versuchsreihen. Basierend auf den Ergebnissen werden Regressionsmodelle entwickelt, die die Prognose des Energiebedarfs unter Angabe der Prozessparameter ermöglichen [Al-G19].

Yi stellt ein Simulationstool vor, das basierend auf einer experimentell ermittelten Datenbank den Energiebedarf von Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens und der Materialextrusion simuliert. Durch Eingabe von Prozessparametern und des NC-Codes erfolgt so die Simulation der Leistungsaufnahme über die Dauer des Fertigungsprozesses und somit die bauteilindividuelle Energiebedarfsprognose [Yi21a].

#### 2.5.4 Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen

Die für additiv gefertigte Bauteile angewandten Nachbearbeitungsverfahren können in vier Kategorien untergliedert werden, wie bereits in Kapitel 2.3.5 näher beschrieben wurde.

Beim Reinigen sind aus ökologischer Sicht die Reinigungsoptionen durch Druckluft und Ultraschall relevant. Druckluft wird direkt aus dem Netz des Betreibers mit dem entsprechenden Druck bezogen. Die benötigte Druckluftmenge ist abhängig von der Nutzungsdauer und kann zwischen einigen Sekunden bei einfachen Bauteilen bis hin zu wenigen Minuten bei komplexen Teilen betragen. Die Ultraschallreinigung benötigt Wasser sowie Strom. Das Wasser kann mehrmals wiederverwendet werden, weshalb die Umweltauswirkungen als gering eingeschätzt und somit vernachlässigt werden können. Der Energiebedarf kann je nach Größe des Ultraschallreinigungsgeräts variieren. So nimmt der Energiebedarf mit zunehmendem Betriebsvolumen zu, da aufgrund des größeren Abstandes zwischen Bauteil und Ultraschallwandler mehr Leistung aufgebracht werden muss, um das Bauteil zu reinigen [Tan20]. In einer Untersuchung von LONG et al. wird zudem ein linearer Zusammenhang zwischen der Abtragsrate von Verunreinigungen während der Bauteilreinigung und der Stromstärke festgestellt, da durch eine höhere Stromstärke eine höhere Ultraschallreinigungsintensität erzielt wird [Long19]. Weitere Ergebnisse zu Untersuchungen des Energiebedarfs beim Ultraschallreinigen sind in Tabelle 2-7 zusammengefasst. Hieraus ergibt sich ein durchschnittlicher Energiebedarf von 1,39 MJ/h bezogen auf die Betriebsdauer.

Tabelle 2-7: Energiebedarf der Ultraschallreinigung

Studie	Leistungsaufnahme der Maschine	Prozessdauer	Behältervolumen	Berechneter SEC
BALOGUN et al. [Balo15]	0,25 W	1 h		0,9 MJ/h
LONG et al. [Long19]	0,0216 kW – 0,14 kW	3 min – 8 min		0,077 MJ/h – 0,504 MJ/h
MOGNOL et al. [Mogn06]	0,5 kW	8 h		1,8 MJ/h
TAN et al. [Tan20]		5 min	8 l	0,9936 MJ/h
		5 min	40 l	2,7216 MJ/h

Zur Wärmebehandlung von additiv gefertigten Bauteilen wird häufig das HIP eingesetzt. Der Energiebedarf hierbei ist abhängig von der Geometrie sowie vom Volumen des Bauteils

[Inga20]. Nach einer Studie von LAUREIJS et al. kann der Energiebedarf mit 122 MJ/kg in Abhängigkeit vom Bauteilgewicht angenähert werden [Laur17]. PERERA modelliert den Energiebedarf des HIP mit Elektroöfen  $E_{HIP,individuell}$  basierend auf der Nennleistung des Ofens  $P_{HIP,Ofen,nenn}$ , der Prozessdauer  $T_{HIP}$ , dem Temperaturprofil  $T_{HIP,Zone}$  sowie der maximalen Nenntemperatur  $T_{HIP,nenn}$  und ermöglicht so die Individualisierung der Berechnung des Energiebedarfs. Das Modell ist in Formel 2-1 gegeben [Pere20].

$$E_{HIP,individuell} = P_{HIP,Ofen,nenn} \cdot T_{HIP} \cdot \frac{T_{HIP,Zone}}{T_{HIP,nenn}} \quad 2-1$$

Der Energiebedarf der Drahterosion, die zum Trennen von Bauplatte und Bauteil oder allgemein als materialabtragendes Nachbearbeitungsverfahren eingesetzt werden kann, wurde bereits in zahlreichen Studien analysiert. Ein Großteil der Untersuchungen ermitteln einen fall-spezifischen Energiebedarf, wie bspw. GUTOWSKI et al., FALUDI et al. und LAUREIJS et al. [Falu17, Laur17, Guto06]. Detailliertere Analysen von ATZENI et al. zeigen, dass mit abnehmendem Querschnitt die Leistungsaufnahme leicht und die Prozesszeit deutlich sinkt, was gemeinsam zu einem geringeren Energiebedarf je Bauteil führt [Atze21]. KELLENS führt eine umfassende Ökobilanz des Prozesses der Drahterosion durch und bewertet die verschiedenen Prozessschritte des Betriebs, Stand-by und Unterstützungsmodus basierend auf einem Eco-Score. Es werden dabei Energie- auch Materialflüsse wie Druckluft, Kühlwasser und Schmierfette berücksichtigt. Die Quantitäten der Energie- und Materialflüsse, sind in Tabelle 2-8 zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass der Energiebedarf 95 % der Umweltauswirkungen verursacht [Kell13].

Tabelle 2-8: Elementarflüsse pro Stunde beim Drahterodieren [Kell13]

Elementarfluss		Schruppen	Schlichten	
Inputflüsse	Energiefluss	Betrieb	4,70 kWh/h	3,05 kWh/h
		Stand-by	0,22 kWh/h	0,22 kWh/h
		Unterstützungsprozesse	0,29 kWh/h	0,29 kWh/h
		Entstaubungssystem	0,30 kWh/h	0,30 kWh/h
	Materialfluss	Druckluft	60,00 l/h	60,00 l/h
		Deionisiertes Wasser	0,63 l/h	0,630 l/h
		Kühlwasser	360,00 l/h	360,00 l/h
		Schmierfett	0,125 g/h	0,125 g/h
Outputflüsse	Materialfluss	Werkzeugverschleiß	0,074 g/h	0,0025 g/h
		Metall vom Werkstück	14,00 g/h	1,60 g/h
		Deionisiertes Wasser	0,38 l/h	0,38 l/h

Eine Zusammenfassung und ein Vergleich der Ergebnisse des Energiebedarfs für das Drahterodieren ist in Tabelle 2-9 gezeigt. Die Studien geben den SEC mit unterschiedlichen Vergleichsbasen an, was einen Vergleich erschwert. So ergibt sich durchschnittlich ein Energiebedarf von 13,16 MJ/h bezogen auf die Betriebsdauer und 0,0884 MJ/m<sup>2</sup> bezogen auf die bearbeitete Fläche. Als Materialabtragendes Verfahren ergibt sich relativ zum abgetrennten Volumen anhand der Studie von GUTOWSKI et al. ein SEC von 4,415 MJ/m<sup>3</sup>.

Tabelle 2-9: Vergleich des Energiebedarfs verschiedener Studien für das Drahterodieren

Studie	Leistungs- aufnahme	Prozessdauer	Prozessrate	Modus	Energie- bedarf	Berechneter SEC
ATZENI et al. [Atze21]		1,01 h		Kleine Fläche	2,484 MJ	2,359 MJ/h
		0,62 h		Mittle Fläche	1,476 MJ	2,381 MJ/h
		0,56 h		Große Fläche	1,296 MJ	2,314 MJ/h
BAUMERS et al. [Baum13]	3,96 kW	10 h			142,46 MJ	14,246 MJ/h
GUTOWSKI et al. [Guto06]	6,6 kW		2,71 cm <sup>3</sup> /s			2,44 J/cm <sup>3</sup>
	- 14,25 kW		- 2,23 cm <sup>3</sup> /s			- 6,39 J/cm <sup>3</sup>
KELLENS et al. [Kell13, Kell11]		1 h		Schruppen	19,836 MJ	19,836 MJ/h
		1 h		Schlichten	13,896 MJ	13,896 MJ/h
ZHANG et al. [Zhan20]						0,47 J/cm <sup>2</sup> - 1,29 J/cm <sup>2</sup>

Für das Fräsen belegen GUTOWSKI et al., KARA et al. und DIAZ et al. in ihren Studien den Zusammenhang zwischen der Materialabtragsrate  $MRR$  und dem SEC [Diaz11, Kara11, Guto06]. GUTOWSKI et al. zeigen, dass die Grundleistungsaufnahme der Werkzeugmaschine  $P_{WZM,fix}$  hierbei wesentlich höher ist, als die variable Leistungsaufnahme  $P_{WZM,var}$ , die durch den eigentlichen Zerspanungsprozess verursacht wird. Somit ergibt sich aus der inversen Beziehung für den SEC eines Fräsprozesses Formel 2-2 [Guto06].

$$SEC_{Fräsen} = \frac{P_{WZM,fix}}{MRR} + P_{WZM,var} \quad 2-2$$

KARA et al. erweitern das Modell von GUTOWSKI et al. zur Prognose des SEC durch maschinen-spezifische Koeffizienten  $C_0$  und  $C_1$ , die individuell für die Maschine sowie den Bearbeitungsmodus, z. B. Trocken- und Nassbearbeitung, statistisch ermittelt werden. Grundlage bilden experimentelle Untersuchung und statistische Auswertung des SEC der Zerspanung von Aluminium, Baustahl und hochfestem Stahl, woraus sich Formel 2-3 ergibt [Kara11].

$$SEC_{Fräsen} = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad 2-3$$

Beispielhaft ergibt sich für drei Werkzeugmaschinen für die Trocken- und Nassbearbeitung der untersuchten Materialien die in Tabelle 2-10 aufgeführten SEC-Prognosemodelle [Kara11]:

Tabelle 2-10: SEC-Modell für verschiedene Fräsmaschinen (nach [Kara11])

Fräsmaschine	Trocken-/Nassbearbeitung	Koeffizienten		Modell
		$C_0$	$C_1$	
Fadal VMC 4020	Trocken	2,845	1,330	$SEC = 2,845 + \frac{1,330}{MRR}$
	Nass	3,082	1,396	$SEC = 3,082 + \frac{1,396}{MRR}$
Mori Seiki Dura Vertical 5500	Trocken	2,830	1,344	$SEC = 2,830 + \frac{1,344}{MRR}$
	Nass	2,953	2,019	$SEC = 2,953 + \frac{2,019}{MRR}$
DMU 60P	Trocken	2,411	5,863	$SEC = 2,411 + \frac{5,863}{MRR}$
	Nass	2,677	6,626	$SEC = 2,677 + \frac{6,626}{MRR}$

Ein Vergleich ermittelter SEC aus verschiedenen Studien zum Energiebedarf des Fräsens ist in Tabelle 2-11 gegeben.

Tabelle 2-11: Vergleich des SEC für Fräsprozesse verschiedener Studien

Volumenbasiert					
Referenz	Material	MRR cm <sup>3</sup> /s	Schruppen kJ/cm <sup>3</sup>	SEC Schichten kJ/cm <sup>3</sup>	Gesamt kJ/cm <sup>3</sup>
KARA et al. [Kara11]	Stahl	0,0005			14,13
DAHMUS et al. [Dahm04]	Stahl	0,35 – 4,7			10,00 – 60,00
LIU et al. [Liu18b]	AlSi 4140, Stahl				14,00
DIAZ et al. [Diaz11]	AlSi 1018, Stahl				11,10 – 151,80
CAMPITELLI et al. [Camp19]	Baustahl	0,0191 – 0,1432			18,00 – 111,70
DAHMUS und GUTOWSKI [Dahm04]	Aluminium	1,5 – 20			2,30 – 14,20
LIU et al. [Liu16]	Al-7075	0,00833 – 0,05			0,70 – 1,01
HSIAO et al. [Hsia21]	Inconel800	0,6879 – 8,5987			0,12 – 0,93
TESIC et al. [Tesi22]	Ti-6Al-4V	0,0035 – 0,0126			141,09 – 404,23
TESIC et al. [Tesi22]	Ti-6Al-4V	0,0035 – 0,0126 0,0045 – 0,0084			141,09 – 404,23 167,41 – 324,77
LYONS et al. [Lyon21]	Ti-6Al-4V	0,119 0,017	19,72	121,72	
PENG et al. [Peng17]			62,2	3723,42	
BONVOISIN et al. [Bonv13]		0,19 – 0,25			25,00 – 34,00
ZHONG et al. [Zhon16b]		0,085 – 0,648			6,33 – 20,23
IQBAL et al. [Iqba16]					40,00 – 110,00
WANG et al. [Wang18]			5,433	6,138	
PARIS et al. [Pari16]	Ti-6Al-4V		219,6	788,4	
Massebasiert					
Referenz	Material	MRR kg/h	Schruppen MJ/kg	SEC Schichten MJ/kg	Gesamt MJ/kg
PRIARONE et al. [Pria20]	Stahl	9,4 – 13,2 1,3 – 1,9	0,76 – 0,84	3,42 – 3,78	
WIPPERMANN et al. [Wipp20]	Edelstahl	0,82 0,1	31,4	264,47	
KELLENS et al. [Kell13]	Stahl				0,47 – 74,75
DAVIS et al. [Davi20]	ABS		11,4	245,5	
PRIARONE et al. [Pria20]	Ti-6Al-4V	1,6 – 2,2 0,1 – 0,2	2,57 – 2,84	21 – 23,21	
PRIARONE et al. [Pria20]	Aluminium	18,7 – 26,3 0,9 – 1,3		1,33 – 1,47 9,41 – 10,40	

Zur Abschätzung der Umweltauswirkungen der Fräsbearbeitung verschiedener Werkstoffe sowie unterschiedlicher Schmierstrategien, der Flutschmierung sowie der Minimalmengenschmierung (MMS) führen CAMPITELLI et al. eine Ökobilanz basierend auf den in Tabelle 2-12 gezeigten Elementarflüssen durch. Es zeigt sich, dass der Großteil der Umweltauswirkungen durch den Bezug von elektrischer Energie sowie die Bereitstellung von Druckluft verursacht wird [Camp19a]. Die ermittelten Werte für das GWP sind in Tabelle 2-13 aufgeführt.

Tabelle 2-12: Input- und Outputflüsse eines Fräsprozesses [Camp19b, Sche16]

Parameter		Aluminium		Stahl		Gusseisen	
		Flutung	MMS	Flutung	MMS	Flutung	MMS
Elektrische Energie	kWh	0,103	0,081	0,072	0,065	0,062	0,058
Druckluft	Nm <sup>3</sup>	0,31	0,40	0,20	0,23	0,23	0,40
Kühlschmierstoff für Flutung	g	130,30	-	59,50		60,30	-
Kühlschmierstoff für MMS	g	-	0,074	-	0,083	-	0,064
Filtervlies	g	0,011	-	0,003	-	0,003	-
Zerspanwerkzeug	Stück	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003
Sonderabfall "gebrauchtes Filtervlies"	g	0,011	-	0,003	-	0,003	-
Sonderabfall "gebrauchte Emulsion"	g	116,00	-	44,90	-	45,70	-
Menge Späne in „gebrauchte Emulsion“	g	72,00	-	0	-	0,80	-

Tabelle 2-13: Vergleich des ermittelten GWP beim Fräsen [Camp19a]

		Aluminium	Stahl	Gusseisen
Funktionelle Einheit	Volumen	5250 mm <sup>3</sup>	469 mm <sup>3</sup>	469 mm <sup>3</sup>
	Masse	0,029 kg	0,007 kg	0,007 kg
Flutschmierung		0,1430 kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,0832 kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,0834 kg CO <sub>2</sub> -Äq.
MMS		0,0994 kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,0660 kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,0842 kg CO <sub>2</sub> -Äq.

### 2.5.5 Ansätze zur Erstellung eines Energieprognosemodells

Neben Energieprognosemodellen für spezifische Prozesse existieren ebenfalls Vorgehen und Konzepte, die bei der Erstellung individueller Energieprognosemodelle unterstützend angewendet werden können.

SCHMIDT et al. entwickeln eine Methodik zur Vorhersage des Energiebedarfs beliebiger Fertigungsprozesse und -anlagen. Ziel des Ansatzes ist es, mit möglichst wenig Messaufwand eine Prognosequalität von 80 % zu erreichen. Hierfür werden die Prozesse und Anlagen mithilfe eines Entscheidungsbaumes hinsichtlich ihrer Komplexität eingeordnet. Darauf basierend werden Handlungsanweisungen zur Erstellung parametrischer oder empirisch basierter Energieprognosemodelle gegeben [Schm15].

DIETMAIR und VERL zeigen eine generische Methode zur Modellierung des Energiebedarfs von Maschinen und Anlagen basierend auf einer statistischen diskreten Ereignisformulierung. Das Vorgehen führen sie exemplarisch an einem Fräsprozess durch [Diet09].

## 2.6 Erkenntnisse aus dem Stand der Technik

Additive Fertigungsverfahren bieten aufgrund ihres schichtweisen Materialauftrags und der damit verbundenen konstruktiven Freiheit der Bauteile technologische Vorteile gegenüber subtraktiven und formativen Verfahren sowie insbesondere für die Einzel- und Kleinserienfertigung ökonomische Vorteile. Das vergleichsweise junge additive Fertigungsverfahren des DED besitzt aufgrund seiner relativ kurzen Fertigungszeiten, der großen erreichbaren Bauvolumen sowie der Möglichkeit des Wiederaufbereitens und Reparierens von Bauteilen großes Potenzial für industrielle Anwendungen.

Durch Leichtbau und Funktionsintegration können Energie- und Ressourceneinsparungen während der Nutzung additiv gefertigter Bauteile erzielt werden, die zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen führen können. Voraussetzung hierfür ist, dass diese Einsparungen durch den Energie- und Ressourcenbedarf der Herstellung dieser Teile nicht kompensiert werden. Um dies sicherzustellen, müssen die Umweltauswirkungen der Herstellung den Umweltauswirkungen der Nutzung der Bauteile gegenübergestellt werden. Die Umweltauswirkungen der Nutzungsphase sind dabei jedoch hochgradig individuell und hängen maßgeblich von der Anwendung ab. Die durch die Herstellung entstehenden Umweltauswirkungen sind häufig unbekannt. Dies gilt insbesondere für die dem additiven Fertigungsprozess vorgelagerten Prozesse.

So existieren bspw. für das weit verbreitete Rohmaterial Edelstahl 316L keine bekannten Ökobilanzen oder Datensätze in Datenbanken. Daher müssen die Umweltauswirkungen basierend auf den Legierungselementen und der Rohstahlherstellung sowie aller notwendigen Prozesse zunächst ermittelt werden. Als erste Orientierung sowie als Vergleichsgrundlage können Ergebnisse der Ökobilanz des verwandten Edelstahl 304 herangezogen werden.

Bei der Pulverherstellung besteht nur eine eingeschränkte Datengrundlage, auf die zurückgegriffen werden kann. Die meisten Daten sind entweder veraltet, die Herkunft nicht umfassend dokumentiert, theoretisch errechnet oder im Labormaßstab ermittelt worden. Einzig DOPLER und WEIß verwenden in ihrer Studie Energiedaten einer kleinskaligen industriellen Pulverherstellung mittels Gasverdüsung [Dopl21]. Diese umfasst jedoch lediglich den Verdüsungsprozess und vernachlässigt vor- und nachgelagerte sowie unterstützende Prozesse. Um die tatsächlichen Umweltauswirkungen vollumfänglich zu ermitteln, ist daher eine umfassende Ökobilanz der Pulverherstellung notwendig.

Für Verfahren, die zur Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile angewendet werden, existieren bereits zahlreiche Studien. Diese sind zwar nicht explizit für additiv gefertigte Bauteile ausgelegt, daraus resultierende Unterschiede in den Energie- und Materialbedarfen können jedoch für eine angenäherte Ermittlung der Umweltauswirkungen vernachlässigt werden. Daher können die in Kapitel 2.5.4 aufgeführten Modelle zur Prognose der Umweltauswirkungen auch für durch HS DED-LB gefertigte Bauteile angewendet werden.

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen von DED-Prozessen existieren bereits einige Studien, die Ergebnisse sind jedoch konträr. Einige Analysen der Umweltauswirkungen innerhalb der Prozesskette weisen darauf hin, dass der Energiebedarf primär durch die Materialbereitstellung, also die Rohstoffgewinnung und die Pulverherstellung, dominiert ist [Bamb17, Huan16, Serr11]. Diese lassen sich jedoch nach BAMBACH et al. durch den Einsatz von Sekundärmaterial reduzieren [Bamb17]. Andere Studien ergeben dagegen, dass der DED-Prozess selbst den größten Energiebedarf aufweist [Jack16, Morr07]. Daneben werden häufig Vergleiche der

Bauteilherstellung durch DED mit der Herstellung durch formative und subtraktive Verfahren durchgeführt. Die Mehrheit der Studien zeigen, dass DED aufgrund der Materialeinsparung aus ökologischer Sicht vorteilhafter ist [Jian19, Huan16, Serr11]. Steigt jedoch der Materialbedarf bspw. aufgrund einer geringen Pulverauftragsrate, wie es bei einem HS DED-LB-Prozess auftreten kann, so kann sich dieses Ergebnis umkehren [Liu18a].

Welches Verfahren aus ökologischer Sicht vorteilhafter ist, ist von vielen Faktoren abhängig wie bspw. vom Festkörper-zu-Hohlraum-Verhältnis des gefertigten Bauteils [Morr07]. Hiermit lassen sich ebenfalls die konträren Ergebnisse erklären. Jede Studie hat individuelle Untersuchungsobjekte, Systemgrenzen und Annahmen definiert. So unterscheiden sich die gefertigten Bauteile sowie die additiven Fertigungssysteme. Zudem werden die dem DED-Prozess vorgelegten Prozesse in den Betrachtungen unterschiedlich berücksichtigt. Es werden somit verschiedene Materialien und Maschinen analysiert sowie verschiedene Prozessparameter verwendet. Daraus lässt sich schließen, dass die für ein Bauteil ermittelten Umweltauswirkungen hochgradig individuell sind und sich daher nur eingeschränkt zur Prognose der Umweltauswirkungen eines anderen Bauteils durch Übertragung der Ergebnisse eignen. Um möglichst präzise die Umweltauswirkungen zu prognostizieren, müssen daher Bauteil-, Prozess-, und Maschinenspezifika berücksichtigt werden.

Durch den Einsatz von HS DED-LB können die bereits kurzen Prozesszeiten von DED weiter reduziert werden, was das Potenzial zur industriellen Anwendung weiter steigert. Aufgrund der wesentlich höheren Vorschubgeschwindigkeiten und Laserleistungen unterscheidet sich der HS DED-LB-Prozess entscheidend von anderen DED-Prozessen. Aus energetischer Sicht lassen kürzere Prozesszeiten auf einen geringeren Energie- und Ressourcenbedarf schließen. Jedoch führen die höheren Prozessgeschwindigkeiten zu einer höheren Leistungsaufnahme, insbesondere für das Antriebssystem und die Lasereinheit. So können die kürzeren Prozesszeiten durch höhere Leistungsaufnahmen potenziell kompensiert werden. Weiterhin werden beim HS DED-LB und anderen DED-Verfahren zwar weitestgehend die gleichen Ressourcen benötigt, die Pulververluste sind beim HS DED-LB jedoch wesentlich höher, was zu einer abweichenden Pulverauftragsrate führt. Aufgrund dieser Unterschiede können die energetischen und ressourcenbedingten Umweltauswirkungen von HS DED-LB nur eingeschränkt von anderen DED-Prozessen übertragen werden. Eine tiefgehende Analyse der Umweltauswirkungen ist zudem notwendig, da HS DED-LB ein vergleichsweises junges Verfahren ist, dessen Entwicklung sich maßgeblich auf technische Gesichtspunkte fokussierte. Daher werden große Potenziale zur Verbesserung der Umweltauswirkungen vermutet. Diese Potenziale gilt es auszuschöpfen, bevor das Verfahren eine breite Adaption in der industriellen Anwendung erfährt, da in der frühen Phase Änderungen leichter und kostengünstiger umzusetzen sind und hierdurch größere Effekte erzielt werden können.

Um die Umweltauswirkungen der additiven Bauteilfertigung mit den potenziellen Einsparungen der Nutzungsphase zu vergleichen oder um das Bauteil und den Fertigungsprozess, neben der Berücksichtigung von ökonomischen und technischen Aspekten, möglichst umweltschonend auszulegen, müssen die Umweltauswirkungen a priori ermittelt werden. Um dies zu ermöglichen, wird ein Prognosemodell benötigt, mit dessen Hilfe die Umweltauswirkungen bauteil- und prozessspezifisch prognostiziert werden können. Bestehende Prognosemodelle für andere additive Fertigungsprozesse können aufgrund der Verfahrensunterschiede zum HS DED-LB nicht angewendet werden. Zudem fehlt hierbei häufig ein analysierender Charakter, sodass

zwar bspw. der Energiebedarf ermittelt werden kann, die exakte Zusammensetzung jedoch nicht ersichtlich ist. Weiterhin fokussieren sich bestehende Ansätze lediglich auf den Energiebedarf und vernachlässigen den Ressourcenbedarf, der ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Da Studien für den DED-Prozess zeigen, dass alle Prozessschritte der Herstellung einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkung der Bauteilherstellung aufweisen, müssen im Prognosemodell die Prozessschritte der Rohmaterialherstellung, der Pulverherstellung, der HS DED-LB-Prozess sowie die Nachbearbeitung Berücksichtigung finden. Hierdurch werden zum einen die tatsächlichen und gesamten durch die Herstellung des Bauteils verursachten Umweltauswirkungen abgebildet. Zum anderen ermöglicht dies ein Gegenüberstellen der Umweltauswirkungen der verschiedenen Lebenszyklusphasen. Weiterhin entstehen durch die Fertigung der Bauteile auf unterschiedlichen Anlagen sowie, je nach Geometrie und Anforderungen, mit unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen, individuelle Energie- und Ressourcenbedarfe. Um die daraus resultierenden Umweltauswirkungen möglichst exakt zu ermitteln, muss das Prognosemodell die Bauteil-, Maschinen- und Prozessspezifika abbilden. Hierdurch können bspw. unterschiedliche Prozessparameterkombinationen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen verglichen und entsprechend ausgelegt werden. Ein Prognosemodell würde somit die Ermittlung der Umweltauswirkungen vor dem Prozess ermöglichen, sodass mögliche Reduktionspotenziale identifiziert werden können und langfristig in der Prozess- und Anlagenentwicklung sowie kurzfristig in der Prozessauslegung berücksichtigt werden können. Zudem ermöglicht dieses Vorgehen die Berücksichtigung ökologischer Aspekte in der Entscheidungsfindung. Als betrachtete Wirkungskategorien zur Beurteilung der Umweltauswirkungen können hierbei bspw. das GWP und der KEA gewählt werden, da diese weit verbreitete und industriell zunehmend relevante Wirkungskategorien sind und hierdurch eine Vergleichsgrundlage geschaffen wird.

## 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

### 3.1 Ziel und Aufgaben

Übergeordnetes Ziel ist es die Umweltauswirkungen der Bauteilherstellung mittels HS DED-LB transparent zu machen, indem die individuelle Prognose des resultierenden KEA und GWP der Herstellung eines Bauteils von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Produkt ermöglicht wird. Hieraus ergibt sich die Forschungsfrage, wie der KEA sowie das GWP der einzelnen Prozessschritte verallgemeinert prognostisch berechnet und zusammengeführt werden können. Die übergeordnete Zielsetzung lässt sich in die folgenden Teilziele untergliedern:

- ❑ Beschreibung und detaillierte Analyse ökologisch relevanter Elemente der Prozessschritte innerhalb der betrachteten Prozesskette und ihrer Elementarflüsse.
- ❑ Entwicklung eines Modells zur Prognose des Energiebedarfs beim HS DED-LB in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie und der Prozessparameter.
- ❑ Entwicklung von Teilmodellen zur prognostischen Berechnung des KEA und des GWP für die betrachteten Prozessschritte der Bauteilherstellung.
- ❑ Identifikation derjenigen Faktoren, die einen signifikanten Einfluss auf den KEA und das GWP haben.

Kernprozess der betrachteten Prozesskette ist der HS DED-LB-Prozess, da hier die wesentliche Geometrieerstellung erfolgt. Dies bedingt aufgrund der großen Gestaltungsfreiheit des Verfahrens hochgradig individuelle Fertigungsprozesse. Somit ist der HS DED-LB-Prozess das zentrale Modul im Gesamtmodell zur Prognose des resultierenden KEA und GWP der gesamten Prozesskette. Von diesem Teilmodell ausgehend erfolgt anschließend die Integration der dem HS DED-LB-Prozess vor- und nachgelagerten Prozessschritte sowie die Entwicklung des KEA- und GWP-Prognosemodells. Zur Entwicklung dieses Prognosemodells müssen die folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

- ❑ Ausgangspunkt für das Prognosemodell des HS DED-LB-Prozesses ist eine detaillierte Analyse des Energiebedarfs. Dies erfolgt durch das Erstellen und Durchführen statistischer Versuchspläne. Hierbei ist es zum einen notwendig, den Verlauf der Leistungsaufnahme innerhalb eines Fertigungsprozesses zu untersuchen und andererseits diejenigen Prozessparameter und Bauteileigenschaften sowie Korrelationen zu identifizieren, die einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme haben.
- ❑ Basierend auf den Erkenntnissen aus der energetischen Analyse des HS DED-LB-Prozesses wird ein Modell zur Prognose des Energiebedarfs entwickelt. Dieses besteht aus einem Leistungsmodell, das in Abhängigkeit der Prozessparameterkombination die Leistungsaufnahme prognostiziert, und aus einem Zeitmodell, das basierend auf der Bauteilgeometrie und der Vorschubgeschwindigkeit die Prozesszeit angenähert berechnet.
- ❑ Um die gesamten aus dem HS DED-LB-Prozess resultierenden Umweltauswirkungen im Modell zu berücksichtigen, muss zunächst das Energieprognosemodell um die Berechnung des Ressourcenbedarfs erweitert werden. Anschließend werden die Energie- und Ressourcenbedarfe in ein Modell zur Bestimmung des bauteilindividuellen KEA und des GWP transformiert. Hierfür müssen spezifische Charakterisierungsfaktoren, d. h. die individuellen Primärenergiefaktoren für den KEA und das individuelle Treibhauspotenzial für den GWP aller Inputflüsse, bestimmt werden.

- Für jeden Prozessschritt wird ein individuelles KEA- und GWP-Prognosemodell entwickelt. Hierzu ist es notwendig, zunächst die Datenverfügbarkeit sowie die Möglichkeiten einer Datenerhebung der einzelnen Prozessschritte zu evaluieren. Anschließend wird analysiert, inwieweit auf die einzelnen Prozessschritte vom Standpunkt des additiven Fertigungsprozesses aus Einfluss genommen werden kann. Darauf basierend werden die individuellen Teilmodelle zunächst grob geplant und hierbei die Variationsmöglichkeiten sowie die Datenherkunft definiert.
- Die Rohmaterialherstellung des Edelstahl 316L kann aufgrund des zu großen Aufwands nicht durch eigene Messungen erhoben werden. Daher ist es notwendig, geeignete Datengrundlagen aus Datenbanken oder der Literatur zu recherchieren und die entsprechenden Daten aufzubereiten, auf deren Basis die jeweiligen Input- und Outputflüsse quantifiziert werden können. Auf Grundlage dieser Datensätze werden anschließend der KEA und das GWP basierend auf der Methode der Ökobilanz quantifiziert.
- Aufgrund der fehlenden Datengrundlage für die Pulverherstellung erfolgt im Rahmen der Arbeit die Ermittlung des KEA und des GWP der industriellen Pulverherstellung basierend auf der Methode der Ökobilanz. Die funktionelle Einheit sowie der Detaillierungsgrad der Ergebnisse müssen dabei so gewählt werden, dass eine spätere Modularisierung und Übertragung in ein Prognosemodell möglich sind.
- Zur Modellierung der Nachbearbeitung kann auf bestehende Ansätze zurückgegriffen werden. Zunächst gilt es, diejenigen Verfahren zu identifizieren, die bei HS DED-LB gefertigten Bauteilen häufig angewendet werden. Für diese Verfahren werden anschließend, aufbauend auf dem Stand der Technik, geeignete Modelle zur Prognose der Umweltauswirkungen ermittelt und zur Berechnung des individuellen GWP und KEA angepasst.
- Die Teilmodelle der Prozessschritte werden zu einem Gesamtmodell aggregiert, das die Bestimmung des GWP und des KEA basierend auf den Bauteil- und Prozessspezifika ermöglicht.

### 3.2 Anforderungen

Das detaillierte Modell für die Energiebedarfsprognose für den HS DED-LB-Prozess in Abhängigkeit von der Prozessparametereinstellung unterscheidet sich hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Berechnungsgrundlage von den Teilmodellen der anderen Prozessschritte und ist zudem zentraler Bestandteil des Gesamtmodells. Daher werden an dieses Teilmodell gesonderte Anforderungen gestellt, die im Folgenden erläutert sind:

#### **Anforderung 1.1: Das Modell muss auf andere HS DED-LB-Fertigungssysteme übertragbar sein**

Verschiedene additive Fertigungssysteme weisen zwar i. d. R. die gleiche Struktur sowie Systemeinheiten auf, jedoch unterscheiden sich die Systemeinheiten in ihrem energetischen Verhalten. Somit sind experimentell ermittelte Energiebedarfe und Leistungsaufnahmen i. d. R. spezifisch und können nur begrenzt auf andere Systemeinheiten übertragen werden. Eine Anforderung an das resultierende Energieprognosemodell ist somit die Sicherstellung der Übertragbarkeit des Modells auf andere HS DED-LB-Fertigungssysteme. Daher muss die Erstellung des Prognosemodells so erfolgen, dass eine Anpassung auf andere Anlagen möglich ist, indem Charakteristika entsprechend im Modell integriert und angepasst werden können. Hierdurch wird die breite Nutzbarkeit des Modells sichergestellt.

**Anforderung 1.2: Das Modell muss den Einfluss unterschiedlicher Prozessparametereinstellungen auf den Energiebedarf abbilden**

Vorangegangene Untersuchungen verschiedener additiver Fertigungsverfahren zeigen, dass die Wahl der Prozessparameter und des Scanpfads einen signifikanten Einfluss auf die Höhe des Energiebedarfs haben [Ehms23b]. Somit entstehen für unterschiedliche Prozessgestaltungen stark divergierende Energiebedarfe. Daher wird an das resultierende Modell die Anforderung gestellt, den Einfluss der Prozessparametereinstellung und des gewählten Scanpfads auf den Energiebedarf abzubilden. Hierdurch wird zudem die Option der Analyse der Zusammensetzung des Energiebedarfs ermöglicht, der für spätere Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz essenziell ist.

**Anforderung 1.3: Das Modell muss eine Prognosequalität von mindestens 95 % aufweisen**

Um eine verlässliche, genaue und reproduzierbare Prognose des Energiebedarfs zu gewährleisten, darf der durch das Modell prognostizierte Energiebedarf nur begrenzt vom tatsächlichen Energiebedarf abweichen. Hierfür wird häufig eine maximale relative Abweichung zwischen gemessenem und prognostiziertem Energiebedarf von 5 % festgelegt [Zirn06]. Daher wird an das Modell die Anforderung einer Prognosequalität von 95 % gestellt. Um dies sicherzustellen und zu belegen wird die Prognosequalität des entwickelten Energiebedarfsprognosemodells mit drei Bauteilen überprüft. Hierbei wird jedes Bauteil lediglich ein Mal gefertigt, da die gewonnenen Erkenntnisse aus der experimentellen Untersuchung des Fertigungssystems gezeigt haben, dass bei der Messung des Energiebedarfs für gleiche Bauteile kaum Abweichungen zu verzeichnen sind, sodass von einer verlässlichen Datengrundlage ausgegangen werden kann.

An das Modell zur Prognose des GWP und des KEA, das neben dem HS DED-LB-Prozess die gesamte Prozesskette und somit auch die Rohmaterial- und Pulverherstellung sowie die Nachbearbeitung umfasst, werden die folgenden Anforderungen gestellt:

**Anforderung 2.1: Das Modell muss alle Prozessschritte zur Herstellung des Bauteils gleichwertig berücksichtigen**

Um repräsentative Ergebnisse des tatsächlichen KEA und GWP, die während der gesamten Herstellung eines Bauteils mit HS DED-LB entstehen, zu erhalten, müssen alle Prozessschritte von Cradle-to-Gate, also von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Bauteil betrachtet werden. Hierdurch kann eine umfassende Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der Bauteilfertigung mittels HS DED-LB erfolgen. Demnach wird an das Modell die Anforderung gestellt, alle Prozessschritte innerhalb der betrachteten Prozesskette gleichwertig zu berücksichtigen.

**Anforderung 2.2: Das Modell muss eine objektive Vergleichbarkeit verschiedener Inputflüsse gewährleisten**

Nicht nur der Bedarf an elektrischer Energie, sondern auch der Materialbedarf hat einen signifikanten Einfluss auf die Umweltauswirkungen des betrachteten Prozesses. Daher müssen für eine umfassende Betrachtung und Analyse beide Elementarflüsse im Modell berücksichtigt werden. Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Elementarflüsse zu gewährleisten, muss im Modell eine objektive Vergleichsbasis implementiert werden, auf deren Basis die anteiligen Energiebedarfe analysiert werden können.

### **Anforderung 2.3: Das Modell muss die Analyse der Zusammensetzung der Umweltauswirkungen ermöglichen**

Um nachfolgende Auswertungen und Interpretationen des Ergebnisses des KEA- und GWP-Prognosemodells zu ermöglichen, muss das Ergebnis möglichst detailliert sein. Dies erfordert die Zuordnung der Umweltauswirkungen hinsichtlich des Entstehungsorts und der Quantität zu den verschiedenen Prozessschritten und Systemeinheiten innerhalb des Modells. Dadurch wird die Grundlage für die spätere Entwicklung und Ausschöpfung von Optimierungspotenzialen geschaffen.

### **3.3 Aufbau der Arbeit**

Als zentrales Element für das Prognosemodell wird in Kapitel 4.1 ein Energieprognosemodell für das HS DED-LB-Verfahren entwickelt. Dieses Energieprognosemodell wird beispielhaft am additiven Fertigungssystem der *pE3D* der *ponticon GmbH*, die in Kapitel 4.1.1 näher beschrieben wird, entwickelt. Grundlage für das Modell bildet eine Analyse des HS DED-LB-Prozesses, indem zunächst einzelne Prozessabschnitte sowie die Energieflüsse identifiziert werden. Anschließend erfolgt eine Analyse des Einflusses der Prozessparameter und Scanpfadcharakteristika auf die Leistungsaufnahme. Aus diesen Erkenntnissen wird anschließend in Kapitel 4.1.5 das Modell zur Prognose des Energiebedarfs eines HS DED-LB-Fertigungsprozesses entwickelt. Dieses Modell wird anschließend in Kapitel 4.1.6 hinsichtlich seiner Prognosequalität und der Anforderungserfüllung validiert. Um eine Übertragung der Methode zur Erstellung eines Prognosemodells für den Energiebedarf auf andere additive Fertigungssysteme zu ermöglichen, wird das Vorgehen in Kapitel 4.2 generalisiert.

In Kapitel 5 erfolgt die Entwicklung des Modells zur Prognose des KEA und des GWP eines durch HS DED-LB gefertigten Bauteils. Die Modellentwicklung sowie der Ansatz werden in Kapitel 5.1.1 erläutert. Die Teilmodelle für die einzelnen Schritte der Prozesskette, die die Rohmaterialherstellung, die Pulverherstellung, den HS DED-LB-Prozess und die Nachbearbeitung der Bauteile sowie mögliche Transporte umfasst, sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. In Kapitel 5.2 wird das entwickelte Modell beispielhaft angewendet. Anschließend erfolgt am Ende des Kapitels die Diskussion und Einordnung der Ergebnisse sowie eine Prüfung der Erfüllung der an das Modell gestellten Anforderungen. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse sowie ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf. Eine Übersicht der Struktur der nachfolgenden Kapitel ist in Abbildung 3-1 gegeben.

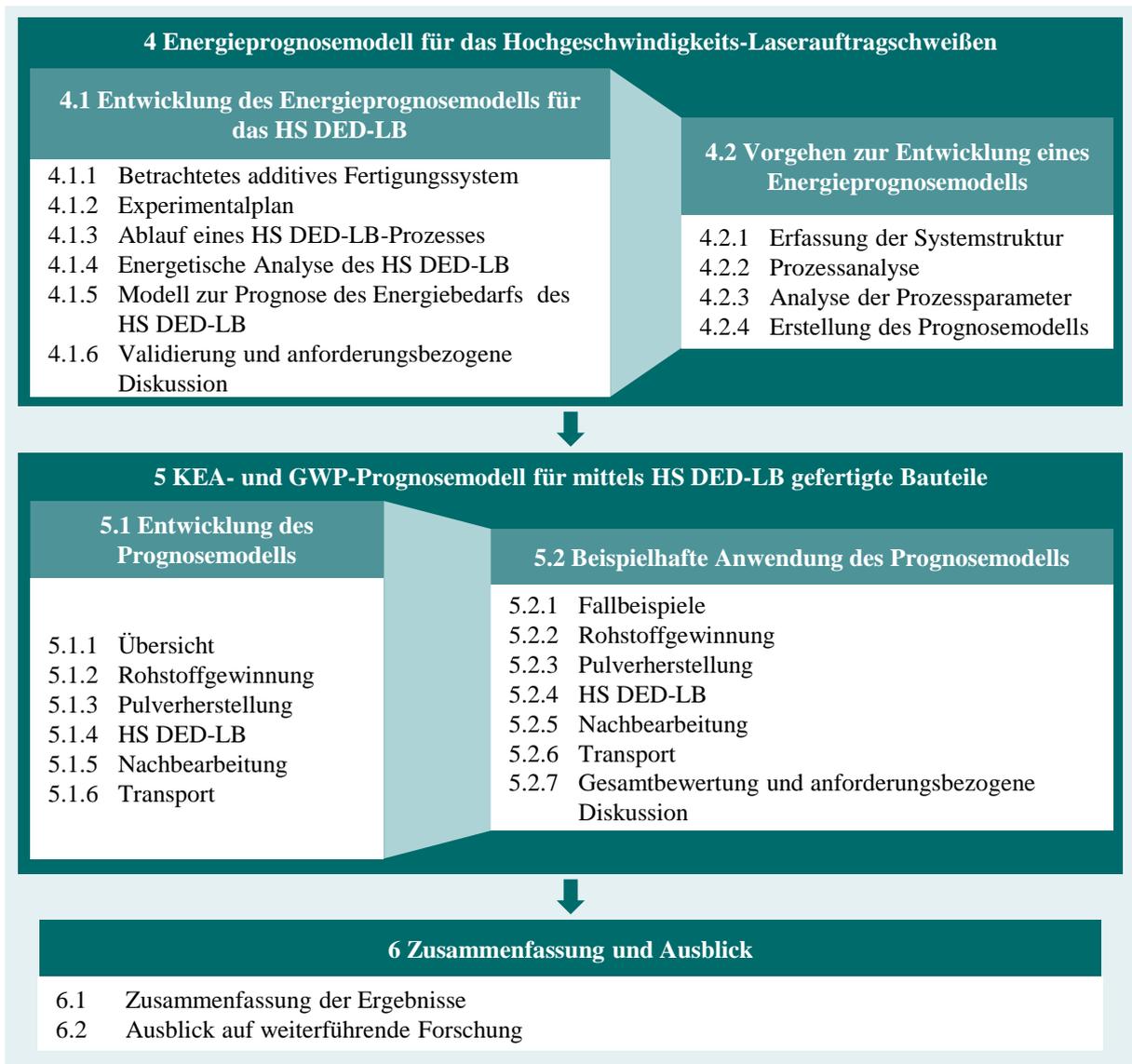


Abbildung 3-1: Übersicht über den Aufbau der Arbeit

## 4 Energieprognosemodell für das Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen

Um den Energiebedarf eines HS DED-LB-Prozesses bauteilindividuell ermittelbar zu machen, wird in diesem Kapitel ein entsprechendes Prognosemodell entwickelt. Dieses Vorgehen wird anschließend zur besseren Übertragung auf andere additive Fertigungssysteme abstrahiert.

### 4.1 Entwicklung des Energieprognosemodells für das HS DED-LB

Zur Entwicklung des Prognosemodells ist zunächst eine Analyse der Zusammensetzung und Einflussfaktoren des Energiebedarfs eines HS DED-LB-Prozesses notwendig. Hierfür wird anfangs das zu untersuchende Fertigungssystem vorgestellt sowie ein Versuchsplan entwickelt. Die daran anschließende Analyse des Energiebedarfs setzt sich zum einen aus der zeitlichen Analyse des Prozessablaufs sowie aus der Analyse der Leistungsaufnahme der individuellen Systemeinheiten zusammen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird anschließend das Energiebedarfsprognosemodell entwickelt. Das Modell wird abschließend anhand von drei Validierungsbauteilen hinsichtlich seiner Prognosequalität überprüft.

#### 4.1.1 Betrachtetes additives Fertigungssystem

Die Untersuchungen sowie die Erstellung des Modells erfolgen an dem im Folgenden vorgestellten additiven System. Als additives Fertigungssystem für das HS DED-LB wird die Anlage *pE3D* der *ponticon GmbH* verwendet. Zentrales Element ist eine bewegliche Bauplattform, auf der die Herstellung von Bauteilen im Bereich der 2,5D-Bearbeitung erfolgt. Diese kann von drei hochdynamischen Linearmotoren, deren Bewegung über ein Tripod-System auf die Bauplattform übertragen wird, in x-, y-, und z-Achsenrichtung bewegt werden. Dabei können Vorschubgeschwindigkeiten der Bauplattform von bis zu 200 m/min erreicht werden.

Der Laserstrahl zum Aufschmelzen des Pulvers wird vom Diodenlaser *LDF 8000-6* der *Laserline GmbH* generiert. Bei einer maximalen Nennleistungsaufnahme von 26.400 W generiert der Laser einen Laserstrahl mit einer angeforderten Leistung zwischen 504 W und 8.400 W, mit einer Wellenlänge zwischen 900 nm und 1.090 nm. Durch das Verfahren einer Linse in der Laseroptik kann der Laserspotdurchmesser zwischen 0,5 mm und 1,8 mm variiert werden.

Als Pulverförderer wird der *Twin-150-ARN216-OP* der *Oerlikon Metco AG* eingesetzt. Als Ausgangsmaterial wird Metallpulver verwendet, das in Behältern auf dem Pulverförderer gelagert wird. Innerhalb der Behälter befindet sich ein Rührer, der durch seine Drehbewegung von maximal 3.300 U/min einem Agglomerieren des Pulvers vorbeugt und dadurch eine homogene Pulverzufuhr sicherstellt. Das Pulver fällt vom Behälter in eine Nut auf der Förderscheibe. Innerhalb dieser Nut wird das Pulver zu der Stelle transportiert, von der aus der Trägergasstrom aus Schutzgas das Pulver zur Düse im Bauraum transportiert. Abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe, die bis zu 10 U/min betragen kann, wird eine definierte Menge Pulver pro Zeiteinheit zur Düse transportiert. Die Rotationsgeschwindigkeiten vom Rührer und der Förderscheibe können dabei unabhängig voneinander gewählt werden, jedoch kann die Förderscheibe nur gemeinsam mit dem Rührer betrieben werden.

Pulver, das während des Fertigungsprozesses nicht aufgetragen wird, wird vom Entstaubungssystem *Dustomat 4-24 W3 eco+ dry* der *ESTA Apparatebau GmbH & Co. KG* aus dem Bauraum extrahiert. Hierbei kann das abgesaugte Luftvolumen zwischen 770 m<sup>3</sup>/h und 2540 m<sup>3</sup>/h variiert werden. Innerhalb des zweistufigen Abscheidesystems werden größere Partikel

zunächst durch einen Prallabscheider und anschließend feine Partikel mithilfe von Filterpatronen aus der Luft abgeschieden. Die Filterpatronen werden nach Ausschalten des Entstaubungssystems durch zwölf Druckluftstöße von den Pulverpartikeln gereinigt. Das abgeschiedene Pulver wird in einer Staubsammelschublade gesammelt.

Das HS DED-LB-Fertigungssystem besteht somit aus vier Systemeinheiten, deren Betrieb durch Prozessparameter variabel gestaltet werden kann. Eine Übersicht der untersuchten Systemeinheiten, ihrer Prozessparameter und möglicher Einstellungen ist in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Übersicht der Systemeinheiten des untersuchten additiven Fertigungssystems mit ihren Prozessparametern und möglichen Einstellungen

Einheit	Prozessparameter		Minimale Einstellung	Maximale Einstellung
Lasereinheit	Laserleistung	$P_{L,set}$	504 W	8.400 W
	Laserspotdurchmesser	$d_L$	0,5 mm	1,8 mm
Antrieb der Bauplattform	Vorschubgeschwindigkeit	$v_A$	0 m/min	200 m/min
	Scanpfad	$G$	beliebig	
Pulverförderer	Rotationsgeschwindigkeit Rührer	$n_R$	0 U/min	3.300 U/min
	Rotationsgeschwindigkeit Förderscheibe	$n_F$	0 U/min	10 U/min
Entstaubungssystem	Absaugungsvolumen	$\dot{V}_{S,set}$	770 m <sup>3</sup> /h	2.540 m <sup>3</sup> /h

An der Stromzuleitung des additiven Fertigungssystems sowie an der für die Lasereinheit, des Entstaubungssystems und des Pulverförderers sind Stromwandlerklemmen der *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* installiert. Die jeweils aufgenommene Leistung wird mittels einer entsprechenden Klemme vom Typ *EL3453* mit einem 3-Kanal-Analogeingang ebenfalls von der *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* mit einer Abtastfrequenz von 1.000 Hz erfasst. Hierbei sind die folgenden Stromwandlerklemmen verbaut:

- ❑ Gesamt: SCT3215-0150 (3x 150/5A)
- ❑ Lasereinheit: SCT1111-0060 (60/1A)
- ❑ Entstaubungssystem: SCT1111-0032 (32/1A)
- ❑ Pulverförderer: SCT0111-0002 (2,5/1A)

Die Steuerung der Leistungsmessung erfolgt hierbei durch Befehle im Geometrie-Code (G-Code). Hierdurch kann die Leistungsmessung zeitgleich mit Beginn des Fertigungsprozesses gestartet und beendet werden. Um das notwendige Verständnis der Einflussfaktoren und Zusammenhänge der Leistungsaufnahme während eines Fertigungsprozesses zur Modellbildung aufzubauen, werden nachfolgend entsprechende Experimente geplant und durchgeführt.

#### 4.1.2 Experimentalplan

Zur Erstellung eines Modells zur Prognose des Energiebedarfs müssen die folgenden Punkte experimentell untersucht werden:

- ❑ Es wird untersucht, wie sich die Leistungsaufnahme während eines Fertigungsprozesses verhält. Hierbei wird ermittelt, ob bspw. eine konstante oder eine regelmäßig oder unregelmäßig fluktuierende Leistungsaufnahme erfolgt. Zudem werden anhand charakteristischer Verhaltensweisen der Systemeinheiten potenzielle Prozessabschnitte identifiziert, die eine Unterteilung des Prozesses in verschiedene Stufen ermöglicht.

- Es wird ermittelt, welche Prozessparameter die Leistungsaufnahme ihrer Systemeinheit beeinflussen, wie stark dieser Einfluss ist und ob Interaktionseffekte mit anderen Prozessparametern vorliegen.
- Es wird quantifiziert, wie sich die Leistungsaufnahme der Systemeinheit bei unterschiedlichen Einstellungen der Prozessparameter verhält.

Die Analyse erfolgt anhand eines mehrstufigen Experimentalplans. In den anfänglichen Versuchen werden zunächst erste Bauteile gefertigt und hierdurch das additive Fertigungssystem initial analysiert. Ziel dabei ist die Untersuchung des jeweiligen Verhaltens derjenigen Systemeinheiten des additiven Fertigungssystems, die während eines Fertigungsprozesses Energieflüsse aufweisen. Anhand charakteristischer Betriebszustände der Systemeinheiten können hierdurch Prozessstufen differenziert werden.

In daran anschließenden vollfaktoriellen Versuchsreihen anhand einer statistischen Versuchsplanung wird der Einfluss der Prozessparameter auf die Leistungsaufnahme untersucht. Hierbei werden die Einheiten des additiven Fertigungssystems und die entsprechenden Prozessparameter individuell analysiert. Dadurch kann festgestellt werden, welche Prozessparameter sich auf die Leistungsaufnahme der Systemeinheit auswirken, wie stark dieser Einfluss ist und welche Interaktionseffekte mit anderen Prozessparametern bestehen. Da das Entstaubungssystem lediglich einen einstellbaren Prozessparameter aufweist, wird es in dieser Stufe nicht betrachtet. Die Einstellungen der jeweiligen Prozessparameter können Tabelle 4-2 entnommen werden. Zur statistischen Validität werden alle Versuche in einer randomisierten Reihenfolge und mindestens drei Mal durchgeführt. Zur Reduktion von externen Störfaktoren erfolgt die Zusammenfassung der Versuche in Blöcken.

Tabelle 4-2: Prozessparametervariation der vollfaktoriellen Versuchsreihe

Einheit	Prozessparameter		Variationslevel	
			-1	1
Lasereinheit	Laserleistung	$P_{L,set}$	504 W	3600 W
	Laserspotdurchmesser	$d_L$	0,5 mm	1,8 mm
Antrieb der Bauplatzform	Vorschubgeschwindigkeit	$v_A$	20 m/min	100 m/min
	Scanpfad	$G$	Kreis	Quadrat
Pulverförderer	Rotationsgeschwindigkeit Rührer	$n_R$	660 U/min	2.640 U/min
	Rotationsgeschwindigkeit Förderscheibe	$n_F$	2 U/min	8 U/min

In der dritten Stufe wird für diejenigen Prozessparameter, die einen signifikanten Einfluss auf die aufgenommene Leistung aufweisen, die jeweilige Einstellung stufenweise von der minimalen bis zur maximalen Einstellung variiert, während andere Prozessparameter auf null oder konstant gehalten werden. Somit kann die aufgenommene Leistung bei unterschiedlichen Einstellungen des Prozessparameters bestimmt werden. Zur Untersuchung der Leistungsaufnahme bei variierender Laserleistung wird die angeforderte Laserleistung stufenweise um 5 % erhöht und hierbei der Laserstrahl für jeweils 0,5 s zugeschaltet. Um verschiedene Scanpfade abzubilden und hierbei die Auswirkungen unterschiedlicher Geschwindigkeiten zu untersuchen, wird die Form eines Kreises mit einem Radius von 275 mm und eines Quadrats mit einer Seitenlänge von 400 mm gewählt. Aus anlagentechnischen Gründen kann jedoch der quadratischen Scanpfad nicht bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min bewegt werden. Daher wird hier eine Maximalgeschwindigkeit von 100 m/min festgelegt, der sich durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit in Schritten von 10 m/min angenähert wird. Es werden

hierbei jeweils fünf Lagen, d. h. fünf vollständige Quadrate abgefahren. Für den kreisförmigen Scanpfad erfolgt eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit in Schritten von 20 m/min bis zur maximalen Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min. Hierbei werden zwischen fünf und zehn Lagen gefertigt, da bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ein sukzessives Beschleunigen auf die Maximalgeschwindigkeit empfohlen wird und hierdurch sichergestellt werden kann, dass mindestens fünf Lagen mit der geforderten Geschwindigkeit abgefahren werden. Die Rotationsgeschwindigkeiten des Rührers sowie der Förderscheibe des Pulverförderers werden ebenfalls schrittweise um je 10 % bis zu ihrer maximalen Rotationsgeschwindigkeit erhöht. Aus Gründen der Prozessstabilität kann die Förderscheibe nur gemeinsam mit dem Rührer betrieben werden. Daher wird die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers für die Untersuchungen der Leistungsaufnahme der Förderscheibe konstant bei 1848 U/min gehalten. Der Betrieb der Förderscheibe erfolgt jeweils zwischen 20 s und 30 s. Das Entstaubungssystem wird jeweils eine Minute lang betrieben. Hierbei wird es zu Beginn angeschaltet und auf das gewünschte Absaugungsvolumen eingestellt und nach 45 s abgeschaltet. Die Einstellungen der untersuchten Prozessparameter sind in Anhang A Tabelle 8-1 in zusammengefasst. Zur Erhöhung der statistischen Signifikanz werden auch hier die einzelnen Versuchspunkte insgesamt drei Mal durchgeführt, die Versuche in Blöcken zusammengefasst sowie die Reihenfolge hierbei zufällig gewählt und variiert.

#### 4.1.3 Ablauf eines HS DED-LB-Prozesses

In initialen Versuchen wird der additive Fertigungsprozess des HS DED-LB analysiert und hierbei in Prozessstufen unterteilt. Der Energiebedarf eines Fertigungsprozesses wird durch die über die Dauer des Prozesses aufgenommene Leistung bestimmt. Zur Untersuchung des Energiebedarfs ist somit zunächst eine Analyse des Fertigungsprozesses und in ihm inkludierter Prozessschritte notwendig. Dies kann durch initiale Experimente erfolgen, in denen während der Fertigung eines oder mehrerer Bauteile der Prozessablauf, d. h. das Zu- und Abschalten der individuellen Systeme des Fertigungssystems beobachtet wird. Darauf basierend kann der Prozess zur Fertigung eines Bauteils mit HS DED-LB in mehrere Prozessschritte unterteilt werden, die in Abbildung 4-1 abgebildet sind.

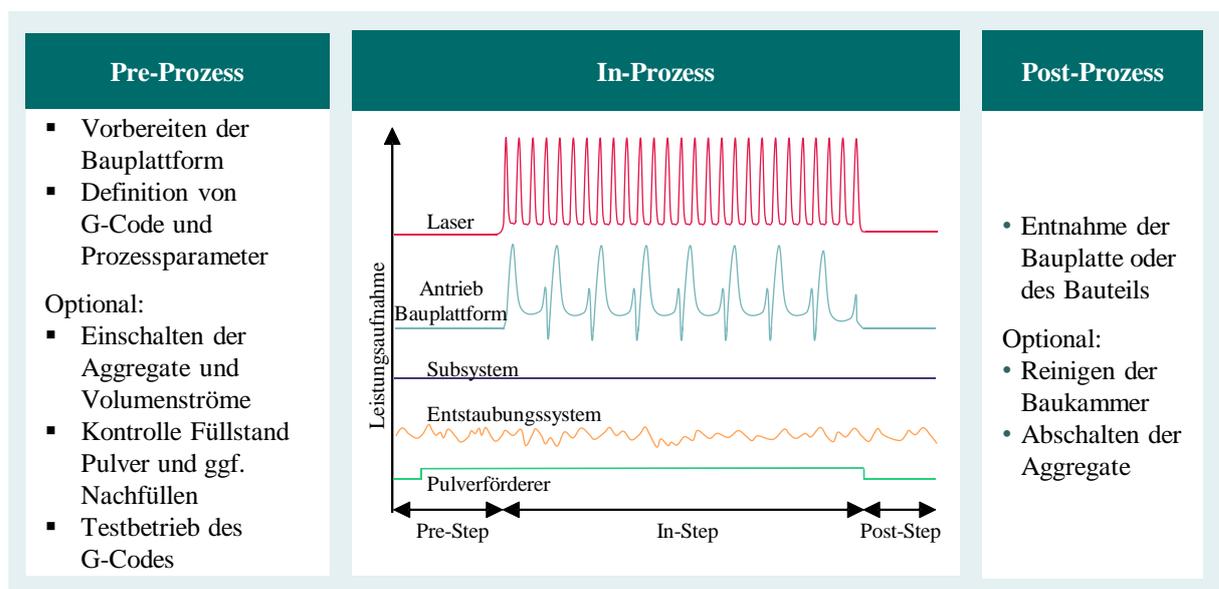


Abbildung 4-1: Übersicht eines Bauzyklus des HS DED-LB-Prozesses

Vor Beginn des eigentlichen Fertigungsprozesses erfolgt der *Pre-Prozess*, der die Vorbereitung des Fertigungsprozesses umfasst. Hier werden, falls zuvor noch nicht geschehen, zunächst die einzelnen Aggregate eingeschaltet, sodass sie sich im Stand-by-Modus befinden, und entsprechend vorbereitet, indem bspw. der Füllstand des Pulvers im Behälter des Pulverförderers kontrolliert und gegebenenfalls Pulver nachgefüllt wird. Auf die Bauplattform wird anschließend eine Bauplatte oder ein Bauteil, das weiterbearbeitet werden soll, befestigt. Zur weiteren Vorbereitung des Fertigungsprozesses wird ein G-Code, der die Anweisungen zur Maschinensteuerung während des Fertigungsprozesses enthält, formuliert oder ein bestehender in die Software des additiven Fertigungssystems geladen und die geplanten Prozessparameter definiert. Zur Überprüfung des Scanpfades des G-Codes, also des Weges der beweglichen Bauplattform, kann der Scanpfad vor der Ausführung des Fertigungsprozesses im Testbetrieb abgefahren werden. Innerhalb des Testbetriebs werden lediglich die Befehle zur Bewegung der Bauplattform ausgeführt, wobei zunächst meist eine wesentlich langsamere Vorschubgeschwindigkeit als die im Prozess geplante eingestellt wird. Somit kann der programmierte G-Code auf Richtigkeit überprüft und eine Kollision des Tripod-Systems oder der Bauplattform mit der Düse vermieden werden. Nach erfolgreichem Testbetrieb ist der Pre-Prozess abgeschlossen und die Fertigung des Bauteils kann beginnen. Da das Entstaubungssystem nicht über den G-Code angesteuert wird, wird es, falls vorher noch nicht geschehen, angeschaltet und das gewünschte Absaugungsvolumen eingestellt.

Der darauffolgende *In-Prozess* umfasst die Fertigung des Bauteils basierend auf den im Pre-Prozess definierten Prozessparametern und G-Code. Der In-Prozess kann wiederum in Anlehnung an Yi et al. in die folgenden drei Prozessstufen unterteilt werden [Ehms23a, Yi21a]:

Zu Beginn des Fertigungsprozesses, dem *Pre-Step*, verfährt zunächst der Kollimator in der Laseroptik und stellt den definierten Laserspotdurchmesser ein. Anschließend werden die beiden Schutzgasvolumenströme, der Trägergasstrom und der Schutzgasstrom, eingeschaltet und dann einige Sekunden gewartet, bis das definierte Volumen homogen aufgebaut wurde. Die Länge hierfür wird anhand von Erfahrungswerten festgelegt und in den Prozessparametern im G-Code definiert. Sie beträgt i. d. R. 3 s. Danach werden der Rührer und die Förderscheibe des Pulverförderers zugeschaltet, sodass nun Pulver durch den Trägergasstrom zur Düse in der Baukammer transportiert wird. Es wird wieder einige Sekunden gewartet, i. d. R. zwischen 10 s und 20 s, bis sich ein homogener Pulverkegel unterhalb der Düse aufgebaut hat. Auch diese Wartezeit wird anlagenspezifisch nach Erfahrungswerten festgelegt, die auf der Sichtbarkeit eines homogenen Pulverkegels beruhen. Die Wartezeiten werden gemeinsam mit den Rotationsgeschwindigkeiten des Rührers und der Förderscheibe sowie die Volumenströme des Trägergasstroms und des Schutzgasstroms in den Prozessparametern des G-Codes definiert. Während des Pre-Steps sind die Motoren zur Bewegung der Bauplattform sowie die Lasereinheit im Stand-by-Modus. Das Entstaubungssystem wurde bereits vor Prozessbeginn manuell eingeschaltet und auf das gewünschte Absaugungsvolumen eingestellt.

Während des *In-Steps* findet der eigentliche Fertigungsprozess statt, d. h. das Bauteil wird in diesem Zeitraum additiv gefertigt. Die Bauplattform wird mit einer in den Prozessparametern definierten Geschwindigkeit durch das Tripod-System und die drei zugehörigen Antriebe bewegt, die die Bauplattform entlang des Scanpfades abwechselnd beschleunigen, die Geschwindigkeit halten und abbremsen. Um ein homogenes Bauteil zu erhalten, muss die Vorschubgeschwindigkeit der Bauplattform während des Materialauftrags konstant gehalten werden. Vor

und nach Richtungsänderungen sind jedoch Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge notwendig, die zusätzliche Scanfadabschnitte bedingen, bei denen kein Material aufgetragen wird. Somit erfolgt abhängig vom Bauteil und vom programmierten Scanfad kein kontinuierlicher Materialauftrag. Im G-Code befindet sich ebenfalls die Steuerung der Lasereinheit, sodass der Laserstrahl nur an denjenigen Stellen, an denen das Material aufgetragen werden soll, entsprechend der in den Prozessparametern definierten Laserleistung zugeschaltet wird. In den Zeiten des Fertigungsprozesses, in denen kein Materialauftrag erfolgt, befindet sich die Lasereinheit im Bereithaltemodus. Dieser Modus zeichnet sich durch eine Leistungsaufnahme aus, die leicht über der Leistungsaufnahme des Stand-by liegt. Dieser Modus ermöglicht eine schnelle Umschaltung des Laserstrahls und somit einen positionsgenauen Materialauftrag. Somit sind alle Aggregate des additiven Fertigungssystems während des In-Steps in Betrieb.

Unmittelbar nach Beendigung des Fertigungsprozesses, im *Post-Step*, werden die Lasereinheit und der Pulverförderer auf Stand-by-Modus geschaltet. Auch die Bauplattform steht still, nachdem sie optional mit langsamer Geschwindigkeit in eine vorher definierte Position zur besseren Bauteilentnahme gefahren ist. Vor Prozessende wird einige wenige Sekunden gewartet, bis die Bauplattform zum Stillstand gekommen ist und sich der Pulverkegel und die Schutzgasvolumenströme vollständig abgebaut haben. Die Dauer des Post-Steps umfasst nur wenige Sekunden, die in den Prozessparametern individuell festgelegt wird. Die Baukammer kann nachfolgend geöffnet und betreten werden.

Nach Beendigung des Fertigungsprozesses schließt sich der *Post-Prozess* an. Hier wird die Bauplatte mit dem Bauteil entnommen und gegebenenfalls ein neuer Bauzyklus gestartet. Optional, z. B. am Tagesende der Nutzung des additiven Fertigungssystems, erfolgt eine Reinigung der Baukammer von nicht aufgetragenem Pulver bspw. mit einem Pinsel oder Handbesen und einem Industriesauger. Anschließend werden die Aggregate ausgeschaltet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Entstaubungssystem kontinuierlich während des gesamten In-Prozesses in Betrieb ist. Der Pulverförderer wird mit Beginn des In-Prozesses eingeschaltet und fördert kontinuierlich während des Pre-Steps und des In-Steps Pulver zum Trägergasvolumenstrom. Die Lasereinheit sowie die Antriebe zur Bewegung der Bauplattform sind dagegen lediglich während des In-Steps in Betrieb. Ihre Leistungskurven zeigen bei initialen Experimenten eine hohe Variabilität, da die Zuschaltung des Laserstrahls sowie die Bauplattformbewegung abhängig vom gewählten Scanfad und somit von der individuellen Bauteilgeometrie sind. Diese Abhängigkeiten und Einflussfaktoren werden nachfolgend näher untersucht.

#### **4.1.4 Energetische Analyse des HS DED-LB**

Im Folgenden werden die zuvor geplanten vollfaktoriellen Versuchsreihen sowie die Analyse des Einflusses der Prozessparameter durchgeführt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse und Daten dienen als Grundlage für das spätere Modell zur Energiebedarfsprognose.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Teile dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ehms23b] veröffentlicht.

#### 4.1.4.1 Energetische Analyse der Lasereinheit

Der Laserstrahl wird in der Lasereinheit generiert. Hierfür wird die Lasereinheit im Pre-Prozess angeschaltet und befindet sich anschließend im Stand-by-Modus. In Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 sind die einzelnen Prozessstufen des Bauzyklus des In-Prozesses erkennbar. Während des Pre-Steps und des Post-Steps ist die Lasereinheit im *Stand-by-Modus* und die Leistungsaufnahme ist hier annähernd konstant. Während des In-Steps wird nach Bedarf der Laserstrahl angefordert, wodurch die Lasereinheit in ihren *Betriebszustand* schaltet. Die Dauer der Anforderung des Laserstrahls ist hierbei abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit sowie vom Scanpfad und somit von der Bauteilgeometrie. Bei einer ausreichend langen Anforderung des Laserstrahls erreicht die Lasereinheit eine annähernd konstante Leistungsaufnahme, wie in Abbildung 4-2 erkennbar. Hier ist auch ein pendelartiger Ausschlag der Leistungskurve direkt nach dem Erreichen der geforderten Laserleistung erkennbar.

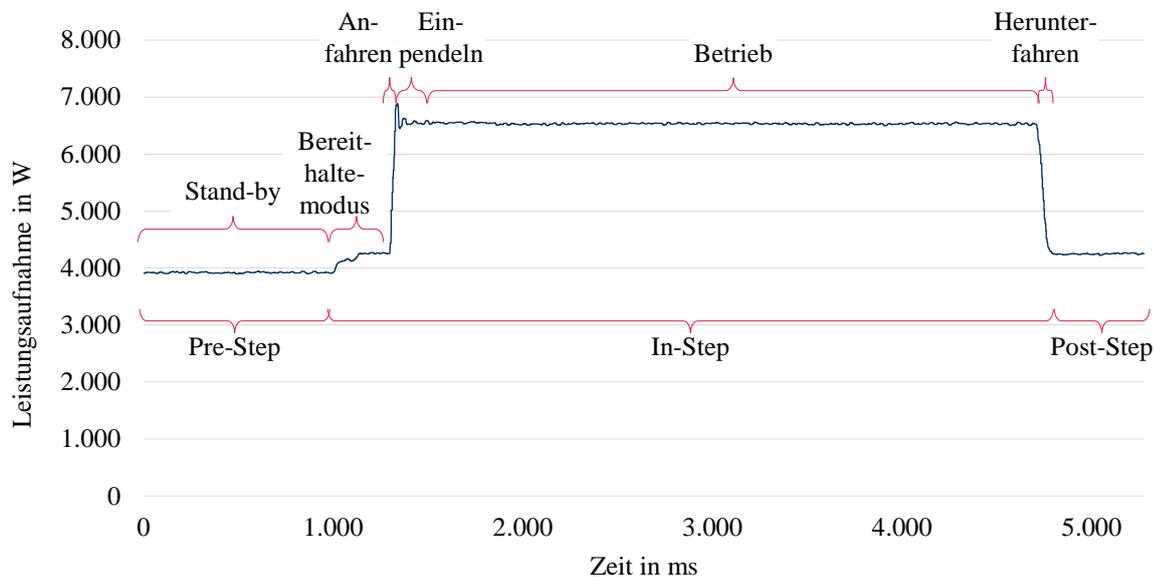


Abbildung 4-2: Beispielhafte Leistungskurve der Lasereinheit bei einer Laserleistung  $P_{L,set}$  von 600 W und einem Laserspotdurchmesser  $d_L$  von 0,6 mm bei einem kontinuierlichen Anfordern des Laserstrahls

Wird der Laserstrahl jedoch nur kurzzeitig, impulsartig zugeschaltet, kann dies dazu führen, dass das Niveau der konstanten Leistungsaufnahme der Lasereinheit nicht erreicht wird. Die resultierende Leistungskurve weist somit Leistungsspitzen auf, die jedoch meist unterhalb der Leistungsaufnahme einer längeren Laserstrahlanforderung liegen, wie in Abbildung 4-3 erkennbar. In den Zeiten, in denen der Laserstrahl während des In-Steps nicht angefordert wird, befindet sich die Lasereinheit im *Bereithaltemodus*. Dieser Modus wird automatisch vor dem Anfordern des Laserstrahls wie in Abbildung 4-2 erkennbar oder zwischen einzelnen Laserimpulsen wie in Abbildung 4-3 erkennbar, eingestellt und ermöglicht das reaktionsschnelle Zu- und Wegschalten des Laserstrahls zum positionsgenauen Materialauftrag. Die Leistungsaufnahme für den Bereithaltemodus ist höher als die während des Stand-by-Modus, jedoch niedriger als bei einer Anforderung des Laserstrahls. Während des Bereithaltemodus kann die Leistungsaufnahme annähernd konstant sein, wie in Abbildung 4-2 vor dem Anfordern des Laserstrahls. Jedoch ist in Abbildung 4-3 zwischen den Laserimpulsen eine eher variable Leistungsaufnahme erkennbar. Die Variation folgt in diesem Fall einem sich wiederholendem Muster, sodass zur Annäherung auch hier eine Konstante angenommen werden kann.

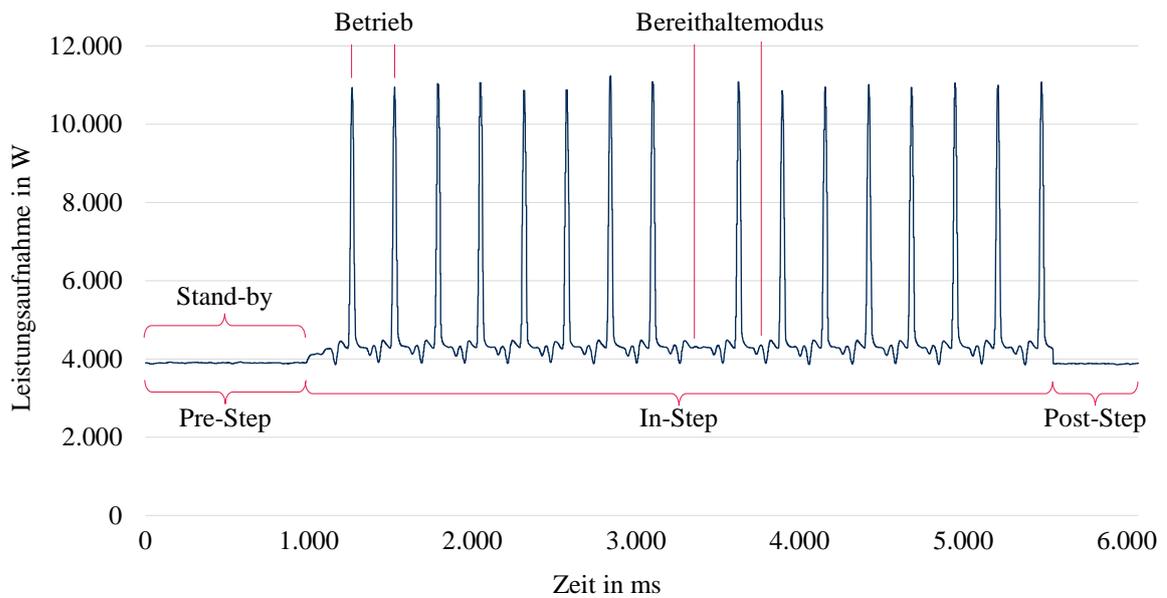


Abbildung 4-3: Beispielhafte Leistungskurve der Lasereinheit bei einer Laserleistung  $P_{L,set}$  von 2.600 W und einem Laserspotdurchmesser  $d_L$  von 1,8 mm bei einem impulsartigen Anfordern des Laserstrahls

Innerhalb der vollfaktoriellen Untersuchungen der Lasereinheit wurde die angeforderte *Laserleistung*  $P_{L,set}$  zwischen der minimalen Laserleistung von 504 W ( $P_{L,set} = -1$ ) und einer mittleren Laserleistung von 3.600 W ( $P_{L,set} = 1$ ) sowie der *Laserspotdurchmesser*  $d_L$  zwischen der minimalen Einstellung von 0,5 mm ( $d_L = -1$ ) und der maximalen Einstellung von 1,8 mm ( $d_L = 1$ ) variiert. In den resultierenden Leistungskurven, die in Abbildung 4-4 dargestellt sind, ist der zuvor beschriebene Ablauf erkennbar.

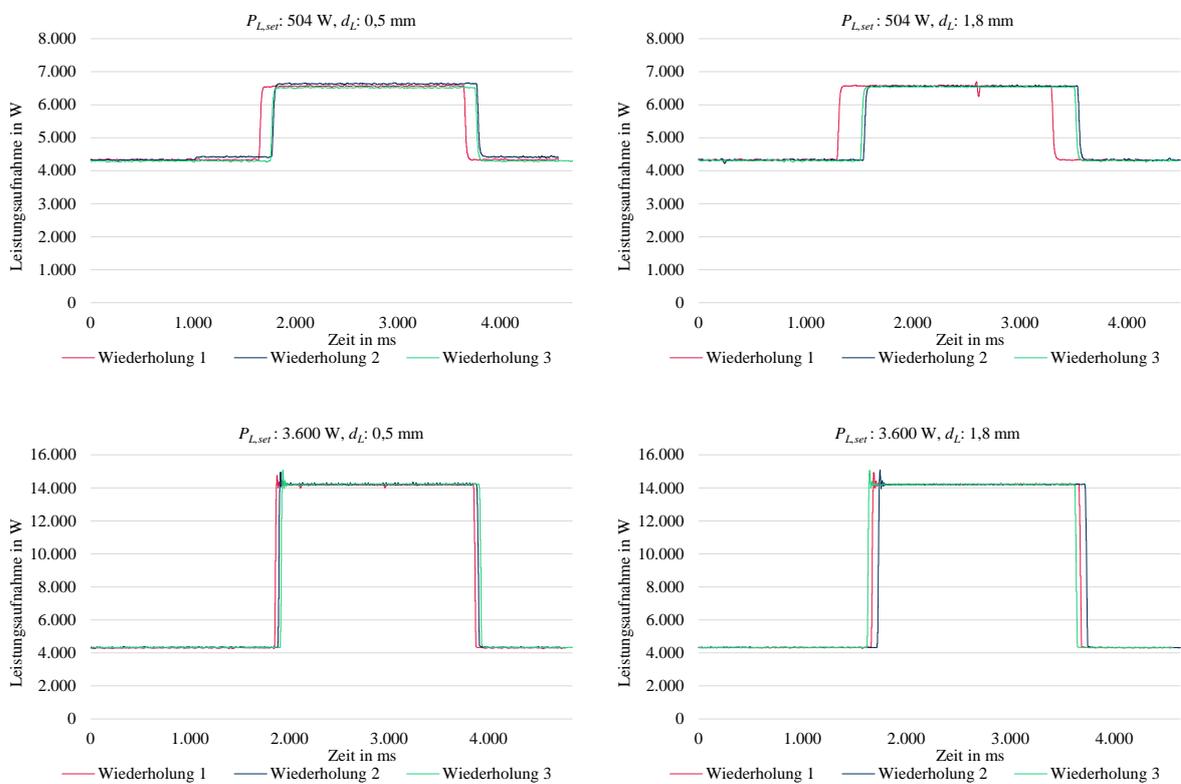


Abbildung 4-4: Leistungskurven der vollfaktoriellen Versuchsreihe der Lasereinheit unter Variation der Laserleistung  $P_{L,set}$  und des Laserspotdurchmessers  $d_L$

Zunächst befindet sich die Lasereinheit im Bereithaltenmodus, ehe die Leistungsaufnahme aufgrund der Anforderung des Laserstrahls innerhalb weniger Millisekunden auf ein konstantes Leistungsniveau ansteigt. Hier ist in den Leistungskurven bei einer Laserleistung von 3.600 W ein Einpendeln der Laserleistung auf das geforderte Niveau deutlich erkennbar, wie bereits für Abbildung 4-2 beschrieben.

Die mittleren Leistungsaufnahmen für die individuellen Abschnitte des Anfahrens, des Betriebs, d. h. das Einpendeln und Halten der konstanten Leistungsaufnahme, und des Herunterfahrens sowie für den gesamten Zyklus sind in Tabelle 4-3 aufgeführt.

Tabelle 4-3: Mittlere Leistungsaufnahmen der vollfaktoriellen Versuchsreihe der Lasereinheit

$P_{L,set}$	$d_L$	$P_{L,set}d_L$	I	II	III	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung
<b>Gesamt</b>							
-1	-1	+1	6.467,23 W	6.589,63 W	6.463,58 W	6.506,82 W	58,58
-1	+1	-1	6.498,47 W	6.481,63 W	6.487,54 W	6.489,22 W	6,98
+1	-1	-1	13.963,95 W	13.983,10 W	13.870,55 W	13.939,20 W	49,17
+1	+1	+1	13.935,58 W	13.922,36 W	14.043,86 W	13.967,27 W	54,43
<b>P-Wert</b>			$P_{L,set}: 1,76 \cdot 10^{-16}$		$d_L: 0,88$	$P_{L,set}d_L: 0,51$	
<b>Stand-by-Modus</b>							
-1	-1	+1	4.329,55 W	4.328,76 W	4.306,69 W	4.321,67 W	10,60
-1	+1	-1	4.330,60 W	4.367,78 W	4.293,30 W	4.330,56 W	30,41
+1	-1	-1	4.328,19 W	4.326,55 W	4.324,47 W	4.326,40 W	1,52
+1	+1	+1	4.302,56 W	4.337,31 W	4.324,30 W	4.321,39 W	14,34
<b>P-Wert</b>			$P_{L,set}: 0,86$		$d_L: 0,88$	$P_{L,set}d_L: 0,59$	
<b>Anfahren</b>							
-1	-1	+1	5.519,67 W	6.187,62 W	5.724,10 W	5.810,46 W	279,44
-1	+1	-1	5.800,20 W	5.628,63 W	5.682,90 W	5.703,91 W	71,60
+1	-1	-1	12.044,32 W	12.790,02 W	12.111,61 W	12.315,32 W	336,79
+1	+1	+1	12.113,47 W	11.265,40 W	12.218,12 W	11.865,67 W	426,59
<b>P-Wert</b>			$P_{L,set}: 2,10 \cdot 10^{-9}$		$d_L: 0,24$	$P_{L,set}d_L: 0,45$	
<b>Betrieb</b>							
-1	-1	+1	6.566,65 W	6.634,22 W	6.516,39 W	6.572,42 W	48,28
-1	+1	-1	6.567,44 W	6.561,47 W	6.539,72 W	6.556,21 W	11,91
+1	-1	-1	14.180,07 W	14.228,53 W	14.217,09 W	14.208,57 W	20,68
+1	+1	+1	14.217,11 W	14.213,71 W	14.214,24 W	14.215,02 W	1,49
<b>P-Wert</b>			$P_{L,set}: 1,66 \cdot 10^{-18}$		$d_L: 0,80$	$P_{L,set}d_L: 0,57$	
<b>Herunterfahren</b>							
-1	-1	+1	4.783,88 W	5.376,03 W	5.139,44 W	5.099,78 W	243,36
-1	+1	-1	4.950,24 W	4.873,27 W	5.121,90 W	4.981,80 W	103,93
+1	-1	-1	8.933,19 W	9.004,66 W	6.231,06 W	8.056,31 W	1.290,97
+1	+1	+1	7.006,57 W	7.410,64 W	8.487,14 W	7.634,78 W	624,87
<b>P-Wert</b>			$P_{L,set}: 6,16 \cdot 10^{-4}$		$d_L: 0,61$	$P_{L,set}d_L: 0,78$	

Wenn der Laserspotdurchmesser  $d_L$  und die eingestellte Laserleistung  $P_{L,set}$  auf ihrer minimalen Einstellung sind, beträgt die mittlere Leistungsaufnahme des gesamten Zyklus durchschnittlich 6.506,8 W. Wird der Laserspotdurchmesser auf 1,8 mm erhöht, so beträgt die mittlere Leistungsaufnahme 6.489,2 W und ist somit durchschnittlich 17,6 W geringer. Ein deutlicher Sprung der mittleren Leistungsaufnahme ist mit der Erhöhung der eingestellten Laserleistung auf 3.600 W zu verzeichnen. Jedoch ist hier die mittlere Leistungsaufnahme bei einem

Laserspotdurchmesser von 0,5 mm mit 13.939,2 W um durchschnittlich 28,1 W höher als die bei einem Laserspotdurchmesser von 1,8 mm mit 13967,3 W. Die statistische Auswertung zeigt, dass mit einem P-Wert von  $1,76 \cdot 10^{-16}$  lediglich die eingestellte Laserleistung einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme der Lasereinheit hat. Für den Laserspotdurchmesser ergibt sich ein P-Wert von 0,88, sodass die Hypothese eines Einflusses dieses Prozessparameters abgelehnt werden kann. Der Laserspotdurchmesser wird durch das Verfahren einer Linse in der Laseroptik während des Pre-Steps eingestellt. Die Leistungsaufnahme hierfür zeigt sich als so gering, dass kein detektierbarer Ausschlag in der Leistungsmessung identifiziert werden kann. Zudem ist keine signifikante Wechselwirkung der eingestellten Laserleistung und des Laserspotdurchmessers mit Einfluss auf die mittlere Leistungsaufnahme aufgrund eines P-Werts von 0,51 erkennbar, was ebenfalls in den parallelen Verläufen im Haupteffektdiagramm in Abbildung 4-5 deutlich wird.

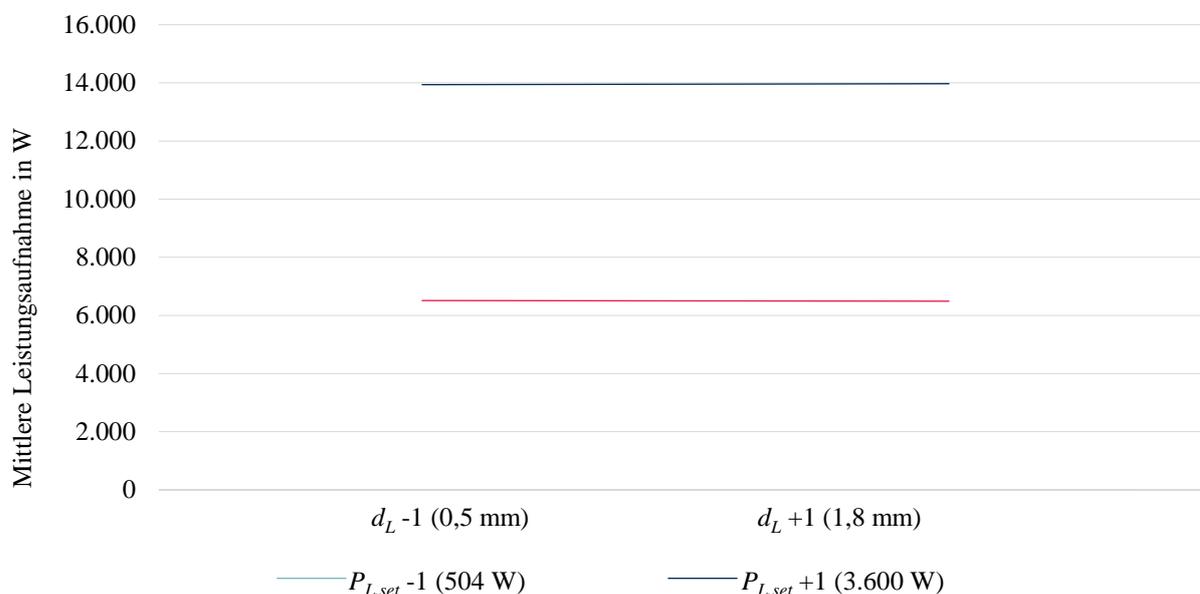


Abbildung 4-5: Haupteffektdiagramm der Leistungsaufnahme der Lasereinheit in Abhängigkeit von der Laserleistung  $P_{L,set}$  und vom Laserspotdurchmesser  $d_L$

Auch bei einer Analyse des Einpendelns, des Anfahrens sowie des Herunterfahrens bei einer Anforderung des Laserstrahls zeigt sich das gleiche Ergebnis, bei dem lediglich die gewählte Laserleistung einen Einfluss auf die mittlere Leistungsaufnahme der Lasereinheit aufweist. Die Leistungsaufnahme während des Stand-by-Modus oder des Bereithaltemodus wird von keinem der variablen Prozessparameter beeinflusst.

Für die Analyse der Leistungsaufnahme bei einer steigenden definierten Laserleistung wurden die Messwerte in das Anfahren, das Einpendeln, das Halten der Leistung sowie das Herunterfahren unterteilt und getrennt analysiert. Zudem wurden die mittleren Leistungsaufnahmen für die Modi „Stand-by“ und „Bereit“ ermittelt. Die Ergebnisse sind in Anhang B in Tabelle 8-2 zusammengefasst.

Das Anfahren, d. h. bis der Laserstrahl die eingestellte Laserleistung erreicht, benötigt durchschnittlich zwischen 16 ms und 67 ms, wobei die eingestellte Laserleistung schneller erreicht wird, je höher sie ist. Die mittlere Leistungsaufnahme steigt dabei mit zunehmender eingestellter Laserleistung an, wie in Anhang B in Abbildung 8-1 gezeigt. Die Zunahme der mittleren

Leistungsaufnahme mit steigender eingestellter Laserleistung kann hierbei linear angenähert werden.

Ist die eingestellte Laserleistung erreicht, nähert sich die aufgenommene Leistung pendelartig einer nahezu konstanten Leistungsaufnahme an. Das Einpendeln tritt i. d. R. erst bei einer eingestellten Laserleistung größer als 1.260 W auf. Das Einpendeln der Leistungsaufnahme hält zwischen 38 ms und 83,67 ms an. Hierbei ist tendenziell eine leichte Zunahme der Dauer mit steigender eingestellter Laserleistung erkennbar, die jedoch starken Schwankungen unterliegt. Die mittlere Leistungsaufnahme ist hierbei durchschnittlich 2 % höher als die mittlere Leistungsaufnahme für das Halten der Laserleistung. Die mittleren Leistungsaufnahmen des Einpendelns bei einer Anforderung des Laserstrahls sind in Anhang B in Abbildung 8-2 abgebildet.

Wie in Abbildung 4-6 erkennbar, steigt beim Halten der Leistung kontinuierlich die mittlere aufgenommene Leistung durchschnittlich um 1.122,24 W je 5 % Erhöhung der eingestellten Laserleistung. Der Wirkungsgrad der Laserstrahlquelle steigt dabei mit zunehmender eingestellter Laserleistung konstant an. Zur Annäherung der mittleren Leistungsaufnahme für das Halten der Leistung kann trotz einer leicht variierenden Zunahme der Leistungsaufnahme eine lineare Steigung angenommen werden. Die Dauer der Anforderung für das Halten der Leistung wird durch den Scanpfad und die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt und ist somit bauteilindividuell.

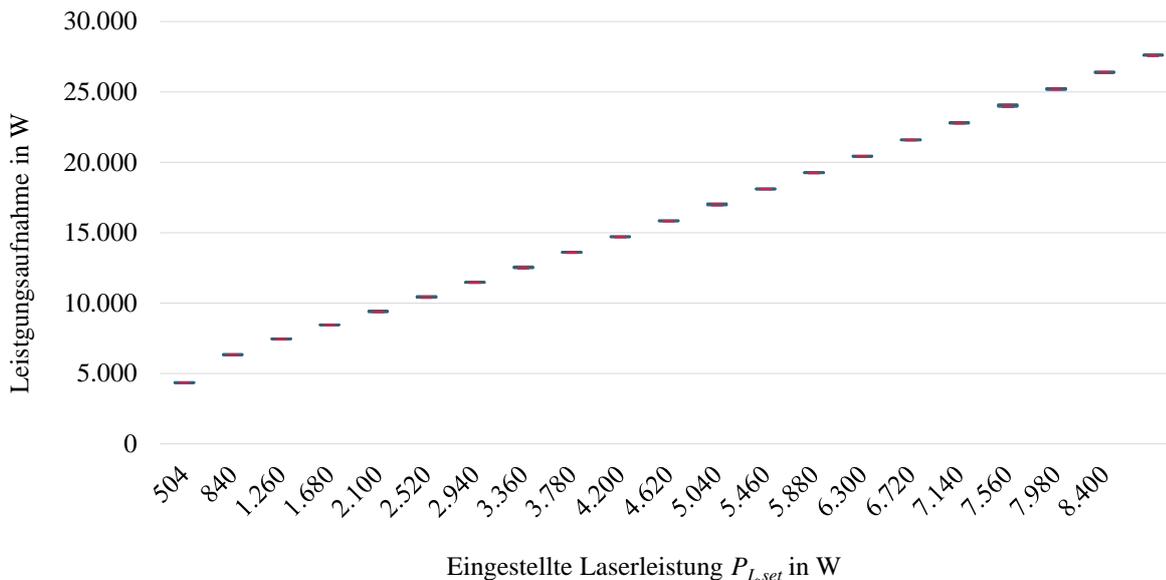


Abbildung 4-6: Verlauf der Leistungsaufnahme der Lasereinheit während des Betriebszustands bei angefordertem Laserstrahl mit zunehmender eingestellter Laserleistung  $P_{L,set}$

Analog zum Einschalten sinkt die benötigte Zeit zum Ausschalten des Laserstrahls mit zunehmender eingestellter Laserleistung. Dies geschieht jedoch eher stufenweise. Bis zu einer eingestellten Laserleistung von 2.940 W schwankt die Dauer zwischen 60,67 ms und 72,33 ms, lässt sich aber linear approximieren. Ab einer eingestellten Laserleistung von 4.200 W sinkt die Dauer zum Ausschalten des Laserstrahls auf ein nahezu konstantes Niveau zwischen 27,00 ms und 31,33 ms. Die Dauer zum Herunterfahren ist somit länger als die Dauer zum Anfahren. Die mittlere Leistungsaufnahme schwankt, zeigt aber ab einer eingestellten Laserleistung von 2.100 W einen Anstieg mit zunehmender eingestellter Laserleistung. Die mittlere Leistungsaufnahme des Herunterfahrens liegt durchschnittlich 5 % unterhalb der des Anfahrens. Dabei handelt es sich jedoch lediglich um eine Tendenz, da die Werte der beiden mittleren

Leistungsaufnahmen, wie in Anhang B in Abbildung 8-3 gezeigt, stark schwanken und somit eine eindeutige Aussage, welche mittlere Leistungsaufnahme größer ist, nicht getroffen werden kann.

Zusammenfassend kann für die Lasereinheit festgehalten werden, dass lediglich die eingestellte Laserleistung einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme der Lasereinheit hat. Im Pre-Step und im Post-Step befindet sich die Lasereinheit im Stand-by-Modus, dessen Leistungsaufnahme unabhängig von Prozessparametereinstellungen ist und somit als konstant angenommen werden kann. Im In-Step wechselt die Lasereinheit in den Bereithaltemodus und der Laserstrahl wird in Abhängigkeit der Geometrie des zu fertigenden Bauteils und des daraus resultierenden Scanpfads angefordert. Die Lasereinheit benötigt einige Millisekunden, bis sie ein nahezu konstantes Niveau der Leistungsaufnahme erreicht, wobei mit zunehmender eingestellter Laserleistung die Dauer für das Anfahren abnimmt. Die mittlere Leistungsaufnahme zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zur eingestellten Laserleistung. Die Zeit, die die Lasereinheit benötigt, um sich auf ein konstantes Niveau der Leistungsaufnahme einzupendeln, kann aufgrund der nur unwesentlich höheren mittleren Leistungsaufnahme vernachlässigt und dem Halten der Leistung zugerechnet werden. Bei einer konstanten Leistungsaufnahme während des Betriebs kann das Verhältnis zwischen eingestellter Laserleistung und mittlerer Leistungsaufnahme ebenfalls linear beschrieben werden. Die Dauer für diesen Abschnitt ist jedoch individuell abhängig vom Scanfad und der Vorschubgeschwindigkeit. Auch während des wiederholten Schaltens der Lasereinheit in den Bereithaltemodus, d. h. für das Herunterfahren, wird weiterhin über einige Millisekunden Leistung aufgenommen. Diese liegt tendenziell etwas unterhalb der mittleren Leistungsaufnahme des Anfahrens.

#### 4.1.4.2 Energetische Analyse des Pulverförderers

Das Pulver für den Materialauftrag befindet sich in speziellen Pulverbehältern auf dem Pulverförderer. Vom Pulverbehälter fällt das Pulver auf eine Förderscheibe, von der aus es mittels Schutzgas zur Düse transportiert wird. Eine typische Leistungskurve über einen gesamten Bauzyklus, die aus dem Betrieb des Pulverförderers resultiert, ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

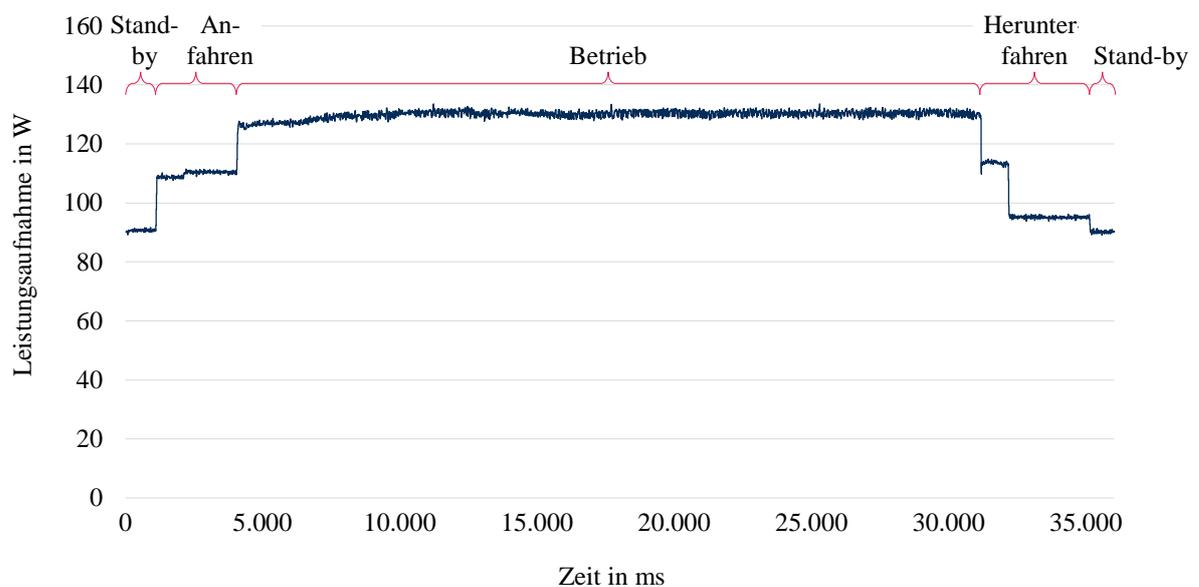


Abbildung 4-7: Beispielhafte Leistungskurve des Pulverförderers bei einer Rotationsgeschwindigkeit des Rührers  $n_R$  von 990 U/min und der Förderscheibe  $n_F$  von 5,5 U/min

Zu Beginn des Bauzyklus befindet sich der Pulverförderer im *Stand-by-Modus*. Der Rührer und die Förderscheibe des Pulverförderers werden nach wenigen Sekunden im Pre-Step angeschaltet, nachdem sich die beiden Schutzgasströme vollständig aufgebaut haben. Das *Anfahren* erfolgt hierbei in zwei Leistungsstufen. Anschließend ist der Pulverförderer während des restlichen Pre-Steps und während des gesamten In-Steps kontinuierlich in *Betrieb*. Die Leistungsaufnahme unterliegt hierbei zwar leichten, unregelmäßigen Schwankungen, kann aber mit einer gemittelten Leistungsaufnahme angenähert werden. Direkt nach Beendigung des In-Steps und somit zu Beginn des Post-Steps wird der Pulverförderer in den Stand-by-Modus geschaltet. Das *Herunterfahren* des Pulverförderers erfolgt in drei Stufen, ehe wieder das Stand-by-Niveau erreicht wird, das für den restlichen Post-Step beibehalten wird.

Innerhalb der vollfaktoriellen Versuchsreihe werden beide *Rotationsgeschwindigkeiten* zwischen 20 % und 80 % variiert. Somit wurden für den *Rührer* Rotationsgeschwindigkeiten von 660 U/min ( $n_R = -1$ ) und 2.640 U/min ( $n_R = 1$ ) und für die *Förderscheibe* von 2 U/min ( $n_F = -1$ ) und 8 U/min ( $n_F = 1$ ) eingestellt. Die resultierenden Leistungskurven sind in Abbildung 4-8 dargestellt und weisen die zuvor beschriebene Charakteristika auf.

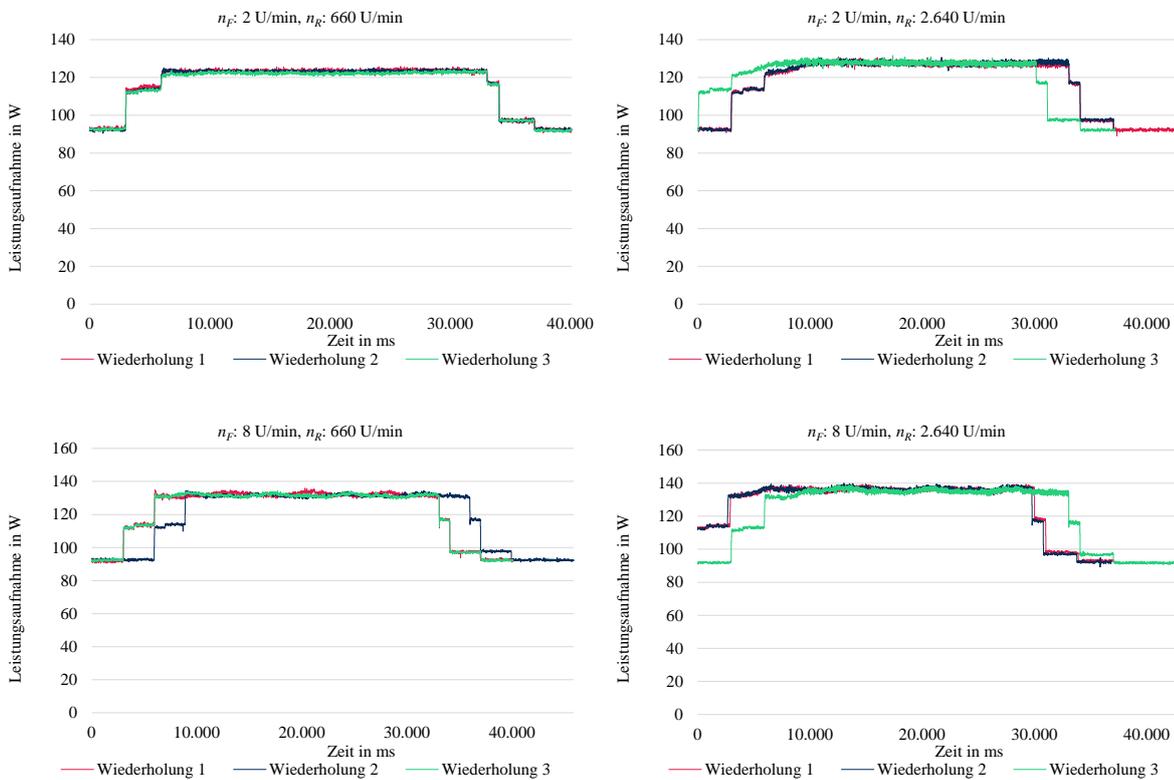


Abbildung 4-8: Leistungskurven der vollfaktoriellen Versuchsreihe des Pulverförderers unter Variation der Rotationsgeschwindigkeit des Rührers  $n_R$  und der Förderscheibe  $n_F$

Das Anfahren, das Halten der Rotationsgeschwindigkeiten sowie das Herunterfahren werden im Folgenden getrennt voneinander hinsichtlich eines Einflusses der Prozessparameter analysiert. Die Ergebnisse sind hierbei in Tabelle 4-4 zusammengefasst. Die Dauer des Anfahrens beträgt stets ca. 3 s und erfolgt in zwei Stufen. Nach der ersten Stufe wird eine konstante Leistung gehalten. Dieses Niveau ist unabhängig von den Prozessparametern und liegt im Mittel bei ca. 110 W. Der Leistungsanstieg in der zweiten Stufe ist dagegen abhängig von den gewählten Prozessparametern und entspricht der Differenz zwischen der annähernd konstanten Leistungsaufnahme während des Betriebs und der ersten Stufe von 110 W. Jedoch wirkt sich dieser

Anstieg der Leistungsaufnahme kaum auf die mittlere Leistungsaufnahme während des Anfahrens aus. Die P-Werte für die Leistungsaufnahme des Anfahrens in Höhe von 0,44 für den Rührer, 0,43 für die Förderscheibe sowie 0,21 für die Interaktionseffekte zeigen, dass die mittlere Leistungsaufnahme dabei unabhängig von den gewählten Prozessparametern ist. Somit kann eine mittlere Leistungsaufnahme von ca. 110 W über den gesamten Prozess des Anfahrens des Pulverförderers angenommen werden.

Tabelle 4-4: Mittlere Leistungsaufnahmen der vollfaktoriellen Versuchsreihe des Pulverförderers

<i>n<sub>R</sub></i>	<i>n<sub>F</sub></i>	<i>n<sub>RF</sub></i>	I	II	III	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung
<b>Gesamt</b>							
-1	-1	+1	117,82 W	116,73 W	116,68 W	117,08 W	0,53
-1	+1	-1	122,52 W	121,86 W	121,56 W	119,42 W	0,23
+1	-1	-1	119,11 W	119,62 W	119,54 W	121,98 W	0,40
+1	+1	+1	125,85 W	124,58 W	124,67 W	125,03 W	0,58
<b>P-Wert</b>			<i>n<sub>R</sub></i> : <b>3,00·10<sup>-5</sup></b>		<i>n<sub>F</sub></i> : <b>1,19·10<sup>-7</sup></b>		<i>n<sub>RF</sub></i> : <b>0,30</b>
<b>Anfahren</b>							
-1	-1	+1	111,11 W	110,02 W	109,97 W	110,37 W	0,53
-1	+1	-1	109,77 W	109,31 W	109,91 W	109,67 W	0,26
+1	-1	-1	109,75 W	109,90 W	109,34 W	109,66 W	0,23
+1	+1	+1	109,80 W	109,56 W	109,88 W	109,75 W	0,14
<b>P-Wert</b>			<i>n<sub>R</sub></i> : <b>0,44</b>		<i>n<sub>F</sub></i> : <b>0,43</b>		<i>n<sub>RF</sub></i> : <b>0,21</b>
<b>Betrieb</b>							
-1	-1	+1	121,16 W	119,91 W	119,65 W	120,24 W	0,66
-1	+1	-1	123,00 W	123,68 W	123,45 W	123,38 W	0,28
+1	-1	-1	127,15 W	126,39 W	126,03 W	126,52 W	0,47
+1	+1	+1	131,34 W	129,85 W	129,96 W	130,38 W	0,68
<b>P-Wert</b>			<i>n<sub>R</sub></i> : <b>1,71·10<sup>-5</sup></b>		<i>n<sub>F</sub></i> : <b>1,28·10<sup>-7</sup></b>		<i>n<sub>RF</sub></i> : <b>0,37</b>
<b>Herunterfahren</b>							
-1	-1	+1	100,31 W	100,11 W	100,70 W	100,37 W	0,25
-1	+1	-1	99,54 W	99,64 W	100,27 W	99,82 W	0,33
+1	-1	-1	100,77 W	99,92 W	100,36 W	100,35 W	0,35
+1	+1	+1	100,30 W	100,21 W	99,88 W	100,13 W	0,18
<b>P-Wert</b>			<i>n<sub>R</sub></i> : <b>0,08</b>		<i>n<sub>F</sub></i> : <b>0,48</b>		<i>n<sub>RF</sub></i> : <b>0,43</b>

Ähnlich verhält sich das Herunterfahren des Pulverförderers vom aktiven Betrieb in den Stand-by-Modus. Im Mittel benötigt das Herunterfahren 4 s, was ebenfalls unabhängig von Prozessparametern ist. Das Herunterfahren erfolgt hierbei in drei Stufen, die wiederum unabhängig von den gewählten Prozessparametern sind. In der ersten Stufe beträgt das arithmetische Mittel der aufgenommenen Leistung 117 W und in der zweiten Stufe 97 W. Über das gesamte Herunterfahren des Pulverförderers ergibt sich eine mittlere Leistungsaufnahme von 100 W. Die P-Werte in Höhe von 0,08 für die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers, 0,48 für die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe sowie 0,43 für die Interaktionseffekte induzieren, dass auch hier kein Einfluss eines Prozessparameters vorliegt.

Die Leistungsaufnahme während des Betriebs variiert stärker als die Leistungsaufnahme für das An- und Herunterfahren. Sind beide Prozessparameter auf 20 % ihrer maximalen Einstellung eingestellt, so liegt die mittlere Leistungsaufnahme bei 120 W. Wird die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe auf 8 U/min erhöht, so erhöht sich auch die mittlere

Leistungsaufnahme auf 127 W. Wird die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers auf 2640 U/min erhöht und bleibt die der Förderscheibe bei 2 U/min, so steigt die mittlere Leistungsaufnahme auf 123 W an. Sind beide Prozessparameter bei 80 % ihrer maximalen Einstellung, so beträgt die mittlere Leistungsaufnahme 130 W. Die Änderung der Leistungsaufnahme spiegelt sich in den Ergebnissen der P-Werte wider. Sowohl die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe als auch die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers haben mit P-Werten von  $1,28 \cdot 10^{-7}$  und  $1,71 \cdot 10^{-5}$  einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Pulverförderers während seines Betriebs. Der P-Wert in Höhe von 0,37 für die Wechselwirkung der beiden Prozessparameter deutet auf fehlende Interaktionseffekte hin. Dies wird auch in den parallelen Verläufen im Haupteffektdiagramm in Abbildung 4-9 deutlich.

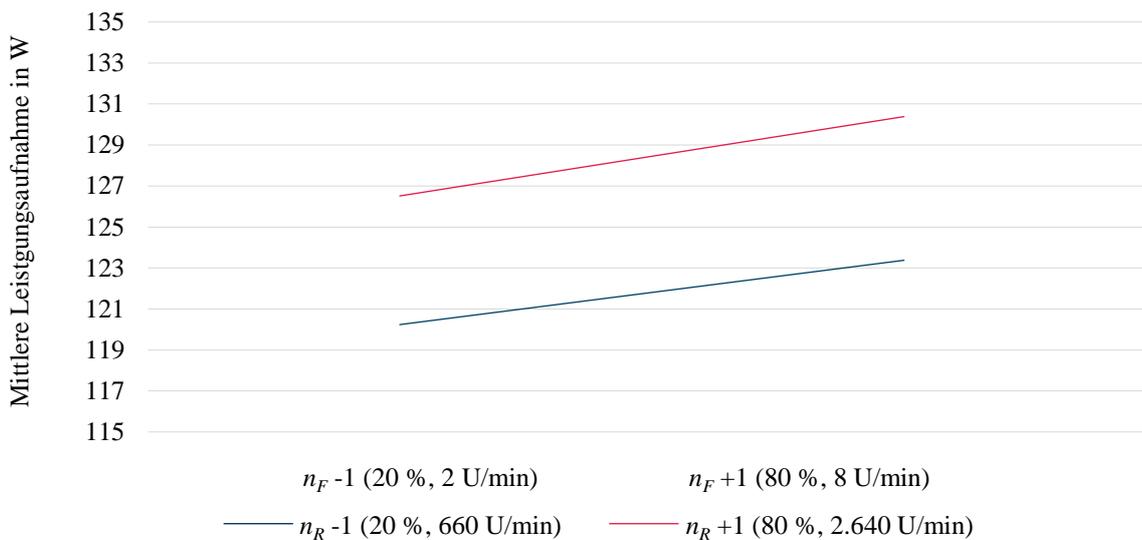


Abbildung 4-9: Haupteffektdiagramm der Leistungsaufnahme des Pulverförderers in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit des Rührers  $n_R$  und der Förderscheibe  $n_F$

Zur weiteren Analyse der Leistungsaufnahme werden sowohl die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe als auch die des Rührers schrittweise erhöht. Bei der Analyse des Rührers ist die Förderscheibe hierbei ausgeschaltet. Aus Gründen der Prozesssicherheit kann jedoch die Förderscheibe nicht ohne den Rührer betrieben werden, sodass die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers innerhalb eines Experimentalblocks konstant gehalten wird. Da das Anfahren sowie das Herunterfahren unabhängig von der Prozessparametereinstellung sind, wird nun lediglich der Betrieb des Pulverförderers näher betrachtet. Der Pulverförderer ist kontinuierlich während des In-Steps in Betrieb, wobei die Dauer hierfür maßgeblich vom Scanpfad und der Vorschubgeschwindigkeit bestimmt wird. Die Ergebnisse der Analyse sind in Anhang C in Tabelle 8-3 und in Abbildung 4-10 zusammengefasst.

Der Stand-by-Modus des Pulverförderers, in dem sowohl die Förderscheibe als auch der Rührer ausgeschaltet sind, weist eine mittlere Leistungsaufnahme von 92,70 W auf. Wird lediglich der Rührer angeschaltet, so steigt die Leistungsaufnahme bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 330 U/min um 24,90 W auf 117,27 W. Dieser Sprung setzt sich sowohl aus der Leistungsaufnahme zum Betrieb des Rührers als auch aus dem zusätzlichen Energiebedarf für die Steuerungssysteme des Pulverförderers zusammen. Das arithmetische Mittel der mittleren Leistungsaufnahmen steigt um 0,65 W bei einer schrittweisen Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit von je 330 U/min. Hierbei sind die Differenzen bei niedrigen Rotationsgeschwindigkeiten von

unter 1.650 U/min stets kleiner als 0,5 W. Die Geschwindigkeitszunahmen ab einer Rotationsgeschwindigkeit größer als 1.980 U/min weisen eine schrittweise Erhöhung der mittleren Leistungsaufnahme zwischen 0,83 W und 1,59 W auf. Die Steigerung der Leistungsaufnahme mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit zeigt somit zwar einen leicht progressiven Verlauf, aufgrund der geringen Leistungssteigerungen kann die Leistungskurve für die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers zur Reduktion der Komplexität dennoch linear angenähert werden. Der Verlauf der Leistungsaufnahme mit steigender Rotationsgeschwindigkeit des Rührers ist in Anhang C in Abbildung 8-4 abgebildet.

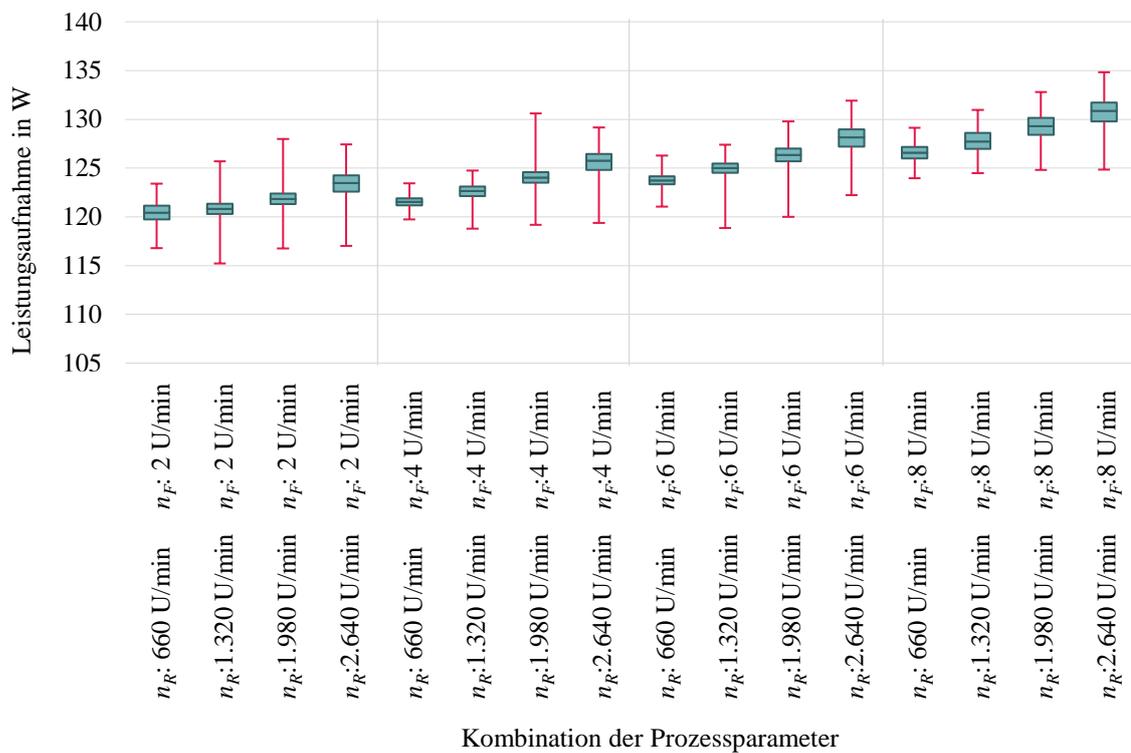


Abbildung 4-10: Verlauf der Leistungsaufnahme mit zunehmender eingestellter Rotationsgeschwindigkeit des Rührers  $n_R$  und der Förderscheibe  $n_F$

Durch den zusätzlichen Betrieb der Förderscheibe steigt die mittlere Leistungsaufnahme weiter an. Wird die Leistungsaufnahme des Rührers und der Steuerungssysteme des Pulverförderers herausgerechnet, so steigt die mittlere Leistungsaufnahme der Förderscheibe von 3,59 W für 1 U/min schrittweise auf 7,26 W für 10 U/min an. Die gemittelte Zunahme beträgt 0,41 W je Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit um 1 U/min. Auch hier ist der Anstieg der Leistungsaufnahme unterhalb einer Rotationsgeschwindigkeit von 3 U/min mit Werten von 0,14 W und 0,1 W geringer als oberhalb mit Werten von bis zu 0,8 W. Trotz des leicht progressiven Verlaufs der Steigerung der Leistungsaufnahme mit Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe, kann diese ebenfalls linear angenähert werden, wie in Anhang C in Abbildung 8-5 abgebildet.

Allgemein weist der Pulverförderer die geringste Leistungsaufnahme der betrachteten Einheiten des HS DED-LB Fertigungssystems auf. Die Einstellung der auf den Pulverförderer bezogenen Prozessparameter *Rotationsgeschwindigkeit des Rührers* sowie *Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe* wirken sich beide auf die Höhe der Leistungsaufnahme während des Betriebs aus. Hierbei bestehen jedoch keine Wechselwirkungen, sodass zur Modellerstellung beide Parameter getrennt voneinander betrachtet werden können. Trotz eines leicht

progressiven Verlaufs kann der Verlauf der mittleren Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit des Rührers und der Förderscheibe durch eine lineare Regression angenähert werden, da hierbei die Abweichung weniger als 2 W und damit weniger als 2 % beträgt. Durch diese Vereinfachung wird der Aufwand zur Modellerstellung sowie die Modellkomplexität reduziert. Die Leistungskurven des Anfahrens sowie des Herunterfahrens des Pulverförderers verlaufen stets annähernd gleich hinsichtlich Dauer und Höhe der Leistungsaufnahme. Daher kann zum Abbilden der Leistungsaufnahme hier für alle Prozessparametereinstellungen das jeweilige arithmetische Mittel angenommen werden. Aufgrund des geringen Energiebedarfs ist ebenfalls eine Vernachlässigung des Anfahrens und Herunterfahrens zur Reduktion der Komplexität des resultierenden Modells möglich. Weiterhin ist die Leistungsaufnahme während des Stand-by-Modus unabhängig von den gewählten Prozessparametern und kann durch eine mittlere Leistungsaufnahme angenähert werden.

#### 4.1.4.3 Energetische Analyse des Entstaubungssystems

In Abbildung 4-11 ist der exemplarische Verlauf der Leistungskurve für das Entstaubungssystem dargestellt. Die Leistungsaufnahme für das *Hochfahren* folgt stets dem hier gezeigten charakteristischen Verlauf. Zunächst steigt die aufgenommene Leistung stark an. Nach zwei Peaks sinkt sie zunächst wieder auf das Stand-by-Niveau ab. Anschließend steigt die aufgenommene Leistung wieder und schwankt anschließend während des *Betriebs* stark, ohne dass eine Regelmäßigkeit erkennbar ist. Beim *Herunterfahren* des Entstaubungssystems, sinkt die Leistungsaufnahme nahezu sofort auf das *Stand-by*-Niveau, wo sie konstant bleibt.

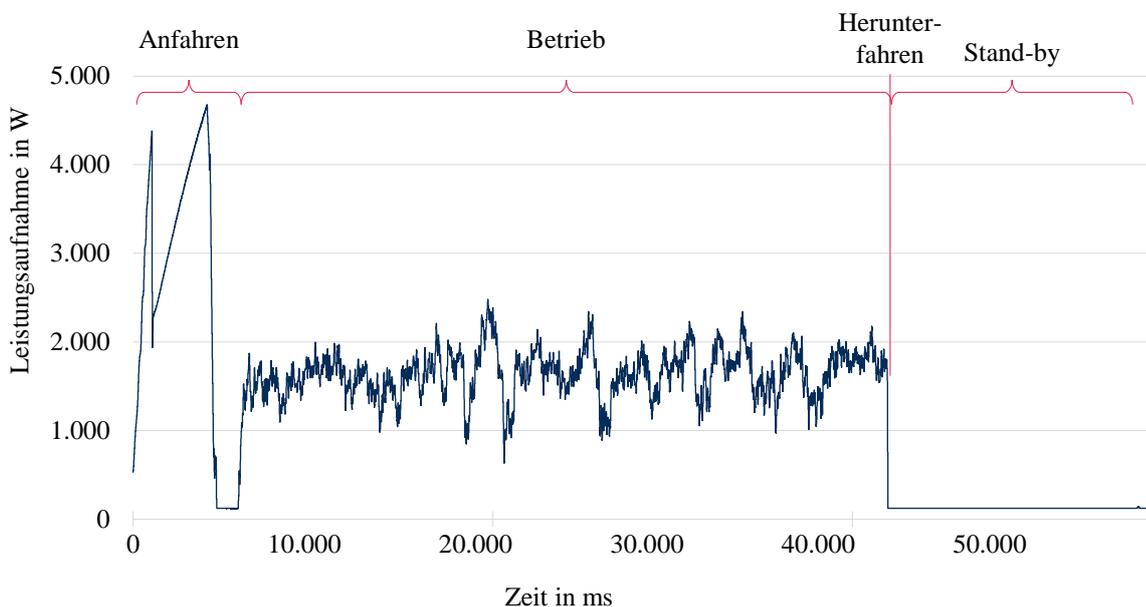


Abbildung 4-11: Beispielhafte Leistungskurve des Entstaubungssystems bei einem Absaugungsvolumen  $\dot{V}_{S,set}$  von 1.690 m<sup>3</sup>/h

Das *Absaugungsvolumen*  $\dot{V}_{S,set}$  ist der einzige Prozessparameter, der für das Entstaubungssystem eingestellt werden kann. Die Analyse des Einflusses in Anhang D in Tabelle 8-4 zeigt, dass der Energiebedarf für das Ausschalten unabhängig vom gewählten Absaugungsvolumen ist. Für das Anfahren steigen die mittlere Leistungsaufnahme und der Energiebedarf mit zunehmendem Absaugungsvolumen. Da das Entstaubungssystem jedoch während des gesamten Prozesses in Betrieb ist und auch zwischen mehreren Prozesszyklen nicht ausgeschaltet wird, kann

der für das Anfahren sowie das Herunterfahren notwendige Energiebedarf vernachlässigt werden. Diese werden somit in nachfolgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt. Während des Betriebs des Entstaubungssystems weist das gewählte Absaugungsvolumen einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme auf. Hierbei besteht, wie in Abbildung 4-12 erkennbar, ein progressiver Zusammenhang, sodass mit zunehmendem Absaugungsvolumen die aufgenommene Leistung überproportional ansteigt. Dieser Anstieg kann durch eine Potenzfunktion angenähert werden.

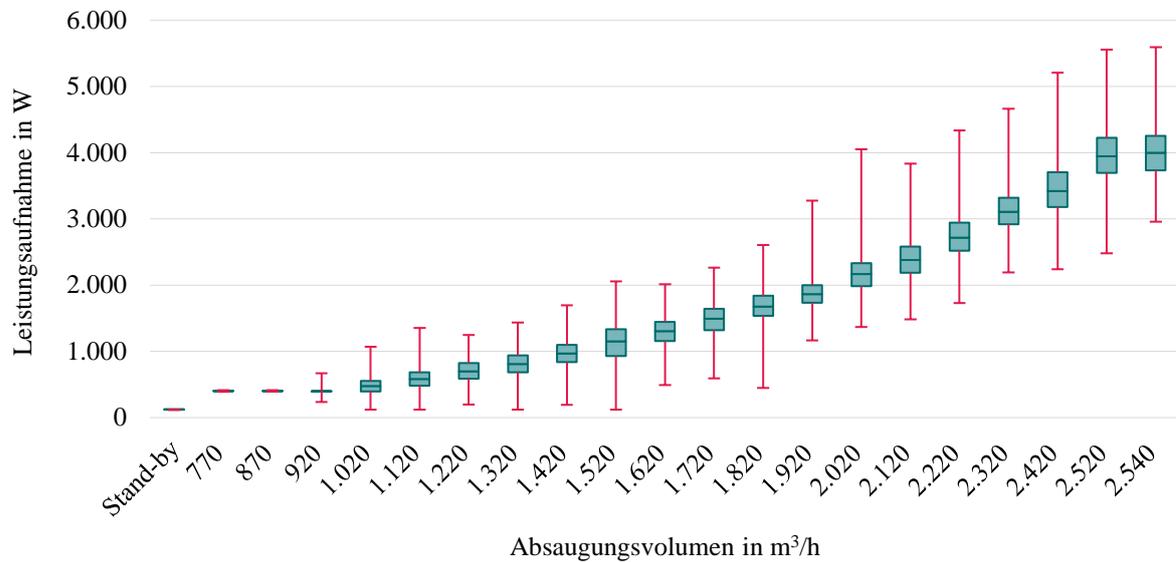


Abbildung 4-12: Verlauf der Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems mit zunehmendem eingestelltem Absaugungsvolumen  $\dot{V}_{S,set}$

#### 4.1.4.4 Energetische Analyse der Antriebe der Bauplattform

Als Bauplattform wird die 3-Achs-Bauplattform, die in einem kartesischen Koordinatensystem in x-, y- sowie z-Richtung bewegt werden kann, verwendet. Die Ergebnisse dieses Kapitels sind somit spezifisch für das Tripod-System und der entsprechenden Antriebskinematik des untersuchten Fertigungssystems. Voruntersuchungen der 3-Achs-Bauplattform zeigten, dass die Leistungsaufnahme individuell für jeden Scanpfad ist. Zur Untersuchung wurden daher zwei grundlegende Scanpfadmuster unterschieden: Um rotationssymmetrische Bewegungen der Bauplattform abzubilden, wurden *kreisförmige Scanpfade* untersucht, und zur Analyse von überwiegend linearen Scanpfaden, wurden *quadratische Scanpfade* analysiert. In Abbildung 4-13 ist die resultierende Leistungskurve eines quadratischen Scanpfads mit einem Umfang von 1,6 m bei einer *Vorschubgeschwindigkeit* von 50 m/min abgebildet. In der Leistungskurve sind die einzelnen Seiten des Quadrats sowie die unterschiedlichen Phasen der Bauplattformbewegung erkennbar. Zu Beginn des Prozesses erfolgt noch keine Bewegung der Bauplattform und das System befindet sich im *Stand-by-Modus*. Um die definierte Vorschubgeschwindigkeit zu erreichen, wird die Bauplattform kontinuierlich beschleunigt, in dem alle drei Motoren in Abhängigkeit der Richtung zwar unterschiedlich stark, aber nahezu gleichzeitig beschleunigen. Diese *Beschleunigung* bedingt einen starken Anstieg der Leistungsaufnahme. Ist die *Geschwindigkeit erreicht*, fällt die Leistungsaufnahme zunächst auf ein wesentlich geringeres Niveau, steigt dann aber während des Verfahrens der Kante bei konstanter Geschwindigkeit wieder leicht an. Die Geschwindigkeit der Bauplattform bleibt zwar konstant, aufgrund des Tripod-

Systems variiert allerdings die Geschwindigkeit der individuellen Antriebe. Vor dem Richtungswechsel erfolgt ein *Abbremsen* der Bauplattform, was wiederum zu einem Anstieg der Leistungsaufnahme führt, der jedoch geringer ist als die der Beschleunigung. Dieses Muster der Leistungskurve wird für jede Seite des Quadrats wiederholt. Hierbei sind in Abhängigkeit der Richtung jedoch kleine Unterschiede in der Höhe der Leistungsaufnahme zu erkennen.

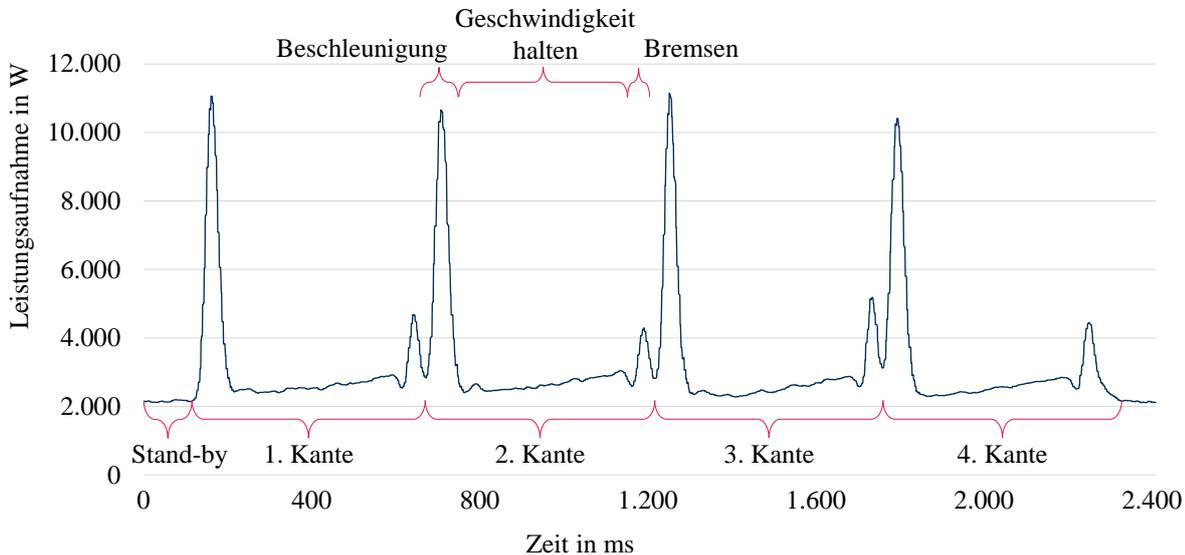


Abbildung 4-13: Beispielhafte Leistungskurve der Antriebe der Bauplattform eines Quadrats bei einer Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  von 50 m/min

Der kreisförmige Scanpfad hat einen Radius von 0,275 m, woraus sich ein Umfang von 1,73 m ergibt. Die daraus resultierende Leistungsaufnahme bei einem Abfahren des Kreises in der Maximalgeschwindigkeit des Fertigungssystems von 200 m/min ist in Abbildung 4-14 abgebildet.

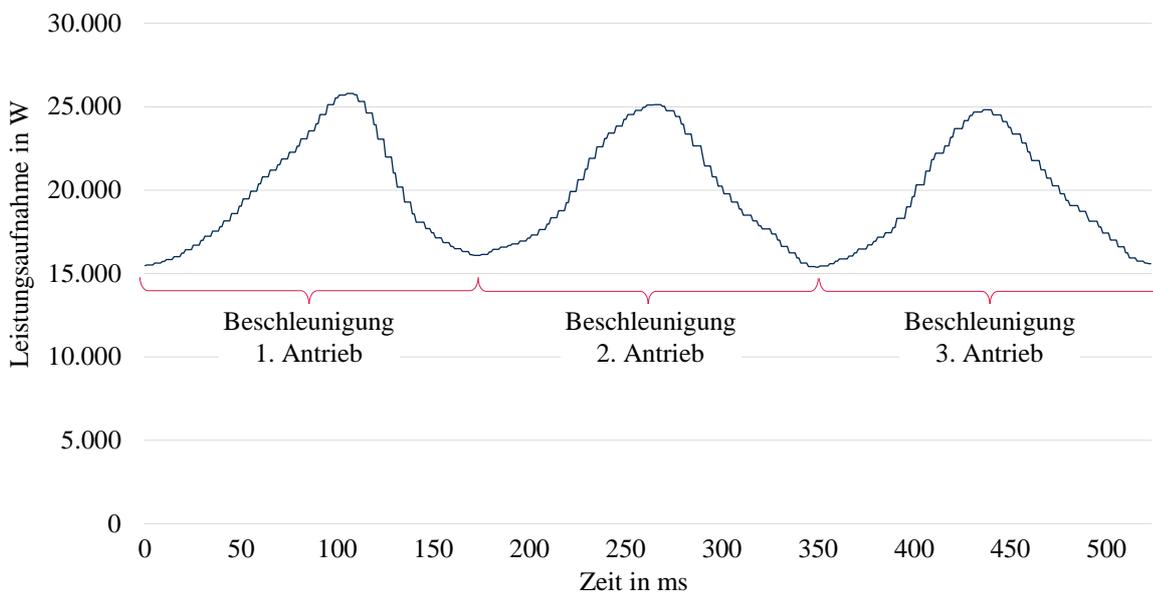


Abbildung 4-14: Beispielhafte Leistungskurve eines Kreises bei einer Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  von 200 m/min

Der kreisförmige Scanpfad führt zu einer kontinuierlichen Bewegung der Bauplattform, sodass hier, im Gegensatz zum quadratischen Scanpfad, die Geschwindigkeit konstant gehalten wird. Um die kreisförmige Bewegung der Bauplattform zu erreichen, beschleunigt jeweils ein

Antrieb stärker als die anderen beiden, eher er wieder langsamer wird und der nachfolgende Antrieb beginnt zu beschleunigen. Dies führt zu einem wellenartigen Beschleunigen und Abbremsen der drei Antriebe, die beim Abfahren eines Kreises zu drei Peaks führen.

Für die vollfaktorielle Versuchsreihe werden die oben beschriebenen Scanpfade mit den Geschwindigkeiten  $v_A$  von 20 m/min ( $v_A=-I$ ) und 100 m/min ( $v_A=I$ ) untersucht. Für jeden Scanpfad wird ein Materialauftrag von fünf Lagen angenommen, d. h. jeder Scanpfad wird fünfmal abgefahren. Für alle Wiederholungen können, wie in Abbildung 4-15 gezeigt, die zuvor beschriebenen charakteristischen Leistungskurven identifiziert werden. Lediglich zu Beginn des kreisförmigen Scanpfads ist beim initialen Anfahren ein hoher Peak erkennbar, der die weitere Leistungsaufnahme um ein Vielfaches übersteigt.

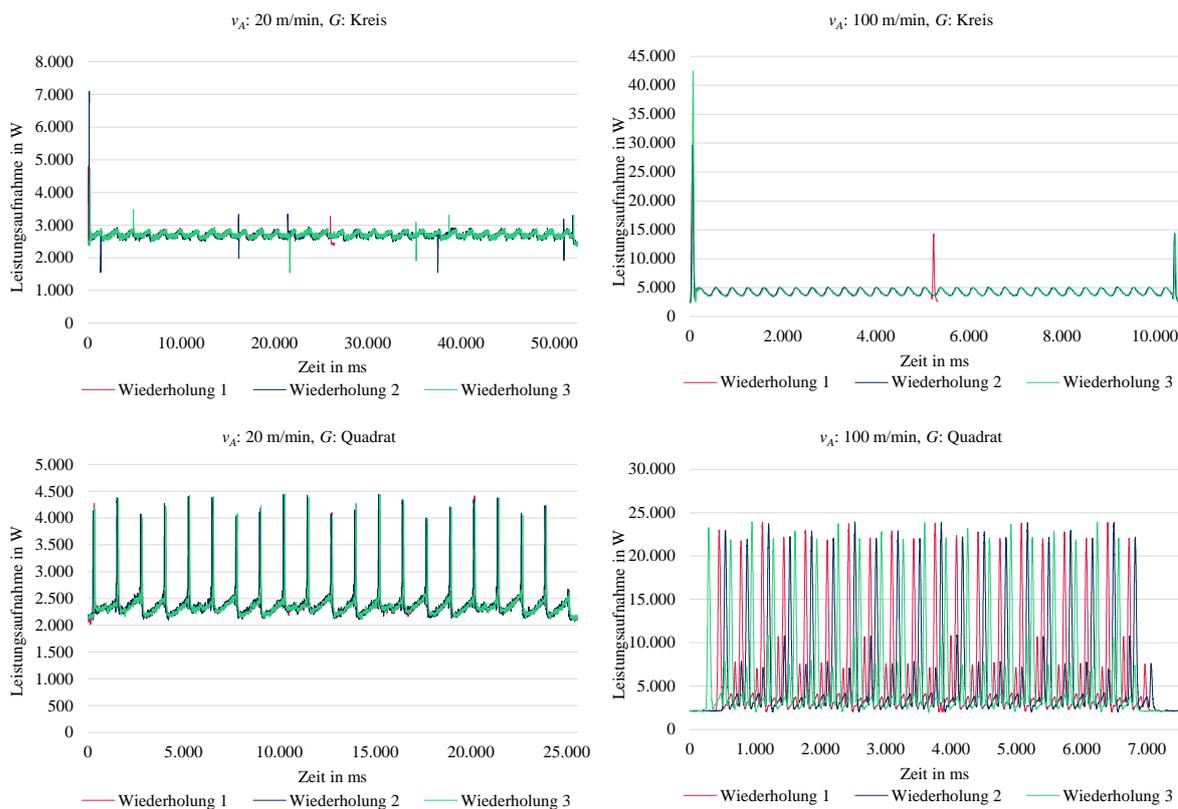


Abbildung 4-15: Leistungskurven der vollfaktoriellen Versuchsreihe des Antriebs der Bauplattform unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  und Scanpfad  $G$

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt für die Analyse der Abhängigkeiten jeweils gemittelt für ein Kreis bzw. ein Quadrat und sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Mittlere Leistungsaufnahme der vollfaktoriellen Versuchsreihe des Antriebs der Bauplattform

$v_A$	$G$	$v_A G$	I	II	III	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung
-1	-1	+1	2.703,99 W	2.710,12 W	2.694,07 W	2.702,73 W	6,61
-1	+1	-1	2.375,05 W	2.390,45 W	2.386,82 W	2.384,11 W	6,57
+1	-1	-1	4.438,27 W	4.351,24 W	4.359,29 W	4.382,93 W	39,27
+1	+1	+1	5.952,41 W	5.971,06 W	5.958,33 W	5.960,60 W	7,78
<b>P-Wert</b>			$v_A: 9,78 \cdot 10^{-16}$		$G: 8,90 \cdot 10^{-11}$	$v_A G: 3,39 \cdot 10^{-12}$	

Für den kreisförmigen Scanpfad ( $G=-I$ ) wird eine mittlere Leistung von 2.702,73 W bei einer Geschwindigkeit von 20 m/min und von 4.382,93 W bei einer Geschwindigkeit von 100 m/min aufgenommen. Beim Quadrat ( $G=I$ ) beträgt die mittlere Leistungsaufnahme bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/min 2.384,11 W und ist somit etwas niedriger als beim kreisförmigen Scanpfad. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 100 m/min liegt die mittlere Leistungsaufnahme für ein Quadrat bei 5.960,60 W und ist somit höher als beim kreisförmigen Scanpfad. Dies kann auf die Parallelkinematik zurückzuführen sein, sodass eine Abweichung dieses Verhaltens bei anderen Antriebssystemen möglich ist.

Wie bereits die durch den Scanpfad bedingten unterschiedlichen Leistungskurven induzieren, bestätigt der P-Wert von  $8,90 \cdot 10^{-11}$  einen signifikanten Einfluss des Scanpfads  $G$  auf die Leistungsaufnahme. Auch die Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  hat mit einem P-Wert von  $9,78 \cdot 10^{-16}$  einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Leistungsaufnahme. Zudem deutet der P-Wert  $v_A G$   $3,39 \cdot 10^{-12}$  auf ein Bestehen von Interaktionseffekten zwischen Scanpfad und Vorschubgeschwindigkeit hin. Somit haben beide Prozessparameter einen Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Antriebs der Bauplattform, was ebenfalls in Abbildung 4-16 erkennbar ist.

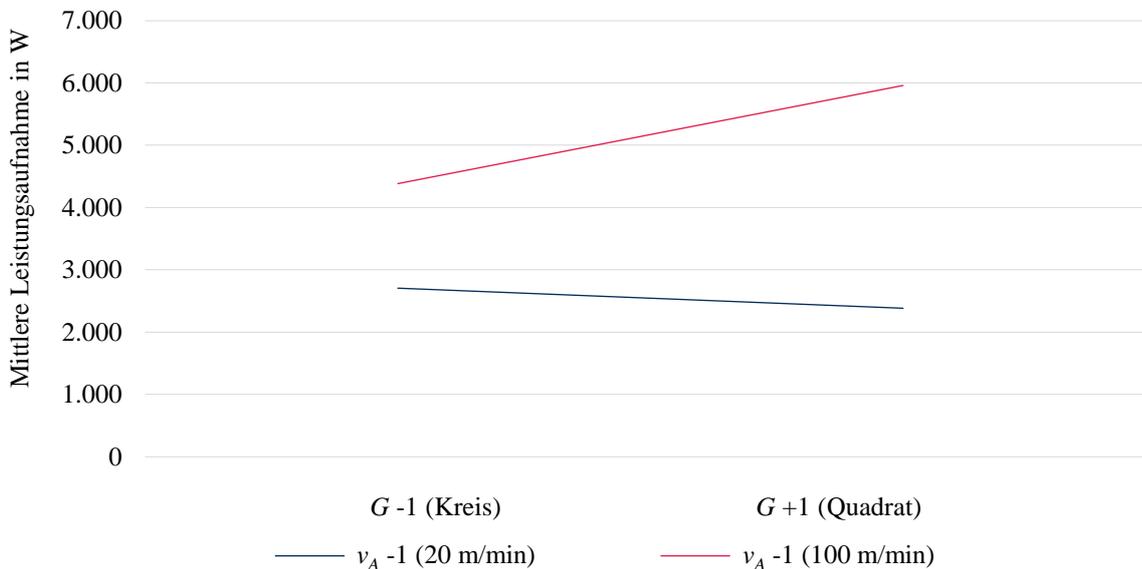


Abbildung 4-16: Haupteffektediagramm der Leistungsaufnahme der Antriebe der Bauplattform in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  und vom Scanpfad  $G$

Da in den initialen Experimenten bei linearen Scanpfaden eine Abhängigkeit der Leistungsaufnahme von der Richtung der Bauplattformbewegung vermutet werden kann, wird die Leistungsaufnahme der Phasen des Beschleunigens, des Haltens der Geschwindigkeit sowie des Abbremsens separat voneinander erneut analysiert. Hierfür werden wieder die Vorschubgeschwindigkeiten  $v_A$  20 m/min und 100 m/min herangezogen. Zudem wird die Richtung einer Bahn  $R$  in x-Richtung ( $R=-I$ ), sowie in y-Richtung ( $R=I$ ) unterschieden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Hierbei zeigt sich für alle drei betrachteten Phasen, dass sowohl die Geschwindigkeit als auch die Richtung der Bahn einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Leistungsaufnahme haben und zudem Wechselwirkungen bestehen. Dies ist auf die Positionierung der Antriebe im Tripod-System zurückzuführen. Wie in Abbildung 4-17 schematisch dargestellt, sind die Antriebe in Form eines gleichseitigen Dreiecks um die Bauplattform und somit ebenfalls im

Koordinatensystem positioniert. Somit unterscheiden sich die Bewegungsprofile der Antriebe in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung der Bauplattform. Für eine Beschleunigung in x-Richtung beschleunigen die zwei Antriebe, deren imaginäre Verbindung im Dreieck der Antriebe parallel zur x-Achse liegen, wesentlich stärker als der gegenüberliegende Antrieb. Für das Verfahren der Bauplattform in y-Richtung beschleunigt insbesondere der Antrieb in der y-Achse stärker und die zwei Antriebe parallel zur x-Achse etwas geringer. Bei geringen Geschwindigkeiten wie 20 m/min ist die Leistungsaufnahme für eine Bahn in y-Richtung stets höher als für die x-Richtung. Bei höheren Geschwindigkeiten dreht sich das Verhältnis um und die Beschleunigung sowie das Abbremsen in x-Richtung weist eine höhere mittlere Leistungsaufnahme auf. Für das Halten der Geschwindigkeit ist hier jedoch die mittlere Leistungsaufnahme für eine Bewegung in Richtung der y-Achse höher.

Tabelle 4-6: Mittlere Leistungsaufnahme der vollfaktoriellen Versuchsreihe der verschiedenen Phasen eines linearen Scanpfads G des Antriebs der Bauplattform bei variierender Geschwindigkeit  $v_A$  und Verfahrtrichtung R

$v_A$	R	$v_A R$	I	II	III	Arithmetisches Mittel	Standardabweichung
<b>Beschleunigen</b>							
-1	-1	+1	2.852,83 W	3.077,16 W	3.038,96 W	2.989,65 W	97,99
-1	+1	-1	3.110,00 W	3.204,17 W	3.246,73 W	3.186,97 W	57,13
+1	-1	-1	10.612,39 W	10.762,08 W	10.715,22 W	10.696,56 W	62,52
+1	+1	+1	10.100,51 W	10.260,37 W	10.143,53 W	10.168,14 W	67,54
<b>P-Wert</b>			$v_A: 5,07 \cdot 10^{-17}$		<b>R: 0,01</b>	$v_A R: 1,10 \cdot 10^{-4}$	
<b>Geschwindigkeit halten</b>							
-1	-1	+1	2.285,87 W	2.302,40 W	2.299,43 W	2.295,90 W	7,20
-1	+1	-1	2.363,88 W	2.376,79 W	2.371,97 W	2.370,88 W	5,32
+1	-1	-1	2.937,77 W	2.952,98 W	2.948,00 W	2.946,25 W	6,33
+1	+1	+1	3.323,26 W	3.297,68 W	3.308,02 W	3.309,66 W	10,51
<b>P-Wert</b>			$v_A: 4,87 \cdot 10^{-15}$		<b>R: 1,43 \cdot 10^{-10}</b>	$v_A R: 3,98 \cdot 10^{-9}$	
<b>Bremsen</b>							
-1	-1	+1	2.511,01 W	2.526,46 W	2.528,80 W	2.522,09 W	7,89
-1	+1	-1	2.541,24 W	2.557,71 W	2.530,56 W	2.543,17 W	11,17
+1	-1	-1	5.586,51 W	5.515,44 W	5.555,56 W	5.552,50 W	29,09
+1	+1	+1	4.197,61 W	4.222,75 W	4.233,48 W	4.217,94 W	15,03
<b>P-Wert</b>			$v_A: 7,33 \cdot 10^{-16}$		<b>R: 1,97 \cdot 10^{-11}</b>	$v_A R: 1,53 \cdot 10^{-11}$	

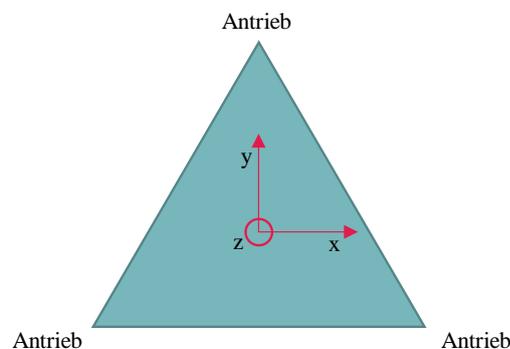


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung der Lage der Bewegungsübermittlung der Antriebe auf die Bauplattform

In nachfolgenden Analysen wird das Verhalten der Leistungsaufnahme mit Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit analysiert. Da der Scanpfad im Gegensatz zu allen anderen Prozessparametern lediglich nominal skalierbar ist, d. h. es sind nur qualitative Einstellungen ohne Rangfolge möglich, erfolgt dies ebenfalls basierend auf einem rotationssymmetrischen, kreisförmigen Scanpfad sowie einem linearen Scanpfad. Für den kreisförmigen Scanpfad erfolgt die Analyse aufgrund des konstanten Geschwindigkeitsbetrags lediglich während des Haltens der Geschwindigkeit. Demgegenüber werden für lineare Scanpfade Beschleunigungsvorgänge, das Halten der Geschwindigkeit sowie das Abbremsen differenziert voneinander analysiert. Das Ergebnis ist in Anhang E in Tabelle 8-5 detailliert aufgeführt.

Die mittlere Leistungsaufnahme für den kreisförmigen Scanpfad steigt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit stetig an. Die Wachstumsrate ist hierbei nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit weiter zu, sodass die mittlere Leistungsaufnahme progressiv steigt. Dies ist ebenfalls im progressiven Verlauf der Leistungszunahme in Abbildung 4-18 erkennbar, der auf ein Wachstumsverhalten ähnlich einer Potenzfunktion hindeutet.

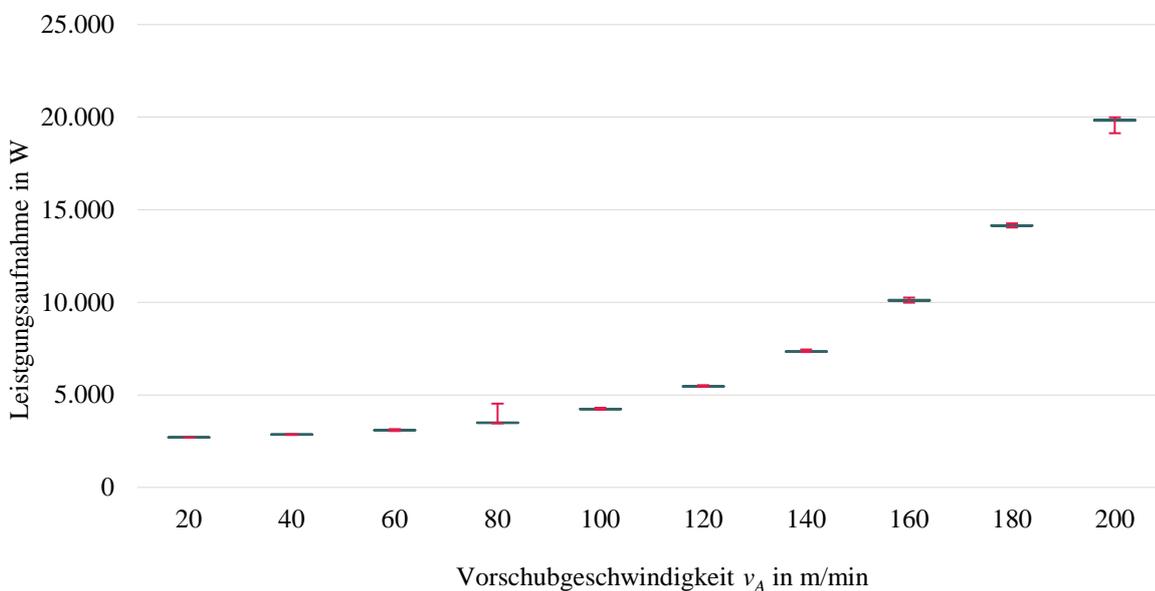


Abbildung 4-18: Verlauf der Leistungsaufnahme der Antriebe der Bauplattform mit zunehmender eingestellter Geschwindigkeit  $v_A$  bei einem kreisförmigen Scanpfads  $G$

Auch beim linearen Scanpfad zeigt sich eine Zunahme der mittleren Leistungsaufnahme für das Beschleunigen, das Halten der Geschwindigkeit sowie das Bremsen um durchschnittlich 893 W, 116 W und 265 W. Für alle drei Phasen ist, wie Abbildung 4-19 zeigt, ein annähernd lineares Wachstumsverhalten erkennbar. Neben der Leistungsaufnahme nimmt die für das Beschleunigen oder Bremsen benötigte Zeit mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ebenfalls zu. Die Nutzung des arithmetischen Mittels als Annäherung ist somit nicht ausreichend präzise, sodass eine Modellierung des entsprechenden Zeitbedarfs notwendig ist.

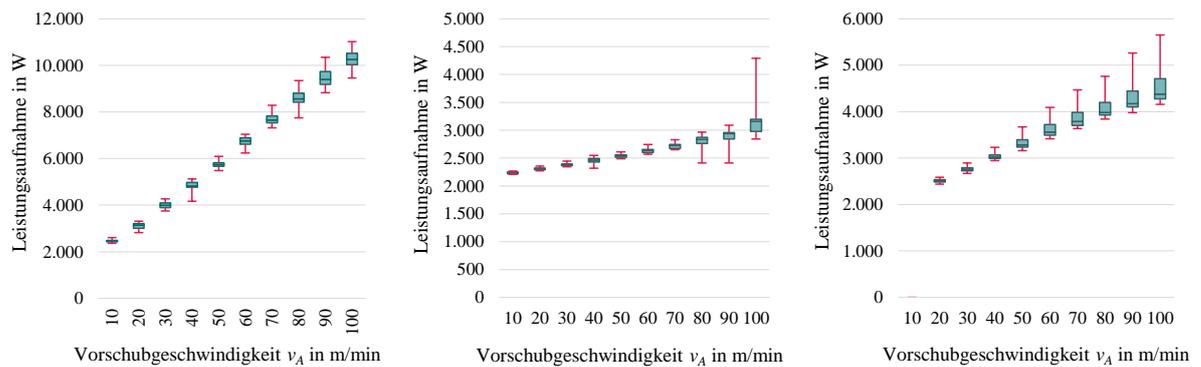


Abbildung 4-19: Verlauf der mittleren aufgenommenen Leistung der Antriebe der Bauplattform mit zunehmender eingestellter Geschwindigkeit  $v_A$  bei einem quadratförmigen Scanpfads  $G$  für das Beschleunigen (links), das Halten der Geschwindigkeit (mitte) sowie das Bremsen (rechts)

Für den Antrieb der Bauplattform kann festgehalten werden, dass sowohl die gewählte Vorschubgeschwindigkeit als auch der gewählte Scanpfad einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme der Antriebe hat und beide Prozessparameter wiederum Wechselwirkungen aufweisen. Somit müssen beide Prozessparameter in einem späteren Modell berücksichtigt werden. Für rotationssymmetrische Scanpfade bleibt der Betrag der Geschwindigkeit konstant, bei linearen Scanpfaden wiederholen sich für jede Bahn die Phasen der Beschleunigung, das Halten der Geschwindigkeit und das Bremsen. Da sich die Leistungsaufnahmen der einzelnen Phasen stark unterscheiden und zudem alle abhängig von der gewählten Vorschubgeschwindigkeit sind, müssen hierfür individuelle Modelle zur Prognose erstellt werden. Bei vorwiegend rotationssymmetrischen Scanpfaden ist der Anstieg der Leistungsaufnahme mit zunehmender Geschwindigkeit progressiv und kann durch eine Funktion dritten Grades angenähert werden. Bei linearen Scanpfaden kann sie für alle Phasen durch lineare Funktionen angenähert werden. Auch hier ist ein leicht progressiver Verlauf zu beobachten, der durch eine Funktion zweiten Grades angenähert werden kann. Aufgrund der limitierten Vorschubgeschwindigkeiten kann hier zur Vereinfachung des Modells ein lineares Verhalten angenommen werden.

#### 4.1.4.5 Zwischenfazit

Die Ergebnisse basieren auf Untersuchungen des HS DED-LB-Fertigungssystems *pE3D* der *ponticon GmbH*, so dass bei anderen Fertigungssystemen Abweichungen in den ermittelten Leistungsaufnahmen auftreten können. Die Höhe der Leistungsaufnahme wird vorwiegend von der Einstellung der Prozessparameter bestimmt, die den Energiebedarf einer Systemeinheit maßgeblich beeinflussen und dieser daher ursächlich zugeordnet werden können. Die als relevant identifizierten Prozessparameter sind nachstehend in der Reihenfolge vom größten bis zum geringsten Einfluss für einen HS DED-LB-Fertigungsprozess aufgeführt. Die Reihenfolge ist jedoch nicht zwingend wie hier angegeben, sondern zeigt eine Tendenz der Einflussstärke basierend auf den vorherigen Ergebnissen. Eine absolute und standardisierte Reihenfolge kann nicht erstellt werden, da die Stärke des Einflusses von den jeweils gewählten Prozessparametern abhängt und somit variabel ist:

- Laserleistung,
- Vorschubgeschwindigkeit,
- Geometrie des Werkstücks und der darauf basierende Scanpfad,

- Absaugungsvolumen des Entstaubungssystems,
- Rotationsgeschwindigkeit des Rührers im Pulverbehälter,
- Rotationsgeschwindigkeit der Pulverförderscheibe.

Der Scanpfad wirkt sich nicht allein auf den Energiebedarf des Antriebs der Bauplattform aus, sondern beeinflusst daneben ebenfalls den Materialauftrag und somit, wann der Laserstrahl zum Materialauftrag zu- und abgeschaltet wird, was wiederum Einfluss auf die Leistungsaufnahme der Lasereinheit und die Pulverauftragsrate hat. Der Scanpfad bestimmt zudem gemeinsam mit der Vorschubgeschwindigkeit die Dauer des HS DED-LB-Fertigungsprozesses. Zur Prognose des Energiebedarfs ist somit zunächst ein Modell zur Abschätzung der Prozessdauer basierend auf dem Scanpfad sowie der Vorschubgeschwindigkeit notwendig. Darauf aufbauend wird anschließend für jede Systemeinheit ein individuelles Modell zur Prognose der Leistungsaufnahme erstellt und mit dem Zeitmodell verknüpft. Die Teilmodelle werden anschließend zu einem Gesamtmodell aggregiert.

#### 4.1.5 Modell zur Prognose des Energiebedarfs des HS DED-LB

Im Folgenden wird, basierend auf den Messergebnissen sowie Erkenntnissen der vorangegangenen experimentellen Untersuchungen des Energiebedarfs des HS DED-LB-Fertigungssystems, ein Modell zur Prognose des bauteilindividuellen Energiebedarfs abgeleitet.<sup>2</sup> Aufgrund der großen Variabilität der Gestaltung des Pre-Prozesses sowie des Post-Prozesses umfasst das Modell lediglich den In-Prozess, d. h. den additiven Fertigungsprozess mit dem Pre-Step, dem In-Step sowie dem Post-Step. Das Modell unterteilt sich hierbei in ein Zeitmodell sowie in Modelle zur Prognose der Leistungsaufnahme der einzelnen Systemeinheiten, die anschließend mit dem Zeitmodell verknüpft werden. Der schematische Aufbau des Energiebedarfsprognosemodells ist in Abbildung 4-20 skizziert.

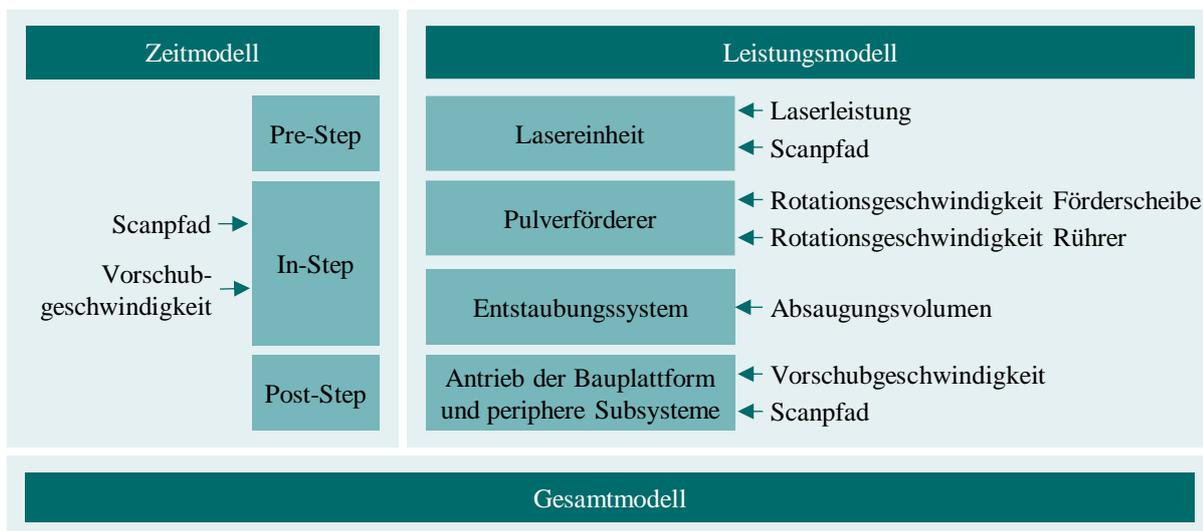


Abbildung 4-20: Aufbau des Energiebedarfprognosemodells für ein HS DED-LB-Fertigungssystem

<sup>2</sup> Teile dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ehms23a] veröffentlicht.

Allgemein setzt sich der Gesamtenergiebedarf eines HS DED-LB-Prozesses  $E_{HS\ DED-LB,total}$  aus den Energiebedarfen der Systemeinheiten inklusive der Subsysteme zusammen. Für das betrachtete System ist dies somit die Summe des Energiebedarfs der Lasereinheit  $E_L$ , des Pulverförderers  $E_{PF}$ , des Entstaubungssystems  $E_S$  sowie der Antriebe der Bauplattform, die ebenfalls den Energiebedarf der Subsysteme umfassen,  $E_A$ . Somit ergibt sich Formel 4-1.

$$E_{HS\ DED-LB,total} = E_L + E_{PF} + E_S + E_A \quad 4-1$$

Grundlegend ist der Energiebedarf  $E$  die über eine definierte Zeit  $t$  aufgenommene Leistung  $P$ , wie Formel 4-2 zeigt. Daher erfolgt die Modellierung der Energiebedarfe aus der Verknüpfung von Zeit- und Leistungsmodellen.

$$E = P \cdot T = \int_{t_0}^T P(t) dt \quad 4-2$$

#### 4.1.5.1 Zeitmodell

Ein Bauzyklus setzt sich wie zuvor beschrieben aus drei Zeitabschnitten zusammen: Der Dauer des Pre-Steps  $T_{pre}$ , des In-Steps  $T_{in}$  sowie des Post-Steps  $T_{post}$ , wie in Formel 4-3 beschrieben. Die Dauer des Pre-Steps und des Post-Steps werden als Prozessparameter vor dem Fertigungsprozess individuell definiert und sind somit bekannt. Die Dauer des In-Steps ist dagegen abhängig vom Scanpfad sowie der gewählten Vorschubgeschwindigkeit und ist somit individuell für jeden Fertigungsprozess.

$$T_{total} = T_{pre} + T_{in} + T_{post} \quad 4-3$$

Zur Berechnung der Dauer des In-Steps wird die Bewegung der Bauplattform entlang des Scanpfads herangezogen. Hierzu wird der Scanpfad in mehrere Abschnitte geteilt, die in einem Scanpfad wiederholt auftreten. Für jeden dieser Abschnitte erfolgt eine individuelle Bestimmung der Dauer. Die Summe der einzelnen Zeitabschnitte ergibt dann, wie in Formel 4-4 gezeigt, die Dauer des In-Steps. Der In-Step setzt sich somit aus den folgenden Abschnitten zusammen:

- ❑ Die Dauer zum Abfahren einer Bahn, d. h. der Abschnitt eines Scanpfads, bei dem Material aufgetragen wird inklusive der Abschnitte zwischen mehreren Materialaufträgen, bei denen die Geschwindigkeit konstant gehalten wird:  $T_{Bahn}$ .
- ❑ Die Dauer zur Beschleunigung der Bauplattform auf die geforderte Vorschubgeschwindigkeit zu Beginn eines Bauzyklus oder nach Wendepunkten:  $T_{ac}$ .
- ❑ Die Dauer zum Abbremsen der Bauplattform von der definierten Vorschubgeschwindigkeit am Ende eines Bauzyklus oder vor Wendepunkten:  $T_{dec}$ .
- ❑ Die Dauer zum Abfahren von Strecken innerhalb der Vor- und Nachlaufstrecken im Scanpfad, die bereits in der definierten Geschwindigkeit abgefahren werden. Hierbei erfolgt jedoch kein Materialauftrag. Diese Pufferdistanzen werden im Scanpfad integriert, um sicherzustellen, dass die definierte Geschwindigkeit für den Materialauftrag tatsächlich erreicht wird:  $T_{Puffer,ac}$  und  $T_{Puffer,dec}$ .
- ❑ Die Dauer zur Anpassung des Abstands zwischen Düse und Bauteiloberfläche zum Wechsel von einer Lage auf die darauffolgende Lage:  $T_{Wechsel}$ .

$$T_{in} = T_{Bahn} + T_{ac} + T_{deac} + T_{Puffer,ac} + T_{Puffer,dec} + T_{Wechsel} \quad 4-4$$

Die Zeitspanne zum Abfahren des Teils des Scanpfads, bei dem Material aufgetragen wird  $T_{Bahn}$ , kann je nach Bauteilgeometrie und daraus resultierendem Scanpfad unterbrochen sein. Eine Bahn umfasst hierbei das Abfahren eines Scanpfadabschnitts mit konstanter Geschwindigkeit, der mit dem Materialauftrag beginnt und endet, d. h. der Laserstrahl wird je nach Bedarf zu- und abgeschaltet. Die Dauer zum Abfahren eines solchen Scanpfadabschnitts wird durch  $t_{Bahn}$  beschrieben. Er wird durch den Quotienten der Länge dieser Bahn  $l_{Bahn}$ , und der definierten Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  berechnet, wie in Formel 4-5 angegeben. Zur Berechnung der Gesamtzeit zum Abfahren der Bahnen  $T_{Bahn}$  wird nun statt der Länge einer Einzelbahn die Gesamtlänge der Bahnen  $L_{Bahnen}$  herangezogen, die durch die Summe der individuellen Anzahl der Bahnen je Lage  $N_{Bahnen \text{ pro Lage}}$  und der individuellen Länge der Bahnen  $l_{Bahn}$  über der Anzahl der Lagen  $N_{Lagen}$  hinweg berechnet werden kann, wie in Formel 4-6 angegeben. Die scanpfadabhängigen Größen  $l_{Bahn}$ ,  $N_{Bahnen \text{ pro Lage}}$  und  $N_{Lagen}$  sind dabei aus dem Scanpfad zu entnehmen. Die Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  wird in den Prozessparametern definiert.

$$t_{Bahn} = \frac{l_{Bahn}}{v_A} \quad 4-5$$

$$T_{Bahn} = \frac{L_{Bahnen}}{v_A} = \frac{N_{Lagen} \cdot l_{Bahn} \cdot N_{Bahnen \text{ pro Lage}}}{v_A} \quad 4-6$$

Vor Beginn der Fertigung wird die Schichtdicke  $h_{Lage}$  in den Prozessparametern definiert. Ausgehend von der Höhe des Bauteils  $h_{Bauteil}$  kann so die Anzahl der Lagen  $N_{Lagen}$  berechnet werden, wie in Formel 4-7 beschrieben. Weiterhin kann über die Breite des Bauteils  $b_{Bauteil}$  und den eingestellten Laserspotdurchmesser  $d_L$  die Anzahl der Bahnen pro Lage  $N_{Bahnen \text{ pro Lage}}$  angenähert werden. Üblicherweise erfolgt eine Überlappung der einzelnen Bahnen, die i. d. R. der Hälfte des Laserspotdurchmessers entspricht. Somit ergibt sich zur Berechnung Formel 4-8.

$$N_{Lagen} = \frac{h_{Bauteil}}{h_{Lage}} \quad 4-7$$

$$N_{Bahnen \text{ pro Lage}} = \frac{b_{Bauteil}}{\frac{1}{2} d_L} \quad 4-8$$

Beschleunigungsvorgänge der Bauplattform finden immer zu Beginn eines In-Steps statt und, in Abhängigkeit vom Scanpfad, optional nach einem Wendepunkt. Je nach Wendestrategie kann die Geschwindigkeit der Bauplattform beibehalten werden oder wird aufgrund der Richtungsänderung teilweise oder bis auf null reduziert. In diesen Fällen findet anschließend eine erneute Beschleunigung der Bauplattform statt. Somit muss zur Berechnung der gesamten Beschleunigungszeit  $T_{ac}$  die Anzahl der Wendepunkte  $N_{Wenden}$  bekannt sein. Diese entspricht der Summe der einzelnen Bahnen pro Lage  $N_{Bahnen \text{ pro Lage}}$  über alle Lagen  $N_{Lagen}$  hinweg, wie in Formel 4-9 beschrieben. Die Dauer eines einzelnen Beschleunigungsvorgangs  $t_{ac}$  kann entweder für die jeweiligen Geschwindigkeiten gemessen und anschließend extrapoliert oder durch die Quotienten aus Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v_A$  und der Beschleunigung  $a_{ac}$  berechnet werden, wie in Formel 4-10 angegeben. Für das betrachtete Fertigungssystem wird eine Beschleunigung  $a_{ac}$  von durchschnittlich  $10 \text{ m/s}^2$  angenommen. Wird beim Wendepunkt die Bauplattform bis auf null abgebremst, so entspricht  $\Delta v_A$  der definierten Geschwindigkeit  $v_A$ . Die Berechnung der Gesamtzeit der Beschleunigungsvorgänge erfolgt dann wie in Formel 4-11

angegeben. Um den Beschleunigungsvorgang zu Beginn des Bauzyklus zu berücksichtigen, wird der Anzahl der Wenden  $N_{Wenden}$  ein weiterer Beschleunigungsvorgang zugerechnet. Somit wird die initiale Beschleunigung auch dann im Zeitmodell berücksichtigt, wenn keinerlei Wendepunkte, wie bei einem rotationssymmetrischen Bauteil, vorhanden sind.

$$N_{Wenden} = N_{Lagen} \cdot N_{Bahnen \text{ pro Lage}} \quad 4-9$$

$$t_{ac} = \frac{\Delta v_A}{a_{ac}} \quad 4-10$$

$$T_{ac} = t_{ac} \cdot (N_{Wenden} + 1) \quad 4-11$$

Am Ende eines Bauzyklus sowie vor möglichen Wendepunkten wird die Bauplattform abgebremst. Die Berechnung der Dauer eines Abbremsvorgangs  $t_{dec}$  sowie der Gesamtdauer  $T_{dec}$  erfolgt analog zur zuvor beschriebenen Berechnung der Dauer der Beschleunigung. Falls für das Bremsen der Bauplattform ein anderer Beschleunigungsbetrag vorliegt als für das Beschleunigen, dann wird entsprechend  $a_{ac}$  durch den Betrag der negativen Beschleunigung für das Bremsen  $a_{dec}$  eingesetzt. Somit ergibt sich für die Berechnung der Dauer eines Abbremsvorgangs  $t_{dec}$  Formel 4-12 und für die Gesamtdauer der Abbremsvorgänge  $T_{dec}$  innerhalb eines Bauzyklus Formel 4-13. Im Fall des hier betrachteten HS DED-LB-Fertigungssystems wird für die negative Beschleunigung der Betrag der positiven Beschleunigung angenommen, sodass  $a_{dec}$  ebenfalls  $10 \text{ m/s}^2$  beträgt.

$$t_{dec} = \frac{\Delta v_A}{a_{dec}} \quad 4-12$$

$$T_{dec} = t_{dec} \cdot (N_{Wenden} + 1) \quad 4-13$$

Um einen gleichmäßigen Materialauftrag zu gewährleisten, muss die Bauplattform die definierte Vorschubgeschwindigkeit über die gesamte Bahnlänge konstant halten. Da die Wahl der Vor- und Nachlaufstrecken manuell anhand von Erfahrungswerten erfolgt, werden die Vor- und Nachlaufstrecken im Scanpfad so definiert, dass zwischen Beschleunigung bzw. Abbremsen und Materialauftrag Pufferdistanzen als Sicherheitsabstände vorhanden sind. Diese Pufferdistanzen werden in der definierten Geschwindigkeit abgefahren, es findet jedoch kein Materialauftrag statt. Zur Berechnung der Dauer für das Abfahren dieser Pufferdistanz nach Beschleunigungsvorgängen  $t_{Puffer,ac}$  und vor Abbremsvorgängen  $t_{Puffer,dec}$ , ist zunächst die Bestimmung der Pufferdistanzen  $l_{Puffer,ac}$  und  $l_{Puffer,dec}$  notwendig. Hierfür wird von der in den Prozessparametern bzw. im Scanpfad definierten Vorlauf- und Nachlauflänge  $l_{Vorlauf}$  und  $l_{Nachlauf}$  die tatsächliche Beschleunigungsstrecke subtrahiert, die sich aus dem Zusammenhang zwischen den jeweiligen Beschleunigungen  $a_{ac}$  und  $a_{dec}$  und der Zeit zum Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit  $t_{ac}$  bzw. zum Abbremsen  $t_{dec}$  berechnen lässt, wie in Formel 4-14 und Formel 4-15 gezeigt. Die so ermittelte Strecke der Pufferdistanz wird anschließend durch die Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  dividiert, um die Dauer für das Zurücklegen dieser Pufferdistanz zu berechnen, wie in Formel 4-16 für Vorlaufstrecken und in Formel 4-17 für Nachlaufstrecken gezeigt. Zur Bestimmung der Gesamtzeit zum Zurücklegen der Pufferdistanzen über einen Bauzyklus  $T_{Puffer,ac}$  nach Beschleunigungsvorgängen und  $T_{Puffer,dec}$  vor Abbremsvorgängen wird, analog zur Berechnung der Beschleunigungs- und Abbremsdauer, die Zeit für eine Pufferdistanz mit der Anzahl der Wendepunkte  $N_{Wenden}$  multipliziert, wie in Formel 4-18 und Formel 4-19 gezeigt.

$$l_{Puffer,ac} = l_{Vortlauf} - \frac{1}{2} \cdot a_{ac} \cdot t_{ac}^2 \quad 4-14$$

$$l_{Puffer,dec} = l_{Nachlauf} - \frac{1}{2} \cdot a_{dec} \cdot t_{dec}^2 \quad 4-15$$

$$t_{Puffer,ac} = \frac{l_{Puffer,ac}}{v_A} \quad 4-16$$

$$t_{Puffer,dec} = \frac{l_{Puffer,dec}}{v_A} \quad 4-17$$

$$T_{Puffer,ac} = t_{Puffer,ac} \cdot (N_{Wenden} + 1) \quad 4-18$$

$$T_{Puffer,dec} = t_{Puffer,dec} \cdot (N_{Wenden} + 1) \quad 4-19$$

Zwischen einzelnen Lagen verfährt die Bauplattform in z-Richtung. Zur annäherungsweisen Ermittlung der Zeit hierfür innerhalb eines Prozesses  $T_{Wechsel}$  wird die mittlere Dauer, die experimentell erhoben wird  $t_{Wechsel}$  und für das betrachtete Fertigungssystem 0,053 s beträgt, mit der Anzahl der Lagen  $N_{Lagen}$  multipliziert. Hieraus ergibt sich Formel 4-20.

$$T_{Wechsel} = t_{Wechsel} \cdot N_{Lagen} \quad 4-20$$

Die für das Zeitmodell experimentell erhobenen Daten sind in Anhang F in Tabelle 8-6 zusammengefasst.

#### 4.1.5.2 Teilmodellentwicklung der Lasereinheit

In Abhängigkeit von der Geometrie des Bauteils und dem darauf basierenden Scanpfad ist der Laserstrahl nicht kontinuierlich in Betrieb, sondern wird je nach Bedarf zu- und abgeschaltet. Daher setzt sich der Energiebedarf der Lasereinheit  $E_L$  aus drei Energiebedarfen zusammen, die wie in Formel 4-21 dargestellt, differenziert werden müssen:

- Der Energiebedarf während der Laserstrahl aktiv ist und Pulver aufschmilzt  $E_{L,B}$ ,
- der Energiebedarf während des Pre-Steps und des Post-Steps, in denen die Lasereinheit im Stand-by-Modus ist  $E_{L,stand-by}$ ,
- der Energiebedarf, während die Lasereinheit zwischen einzelnen Laserstrahlimpulsen im Bereithaltemodus ist  $E_{L,bereit}$ .

$$E_L = E_{L,B} + E_{L,stand-by} + E_{L,bereit} \quad 4-21$$

Wird der Laserstrahl angefordert, so geht die Lasereinheit vom Bereithaltemodus in den Modus „Betrieb“ über, sodass Material aufgetragen werden kann. In vorangegangenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Leistungsaufnahme für das Anfahren auf die geforderte Laserleistung wenige Millisekunden benötigt. Je nach Scanpfad und gewählter Vorschubgeschwindigkeit kann jedoch der Fall auftreten, dass die Lasereinheit wieder in den Bereithaltemodus wechselt, bevor eine konstante Leistungsaufnahme erreicht wird. Daher müssen zur Modellierung des Energiebedarfs während des Betriebs der Lasereinheit  $E_{L,B}$  zwei Fälle unterschieden werden, die in Formel 4-22 gezeigt sind. Ist die Zeit des Materialauftrags  $t_{Materialauftrag}$ , kleiner oder gleich der Zeit, die die Lasereinheit benötigt um eine konstante Leistungsaufnahme zu erreichen  $t_{L,an}$ , so wird der Energiebedarf basierend auf Werten für das An- und Herunterfahren der Lasereinheit modelliert. Andernfalls wird die Dauer der konstanten Leistungsaufnahme berücksichtigt.

$$E_{L,B} = \begin{cases} E_{L,B, \text{kurz}}, & \text{wenn } t_{\text{Materialauftrag}} \leq t_{L,an} \\ E_{L,B, \text{lang}}, & \text{wenn } t_{\text{Materialauftrag}} > t_{L,an} \end{cases} \quad 4-22$$

Erfolgt innerhalb der Bahn ein kontinuierlicher Materialauftrag, so entspricht  $t_{\text{Materialauftrag}}$  exakt  $t_{\text{Bahn}}$  und die Berechnung erfolgt wie in Formel 4-5 im Zeitmodell beschrieben. Wird innerhalb der Bahn der Laserstrahl mehrmals zu- und weggeschaltet, so wird in Formel 4-5 die Länge der Bahn  $l_{\text{Bahn}}$  durch die Länge des entsprechenden Materialauftrags  $l_{\text{Materialauftrag}}$  ersetzt. Somit erfolgt die Berechnung der Zeit zum Abfahren der Bahnabschnitte mit Materialauftrag anhand von Formel 4-23.

$$t_{\text{Materialauftrag}} = \frac{l_{\text{Materialauftrag}}}{v_A} \quad 4-23$$

Die Zeit  $t_{L,an}$ , die für das Anfahren der Lasereinheit notwendig ist, sinkt mit zunehmender eingestellter Laserleistung  $P_{L,set}$ . Dieses Verhalten kann mit einer Potenzfunktion angenähert werden. Es ergibt sich die folgende Formel 4-24, in die die Zeiten für das Anfahren der maximal einstellbaren Laserleistung und der minimal einstellbaren Laserleistung, also  $t_{L,an,max}$  und  $t_{L,an,min}$  erhoben und eingesetzt werden. Für das betrachtete System konnten Zeiten von 67,33 ms für  $t_{L,an,min}$  und 16,00 ms für  $t_{L,an,max}$  ermittelt werden. Die maximal einstellbare Laserleistung  $P_{L,set,max}$  beträgt 8.400 W.

$$t_{L,an} = t_{L,an,max} \cdot \left( \frac{P_{L,set}}{P_{L,set,max}} \right)^{\log\left(\frac{t_{L,an,max}}{t_{L,an,min}}\right)} \quad 4-24$$

Ist die Zeit für das Anfahren kürzer als die Dauer des Materialauftrags, so ist ebenfalls die Dauer des Herunterfahrens zur Modellierung des Energiebedarfs notwendig. Die Zeit für das Herunterfahren  $t_{L,aus}$  kann analog ebenfalls durch eine Potenzfunktion angenähert werden, so dass die Formel 4-25 resultiert. Für das Herunterfahren wurden die Zeiten für 29,33 ms für  $t_{L,aus,max}$ , sowie 64,33 ms für  $t_{L,aus,min}$  ermittelt.

$$t_{L,aus} = t_{L,aus,max} \cdot \left( \frac{P_{L,set}}{P_{L,set,max}} \right)^{\log\left(\frac{t_{L,aus,max}}{t_{L,aus,min}}\right)} \quad 4-25$$

Zur Modellierung des Falls, dass  $t_{\text{Materialauftrag}}$ , kleiner oder gleich  $t_{L,an}$  ist, kann der Energiebedarf  $E_{L,B,kurz}$  basierend auf Formel 4-26 berechnet werden. Da die Dauer des Materialauftrags geringer sein kann als die für das An- und Herunterfahren der Lasereinheit notwendigen Zeitspannen, erfolgt die Berechnung des Energiebedarfs über die Gesamtdauer des Materialauftrags  $T_{\text{Materialauftrag}}$ . Zur Modellierung der Leistungsaufnahme werden die Leistungsaufnahmen für das Anfahren  $P_{L,an}$  und das Herunterfahren  $P_{L,aus}$  anteilig anhand der Zeitspannen für das An- und Herunterfahren gemittelt.

$$E_{L,B,kurz} = \left( \frac{t_{L,an}}{t_{L,an} + t_{L,aus}} \cdot P_{L,an} + \frac{t_{L,aus}}{t_{L,an} + t_{L,aus}} \cdot P_{L,aus} \right) \cdot T_{\text{Materialauftrag}} \quad 4-26$$

Die Berechnung der Gesamtzeit des Materialauftrags  $t_{\text{Materialauftrag}}$  erfolgt analog zu Formel 4-6, wobei die Länge des Materialauftrags anstelle der Bahn eingesetzt wird und somit wie in Formel 4-27 gegeben. Erfolgt ein kontinuierlicher Materialauftrag in der Bahn, so entspricht die Dauer des Materialauftrags der Dauer für das Abfahren der Bahn  $T_{\text{Bahn}}$ .

$$T_{\text{Materialauftrag}} = \frac{L_{\text{Materialauftrag}}}{v_A} = \frac{N_{\text{Lagen}} \cdot l_{\text{Materialauftrag}} \cdot N_{\text{Bahnen pro Lage}}}{v_A} \quad 4-27$$

In den vorherigen Versuchen wurde ermittelt, dass die Zunahme der Leistungsaufnahme beim Anfahren und beim Herunterfahren mit steigender eingestellten Laserleistung approximativ einer linearen Steigung entspricht. Demnach kann innerhalb des Modells die Leistungsaufnahme der Lasereinheit durch eine Geradengleichung abgebildet werden. Hierfür fungiert die mittlere Leistungsaufnahme während des Anfahrens auf die minimal mögliche einstellbare Laserleistung  $P_{L,an,min}$  als y-Achsenabschnitt. Die Steigung der Gerade kann durch die Differenz der mittleren Leistungsaufnahmen der maximal möglichen einstellbaren Laserleistung  $P_{L,an,max}$ , für die im Rahmen der Experimente 15.081,04 W gemessen wurde, und der minimalen Leistungsaufnahme  $P_{L,an,min}$ , für die ein theoretischer Wert von 4.900,00 W durch Interpolation berechnet wurde, abgebildet werden. Der x-Achsenabschnitt wird durch die eingestellte angeforderte Laserleistung  $P_{L,set}$  bestimmt, die hier als prozentualer Anteil an der maximal möglichen Laserleistungseinstellung  $P_{L,set,max}$  umgerechnet wird. Daraus ergibt sich Formel 4-28. Analog dazu erfolgt die Berechnung von  $P_{L,aus}$ , wie in Formel 4-29 gezeigt. Für  $P_{L,aus,max}$  wurde 15.656,76 W gemessen und für  $P_{L,aus,min}$  wurde durch Interpolation über alle gemessenen Werte 2.729,90 W ermittelt.

$$P_{L,an} = (P_{L,an,max} - P_{L,an,min}) \cdot \frac{P_{L,set}}{P_{L,set,max}} + P_{L,an,min} \quad 4-28$$

$$P_{L,aus} = (P_{L,aus,max} - P_{L,aus,min}) \cdot \frac{P_{L,set}}{P_{L,set,max}} + P_{L,aus,min} \quad 4-29$$

Für den Fall, dass ein Niveau mit einer konstanten Leistungsaufnahme erreicht wird, setzt sich der Energiebedarf für den Betrieb der Lasereinheit  $E_{L,B,lang}$  aus zwei Bestandteilen zusammen, wie in Formel 4-30 gezeigt: Dem Energiebedarf zum Anfahren und Herunterfahren  $E_{L,B,lang,an/aus}$  und dem Energiebedarf für die konstante Leistungsaufnahme  $E_{L,B,lang,halten}$ .

$$E_{L,B,lang} = E_{L,B,lang,an/aus} + E_{L,B,lang,halten} \quad 4-30$$

Der Energiebedarf zum Anfahren und Herunterfahren eines jeden Laserimpulses  $E_{L,lang,an/aus}$  ist das Produkt aus der Summe der mittleren Leistungsaufnahme zum Anfahren  $P_{L,an}$  und Herunterfahren  $P_{L,aus}$ , jeweils multipliziert mit dem entsprechenden kumulierten Zeitabschnitten  $T_{L,an}$  bzw.  $T_{L,aus}$ , wie in Formel 4-31 angegeben.

$$E_{L,B,lang,an/aus} = P_{L,an} \cdot T_{L,an} + P_{L,aus} \cdot T_{L,aus} \quad 4-31$$

Die Gesamtzeiten für das Anfahren  $T_{L,an}$  und das Herunterfahren  $T_{L,aus}$  ist dabei die Summe der Zeiten für alle Anfahrvorgänge  $t_{L,an}$  bzw. Herunterfahrvorgänge  $t_{L,aus}$  innerhalb eines HS DED-LB Fertigungsprozesses und kann wie in Formel 4-32 und Formel 4-33 beschrieben durch das Multiplizieren mit der Anzahl der Bahnen pro Lage  $N_{Bahnen \text{ pro Lage}}$  und der Anzahl der Lagen  $N_{Lagen}$  berechnet werden.

$$T_{L,an} = N_{Lagen} \cdot t_{L,an} \cdot N_{Bahnen \text{ pro Lage}} \quad 4-32$$

$$T_{L,aus} = N_{Lagen} \cdot t_{L,aus} \cdot N_{Bahnen \text{ pro Lage}} \quad 4-33$$

Der Energiebedarf für die konstante Leistungsaufnahme  $E_{L,B,lang,halten}$  setzt sich folglich aus der mittleren Leistungsaufnahme über die restliche verbleibende Zeit des Materialauftrags zusammen. Dieser Zeitabschnitt, bei dem die Leistungsaufnahme der Lasereinheit nahezu konstant ist, wird durch die Differenz der Gesamtzeit für den Materialauftrag  $T_{Materialauftrag}$  und der Zeiten für das Hoch- und Herunterfahren der Laserleistung  $T_{L,an}$  und  $T_{L,aus}$  bestimmt. Diese Zeitspanne

wird dann mit der mittleren Leistungsaufnahme des konstanten Betriebs  $P_{L,B}$ , multipliziert, so dass der Energiebedarf  $E_{L,B,lang,halten}$ , wie in Formel 4-34 gezeigt, berechnet werden kann. Das in den Vorversuchen identifizierte Einpendeln auf eine konstante Leistungsaufnahme während des Betriebs wird an dieser Stelle vernachlässigt. Die Leistungsaufnahme hierfür wird aufgrund der nur geringen Abweichungen der mittleren Leistungsaufnahmen zwischen Einpendeln und Betrieb zur Reduktion der Modellkomplexität der konstanten Leistungsaufnahme des Betriebs inkludiert.

$$E_{L,B,lang,halten} = P_{L,B} \cdot (T_{Materialauftrag} - T_{L,an} - T_{L,aus}) \quad 4-34$$

Die erforderliche Leistung der Lasereinheit  $P_{L,B}$  bei einem kontinuierlichen Anfordern des Laserstrahls hängt von der eingestellten Laserleistung  $P_{L,set}$  ab. Es wurde festgestellt, dass die Leistungsaufnahme mit einer höheren eingestellten Laserleistung annähernd linear steigt. Somit kann die Leistungsaufnahme durch eine lineare Funktion beschrieben werden. Dabei dient die Leistungsaufnahme des Bereithaltmodus  $P_{L,bereit}$  als y-Achsenabschnitt und die Differenz zwischen der Leistungsaufnahme bei einer maximalen eingestellten Laserleistung  $P_{L,B,max}$  und der Leistungsaufnahme im Bereithaltmodus als Steigung. Durch Einsetzen der eingestellten Laserleistung  $P_{L,set}$  als Anteil der maximal eingestellten Laserleistung  $P_{L,set,max}$  kann nun mit Formel 4-35 die Leistungsaufnahme berechnet werden.

$$P_{L,B} = (P_{L,B,max} - P_{L,bereit}) \cdot \frac{P_{L,set}}{P_{L,set,max}} + P_{L,bereit} \quad 4-35$$

Die maximale Leistungsaufnahme  $P_{L,B,max}$  kann experimentell ermittelt werden, wie hier geschehen, wobei ein Wert von 26.652,89 W bestimmt wurde. Sie kann zudem auch als maximale Leistungsaufnahme der Spezifikationen der Lasereinheit entnommen werden oder basierend auf dem Wirkungsgrad  $\eta_L$  gemäß Formel 4-36 berechnet werden. Für das betrachtete HS DED-LB-Fertigungssystem beträgt der Wirkungsgrad der maximalen Laserleistung bei ca. 31 %, wobei zu beachten ist, dass der Wirkungsgrad mit zunehmender eingestellter Laserleistung steigt.

$$P_{L,B,max} = \frac{P_{L,set,max}}{\eta_L} \quad 4-36$$

Ist der Laserstrahl nicht zugeschaltet, so befindet sich die Lasereinheit während des In-Steps im Bereithaltmodus. Der hierfür benötigte Energiebedarf entspricht der mittleren Leistungsaufnahme  $P_{L,bereit}$  über die verbleibende Zeit des In-Steps, wie in Formel 4-37 gezeigt. Die Leistungsaufnahme ist hierbei während des Bereithaltmodus unabhängig von der eingestellten Laserleistung und kann als konstant angenommen werden. Für das betrachtete System wurde hierfür eine mittlere Leistungsaufnahme  $P_{L,bereit}$  von 4.368,36 W ermittelt. Die Lasereinheit befindet sich nur während des In-Steps in diesem Modus, wenn der Laserstrahl gerade nicht angefordert wird. Die Zeit ist somit die Differenz aus der Dauer des In-Steps  $T_{in}$  und der Gesamtzeit, in der die Lasereinheit aktiv einen Laserstrahl erzeugt, d. h. in Betrieb ist,  $T_{Materialauftrag}$ .

$$E_{L,bereit} = P_{L,bereit} \cdot (T_{in} - T_{Materialauftrag}) \quad 4-37$$

Während des Pre-Steps und des Post-Steps befindet sich die Lasereinheit im Stand-by-Modus. Der Energiebedarf hierfür kann anhand der mittleren Leistungsaufnahme über die Zeit berechnet werden, wie in Formel 4-38 gezeigt. Da der Pre-Step und der Post-Step als Prozessparameter vor Prozessbeginn definiert werden, sind sie bekannt. Die erforderliche Leistung  $P_{L,stand-by}$  ist unabhängig von gewählten Prozessparametern und kann als konstant

angenommen werden. Sie muss für jedes System individuell bestimmt werden. Für das hier betrachtete System konnte basierend auf den Ergebnissen der Experimente eine mittlere Leistungsaufnahme von 2.343,40 W ermittelt werden.

$$E_{L,stand-by} = P_{L,stand-by} \cdot (T_{pre} + T_{post}) \quad 4-38$$

Die für die Energieprognose der Lasereinheit notwendigen und experimentell erhobenen Daten sind ebenfalls in Anhang F in Tabelle 8-7 zusammengefasst.

#### 4.1.5.3 Teilmodellentwicklung des Pulverförderers

Der Pulverförderer ist während des gesamten In-Steps sowie während Teilen des Pre-Steps in Betrieb. Da das Pulver während des Prozesses kontinuierlich gefördert wird, unterliegt der Betrieb keinen Schwankungen. Daraus resultiert eine Leistungsaufnahme des Pulverförderers, die nur geringe Fluktuationen aufweist, die durch das Heranziehen des arithmetischen Mittels vernachlässigt werden können.

Grundsätzlich setzt sich der Gesamtenergiebedarf des Pulverförderers  $E_{PF}$  aus vier Bestandteilen zusammen:

- Der Energiebedarf während des Anfahrens  $E_{PF,an}$ ,
- der Energiebedarf während des Betriebs  $E_{PF,B}$ ,
- der Energiebedarf, der während des Herunterfahrens des Pulverförderers  $E_{PF,aus}$  entsteht, und
- der Energiebedarf während der Pulverförderer im Stand-by-Modus ist  $E_{PF,stand-by}$ .

Somit gilt für den Gesamtenergiebedarf des Pulverförderers  $E_{PF}$  die folgende Formel 4-39.

$$E_{PF} = E_{PF,stand-by} + E_{PF,an} + E_{PF,B} + E_{PF,aus} \quad 4-39$$

Da sowohl die Dauer des Anfahrens und des Herunterfahrens als auch die mittlere Leistungsaufnahme unabhängig von den gewählten Prozessparametern sind, können die Energiebedarfe für das Anfahren  $E_{PF,an}$  und das Herunterfahren  $E_{PF,aus}$  beide als Konstanten angenommen werden. Dadurch besteht nach der Erhebung keine Notwendigkeit der weiteren Modellierung des Energiebedarfs. Für das hier betrachtete System wurde für  $E_{PF,an}$  ein mittlerer Energiebedarf von 0,0914 Wh und für  $E_{PF,aus}$  ein mittlerer Energiebedarf von 0,1102 Wh gemessen. Aufgrund des sehr geringen Energiebedarfs, der während des Anfahrens und Herunterfahrens entsteht, ist eine Vernachlässigung der beiden Energiebedarfe zur Reduktion der Komplexität des Modells oder des Aufwands der Datenerhebung ebenfalls möglich.

Der Pulverförderer ist während des gesamten In-Steps  $t_{in}$  i. d. R. ununterbrochen in Betrieb. Die Dauer, in der der Pulverförderer im Pre-Step eingeschaltet ist, setzt sich aus der Dauer des Pre-Steps  $T_{pre}$  abzüglich der Einschaltzeitverzögerung  $T_{PF,z}$  sowie aus der Dauer für das Anfahren zusammen. Sowohl  $T_{pre}$  als auch  $T_{PF,z}$  werden in den Prozessparametern definiert und sind daher bekannt. Die Werte für  $T_{pre}$  liegen meist zwischen 13 s und 23 s und für  $T_{PF,z}$  zwischen 3 s und 10 s. Die Dauer für das Anfahren des Pulverförderers  $T_{PF,an}$  ist konstant und wurde experimentell mit 3 s bestimmt. Die Dauer des In-Steps  $T_{in}$  wird, wie zu Beginn des Kapitels 4.1.5.1 beschrieben, ermittelt. Gemeinsam mit der mittleren Leistungsaufnahme während des Betriebs des Pulverförderers  $P_{PF,B}$  ergibt sich somit Formel 4-40.

$$E_{PF,B} = P_{PF,B} \cdot (T_{pre} - T_{PF,z} - T_{PF,an} + T_{in}) \quad 4-40$$

Die Leistungsaufnahme während des Betriebes  $P_{PF,B}$  ist abhängig von den gewählten Prozessparametern der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe  $n_F$  und der Rotationsgeschwindigkeit des Rührers  $n_R$ . Da keine Wechselwirkungen vorliegen, kann die Leistungsaufnahme des Pulverförderers durch drei Bestandteile modelliert werden: Zu der Basisleistungsaufnahme im Stand-by-Modus  $P_{PF,stand-by}$ , die unabhängig von den gewählten Prozessparametern ist, werden die durch den Betrieb des Rührers und die durch den Betrieb der Förderscheibe zusätzlichen, individuellen Leistungsaufnahmen  $P_{PF,B,R}$  und  $P_{PF,B,F}$  addiert. Somit gilt Formel 4-41.

$$P_{PF,B} = P_{PF,stand-by} + P_{PF,B,R} + P_{PF,B,F} \quad 4-41$$

Für beide Prozessparameter ist ein linearer Anstieg der Leistungsaufnahme bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten zu beobachten. Daher kann die erforderliche Leistung für jeden Prozessparameter durch eine lineare Regression berechnet werden. Ausgehend von den jeweiligen Basisleistungen des Rührers  $P_{PF,B,R,basis}$  und der Förderscheibe  $P_{PF,B,F,basis}$ , die als y-Achsenabschnitt dienen, ergibt sich der Proportionalitätsfaktor aus der Differenz zwischen den maximalen Leistungsaufnahme  $P_{PF,B,R,max}$  und  $P_{PF,B,F,max}$  sowie der jeweiligen Basisleistungsaufnahme. Die maximal aufgenommene Leistung sowie die Basisleistungsaufnahme müssen sowohl für den Rührer als auch für die Förderscheibe experimentell ermittelt werden. Für das hier betrachtete System ergeben sich aus den Experimenten für den Rührer eine Basisleistung  $P_{PF,B,R,basis}$  von 23,30 W und eine maximale Leistungsaufnahme von 30,38 W sowie für die Förderscheibe eine Basisleistungsaufnahme von 1,27 W und eine maximale Leistungsaufnahme von 10,14 W. Der x-Achsenabschnitt wird durch den Anteil der eingestellten Rotationsgeschwindigkeiten  $n_R$  bzw.  $n_F$  an den Maximalgeschwindigkeiten berechnet, die 3.300 U/min für  $n_{R,max}$  und 10 U/min für  $n_{F,max}$  betragen. Somit ergeben sich für die durch den Rührer verursachte Leistungsaufnahme  $P_{PF,B,R}$  Formel 4-42 und für die von der Förderscheibe verursachte Leistungsaufnahme  $P_{PF,B,F}$  Formel 4-43.

$$P_{PF,B,R} = (P_{PF,B,R,max} - P_{PF,B,R,basis}) \cdot \frac{n_R}{n_{R,max}} + P_{PF,B,R,basis} \quad 4-42$$

$$P_{PF,B,F} = (P_{PF,B,F,max} - P_{PF,B,F,basis}) \cdot \frac{n_F}{n_{F,max}} + P_{PF,B,F,basis} \quad 4-43$$

Während des Post-Steps befindet sich der Pulverförderer im Stand-by-Modus. Der Energiebedarf während des Stand-by-Modus ist anhängig von der Dauer, während der sich der Pulverförderer im Stand-by-Modus befindet und der Leistungsaufnahme. Die Leistungsaufnahme während des Stand-by-Modus  $P_{PF,stand-by}$  ist eine Konstante und wird einmalig experimentell ermittelt. Für den betrachteten Pulverförderer wurde ein Wert von 92,70 W bestimmt. Der Pulverförderer befindet sich kurze Zeit im Pre-Step sowie während des Großteils des Post-Steps im Stand-by-Modus. Die Dauer während des Pre-Steps ist abhängig von der Wahl der Einschaltverzögerung  $T_{PF,z}$ , also dem zeitlichen Abstand zwischen Einschalten der Schutzgasvolumenströme und dem Pulverförderer. Direkt zu Beginn des Post-Steps wird der Pulverförderer heruntergefahren und befindet sich anschließend im Stand-by-Modus, sodass die Zeit hierfür aus der Differenz zwischen der Dauer des Post-Steps  $T_{post}$  und der Dauer für das Herunterfahren des Pulverförderers  $T_{PF,aus}$  berechnet werden kann. Daraus ergibt sich die folgende Formel 4-44. Die Dauer des Post-Steps  $T_{post}$  sowie die Einschaltzeitverzögerung  $T_{PF,z}$  sind Prozessparameter und werden vor Prozessbeginn definiert. Übliche Werte sind für  $T_{post}$  10 s und für  $T_{PF,z}$  3 s. Die

Dauer für das Herunterfahren  $T_{pf,aus}$  muss experimentell ermittelt werden. Für das betrachtete System wurde hierbei eine mittlere Dauer von 3,96 s ermittelt.

$$E_{PF,stand-by} = P_{PF,stand-by} \cdot (T_{PF,z} + T_{post} - T_{PF,aus}) \quad 4-44$$

Die Daten, die für das Energiebedarfsprognosemodell des Pulverförderers notwendigen sind, wurden experimentell erhoben und sind in Anhang F in Tabelle 8-8 zusammengefasst.

#### 4.1.5.4 Teilmodellentwicklung des Entstaubungssystems

Das Entstaubungssystem ist weitestgehend unabhängig vom Prozess und läuft kontinuierlich während des gesamten Bauzyklus. I. d. R. wird es zu Beginn des Anlagenbetriebs eingeschaltet, wobei direkt das gewünschte Absaugungsvolumen eingestellt wird, und erst zu Betriebsende wieder ausgeschaltet. Somit wird im Modell lediglich der Betrieb des Entstaubungssystems berücksichtigt. Daher erfolgt, wie in Formel 4-45 gezeigt, die Berechnung des Energiebedarfs des Entstaubungssystems  $E_S$  durch die Multiplikation der mittleren Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems während des Betriebs  $P_{S,B}$  mit der gesamten Prozesszeit  $T_{total}$ .

$$E_S = P_{S,B} \cdot T_{total} \quad 4-45$$

Die Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems während seines Betriebs ist durch starke Fluktuationen gekennzeichnet, die auf das variierende Absaugungsvolumen zurückzuführen ist. Dennoch kann sie durch die Annahme des arithmetischen Mittelwerts angenähert werden. Die Zunahme der Leistungsaufnahme über ein steigendes Absaugungsvolumen kann durch eine quadratische Funktion angenähert werden. Hierfür werden drei charakteristische Punkte, die Leistungsaufnahme bei maximalem Absaugungsvolumen  $P_{S,max}$ , die minimale Basisleistungsaufnahme  $P_{S,basis}$  sowie die Leistungsaufnahme bei einem eingestellten Absaugungsvolumen  $\dot{V}_{S,set}$ , das 50 % des maximalen Absaugungsvolumen  $\dot{V}_{S,set,max}$  entspricht,  $P_{S,50\%}$ , definiert. Diese drei charakteristischen Punkte wurden gewählt, um nach der Erstellung der Funktion durch das Gaußschen Eliminationsverfahren eine Funktion mit möglichst geringer Komplexität zu erhalten. Durch das Einsetzen der ermittelten Leistungsaufnahmen in Formel 4-46 kann die Leistungsaufnahme des Entstaubungssystems individuell angepasst werden. Für das untersuchte System wurde für  $P_{S,max}$  4.007,76 W, für  $P_{S,50\%}$  757,41 W und für  $P_{S,basis}$  402,60 W ermittelt.

$$P_{S,B} = (2P_{S,max} - 4P_{S,50\%} + 2P_{S,basis}) \cdot \left( \frac{\dot{V}_{S,set}}{\dot{V}_{S,set,max}} \right)^2 + (-P_{S,max} + 4P_{S,50\%} - 3P_{S,basis}) \cdot \frac{\dot{V}_{S,set}}{\dot{V}_{S,set,max}} + P_{S,basis} \quad 4-46$$

Die für die Energiebedarfsprognose des Entstaubungssystem notwendigen Daten sind in Anhang F in Tabelle 8-9 zusammengefasst.

#### 4.1.5.5 Teilmodellentwicklung des Antriebs der Bauplattform und peripheren Subsysteme

Aufgrund der Struktur der Messsensoren wird die Leistungsaufnahme der Antriebe sowie der peripheren Subsysteme gemeinsam aufgenommen. Die Voruntersuchungen zeigen eine konstante Leistungsaufnahme der peripheren Subsysteme. Daher kann diese gemeinsam mit der der Antriebe der Bauplattform im Modell abgebildet werden. Im Folgenden wird jedoch nur

von der Leistungsaufnahme der Antriebe gesprochen und diese abgebildet. Diese schließt die Leistungsaufnahme der peripheren Subsysteme mit ein.

Die drei Linearantriebe bewegen die Bauplattform entlang des definierten Scanpfads. Im Pre-Step und meist auch im Post-Step befinden sich die Antriebe im Stand-by-Modus. Im In-Step sind die Antriebe in Betrieb. Daher setzt sich der Energiebedarf für die Antriebe aus dem Energiebedarf während des Stand-by-Modus  $E_{A,stand-by}$  und dem Energiebedarf während des Betriebs  $E_{A,B}$  zusammen, wie in Formel 4-47 gezeigt.

$$E_A = E_{A,B} + E_{A,stand-by} \quad 4-47$$

Die Antriebe befinden sich im Pre-Step im Stand-by-Modus. Im Post-Step wird der additive Fertigungsprozess beendet und im betrachteten Fertigungssystem fährt die Bauplattform keinen Scanpfad ab. Dennoch ist es möglich, die Bauplattform während des Post-Steps an eine definierte Position zu fahren, um die Entnahme des Bauteils zu erleichtern. Da die Fahrt in diese Entnahmeposition zum einen lediglich optional ist und zum anderen bei wesentlich geringeren Geschwindigkeiten vergleichsweise kurze Strecken zurückgelegt werden, die nur einen geringen Energiebedarf aufweisen, wird diese Option im Modell vernachlässigt. Demnach wird angenommen, dass die Antriebe sich während des gesamten Post-Steps ebenfalls im Stand-by-Modus befinden. Somit wird der Energiebedarf des Stand-by-Modus der Antriebe  $E_{A,stand-by}$  durch die mittlere Leistungsaufnahme während des Stand-by-Modus  $P_{A,stand-by}$  über die Dauer des Pre-Steps  $T_{pre}$  und des Post-Steps  $T_{post}$  hinweg berechnet, wie in Formel 4-48 angegeben. Die Leistungsaufnahme während des Stand-by-Modus wird experimentell erhoben, wobei für das hier betrachtete Fertigungssystem eine Leistungsaufnahme  $P_{A,stand-by}$  in Höhe von 1.250,29 W ermittelt wurde.

$$E_{A,stand-by} = P_{A,stand-by} \cdot (T_{pre} + T_{post}) \quad 4-48$$

Die Leistungsaufnahme des Betriebs der Antriebe  $E_{A,B}$  während des In-Steps ist von der Vorschubgeschwindigkeit und dem gewählten Scanpfad abhängig. Da der Scanpfad lediglich nominal skalierbar ist, ist eine Fallunterscheidung zwischen unterschiedlichen Scanpfaden notwendig. Hierzu werden, wie bereits zuvor in der Analyse des Energiebedarfs, die zwei grundlegenden Ausprägungsformen, ein vorwiegend linearer Scanpfad mit Wendepunkten  $E_{A,lin}$  und ein vorwiegend rotationssymmetrischer Scanpfad ohne Wendepunkte  $E_{A,rot}$ , ausgewählt. Dadurch ergibt sich die Fallunterscheidung wie in Formel 4-49 angegeben.

$$E_{A,B} = \begin{cases} E_{A,rot}, & \text{wenn Scanpfad} = \text{rotationssymmetrisch} \\ E_{A,lin}, & \text{wenn Scanpfad} = \text{linear} \end{cases} \quad 4-49$$

Für beide Fälle wird der Energiebedarf individuell bestimmt. Für den rotationssymmetrischen Scanpfad, also ein Scanpfad ohne Wendepunkte, wird der Energiebedarf  $E_{A,rot}$  durch die entsprechende mittlere Leistungsaufnahme  $P_{A,B,rot}$  über die gesamte Zeit des In-Steps  $T_{in}$  berechnet, wie in Formel 4-50 gegeben.

$$E_{A,rot} = P_{A,B,rot} \cdot T_{in} \quad 4-50$$

Aufgrund des zyklischen Verhaltens der Leistungsaufnahme während eines rotationssymmetrischen Scanpfads kann die Leistungsaufnahme durch das arithmetische Mittel approximiert werden. Bei der Analyse von rotationssymmetrischen Scanpfaden wurde zudem festgestellt, dass die Leistungsaufnahme der Antriebe mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit progressiv ansteigt. Die Messdaten zeigen, dass das Verhalten durch eine Funktion dritten Grades

angenähert werden kann. Ein entsprechendes Modell kann durch das Gaußsche Eliminationsverfahren hergeleitet werden. Hierzu werden vier Punkte definiert: Die mittlere Leistungsaufnahme bei maximaler Geschwindigkeit  $P_{A,B,rot,max}$ , bei Geschwindigkeiten die 75 % und 50 % der Maximalgeschwindigkeit entsprechen  $P_{A,B,rot,75\%}$  und  $P_{A,B,rot,50\%}$  sowie die theoretisch minimale Geschwindigkeit  $P_{A,B,rot,min}$ . Das Ergebnis des Gaußschen Eliminationsverfahrens ist in Formel 4-51 angegeben.

$$\begin{aligned}
 P_{A,B,rot} = & \left( 8P_{A,B,rot,max} - 21,33P_{A,B,rot,75\%} + 16P_{A,B,rot,50\%} - 2,67P_{A,B,rot,min} \right) \\
 & \cdot \left( \frac{v_A}{v_{A,max}} \right)^3 \\
 & + \left( -10P_{A,B,rot,max} + 32P_{A,B,rot,75\%} - 28P_{A,B,rot,50\%} + 6P_{A,B,rot,min} \right) \\
 & \cdot \left( \frac{v_A}{v_{A,max}} \right)^2 \\
 & + \left( 3P_{A,B,rot,max} - 10,67P_{A,B,rot,75\%} + 12P_{A,B,rot,50\%} - 4,33P_{A,B,rot,min} \right) \\
 & \cdot \left( \frac{v_A}{v_{A,max}} \right) + P_{A,B,rot,min}
 \end{aligned} \tag{4-51}$$

Durch das Einsetzen der Messwerte kann der Energiebedarf in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit  $v_A$  und der maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{A,max}$ , die für das hier betrachtete System 200 m/min beträgt, berechnet werden. Als Messwerte wurden für  $P_{A,B,rot,max}$  eine Leistungsaufnahme von 19.741,19 W, für  $P_{A,B,rot,75\%}$  von 8.622,20 W, für  $P_{A,B,rot,50\%}$  von 4.237,43 W sowie für  $P_{A,B,rot,min}$  von 2.020,60 W ermittelt.

Bei Scanpfaden mit Wendepunkten, die eher linear sind, wird jede Strecke zwischen zwei Wendepunkten in drei Abschnitte unterteilt und die entsprechenden Energiebedarfe berechnet:

- Der aus der Beschleunigung  $E_{A,ac,lin}$ , der Bauplattform resultierende Energiebedarf,
- der Energiebedarf für das Konstanthalten der Geschwindigkeit  $E_{A,B,lin}$ ,
- der Energiebedarf für das Abbremsen der Bauplattform  $E_{A,dec,lin}$ .

Somit setzt sich der Gesamtenergiebedarf für lineare Scanpfade  $E_{A,lin}$ , wie in Formel 4-52 gezeigt, aus der Summe dieser drei Energiebedarfe zusammen.

$$E_{A,lin} = E_{A,ac,lin} + E_{A,B,lin} + E_{A,dec,lin} \tag{4-52}$$

Für jeden dieser Abschnitte wird die entsprechende Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Geschwindigkeit modelliert. In den vorangehenden Untersuchungen wurde eine Abhängigkeit der Leistungsaufnahme von der Richtung der Bewegung identifiziert. Eine modellhafte Abbildung dieser wäre bspw. durch eine anteilige Zurechnung der mittleren Leistungsaufnahmen in Abhängigkeit des Winkels der Bewegung relativ zur x- oder y-Achse möglich. Jedoch kann die Richtung der Bewegung individuell für jede Bahn innerhalb des Scanpfads sein. Die Berechnung des Energiebedarfs müsste bei einer Berücksichtigung der individuellen Richtungen des Scanpfads somit für jede Auftragsspur individuell erfolgen, was zu einem starken Anstieg der Komplexität der Modellanwendung führt, da detaillierte Kenntnisse des Scanpfads notwendig wären. Zudem ist die Differenz der mittleren Leistungsaufnahmen für unterschiedliche Richtungen zwar gegeben, jedoch vergleichsweise gering. Daher werden für das Modell unterschiedliche Richtungen für Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge sowie für das Halten der

Geschwindigkeit vernachlässigt. Stattdessen wird für die Leistungsaufnahmen jeweils ein Mittelwert der Bewegungen parallel zur x- oder y-Achse herangezogen.

Der Energiebedarf für die Beschleunigung  $E_{A,ac,lin}$  ist somit das Produkt der mittleren Leistungsaufnahme für das lineare Beschleunigen  $P_{A,ac,lin}$  und der Gesamtzeit, in der die Bauplattform beschleunigt  $T_{ac}$ , wie in Formel 4-53 gezeigt.

$$E_{A,ac,lin} = P_{A,ac,lin} \cdot T_{ac} \quad 4-53$$

Analog wird der Energiebedarf für das Abbremsen  $E_{A,dec,lin}$  modelliert, indem die mittlere Leistungsaufnahme für das Abbremsen  $P_{A,dec,lin}$  über die Gesamtzeit für das Abbremsen  $T_{dec}$  integriert wird, wie in Formel 4-54 gezeigt.

$$E_{A,dec,lin} = P_{A,dec,lin} \cdot T_{dec} \quad 4-54$$

Für den Energiebedarf, der während des Haltens der Geschwindigkeit  $E_{A,B,lin}$  benötigt wird, wird somit die entsprechende Leistung  $P_{A,B,lin}$  mit der restlichen Zeit des In-Steps  $T_{in}$  multipliziert, wie in Formel 4-55 beschrieben.

$$E_{A,B,lin} = P_{A,B,lin} \cdot (T_{in} - T_{ac} - T_{deac}) \quad 4-55$$

Die Leistungsaufnahmen für das Anfahren  $P_{A,ac,lin}$ , das Halten der Geschwindigkeit  $P_{A,B,lin}$  sowie für das Abbremsen  $P_{A,dec,lin}$  wird durch lineare Regressionsmodelle bestimmt. Diese werden durch Geradengleichungen angenähert, wobei die Differenz zwischen der Leistungsaufnahme bei der maximalen Geschwindigkeit  $P_{A,ac,lin,max}$ ,  $P_{A,B,lin,max}$  sowie  $P_{A,dec,lin,max}$  und der theoretischen Leistungsaufnahme bei der minimalen Geschwindigkeit  $P_{A,ac,lin,min}$ ,  $P_{A,B,lin,min}$  sowie  $P_{A,dec,lin,min}$  die Steigung bildet. Der x-Achsenabschnitt wird wiederum aus der relativen Geschwindigkeit berechnet d.h. aus dem Quotienten der eingestellten Geschwindigkeit und der Maximalgeschwindigkeit, wobei als Maximalgeschwindigkeit  $v_{A,max}$  die Geschwindigkeit verwendet wird, die zuvor zur Ermittlung der maximalen Leistungsaufnahmen eingestellt wurde. Der y-Achsenabschnitt ist wiederum die theoretisch minimale Leistungsaufnahme. So ergeben sich für die Leistungsaufnahme der Beschleunigung  $P_{A,ac,lin}$  Formel 4-56, für das Halten der Geschwindigkeit  $P_{A,B,lin}$  Formel 4-57 und für das Abbremsen  $P_{A,dec,lin}$  Formel 4-58.

$$P_{A,ac,lin} = (P_{A,ac,lin,max} - P_{A,ac,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,ac,lin,min} \quad 4-56$$

$$P_{A,B,lin} = (P_{A,B,lin,max} - P_{A,B,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,B,lin,min} \quad 4-57$$

$$P_{A,dec,lin} = (P_{A,dec,lin,max} - P_{A,dec,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,dec,lin,min} \quad 4-58$$

Für den Fall, dass aus Prozessgründen die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht werden kann, ist die Modellierung des Energiebedarfs basierend auf der gemessenen Leistungsaufnahme bei einer Geschwindigkeit, die 50 % der Maximalgeschwindigkeit entspricht, ebenfalls möglich. Damit dennoch auch Geschwindigkeiten oberhalb der 50 % modelliert werden können, wird die maximale Geschwindigkeit linear extrapoliert, indem die Steigung, d. h. die Differenz der Leistungsaufnahme bei 50 % relativer Geschwindigkeit  $P_{A,ac,lin,50\%}$ ,  $P_{A,B,lin,50\%}$  sowie  $P_{A,dec,lin,50\%}$  und der theoretisch minimalen Geschwindigkeit, verdoppelt wird. Daraus ergeben sich Formel 4-59 für  $P_{A,ac,lin}$ , Formel 4-60 für  $P_{A,B,lin}$  und Formel 4-61 für  $P_{A,dec,lin}$ .

$$P_{A,ac,lin} = 2 \cdot (P_{A,ac,lin,50\%} - P_{A,ac,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,ac,lin,min} \quad 4-59$$

$$P_{A,B,lin} = 2 \cdot (P_{A,B,lin,50\%} - P_{A,B,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,B,lin,min} \quad 4-60$$

$$P_{A,dec,lin} = 2 \cdot (P_{A,dec,lin,50\%} - P_{A,dec,lin,min}) \cdot \frac{v_A}{v_{A,max}} + P_{A,dec,lin,min} \quad 4-61$$

Die minimalen und maximalen Leistungsaufnahmen werden experimentell erhoben. Für das Beschleunigen der Bauplattform ergibt sich somit eine Leistungsaufnahme bei einer Vorschubgeschwindigkeit, der 50 % der maximalen Vorschubgeschwindigkeit entspricht  $P_{A,ac,lin,50\%}$ , von 10.285,79 W und eine minimale Leistungsaufnahme  $P_{A,ac,lin,min}$  von 1.282,20 W. Als mittlere Leistungsaufnahme für das Halten der Geschwindigkeit ergibt sich analog für  $P_{A,B,lin,50\%}$  3.105,72 W und für  $P_{A,B,lin,min}$  2.044,05 W sowie für das Abbremsen  $P_{A,dec,lin,50\%}$  4.629,00 W und für  $P_{A,dec,lin,min}$  1.986,50 W. Diese Daten, sowie alle weiteren, die für die Energiebedarfsprognose der Antriebe der Bauplattform erforderlich sind, wurden experimentell erhoben und sind in Anhang F in Tabelle 8-10 zusammengefasst.

#### 4.1.6 Validierung und anforderungsbezogene Diskussion

Das Energiebedarfsprognosemodell wurde mit den zuvor experimentell erhobenen Daten aufgestellt. Um die Prognosequalität zu beurteilen sowie die Erfüllung der an das Modell gestellten Anforderungen zu evaluieren, wurde das Modell an drei unterschiedlichen Validierungsbauteilen angewendet, die in Abbildung 4-21 abgebildet sind. Ziel war die Erprobung des Modells an drei unterschiedlichen Bauteilen. Der Quader steht dabei exemplarisch für massive Bauteile, die überwiegend aus linearen Scanpfaden bestehen. Die Herstellung des Logos erfolgte ebenfalls durch lineare Scanpfade, wobei der Laserstrahl innerhalb einer Bahn mehrfach an- und abgeschaltet wird. Der Zylinder ist als einziges Bauteil dünnwandig und rotationssymmetrisch. Die Bauteilfertigung erfolgt daher über eine kreisförmige Scanbahn mit kontinuierlichem Materialauftrag, weshalb der Laserstrahl während des gesamten In-Steps angeschaltet ist. Diese drei Bauteile repräsentieren somit unterschiedliche Fälle möglicher Bauteilgeometrien.



Abbildung 4-21: Validierungsbauteile

Erstes Bauteil ist ein Quader, der 15 mm lang, 8,1 mm breit und 4,8 mm hoch ist und 4,69 g wiegt. Der Quader besitzt einen weitestgehend linearen, manuell erstellten Scanpfad mit entsprechenden Vorlaufstrecken. Der Materialauftrag erfolgt bei einer Geschwindigkeit von 80 m/min und einer Laserleistung von 3.200 W. Die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe von 5,5 U/min entspricht einem Pulvermassenstrom von 35 g/min. Das zweite Validierungsbauteil, das Logo, weist ebenfalls einen weitestgehend linearen Scanpfad auf, wobei der G-Code rechnergestützt mithilfe einer Computer-aided-manufacturing-Software erzeugt wurde. Im Vergleich zum Quader variieren beim Logo die Längen der einzelnen Bahnen im

Scanpfad und der Laserstrahl wird innerhalb einer Bahn mehrmals zu- und abgeschaltet. Zudem ist das Logo mit einer Länge von 77 mm, einer Breite von 38,4 mm und einer Höhe von 3,3 mm sowie einem Bauteilgewicht von 31,41 g größer und schwerer als der Quader. Die Vorschubgeschwindigkeit ist mit 10 m/min sehr niedrig, wobei korrespondierend dazu eine mittlere Laserleistung von 1.380 W und ein Pulvermassenstrom von 35 g/min gewählt wurden. Als drittes Bauteil wurde ein Zylinder mit einem Durchmesser von 120 mm und einer Höhe von 16,7 mm gefertigt. Das resultierende Bauteil weist ein Gewicht von 59,43 g auf. Aufgrund der rotations-symmetrischen Geometrie, die mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 m/min abgefahren wird, ist der Laserstrahl nahezu während des gesamten In-Steps mit einer Leistung von 600 W zugeschaltet. Der Pulvermassenstrom ist mit 21 g/min niedriger als bei den anderen Validierungsbauteilen. Das Entstaubungssystem war bei allen drei Bauteilen auf ein Absaugungsvolumen von 1.690 m<sup>3</sup>/h eingestellt. Die Bauteile wurden anhand der in Tabelle 4-7 zusammengefassten Prozessparameter mittels HS DED-LB gefertigt.

Tabelle 4-7: Prozessparameter der Validierungsbauteile

Prozessparameter	Formelzeichen	Einheit	Quader	Logo	Zylinder
Laserleistung	$P_{L,set}$	W	3.200	1.380	600
Vorschubgeschwindigkeit	$v_A$	m/min	80	10	20
Absaugungsvolumen	$\dot{V}_{S,set}$	m <sup>3</sup> /h	1.690	1.690	1.690
Geschwindigkeit Förderscheibe	$n_F$	U/min	5,5	5,6	3,3
Geschwindigkeit Rührer	$n_R$	U/min	990	990	990
Länge einer Bahn	$l_{Bahn}$	m	0,015	0,0782	0,377
Anzahl Bahnen pro Lage	$N_{Bahnen\ pro\ Lage}$	Stk.	8	63	1
Anzahl Lagen	$N_{Lagen}$	Stk.	80	5	200
Vor- und Nachlaufstrecke	$l_{Vorlauf}$ und $l_{Nachlauf}$	m	0,1	0,05	0,06
Wendepunkte vorhanden	$N_{Wenden}$		Ja	Ja	Nein
Dauer Pre-Step	$T_{pre}$	s	23	15	18
Dauer Post-Step	$T_{post}$	s	10	10	10

Zur Fertigung der Validierungsbauteile wird das in Kapitel 4.1.1 beschriebene additive Fertigungssystem für HS DED-LB, das *pE3D* der *ponticon GmbH* genutzt. Während des gesamten Bauzyklus wurde die bezogene Leistung je Millisekunde aufgezeichnet. Anhand der aufgenommenen Leistung und der Prozesszeit wurde der tatsächliche Energiebedarf bestimmt. Parallel dazu erfolgt die Prognose des Energiebedarfs basierend auf den Scanpfadcharakteristika und den Prozessparametern mithilfe des in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Prognosemodells.

Die Ergebnisse des erhobenen sowie des durch das Modell prognostizierten Energiebedarfs sind in Tabelle 4-8 vergleichend gegenübergestellt. Mit 901,72 Wh wird zur Fertigung des Logos am meisten Energie benötigt, gefolgt vom Zylinder mit 705,62 Wh und dem Quader mit 629,56 Wh. Die Reihenfolge entspricht auch den Prozesszeiten, die für das Logo 349,82 s, den Zylinder 252,41 s und den Quader 199,34 s betragen.

Tabelle 4-8: Validierungsergebnisse

Systemeinheit	Energiebedarf	Einheit	Quader		Logo		Zylinder	
			Messung	Modell	Messung	Modell	Messung	Modell
Lasereinheit	$E_L$	Wh	257,93	239,88	510,58	484,48	439,47	405,58
Antriebssystem und Peripherie	$E_A$	Wh	286,75	273,57	215,52	230,34	139,10	188,12
Entstaubungssystem	$E_S$	Wh	77,32	86,93	162,26	165,81	117,60	111,21
Pulverförderer	$E_{PF}$	Wh	7,56	7,06	13,36	13,55	9,44	8,91
<b>Gesamt</b>	<b><math>E_{HS\ DED-LB,total}</math></b>	<b>Wh</b>	<b>629,56</b>	<b>607,44</b>	<b>901,72</b>	<b>894,19</b>	<b>705,62</b>	<b>713,82</b>

Für den Quader wird ein Energiebedarf von 607,44 Wh modelliert, was 22,12 Wh niedriger als der tatsächliche Energiebedarf ist, und einer Abweichung von ca. 4 % entspricht, wie in Abbildung 4-22 dargestellt. Allgemein benötigt das Antriebssystem gemeinsam mit den peripheren Subsystemen knapp die Hälfte des gesamten Energiebedarfs, gefolgt von der Lasereinheit. Während der modellierte Energiebedarf für die Lasereinheit, das Antriebssystem sowie den Pulverförderer 7 %, 5 % und 7 % zu niedrig sind, ist er für das Entstaubungssystem 12 % zu hoch.

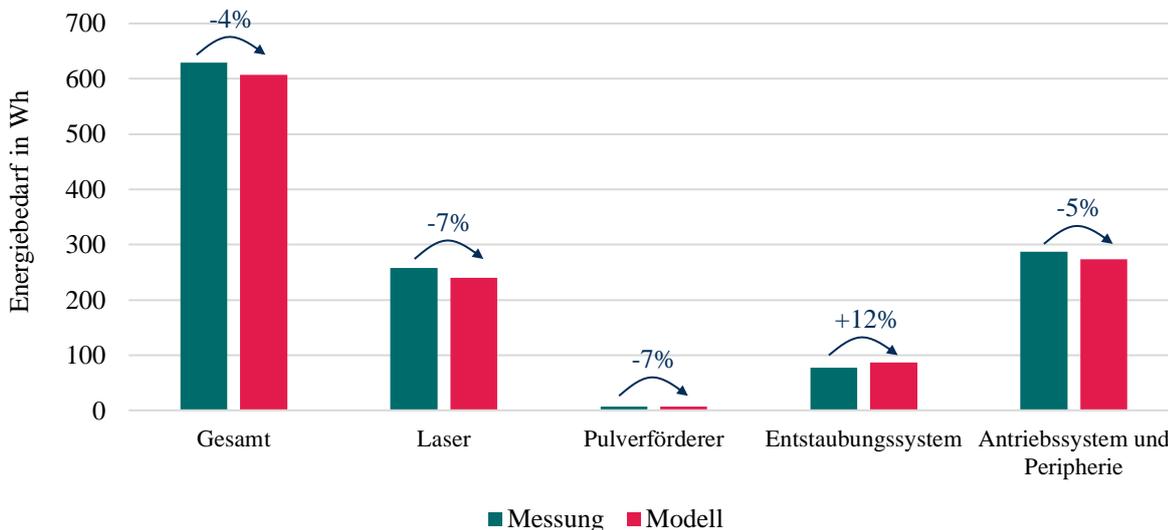


Abbildung 4-22: Vergleich der Messwerte und Modellierungsergebnisse für das Validierungsbauteil Quader

Der modellierte und tatsächliche Energiebedarf des Logos ist in Abbildung 4-23 dargestellt. Er wurde auf 894,19 Wh prognostiziert, was einer absoluten Abweichung von 7,53 Wh und einer relativen Abweichung von 1 % entspricht. Mehr als die Hälfte des Energiebedarfs wird dabei von der Lasereinheit verursacht, wobei der modellierte Energiebedarf trotz des häufigen zu- und abschalten des Laserstrahls lediglich um 5 % vom tatsächlichen Energiebedarf abweicht. Der modellierte Energiebedarf der Antriebssysteme ist um ca. 7 %, der des Entstaubungssystem um ca. 2 % und der des Pulverförderers um ca. 1 % zu hoch.

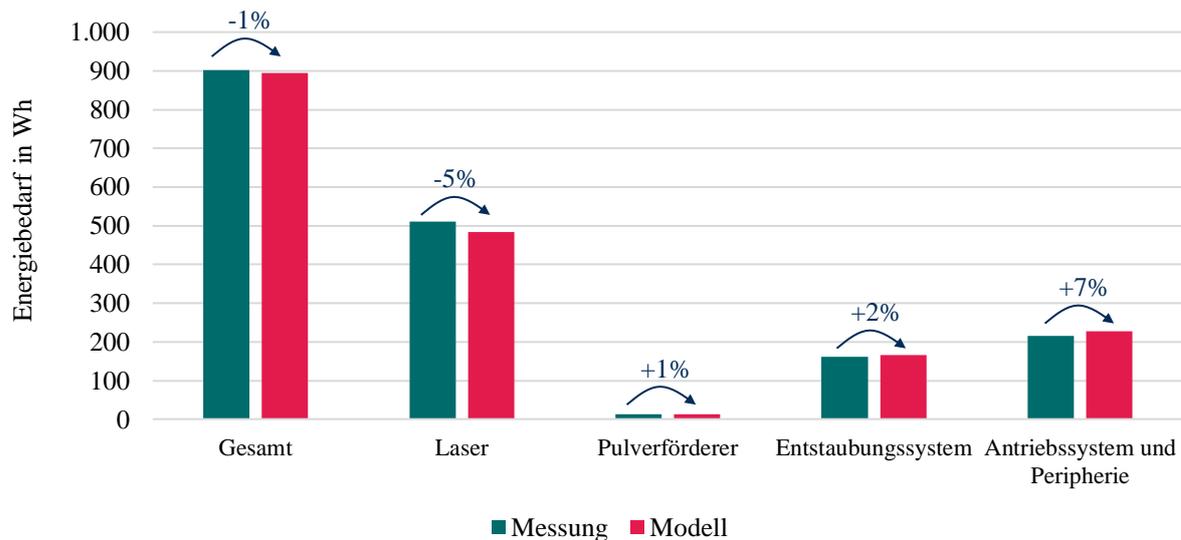


Abbildung 4-23: Vergleich der Messwerte und Modellierungsergebnisse für das Validierungsbauteil Logo

Beim Vergleich des modellierten Energiebedarfs mit dem tatsächlichen Energiebedarf für die Fertigung des Zylinders, ist der mit 188,12 Wh prognostizierte Energiebedarf des Antriebssystems und des peripheren Subsystems um 35 % höher als der tatsächliche Energiebedarf, wie in Abbildung 4-24 zu erkennen ist.

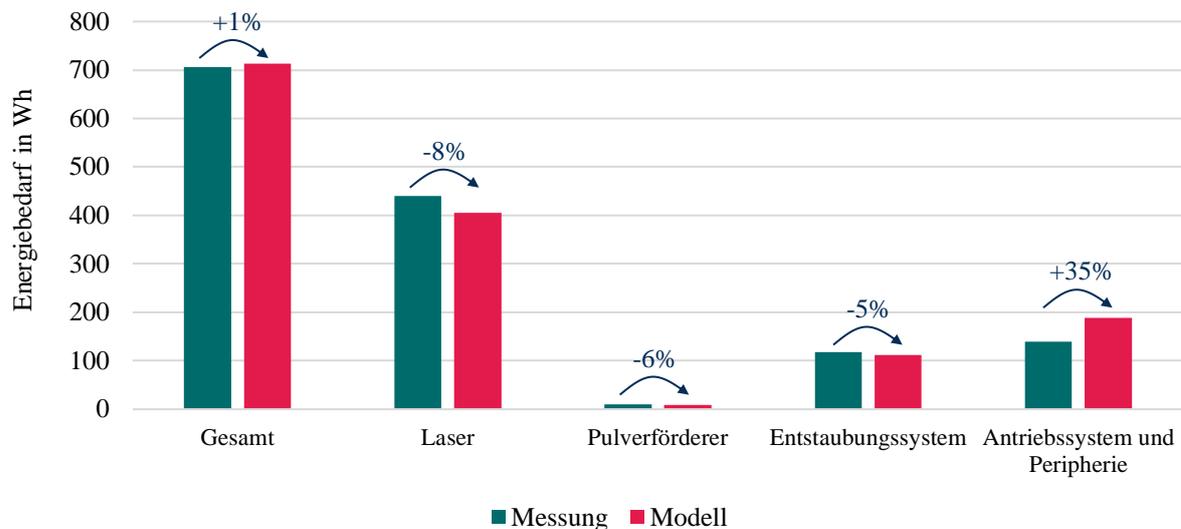


Abbildung 4-24: Vergleich der Messwerte und Modellierungsergebnisse für das Validierungsbauteil Zylinder

Diese große Abweichung ist auf den kleineren Radius des Zylinders im Vergleich zum kreisförmigen Scanpfad während der Erhebung der notwendigen Messwerte zur Modellerstellung zurückzuführen. Für die Analyse der Leistungsaufnahme des Antriebs bis zur maximal möglichen Geschwindigkeit von 200 m/min war aufgrund der kinematischen Einschränkungen der Anlage ein großer Radius für den kreisförmigen Scanpfad erforderlich. Die Modellerstellung erfolgte anschließend auf Basis der Daten für den untersuchten Radius. Um die Genauigkeit der Energiebedarfsprognose für andere Radien zu analysieren, wurde für den Zylinder ein kleinerer Radius gewählt. Zur Verbesserung der Prognosequalität für kreisförmige Scanpfade kann entweder die Datengrundlage des Modells erweitert werden oder das datengetriebene Modell

durch die Modellierung physikalischer Zusammenhänge ergänzt werden. Demgegenüber wird der Energiebedarf der Lasereinheit, der knapp zwei Drittel des Gesamtenergiebedarfs verursacht, ca. 8 % zu niedrig modelliert. Ebenfalls zu gering modelliert wird der Pulverförderer mit einer relativen Abweichung von 6 % und das Entstaubungssystem mit einer relativen Abweichung von 5 %. In der Gesamtbetrachtung kompensiert der zu niedrig modellierte Energiebedarf der Lasereinheit, des Entstaubungssystems und des Pulverförderers den zu hoch modellierten Energiebedarf des Antriebssystems und der peripheren Subsysteme, sodass für die Modellierung des Energiebedarfs für das Gesamtsystem 713,82 Wh resultieren, was einer absoluten Abweichung von 8,20 Wh und einer relativen Abweichung von lediglich 1 % entspricht.

Der modellierte Gesamtenergiebedarf der drei Bauteile weicht um maximal 4 % vom tatsächlichen Energiebedarf ab. Somit ist die Anforderung an die Prognosequalität des Berechnungsmodells, die eine Abweichung von höchstens 5 % fordert, erfüllt. Der modellierte Energiebedarf der einzelnen Subsysteme des Fertigungssystems weicht allerdings teilweise um mehr als 5 % vom tatsächlichen Energiebedarf ab, was eine Verletzung der Anforderung bedeutet. Die Energiebedarfe der Lasereinheit und des Pulverförderers werden im Modell tendenziell als zu gering berechnet. Der modellierte Energiebedarf des Antriebs der Bauplattform weist die größten Abweichungen auf, was auf die hohe Variabilität der Scanpfade zurückzuführen ist. Zur Erhöhung der Prognosequalität bedarf es einerseits einer tiefergehenden Analyse der Beschleunigungsvorgänge und der daraus resultierenden Leistungsaufnahmen und Zeitbedarfe sowie einer Erweiterung des datenbasierten Prognosemodells durch physikalische Modelle. Durch die Verknüpfung der G-Code-Simulation mit den detaillierten Leistungs- und Zeitdaten kann somit eine scanpfadspezifische Energiebedarfsprognose erfolgen. Bei der Modellierung des Energiebedarfs des Entstaubungssystems lässt sich trotz des über alle Validierungsbauteile hinweg gleich eingestellten Absaugungsvolumens keine Tendenz feststellen. Die großen Schwankungen in der Leistungsaufnahme können zwar mit dem arithmetischen Mittelwert angenähert werden, jedoch erschweren diese eine präzise Prognose und können zu zufälligen Abweichungen führen.

Insgesamt ergibt sich für die Validierungsbauteile ein SEC von 483,24 MJ/kg (134,23 kWh/kg) für den Quader, von 103,32 MJ/kg (28,70 kWh/kg) für das Logo sowie von 42,74 MJ/kg (11,87 kWh/kg) für den Zylinder. Der niedrige SEC für den Zylinder begründet sich zum einen durch die geringe Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit. Zum anderen erfolgt aufgrund der Geometrie ein kontinuierlicher Materialauftrag, sodass keine Zeiten ohne Materialauftrag vorkommen. Hierdurch existieren kaum Prozessabschnitte, die nicht effektiv zu einem Formaufbau beitragen. Somit haben die kontinuierlich betriebenen Systeme wie das Entstaubungssystem und die peripheren Subsysteme anteilig einen geringeren Einfluss, was zu einem reduzierten SEC führt. Die vergleichsweise hohe Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit des Quaders führen wiederum zu einem hohen SEC. Zudem ist die Prozessdauer des Quaders die längste und das resultierende Bauteilgewicht das geringste. Diese Relation führen zu dem deutlich höheren SEC im Vergleich zu den anderen Bauteilen. Es zeigt sich somit, dass eine Annäherung des Energiebedarfs eines HS DED-LB-Prozesses durch den SEC nicht ausreichend möglich ist. Er wird maßgeblich durch die gewählten Prozessparameter und durch den auf der Bauteilgeometrie beruhenden Scanpfad bestimmt und ist somit bauteilindividuell. Dies zeigt die unabdingbare Notwendigkeit eines Prognosemodells, das den Energiebedarf abbildet, der sich aus den individuellen Prozessparametereinstellungen und dem Scanpfad ergibt. Im Modell

können all diejenigen Prozessparameter variiert werden, bei denen in den vorangegangenen Studien ein signifikanter Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Fertigungssystems identifiziert wurde. So können im Modell die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit, die Rotationsgeschwindigkeit des Rührers und der Förderscheibe sowie das Absaugungsvolumen entsprechend der gewählten Prozessparameter angepasst werden. Auch die Variabilität des Scanpfads wird in vereinfachter Form berücksichtigt. Diese bestimmt gemeinsam mit der Vorschubgeschwindigkeit maßgeblich die Prozessdauer und beeinflusst darüber hinaus auch die Leistungsaufnahme des Antriebs der Bauplattform sowie der Lasereinheit. Somit wird auch die Anforderung, dass das Modell den Einfluss unterschiedlicher Prozessparametereinstellungen widerspiegeln muss, erfüllt.

Das Prinzip des entwickelten Energiebedarfsprognosemodell beruht auf statistischer Regression basierend auf experimentell erhobenen Daten. Um das Modell auf andere HS DED-LB-Fertigungssysteme zu übertragen und entsprechend zu spezifizieren, kann eine Anpassung der Datengrundlage notwendig werden. Diese kann durch die Erhebung der notwendigen Variablen erfolgen. Somit ist die Anforderung der Übertragbarkeit des Modells erfüllt. Aufgrund der im Modell berücksichtigten Charakteristika des HS DED-LB-Fertigungssystems ist das entwickelte Modell jedoch nur eingeschränkt auf andere additive Fertigungssysteme übertragbar. Hierfür ist eine weitere Abstraktion des Vorgehens notwendig. Daher wird im nachfolgenden Kapitel das Vorgehen zur Entwicklung eines Modells, das neben der Energieprognose auch die Analyse der Zusammensetzung des Energiebedarfs ermöglicht, vorgestellt.

## 4.2 Vorgehen zur Entwicklung eines Energieprognosemodells

Damit analytische Energieprognosemodelle wie das beschriebene für HS DED-LB auch für andere additive Fertigungsverfahren entwickelt werden können, wird das Vorgehen zur Modellerstellung im Folgenden abstrahiert und generalisiert, das in Abbildung 4-25 zusammengefasst ist.<sup>3</sup>

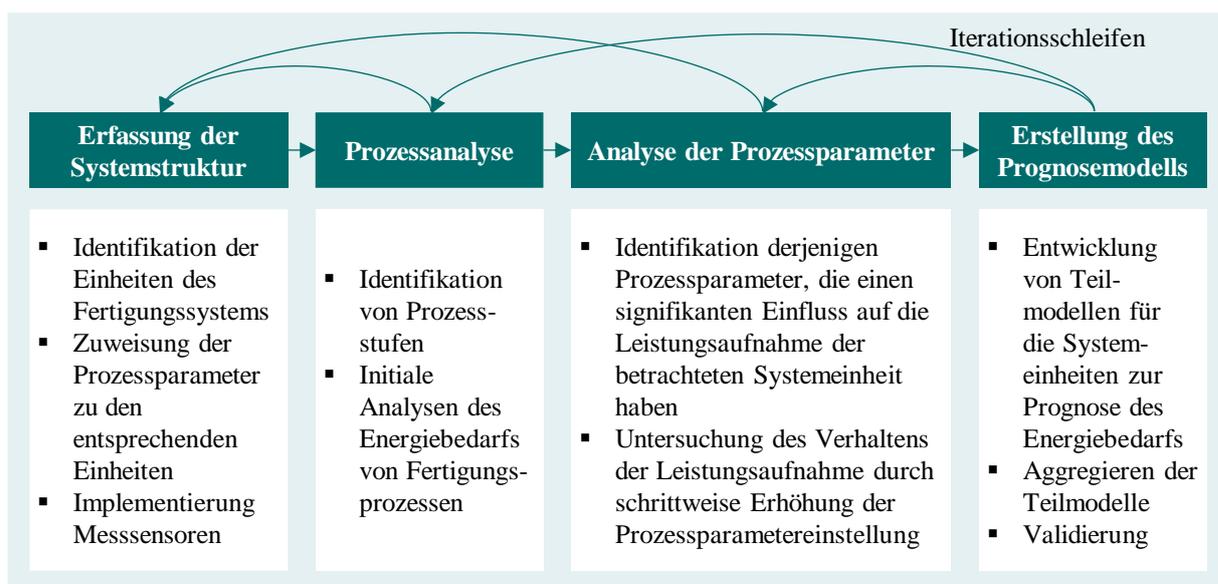


Abbildung 4-25: Vorgehen zur Erstellung eines analytischen Prognosemodells für den Energiebedarf eines additiven Fertigungssystems [Ehms23d]

<sup>3</sup> Teile dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ehms23d] veröffentlicht.

In Abhängigkeit von der Ähnlichkeit des zu untersuchenden Fertigungsverfahrens mit dem HS DED-LB-Prozess können Erkenntnisse und Ergebnisse aus Kapitel 4.1 übertragen werden. Ungeachtet dessen wird das Vorgehen für eine größtmögliche Übertragbarkeit nachfolgend abstrahiert und dargelegt. Das Vorgehen zur Modellerstellung kann in vier Schritte unterteilt werden. Zunächst wird die Struktur des zu untersuchenden Systems erfasst. Anschließend wird der Fertigungsprozess analysiert und in einzelne Prozessstufen unterteilt. Darauf aufbauend werden die Prozessparameter und deren Auswirkung auf den Energiebedarf experimentell untersucht. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird das Modell entwickelt und anhand von Referenzbauteilen validiert und gegebenenfalls weiter verbessert. Hierbei können Iterationsschleifen notwendig werden, in denen der Prozess und die Prozessparameter zur detaillierteren Modellerstellung näher analysiert werden. Nachfolgend werden die Schritte zur individuellen Erstellung eines Prognosemodells detailliert erläutert.

#### 4.2.1 Erfassung der Systemstruktur

Ziel der Strukturermittlung ist es, grundlegende Kenntnisse über das untersuchte System zu erhalten und die technischen Voraussetzungen für die nachfolgenden Schritte zu schaffen. Zunächst werden alle energiebezogenen Systemeinheiten des untersuchten Systems identifiziert und anschließend basierend auf Grundannahmen klassifiziert. Eine Klasse umfasst diejenigen Systemeinheiten, bei denen von einer variablen oder veränderlichen Leistungsaufnahme ausgegangen werden kann. Für diese Systemeinheiten muss der Energiebedarf individuell analysiert und in den folgenden Schritten ein individuelles Modell erstellt werden. Eine weitere Klasse wird durch Systemeinheiten gebildet, deren Leistungsaufnahme während des gesamten Prozesses als konstant und unabhängig von Prozessparametern oder anderen Einstellungen erwartet wird. Systemeinheiten dieser Klasse können als periphere Subsysteme zusammengefasst werden. In den Analysen des nachfolgenden Schrittes werden diese Grundannahmen überprüft. Sollten eine oder mehrere Klassifizierungen von Systemeinheiten nicht der ersten Annahme entsprechen, so ist eine spätere Neuordnung möglich.

Basierend auf dieser initialen Klassifizierung werden, falls nicht vorhanden, Leistungsmesssensoren implementiert. Ein Sensor nimmt dabei die aufgenommene Leistung des gesamten Fertigungssystems auf. Weitere Messsensoren werden für jede Systemeinheit implementiert, die mit einer variablen Leistungsaufnahme klassifiziert wurde. Je nach Verfügbarkeit und Möglichkeit der Integration kann auf eine Implementierung von Messsensoren für eine dieser Systemeinheiten verzichtet werden. Deren Leistungsaufnahme kann basierend auf der Leistungsaufnahme des gesamten Systems berechnet werden, indem die Gesamtleistungsaufnahme, von der der anderen Systemeinheiten abgezogen wird. Wird diese Option angewendet, so ist jedoch die Überprüfung der vorherigen Klassifizierung nur eingeschränkt möglich, da die Ursache der Variabilität erst spät nach tiefgehenden Analysen im dritten Schritt des Vorgehens oder gar nicht identifiziert werden können. Die Abtastrate der Sensoren muss an die Prozessgeschwindigkeit und die Variabilität der Maschine und des Prozesses angepasst werden. Hierbei ist generell eine höhere Abtastrate zu bevorzugen, um Schwankungen sowie Anfahr- und Herunterfahrverhalten analysieren und später im Modell abbilden zu können.

Nach der initialen Untersuchung der Systemeinheiten werden die einstellbaren Prozessparameter ermittelt. Diese werden anschließend strukturiert, indem sie den Systemeinheiten zugeordnet werden, deren Betriebsverhalten sie beeinflussen.

Ergebnis dieses Schrittes ist die Strukturierung des Systems, die der in Abbildung 4-26 gezeigten Form entspricht. Es wurde grundlegendes Wissen über das System erlangt und durch das Installieren von Leistungsmesssensoren die zur Analyse des Energiebedarfs notwendige Infrastruktur geschaffen.

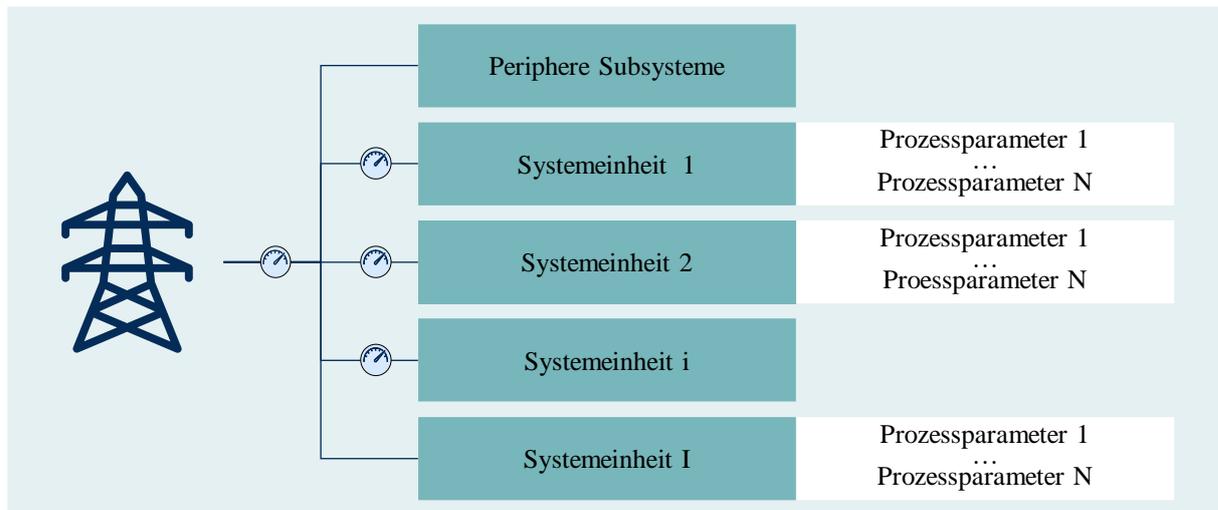


Abbildung 4-26: Exemplarische Strukturierung des untersuchten Systems und Implementierung der Messsensoren

#### 4.2.2 Prozessanalyse

Im nächsten Schritt, der Prozessanalyse, wird der Bauzyklus hinsichtlich seiner Prozessstufen und des jeweiligen Verhaltens der Leistungsaufnahme der einzelnen Systemeinheiten untersucht. Dazu werden in ersten initialen Experimenten Bauteile gefertigt und hierbei die Leistungsaufnahme gemessen. Als Bauteile werden typische oder auf dem additiven Fertigungssystem häufig gefertigte Bauteile und die entsprechenden Prozessparameter ausgewählt. Dadurch erfolgt eine Analyse des Prozesses basierend auf der geplanten oder der üblichen Nutzungsweise des additiven Fertigungssystems. Da die Auswahl des Bauteils die Analyse des Prozessablaufs zwar vereinfachen kann, jedoch nicht entscheidend ist, können auch, wenn keine spezifischen Bauteile vorliegen, beliebige Bauteile gefertigt werden. Im Anschluss erfolgt eine initiale Analyse des additiven Fertigungsprozesses auf Basis der durch die Messsensoren erfassten Leistungsdaten.

Zunächst wird der Prozess in einzelne Prozessstufen unterteilt. Sind die einzelnen Prozessstufen noch nicht bekannt, so erfolgt ihre Identifikation und Unterteilung durch Beobachtung der Fertigungsprozesse sowie anhand der Leistungsdaten der initialen Experimente. Hierbei werden Muster identifiziert, die sich innerhalb eines Prozesses voneinander abgrenzen, jedoch beim Vergleich mehrerer Prozesse wiederholt auftreten. Oft kann visuell bei der Prozessbeobachtung der Übergang von einer Prozessstufe in die darauffolgenden erkannt werden. Parallel dazu wird nach Mustern in den Leistungsdaten gesucht, die der visuellen Prozessbeobachtung entsprechen, da sich häufig bei einem Übergang von einer Prozessstufe in die darauffolgende die Leistungsaufnahme mancher oder auch aller Systemeinheiten verändert. Bspw. benötigen viele Fertigungssysteme eine Aufwärmphase vor dem Start und eine Abkühlphase nach Beendigung des eigentlichen Fertigungsprozesses. Während solcher Phasen befinden sich manche Systemeinheiten in Betrieb und andere wiederum im Stand-by-Modus. Der Beginn des eigentlichen Fertigungsprozesses wird dann meist durch das in Betrieb nehmen aller Systemeinheiten markiert.

Die Prozessstufen sind somit Bestandteile des Gesamtprozess, sind jedoch ebenfalls klar voneinander abgrenzbar. Das Wissen um die verschiedenen Prozessstufen kann auch bereits vor den initialen Versuchen vorhanden sein.

Es besteht die Möglichkeit, dass einige Systemeinheiten lediglich während bestimmter Prozessstufen aktiv in Betrieb sind. Daher wird anschließend das Verhalten der Systemeinheiten innerhalb der identifizierten Prozessstufen untersucht. Hierbei wird analysiert, wann die Systemeinheiten Leistung beziehen und wie die Leistungsaufnahme sich während der einzelnen Prozessstufen verhält. Dabei werden folgende Merkmale ermittelt:

- ❑ Wann bzw. in welcher Prozessstufe befindet sich welche Systemeinheit in Betrieb, im Stand-by-Modus oder einem anderen Modus oder ist ausgeschaltet und wann erfolgen die Zu- und Abschaltung?
- ❑ Wie verhält sich die Leistungsaufnahme der Systemeinheiten innerhalb der Prozessstufen?
- ❑ Wie verhalten sich die Leistungsaufnahmen der Systemeinheiten je Prozessstufe während des Anfahrens, des Betriebs und des Abschaltens?

Die Leistungsaufnahme einer Systemeinheit kann zum Beispiel konstant sein, zufällig schwanken oder nach bestimmten Regelmäßigkeiten fluktuieren. Wenn die Leistungsaufnahme konstant ist, befindet sich die Systemeinheit entweder im Stand-by-Modus, ist ausgeschaltet oder ist auf dem eingestellten Niveau in Betrieb und bezieht kontinuierlich Leistung, wie beispielhaft die peripheren Teilsysteme und Systemeinheit 4 in Abbildung 4-27 zeigen. Zufällige Schwankungen treten meist ebenfalls während des Betriebs der Systemeinheiten auf dem eingestellten Niveau auf, wie z. B. Systemeinheit 3, und periodische Schwankungen durch wiederholtes Ein- und Ausschalten wie bspw. Systemeinheit 1 und Systemeinheit 2.

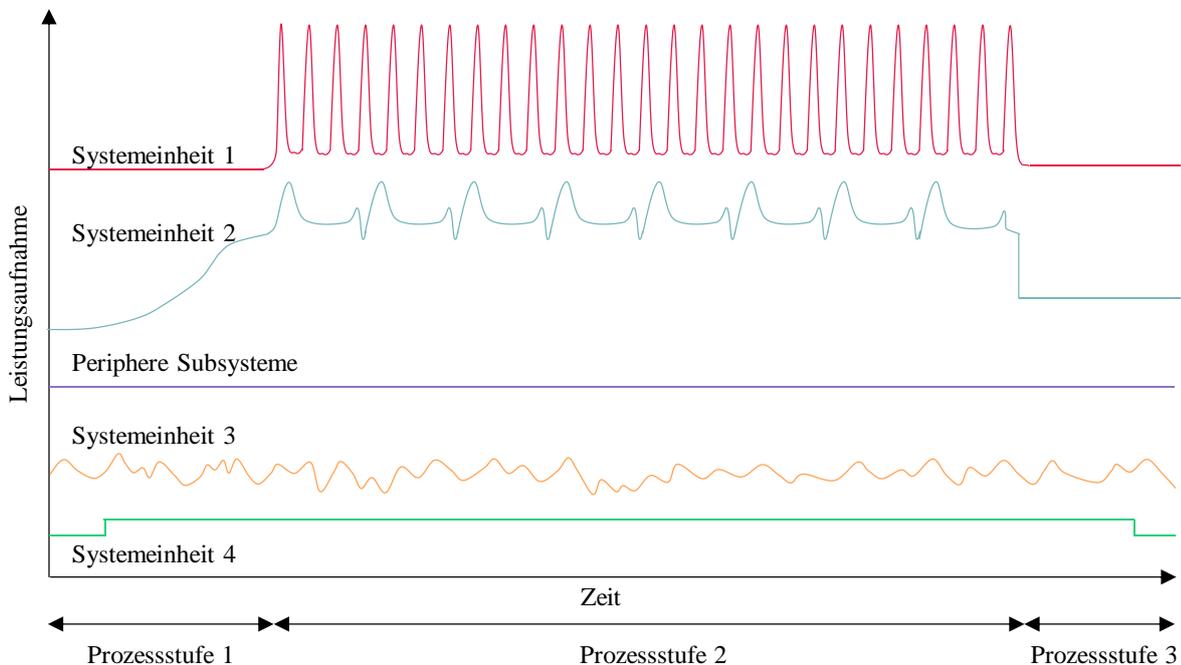


Abbildung 4-27: Beispiel für die Unterteilung eines Fertigungsprozesses in Prozessstufen auf Grundlage der Leistungsaufnahme

### 4.2.3 Analyse der Prozessparameter

Aufbauend auf der Analyse des Prozesses wird der Einfluss der Prozessparameter analysiert. Dies erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden in vollfaktoriellen Versuchsreihen diejenigen Prozessparameter identifiziert, die einen signifikanten Einfluss auf die Leistungsaufnahme der jeweiligen Systemeinheiten haben. Gleichzeitig werden auch mögliche Wechselwirkungen identifiziert. In einem anschließenden zweiten Schritt werden die relevanten Prozessparameter eingehend analysiert.

Zur Vorbereitung der Versuche wurden in den vorherigen Schritten zuvor bereits die einstellbaren Prozessparameter identifiziert und derjenigen Systemeinheit, die sie maßgeblich beeinflussen, zugeordnet. Nun wird für jede Systemeinheit ein statistischer Versuchsplan entwickelt, der im Rahmen von vollfaktoriellen Versuchsreihen den Einfluss der jeweiligen Prozessparameter analysiert. Bei der Versuchsplanung müssen die Prinzipien der zufälligen Reihenfolge, der Blockbildung und der Wiederholung zur Sicherstellung der statistischen Signifikanz berücksichtigt werden. Für jeden Versuchspunkt müssen somit mindestens drei Versuche durchgeführt werden. Bei einer starken Streuung der Ergebnisse, kann eine Erhöhung der Wiederholungen notwendig werden. Mit zunehmender Anzahl an Parametern, die einer Systemeinheit zugeordnet werden, steigt die Anzahl an notwendigen Versuchen im Rahmen der vollfaktoriellen Versuchsreihen stark an. In solchen Fällen kann der Wechsel von einer vollfaktoriellen auf eine teilfaktorielle Versuchsreihe notwendig werden. Im Rahmen teilfaktorieller Versuchsreihen erfolgt lediglich eine experimentelle Untersuchung eines Teils der in einem vollfaktoriellen Versuchsplan enthaltenen Faktorstufenkombinationen. Die Untersuchung von Faktorkombinationen führt zu einer gekoppelten Darstellung der Ergebnisse, was die Interpretation erschwert, da eine Vermengung der untersuchten Faktoren erfolgt. Dies impliziert, dass bei der Auswertung statt des Faktoreffektes stets lediglich die Summe des Faktoreffektes und des Interaktioneneffektes ausgewiesen wird. Daher setzt die Anwendung teilfaktorieller Versuchspläne voraus, dass mittels technischer Überlegungen bestimmt werden kann, welcher der vermengten Effekte tatsächlich die Zielgröße beeinflusst. Sofern der den Versuch beeinflussende Effekt nicht identifizierbar ist, besteht das Risiko einer falschen Interpretation der Ergebnisse des Experiments [Wiec09].

Während der Durchführung der Experimente werden die Leistungsaufnahmen für jede Prozessstufe gemessen und anschließend die gesammelten Daten ausgewertet. Durch die Bestimmung des statistischen Evidenzmaßes des P-Werts wird nun ermittelt, welche Prozessparameter in welcher Prozessstufe die Leistungsaufnahme und damit den Energiebedarf der jeweiligen Systemeinheit beeinflussen. Parallel dazu werden die Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern ermittelt, wie beispielhaft in Abbildung 4-28 links dargestellt. Dies erfolgt für jeden im zweiten Schritt des Vorgehens identifizierten Betriebsmodus der Systemeinheit bzw. für jede Prozessstufe. Bspw. ist die Leistungsaufnahme einer Systemeinheit im Stand-by-Modus i. d. R. unabhängig von den gewählten Prozessparametern. Die Höhe der Leistungsaufnahme während des Betriebs ist demgegenüber i. d. R. von der Einstellung der Prozessparameter abhängig.

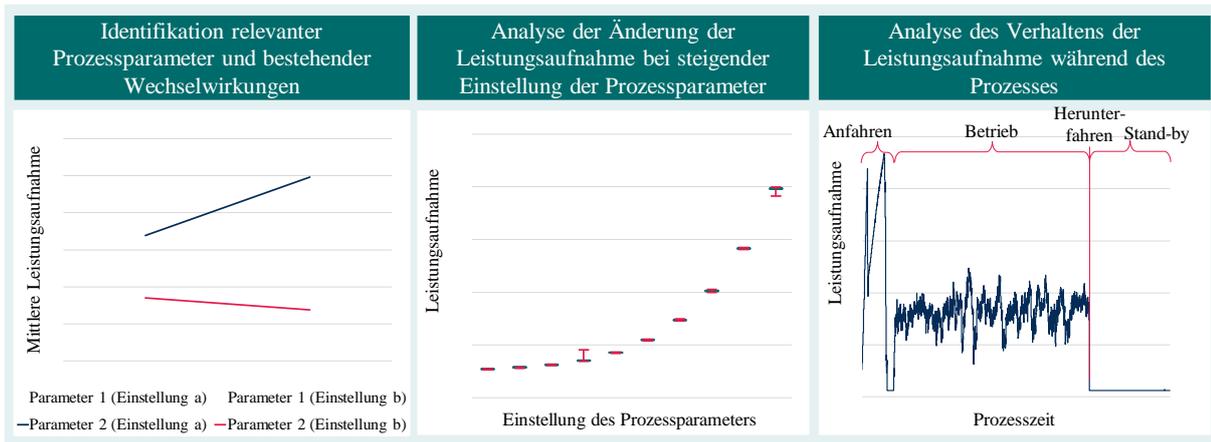


Abbildung 4-28: Beispielhafte Analyse der Prozessparameter einer Systemeinheit und deren Einfluss auf die Leistungsaufnahme

Im zweiten Schritt werden die relevanten Prozessparameter genauer analysiert. Dazu wird in weiteren Versuchen lediglich der untersuchte Prozessparameter in mehreren Schritten von der Minimaleinstellung bis zur Maximaleinstellung variiert, während alle anderen Prozessparameter konstant gehalten werden. Auch hier werden die Versuchspunkte mindestens dreimal in zufälliger Reihenfolge durchgeführt und zu Versuchsblöcken gruppiert. Anhand dieser Versuche wird untersucht, wie sich die Leistungsaufnahme bei steigenden Prozessparametereinstellungen verhält. Bspw. steigt die gemittelte Leistungsaufnahme bei einer allmählichen Erhöhung des Prozessparameters meist entweder annähernd linear oder progressiv, wie in Abbildung 4-28 mittig dargestellt. Hierbei werden auch die einzelnen Betriebsmodi des Stand-by, des Anfahrens, des Betriebs sowie des Herunterfahrens separat ausgewertet und entsprechende Leistungsaufnahmen ermittelt, wie in Abbildung 4-28 rechts dargestellt.

Somit ist bekannt, welche Prozessparameter sich auf die Leistungsaufnahme der Systemeinheiten auswirken und im Modell zur Prognose des Energiebedarfs berücksichtigt werden müssen. Zudem wurde auch ermittelt, wie sich die Leistungsaufnahme der Systemeinheiten in Abhängigkeit der jeweiligen Prozessparametereinstellung verändert. Gleichzeitig wurde durch die Experimente die Datengrundlage für das Prognosemodell geschaffen.

#### 4.2.4 Erstellung des Prognosemodells

Das Vorgehen zur Erstellung des Modells zur Prognose des Energiebedarfs folgt einem systematischen Ansatz, der in Abbildung 4-29 dargestellt ist.

Allgemein setzt sich der Energiebedarf des Gesamtsystems  $E_{total}$  aus der Summe der jeweiligen Energiebedarfe seiner Systemeinheiten  $E_i$  zusammen. Daher gilt Formel 4-62.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^I E_i \quad 4-62$$

In den vorangegangenen Schritten wurden der Energiebedarf aller Systemeinheiten und die entsprechenden Prozessparameter detailliert analysiert. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage der Modellerstellung. Damit mit Hilfe des Modells der Energiebedarf präzise prognostiziert und gleichzeitig die Zusammensetzung des Energiebedarfs analysiert werden kann, wird für jede Systemeinheit  $i$  der Energiebedarf individuell prognostiziert. Somit resultiert ein Teilmodell für jede Systemeinheit des betrachteten Fertigungssystems, die im letzten Schritt durch Aufsummieren verknüpft werden.

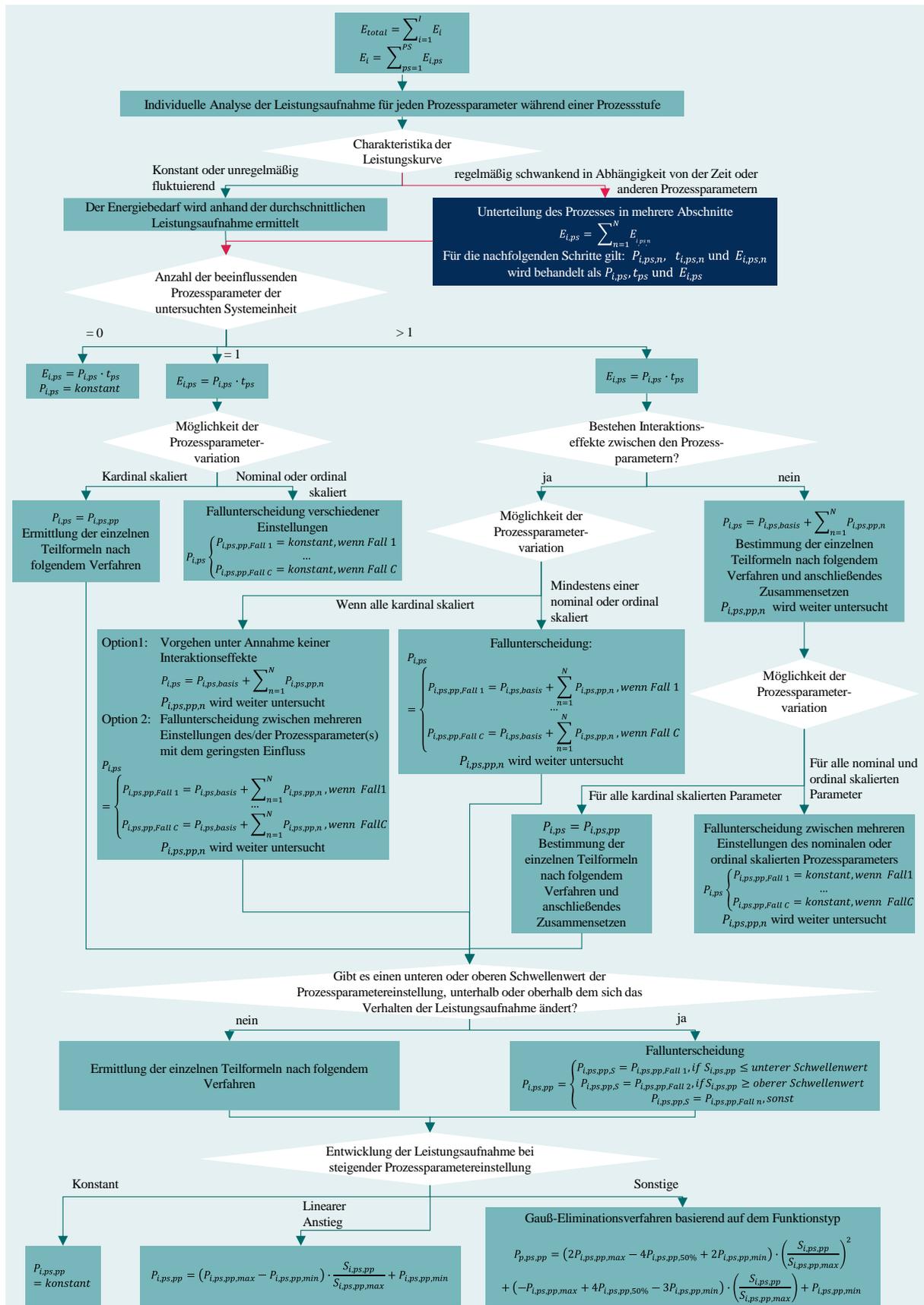


Abbildung 4-29: Übersicht des Vorgehens zur Modellierung der Leistungsaufnahme

In der vorangegangenen Prozessanalyse wurde der Prozess in mehrere Prozessstufen  $ps$  unterteilt, die für jeden Gesamtprozess stets sequenziell ablaufen. Die Leistungsaufnahme einer Systemeinheit  $i$  kann sich beim Übergang vom einer Prozessstufe in die darauffolgende verändern.

Zudem ist die Dauer der Prozessstufen individuell. Der resultierende Energiebedarf der Systemeinheit  $E_i$  ist somit die Summe seiner Energiebedarfe über alle Prozessstufen  $E_{i,ps}$  hinweg, wie in Formel 4-63 dargestellt.

$$E_i = \sum_{ps=1}^{PS} E_{i,ps} \quad 4-63$$

Für jede identifizierte Prozessstufe wird das Verhalten der Leistungsaufnahme für jede Systemeinheit analysiert. Dabei kann die Leistungsaufnahme nahezu konstant erfolgen, regelmäßig oder unregelmäßig schwanken sowie zu- oder abnehmen. Entsprechend dieser Einordnung wird das weitere Vorgehen gewählt.

Tritt eine regelmäßige Fluktuation auf, d. h. die Leistungsaufnahme schwankt periodisch abhängig von der Zeit oder beeinflusst von anderen Prozessparametern, die nicht primär den Energiebedarf der untersuchten Systemeinheit, sondern den einer anderen Systemeinheiten beeinflussen, wird diese Prozessstufe erneut in weitere Abschnitte  $n$  unterteilt. Ein Abschnitt bildet dabei eine Periode der fluktuierenden Leistungsaufnahme ab. Für jeden dieser Abschnitte wird wiederum für die Systemeinheit ein individuelles Modell für die Ermittlung des Energiebedarfs  $E_{i,ps,n}$  erstellt. Die Summe der Energiebedarfe der einzelnen Abschnitte  $n$  ergibt dann wiederum den Energiebedarf der Systemeinheiten für die betrachtete Prozessstufe  $E_{i,ps}$ , wie in Formel 4-64 gezeigt.

$$E_{i,ps} = \sum_{n=1}^N E_{i,ps,n} \quad 4-64$$

Im weiteren Vorgehen erfolgt die Modellerstellung der einzelnen Abschnitte identisch wie die Modellerstellung für die gesamten Prozessstufen. Daher gilt für die Fälle, in denen eine Unterteilung in Abschnitte  $n$  notwendig ist, dass  $E_{i,ps,n}$  nun  $E_{i,ps}$  entspricht, dass  $P_{i,ps,n}$  nun  $P_{i,ps}$  entspricht und dass  $t_{ps,n}$  nun  $t_{ps}$  entspricht. Anschließend werden die Energiebedarfe entsprechend Formel 4-63 berechnet. Wird im weiter beschriebenen Vorgehen von einer Prozessstufe gesprochen, so ist die Anweisung für den entsprechenden Abschnitt in der Prozessstufe anzuwenden.

Der Energiebedarf einer Systemeinheit während einer Prozessstufe  $E_{i,ps}$  wird anhand von Formel 4-65 berechnet, indem die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$  gemittelt und über die Dauer der Prozessstufe  $t_{ps}$  berechnet wird.

$$E_{i,ps} = P_{i,ps} \cdot t_{ps} \quad 4-65$$

Basierend auf den Ergebnissen aus der Analyse der Prozessparameter ist bekannt, welche und somit auch wie viele Prozessparameter einen Einfluss auf die Leistungsaufnahme der untersuchten Systemeinheit während der Prozessstufe haben. Hierfür werden drei Fälle unterschieden.

Im einfachsten Fall ist die Leistungsaufnahme unabhängig von jeglichen Prozessparametern. Somit kann die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$  gemittelt werden und über die Dauer der Prozessstufe als konstant angenommen werden. Somit gilt Formel 4-66. Die Höhe der Leistungsaufnahme wurde bereits in den vorangegangenen Experimenten bestimmt und kann durch die Bildung des arithmetischen Mittelwerts angenähert quantifiziert werden.

$$P_{i,ps} = \textit{konstant} \quad 4-66$$

Wird die Leistungsaufnahme von genau einem Prozessparameter  $pp$  beeinflusst, ist die mittlere Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$  und somit auch der Energiebedarf  $E_{i,ps}$  abhängig von der Prozessparametereinstellung, was dem zweiten Fall entspricht. Wie die Bestimmung der Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$  in Abhängigkeit des Prozessparameters  $pp$  erfolgt, ist abhängig von der Skalierbarkeit des Parameters. Ist der Prozessparameter kardinal skalierbar, so wird die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp}$  abhängig von der gewählten Prozessparametereinstellung modelliert und Formel 4-67 gilt. Die Modellierung erfolgt ab Formel 4-71.

$$P_{i,ps} = P_{i,ps,pp} \quad 4-67$$

Ist der Prozessparameter jedoch nur nominal oder ordinal skalierbar, wird eine Fallunterscheidung vorgenommen. Dazu wird für jede Prozessstufe oder jeden Abschnitt einer Prozessstufe eine ausreichende Anzahl verschiedener Einstellungen des Prozessparameters definiert und für jede Prozessparametereinstellung die gemittelte Leistungsaufnahme zugeordnet. Falls die Optionen der Prozessparametereinstellungen zu groß oder gar unendlich und somit nicht abbildbar sind, muss eine Auswahl getroffen werden, wobei wesentliche oder häufig vorkommende Einstellungen bevorzugt werden. In späteren Validierungen wird überprüft, ob die ausgewählten Einstellungsoptionen ausreichend sind bzw. passend gewählt wurden. Je nach erreichter Prognosequalität ist eine Wiederholung der Iteration notwendig und die Auswahl der unterschiedenen Fälle an Prozessparametereinstellungsoptionen wird angepasst. Diese Fallunterscheidung, die auch in Formel 4-68 dargestellt ist, ermöglicht es, die Leistungsaufnahme für verschiedene Prozessparametereinstellungen zu approximieren. Für die verschiedenen Prozessparametereinstellungen werden beliebig viele Fälle definiert, deren Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp, \textit{Fall 1}}$  bis  $P_{i,ps,pp, \textit{Fall C}}$  basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Experimente quantifiziert werden. Somit kann, da keine weiteren Abhängigkeiten bestehen, die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$  durch diese konstanten Werte angenähert werden.

$$P_{i,ps} = \begin{cases} P_{i,ps,pp, \textit{Fall 1}} = \textit{konstant, wenn Fall 1} \\ \dots \\ P_{i,ps,pp, \textit{Fall C}} = \textit{konstant, wenn Fall C} \end{cases} \quad 4-68$$

Im dritten Fall wird die Leistungsaufnahme von mehr als einem Prozessparameter  $pp$  beeinflusst.

Wenn mehrere Prozessparameter den Energiebedarf einer Systemeinheit beeinflussen, ist zunächst zu prüfen, ob Interaktionseffekte zwischen den Prozessparametern bestehen. Eventuelle Interaktionseffekte wurden in der vorangegangenen Analyse der Prozessparameter ermittelt. Zunächst wird der Fall betrachtet, dass keine Interaktionseffekte zwischen den Prozessparametern bestehen. Zur Modellbildung wird angenommen, dass jede Systemeinheit eine Grundleistungsaufnahme  $P_{i,ps,basis}$  besitzt, die durch die Prozessparametereinstellungen nicht verändert wird. Diese wird experimentell ermittelt und als Konstante addiert. Zusätzlich verursacht jeder Prozessparameter eine Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp,n}$ , die von seiner Einstellung abhängt. Die Leistungsaufnahme ist somit die Summe aller prozessparameterindividuellen Leistungsaufnahmen  $P_{i,ps,pp,n}$  und der Grundleistungsaufnahme  $P_{i,ps,basis}$ , wie in Formel 4-69 gezeigt.

$$P_{i,ps} = P_{i,ps,basis} + \sum_{n=1}^N P_{i,ps,pp,n} \quad 4-69$$

Die Modellierung der Anteile der Leistungsaufnahmen, die von Prozessparametereinstellungen abhängig sind, erfolgt analog zur Modellierung, wenn nur ein Prozessparameter einen Einfluss auf die Leistungsaufnahme hat. Somit wird zunächst geprüft, ob die Prozessparameter nominal, ordinal oder kardinal skaliert sind. Für alle kardinal skalierbaren Prozessparameter erfolgt die Modellierung der Leistungsaufnahme analog zum Vorgehen für einen Prozessparameter, in Formel 4-67 sowie ab Formel 4-71. Für alle nominal oder ordinal skalierbaren Prozessparametern erfolgt eine Fallunterscheidung wie bereits in Formel 4-68 beschrieben.

Falls Interaktionseffekte zwischen den Prozessparametern bestehen, ist eine integrierte Modellierung der Leistungsaufnahme notwendig, d. h. der gemeinsame Einfluss wird im Modell berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt auch hier in Abhängigkeit von der Skalierbarkeit der Prozessparameter. Ist mindestens ein Prozessparameter nominal oder ordinal skalierbar, so wird eine Fallunterscheidung zwischen verschiedenen Einstellungen des nominal oder ordinal skalierbaren Prozessparameters vorgenommen. Hierfür werden für die nominal oder ordinal skalierbaren Prozessparameter verschiedene Fälle definiert, für die individuelle Modelle entwickelt werden. Ist mehr als ein Prozessparameter ordinal oder nominal skalierbar, so werden für alle nominal und ordinal skalierbaren Prozessparameter verschiedene Fälle definiert und diese dann entsprechend kombiniert. Somit kann für jede dieser Einstellung der ordinal und nominal skalierbaren Prozessparameter die Leistungsaufnahme als Konstante in Abhängigkeit vom kardinal skalierbaren Prozessparameter modelliert werden. Die Modelle der einzelnen Fälle orientieren sich dabei an der vorherigen vorgestellten Form von Formel 4-69 und ist in Formel 4-70 dargestellt. Daher wird für jeden unterschiedenen Fall die Basisleistungsaufnahme  $P_{i,ps,basis}$  aus den vorangegangenen Experimenten quantifiziert. Die Anteile der Leistungsaufnahmen, die von kardinal skalierbaren Prozessparametern abhängen, werden individuell für jeden Fall modelliert. Das Vorgehen hierfür wird ab Formel 4-71 beschrieben.

$$P_{i,ps} = \begin{cases} P_{i,ps,pp,Fall\ 1} = P_{i,ps,basis} + \sum_{n=1}^N P_{i,ps,pp,n}, \text{ wenn Fall 1} \\ \dots \\ P_{i,ps,pp,Fall\ C} = P_{i,ps,basis} + \sum_{n=1}^N P_{i,ps,pp,n}, \text{ wenn Fall C} \end{cases} \quad 4-70$$

Wird die Leistungsaufnahme ausschließlich von kardinal skalierbaren Prozessparametern beeinflusst, so sind zwei Optionen möglich. Zunächst erfolgt eine Modellierung der Leistungsaufnahme unter Vernachlässigung der Interaktionseffekte. Hier wird demnach die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps}$ , wie in Formel 4-69 beschrieben, modelliert, indem sich diese aus der unabhängigen Basisleistungsaufnahme  $P_{i,ps,basis}$  sowie der Summe der anteilig durch die Prozessparameter bedingten Leistungsaufnahmen  $P_{i,ps,pp,n}$  zusammensetzt. Ist diese Modellierung nicht präzise genug, d. h. die dadurch erreichte Prognosequalität ist nicht ausreichend, so werden verschiedene Fälle für alle Prozessparameter, bis auf denjenigen mit dem stärksten Einfluss auf den Energiebedarf, definiert und wie zuvor für nominal und ordinal skalierbare Prozessparameter beschrieben und ggf. kombiniert. Der Prozessparameter mit dem größten Einfluss auf den Energiebedarf wird anschließend in Abhängigkeit von den definierten Fällen quantifiziert und entsprechend dem Vorgehen zur Modellierung der kardinal skalierbaren Prozessparameter modelliert, wie ab Formel 4-71 beschrieben.

Die Modellierung der Leistungsaufnahmen, die durch einen kardinal skalierbaren Prozessparameter beeinflusst werden, orientiert sich an dem im Folgenden beschriebenen Vorgehen. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse der Prozessparameter wird das Verhalten der mittleren Leistungsaufnahme bei zunehmender Prozessparametereinstellung betrachtet. Zunächst wird geprüft, ob ein Schwellenwert  $S$  der Prozessparametereinstellung existiert, der eine markante Änderung des Verhaltens der Leistungsaufnahme markiert. Die mittlere Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp,S}$  kann bspw. unterhalb eines Schwellenwertes trotz steigender Prozessparametereinstellung  $S_{i,ps,pp,n}$  konstant bleiben und erst oberhalb des Schwellenwertes allmählich zunehmen. Analog dazu kann es auch einen oberen Schwellenwert geben, oberhalb dessen die Leistungsaufnahme nicht weiter ansteigt. Beim Auftreten eines oder mehrerer solcher Schwellenwerte wird eine Fallunterscheidung vorgenommen, wobei für jeden Fall eine individuelle Modellierung des Energiebedarfs  $E_{i,ps,pp}$  erfolgt, die anschließend aufsummiert werden, wie in Formel 4-71 angegeben. Die Ermittlung der jeweiligen Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp,S}$  erfolgt dann basierend anhand der Fallunterscheidung anhand Formel 4-72.

$$E_{i,ps,pp} = \sum_{s=0}^S P_{i,ps,pp,S} \cdot t_{ps} \quad 4-71$$

$$P_{i,ps,pp} = \begin{cases} P_{i,ps,pp,S} = P_{i,ps,pp, Fall\ u}, & \text{wenn } S_{i,ps,pp} \leq \text{unterer Schwellenwert} \\ P_{i,ps,pp,S} = P_{i,ps,pp, Fall\ o}, & \text{wenn } S_{i,ps,pp} \geq \text{oberer Schwellenwert} \\ P_{i,ps,pp,S} = P_{i,ps,pp, Fall\ n}, & \text{sonst} \end{cases} \quad 4-72$$

Anschließend wird für die einzelnen Fälle  $P_{i,ps,pp, Fall\ u}$ ,  $P_{i,ps,pp, Fall\ o}$  und  $P_{i,ps,pp, Fall\ n}$  sowie wenn keine Schwellenwerte erkennbar sind das Verhalten der mittleren Leistungsaufnahme mit zunehmender Einstellung des kardinal skalierbaren Prozessparameters untersucht. Anhand des Verhaltens wird ein entsprechendes Modell gewählt. Unterhalb oder oberhalb von Schwellenwerten kann die mittlere Leistungsaufnahme konstant und somit vom Prozessparameter unabhängig sein. Die Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp}$  wird dann wie in Formel 4-73 beschrieben modelliert.

$$P_{i,ps,pp} = \textit{konstant} \quad 4-73$$

Häufig nimmt die mittlere Leistungsaufnahme mit zunehmender Einstellung der Prozessparameter zu. Das im folgenden vorgestellte Vorgehen für zunehmende Leistungsaufnahmen kann aber auch auf abnehmende Leistungsaufnahmen übertragen werden. Die Steigung kann linear, progressiv oder degressiv sein. Um eine Regression für ein lineares Verhalten zu erhalten, kann die Steigung der Funktion anhand der Differenz zwischen der maximalen Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp,max}$  und der minimalen Leistungsaufnahme  $P_{i,ps,pp,min}$  berechnet werden. Die minimale Leistungsaufnahme dient zudem als y-Achsenabschnitt. Der Achsenabschnitt der x-Achse wird dann durch das Verhältnis zwischen der gewählten Prozessparametereinstellung  $S_{i,ps,pp}$  und der maximalen Prozessparametereinstellung  $S_{i,ps,pp,max}$  berechnet. Das Grundmodell für ein lineares Verhalten ist in Formel 4-74 gegeben. Die minimalen und maximalen Leistungsaufnahmen  $P_{i,ps,pp,max}$  und  $P_{i,ps,pp,min}$  wurden in den vorangegangenen Experimenten ermittelt und können für das Modell übernommen werden.

$$P_{i,ps,pp,n} = (P_{i,ps,pp,max} - P_{i,ps,pp,min}) \cdot \frac{S_{i,ps,pp}}{S_{i,ps,pp,max}} + P_{i,ps,pp,min} \quad 4-74$$

Liegt kein linearer Zusammenhang vor, kann mit Hilfe des Gaußschen Eliminationsverfahrens eine allgemeine Funktion beliebigen Grades abgeleitet werden. Hierzu werden zusätzlich zur minimalen und maximalen Prozessparametereinstellung weitere Punkte definiert. Die Wahl der Punkte orientiert sich dabei u. a. auch am Verlauf und sollte nicht zu nah an der minimalen und maximalen Prozessparametereinstellung liegen. Es bieten sich bspw. die Leistungsaufnahme bei einer relativen Prozessparametereinstellung von 50 %  $P_{i,ps,pp,50\%}$  aber auch von 25 % und 75 % an. Die relative Einstellung des Prozessparameters dient wie zuvor als x-Achsenabschnitt. Formel 4-75 zeigt das Ergebnis des Gaußschen Eliminationsverfahrens für einen quadratischen Verlauf. Als Punkte wurden hierbei  $(0|P_{i,ps,pp,min})$ ,  $(0,5|P_{i,ps,pp,50\%})$  und  $(1|P_{i,ps,pp,max})$  gewählt. Das Gaußschen Eliminationsverfahren kann bspw. auch für das Erhalten von Funktionen dritten Grades sowie logarithmische Funktionen eingesetzt werden.

$$\begin{aligned}
 P_{i,ps,pp,n} = & \left(2P_{i,ps,pp,max} - 4P_{i,ps,pp,50\%} + 2P_{i,ps,pp,min}\right) \cdot \left(\frac{S_{i,ps,pp}}{S_{i,ps,pp,max}}\right)^2 \\
 & + \left(-P_{i,ps,pp,max} + 4P_{i,ps,pp,50\%} + 3P_{i,ps,pp,min}\right) \cdot \left(\frac{S_{i,ps,pp}}{S_{i,ps,pp,max}}\right) \\
 & + P_{i,ps,pp,min}
 \end{aligned} \quad 4-75$$

Die Teilmodelle werden anschließend entsprechend dem Vorgehen zusammengesetzt und anhand von Referenzbauteilen validiert. Durch die Validierung können mögliche Defizite des Modells identifiziert werden. Falls erforderlich, kann das Modell dann durch die Wahl einer anderen Regressionsfunktion oder durch eine Erhöhung des Detaillierungsgrades verbessert werden. Bspw. können weitere Abschnitte innerhalb einer Prozessstufe für eine Systemeinheit unterschieden werden oder weitere Fallunterscheidungen hinzugefügt werden. Das Vorgehen ermöglicht die Entwicklung und Übertragung eines Modells zur Prognose und Analyse des Energiebedarfs von additiven Fertigungssystemen.

## 5 KEA- und GWP-Prognosemodell für mittels HS DED-LB gefertigte Bauteile

Der Energiebedarf des HS DED-LB-Prozesses kann durch das in Kapitel 4 beschriebene Modell prognostisch quantifiziert und analysiert werden. Zur Abschätzung der aus dem HS DED-LB-Prozess resultierenden Umweltauswirkungen wird sich, wie in Kapitel 2.4.4 erläutert, im Folgenden auf zwei der zentralen Wirkungskategorien einer Ökobilanz fokussiert, den KEA (Wirkungskategorie: Cumulative Energy Demand) und das GWP (Wirkungskategorie: IPCC 2013 Climate Change GWP 100a). Hierfür wird das Energiebedarfsprognosemodell des HS DED-LB um die Quantifizierung der Stoffflüsse erweitert und in ein Modell zur Berechnung des aus den Elementarflüssen resultierenden GWP und KEA weiterentwickelt. Da jedoch auch die dem HS DED-LB-Prozess vor- und nachgelagerten Prozessschritte maßgeblich zu den Umweltauswirkungen eines mittels HS DED-LB gefertigten Bauteils beitragen, werden die aus der Rohstoffgewinnung, der Pulverherstellung sowie von möglichen Nachbearbeitungsprozessen resultierenden KEA und GWP ebenfalls in das Modell integriert. Der Aufbau sowie die Entwicklung des Modells sind nachfolgend in Kapitel 5.1 beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 5.2 das Modell exemplarisch an drei Bauteilen angewendet. Hierdurch wird die Funktionsweise aufgezeigt sowie die Anforderungserfüllung diskutiert.

### 5.1 Entwicklung des Prognosemodells

Das Modell schafft eine Transparenz des individuellen KEA und GWP eines Bauteils und kann dadurch als Entscheidungsgrundlage für Prozessauswahl und -auslegung dienen. Die Anforderungen an das Modell sind in Kapitel 3.2 beschrieben. Um die gesamte Prozesskette gleichwertig zu berücksichtigen, wird für jeden Prozessschritt ein individuelles Teilmodell erstellt, die abschließend zu einem Gesamtmodell aggregiert werden. Im Folgenden wird zunächst der Gesamtansatz erläutert. Anschließend erfolgt die Modellentwicklung für die Rohstoffgewinnung, die Pulverherstellung, den HS DED-LB-Prozess, ausgewählte Nachbearbeitungsprozesse sowie für Transportprozesse.

#### 5.1.1 Übersicht über das Gesamtmodell

Zentrales Element ist das in Kapitel 4.1.5 entwickelte Energieprognosemodell für den HS DED-LB-Prozess. Während dieses Prozesses wird das später verwendete Bauteil gefertigt und seine Eigenschaften definiert. Zudem wirken sich die für diesen Prozessschritt getroffenen Entscheidungen und gewählten Prozessparameter auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte aus. So bestimmt z. B. die Wahl des Pulvermassenstroms die während des Prozesses geförderte Pulvermenge und die aufgebaute Geometrie sowie die durch die gewählte Laserleistung bedingte Schichtdicke beeinflussen den späteren Nachbearbeitungsbedarf. Zudem gestalten Nutzende des Prognosemodells meist auch den additiven Fertigungsprozess und können daher aktiv auf ihn Einfluss nehmen. Auf die vorgelagerten Prozessschritte der Rohmaterial- und Pulverherstellung besteht dagegen meist nur geringer bis kein Einfluss. Im Modell werden somit zwar alle Prozessschritte quantifiziert, jedoch wird lediglich im Modell für das HS DED-LB die umfassende Möglichkeit bestehen, gewählte Prozessparameter zu variieren. Hierfür wird das in Kapitel 4.1.5 beschriebene Energieprognosemodell für HS DED-LB-Prozesse um Elemente zur Prognose der Materialbedarfe des Prozesses erweitert. Die Energie- und Materialbedarfe werden anschließend mit den Charakterisierungsfaktoren verknüpft, um die resultierenden KEA

und GWP zu ermitteln. Die Charakterisierungsfaktoren werden anhand von Datenbanken ermittelt und geben den spezifischen KEA oder GWP je Mengeneinheit wie bspw. Gewicht, Volumen oder Energiebedarf an. Das Teilmodell des HS DED-LB-Prozesses weist somit den höchsten Detaillierungsgrad auf.

Für Rohstoffgewinnung, Pulverherstellung sowie Nachbearbeitung werden individuelle Teilmodelle erstellt und miteinander verknüpft. Input hierfür sind bauteil- und fertigungssystem-spezifische Informationen. Da die zur Verfügung stehenden Informationen und die Beeinflussbarkeit der einzelnen Prozessschritte unterschiedlich sind, weisen die Teilmodelle einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad auf. Basierend auf dem Vorgehen der Methode einer Ökobilanz werden individuelle Charakterisierungsfaktoren abgeleitet, sodass das GWP und der KEA der individuellen Prozessschritte modularisiert werden kann. Die Systemgrenze umfasst alle für den betrachteten Prozess relevanten Prozessschritte sowie die entsprechenden Material- und Energieflüsse. Als betrachtetes Material wurde der Edelstahl 316L (Werkstoffnummer: 1.4404) verwendet. 316L ist aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften und seines Temperaturverhaltens ein weit verbreitetes und in der additiven Fertigung häufig eingesetztes Material [Zhan14]. Das Gesamtmodell ist somit wie in Abbildung 5-1 gezeigt aufgebaut.

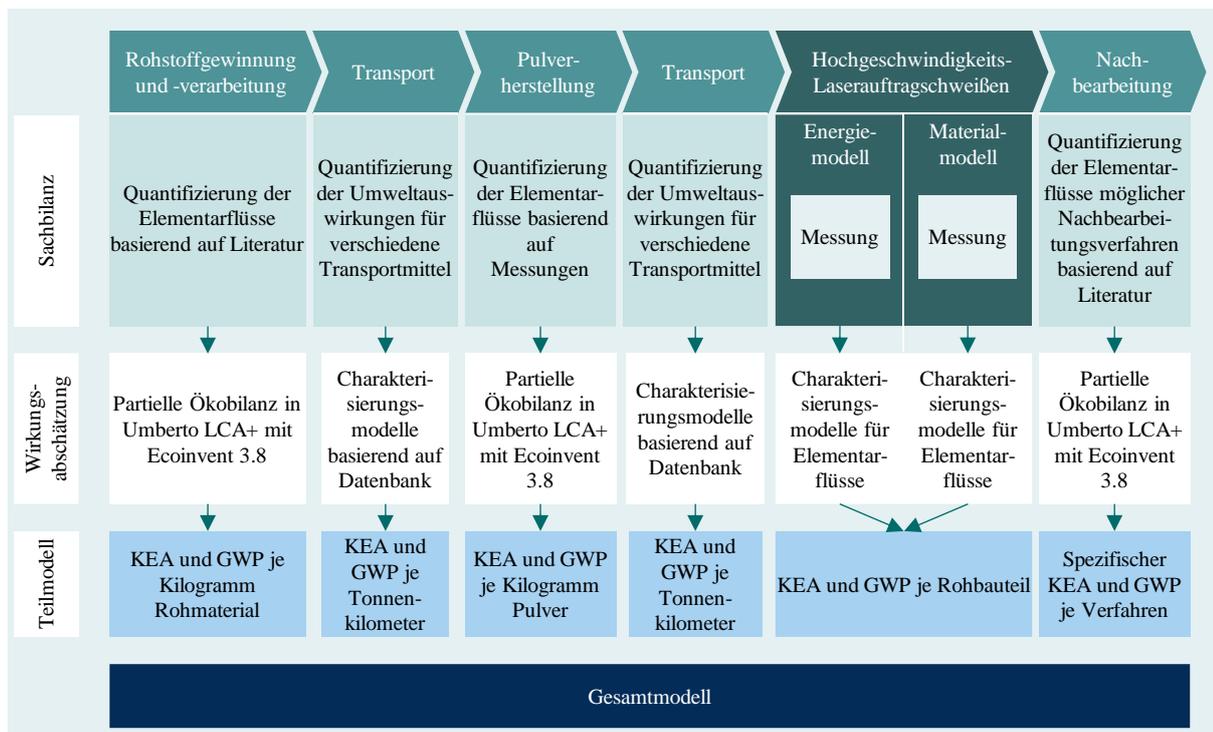


Abbildung 5-1: Aufbau des KEA- und GWP-Prognosemodells der betrachteten Prozesskette

Für die Rohstoffgewinnung und die Herstellung des 316L als Rohmaterial sowie seiner Legierungselemente werden die Elementarflüsse basierend auf Literaturwerten quantifiziert und in *Umberto LCA+* der *iPoint-systems GmbH* modelliert, wodurch die vorgelagerten Prozesse der Elementarflüsse durch die in der Datenbank *Ecoinvent 3.8* hinterlegten Werte berücksichtigt und im Modell integriert werden. Die Weiterverarbeitung des Rohmaterials zu Pulver für die additive Fertigung erfolgt mittels Gasverdüsung. Die Analyse der Prozesskette sowie die Sachbilanz erfolgen innerhalb einer industriellen Produktion. Der Prozess wird gemeinsam mit den quantifizierten Elementarflüssen ebenfalls in *Umberto LCA+* modelliert und mit den entsprechenden Wirkungskategorien verknüpft. Von der großen Anzahl an möglichen

Nachbearbeitungsprozessen werden die relevantesten und somit auch häufig eingesetzten Prozesse, basierend auf Literaturdaten und Datenbankwerten, im Modell berücksichtigt. Innerhalb der betrachteten Prozessschritte sowie zwischen den Prozessschritten erfolgen Transportprozesse, die basierend auf der Transportstrecke und der transportierten Masse im Modell integriert werden.

Der KEA sowie das GWP für ein Bauteil  $KEA_{Bauteil}$  und  $GWP_{Bauteil}$  ist somit die Summe des KEA bzw. des GWP der einzelnen Prozessschritte, wie in Formel 5-1 und Formel 5-2 gezeigt.

$$KEA_{Bauteil} = KEA_{Rohmaterial} + KEA_{Pulver} + KEA_{HS\ DED-LB} + KEA_{Nachbearbeitung} + KEA_{Transport} \quad 5-1$$

$$GWP_{Bauteil} = GWP_{Rohmaterial} + GWP_{Pulver} + GWP_{HS\ DED-LB} + GWP_{Nachbearbeitung} + GWP_{Transport} \quad 5-2$$

Zentrale Größe ist hierbei der Materialbedarf der einzelnen Prozessschritte. Als Material für den HS DED-LB-Prozess wird 316L Pulver verwendet. Der Pulvermassenstrom  $\dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver}$ , d. h. die geförderte Pulvermenge pro Minute, wird direkt durch die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe des Pulverförderers definiert. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben, wird diese kurz nach Beginn des Pre-Steps eingeschaltet und mit Ende des In-Steps ausgeschaltet. Somit lässt sich die geförderte Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$  über die Dauer des Pre-Steps und des In-Steps extrapolieren, wie in Formel 5-3 beschrieben.

$$M_{HS\ DED-LB, Pulver} = \dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver} (T_{pre} - T_{PF,z} + T_{in}) \quad 5-3$$

Der Pulvermassenstrom  $\dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver}$  in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe kann auf verschiedene Weisen bestimmt werden. Üblich ist die experimentelle Bestimmung, bei der die Förderscheibe eine bestimmte Zeit, bspw. zehn Minuten bei einer definierten Rotationsgeschwindigkeit betrieben wird, sodass Pulver gefördert wird. Das geförderte Pulver wird aufgefangen und anschließend gewogen. Durch das wiederholte Durchführen dieses Vorgangs mit schrittweiser Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit kann so der Pulvermassenstrom durch eine lineare Regression extrapoliert werden. Beispielhaft ist diese für eine Charge des *MetcoAdd 316L* der *OC Oerlikon Corporation AG* in Formel 5-4 angegeben, wobei die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe  $n_F$  in U/min angegeben wird. Da die Dichte verschiedener Materialien sowie die PGV zwischen mehreren Chargen variieren kann, muss für jedes Pulver und jede Charge der individuelle Pulvermassenstrom bestimmt werden. Alternativ kann der Pulvermassenstrom auch über die Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe und dem Volumen der Nut für den Pulvertransport in der Förderscheibe berechnet werden, das sich aus dem Produkt von Querschnittsfläche der Nut  $Q_{Nut}$ , dem Umfang der Nut  $U_{Nut}$  und der Schüttdichte des Pulvers  $\rho_{Schütt, 316L}$ , gemäß Formel 5-5, ergibt.

$$\dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver} = 6,3689091 \cdot n_F \quad 5-4$$

$$\dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver} = n_F \cdot U_{Nut} \cdot Q_{Nut} \cdot \rho_{Schütt, 316L} \quad 5-5$$

Es wird jedoch nicht das gesamte geförderte Pulver aufgetragen. Pulver, das nicht im Bauteil verbleibt und zum Formaufbau beiträgt, führt zum Pulververlust  $M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust}$ . SCHAIBLE et al. klassifizieren zwei Arten von Pulververlusten, deren Summe, wie in Formel 5-6 beschrieben, den gesamten Pulververlust umfassen. Maschinenbedingte Pulververluste  $M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, masch.}$  sind spezifisch für den HS DED-LB-Prozess und entstehen aufgrund

der notwendigen Beschleunigungs- und Abbremsstrecken für die Bauplattform ohne Materialauftrag, bei denen der Laserstrahl zwar ausgeschaltet ist, der Pulvermassenstrom aufgrund seiner großen Latenzzeit jedoch weiter aufrechterhalten wird. Diese Art von Pulververlust kann somit durch Formel 5-7 berechnet werden, indem die Masse des geförderten Pulvers bei ausgeschaltetem Laserstrahl bestimmt wird. Prozessbedingte Pulververluste  $M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, proz.}$ , werden durch prozessphysikalische Effekte wie Verdampfung von Partikeln und Übersprühen verursacht. Sie treten nur auf, wenn der Laserstrahl zugeschaltet ist [Scha21]. Zur Berechnung der prozessbedingten Pulververluste wird daher die Masse des gefertigten Bauteils  $m_{HS\ DED-LB, Bauteil}$  von der Pulvermenge abgezogen, die während der Laserstrahl zugeschaltet  $T_{L,an}$  ist, gefördert wird. Daraus ergibt sich Formel 5-8.

$$M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust} = M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, masch.} + M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, proz.} \quad 5-6$$

$$M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, masch.} = \dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver} \cdot (T_{pre} + T_{in} - T_{L,an}) \quad 5-7$$

$$M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust, proz.} = \dot{m}_{HS\ DED-LB, Pulver} \cdot T_{L,an} - m_{HS\ DED-LB, Bauteil} \quad 5-8$$

Zur Bestimmung der tatsächlich im Prozess eingesetzten Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$ , erfolgt eine Fallunterscheidung, ob eine Wiederverwendung des Pulvers stattfindet. Pulververluste können, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, teilweise aufgefangen, aufbereitet und erneut genutzt werden. Jedoch kann das geförderte Pulver aus den folgenden Gründen nicht gänzlich wieder verwendet werden:

- ❑ Es verbleibt ein Pulverrest im Bauraum, der nicht vom Entstaubungssystem extrahiert wird und somit anderweitig entfernt wird, was eine Wiederverwendung aufgrund von Verunreinigungen stark erschwert.
- ❑ Pulverpartikel werden während des HS DED-LB-Prozesses agglomeriert und zusammengeschweißt. Diese Partikel weisen somit eine zu große Partikelgröße auf und werden daher während des Aufbereitungsprozesses entfernt [Azev18].
- ❑ Manche Partikel verdampfen während des HS DED-LB-Prozesses [Scha21].

Nach FALUDI et al. können beim Lasersintern zwischen 95 % und 98 % des nicht aufgetragenen Pulvers wieder verwendet werden [Falu15]. Für das HS DED-LB liegen bisher keine quantitativen Untersuchungen zur Wiederverwendbarkeit von nicht aufgetragenem Pulver vor. Pulververluste, bedingt durch Pulverrückstände im Bauraum oder am Bauteil, sowie eine notwendige Aufbereitung von Pulver, um Pulverpartikel zu entfernen, die aufgrund von Akkumulationen oberhalb der benötigten Partikelgröße liegen, führen dazu, dass lediglich ein Teil des nicht aufgetragenen Pulvers wiederverwendet werden kann. Um diese unbekannteren Verluste zu berücksichtigen, kann somit für das HS DED-LB die konservative Annahme getroffen werden, dass 85 % des nicht aufgetragenen Pulvers wiederverwendet werden kann, wodurch nicht zurückgewinnbare Pulververluste von 15 % auftreten. Dieser Anteil wird durch den Faktor  $f_{HS\ DED-LB, Pulver, Wiederverwendung}$  berücksichtigt, der somit die Menge dieser Verluste anhand der während des Prozesses geförderten Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$  bestimmt. Diese unvermeidbaren Pulververluste werden zusätzlich zum Bauteilgewicht nach dem HS DED-LB-Prozess  $m_{HS\ DED-LB, Bauteil}$  als Pulverbedarf berücksichtigt. Findet keine Wiederverwendung des eingesetzten Pulvers statt, so wird die geförderte Pulvermenge als Pulverbedarf verwendet. Die Fallunterscheidung erfolgt wie in Formel 5-9 beschrieben.

$$M_{HS\ DED-LB,Pulver} = \begin{cases} \text{wenn Wiederverwendung, } m_{HS\ DED, LB, Bauteil} + M_{HS\ DED-LB, Pulver, Verlust} \\ \quad \cdot f_{HS\ DED-LB, Pulver, Wiederverwendung} \\ \text{wenn keine Wiederverwendung, } M_{HS\ DED-LB, Pulver} \end{cases} \quad 5-9$$

Für die dem HS DED-LB-Prozess vorgelagerten Prozessschritte wird angenommen, dass keinerlei Materialverluste entstehen. Somit entspricht die während des HS DED-LB-Prozesses geförderte Pulvermenge dem Bedarf an Rohmaterial sowie an Pulver. Die Modelle zur Prognose des KEA und des GWP entlang der Prozesskette zur Herstellung eines Bauteils mittels HS DED-LB erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

### 5.1.2 Teilmodellentwicklung der Rohstoffgewinnung

In Kapitel 2.3.2 wurde die zur Herstellung des Edelstahl 316L notwendigen Prozesse mit den dazugehörigen Elementarflüssen erläutert. Basierend auf diesen Prozessketten werden der KEA und das GWP basierend auf der Methode einer Ökobilanz anhand des in Kapitel 2.4 beschriebenen Vorgehens für den Rohstahl und die Legierungselemente bestimmt. Hierfür werden für jedes Legierungselement sowie für die Edelstahlherstellung selbst die jeweiligen identifizierten Prozessketten individuell in einem Cradle-to-Gate-Ansatz in *Umberto LCA+* modelliert und anschließend in ein Gesamtmodell integriert. Die quantifizierten Input- und Outputflüsse stammen aus der Literatur. Diese werden anschließend mit Datenbankwerten aus *Ecoinvent 3.8* zur Abbildung der vorgelagerten Prozessstufen der Inputflüsse verknüpft.

Für die partielle Ökobilanz der Rohstahlherstellung wird angenommen, dass das Eisenerz zunächst in Australien abgebaut und aufbereitet wird. Anschließend wird der Rohstahl über die Hochofen-Konverter-Route sowie die Elektroschmelz-Route im Elektrolichtbogenofen weiterverarbeitet. Da China der weltweit größte Rohstahlproduzent ist, wird angenommen, dass der Herstellungsprozess in China stattfindet [WSA21]. Die Quantifizierung der Elementarflüsse erfolgt basierend auf den Arbeiten von NORGATE und HAQUE für den Abbau und die Aufbereitung von Eisenerz sowie von BURCHART-KAROL für die Rohstahlherstellung [Burc13, Norg10].

Der Abbau und die Aufbereitung des Eisenerzes erfolgt nach NORGATE und HAQUE in mehreren Prozessschritten. Hierbei wird das Eisenerz durch Sprengung gewonnen und anschließend durch Zerkleinerungs- und Siebvorgänge weiterverarbeitet, ehe es für die Rohstahlherstellung weitertransportiert wird. Die Daten der Autoren stammen von vier unterschiedlich großen australischen Eisenerzminen (Brockman, Paraburdoo, Hopes Down, Yiandicoogin) und sind anhand der jeweiligen Produktionsmenge gewichtet. Als funktionelle Einheit wird eine Tonne Eisenerz definiert [Norg10]. Die Modellierung beruht auf den folgenden Annahmen der Autoren:

- Der Abbau von Eisenerz erfolgt im Tagebau.
- Die Sanierung und Renaturierung von Minenstandorten werden nicht berücksichtigt.
- Da die Minen in Australien im Landesinneren liegen, wird in der Modellierung ein Transport des Eisenerzes per Zug zum Verschiffungshafen berücksichtigt.
- Das abgebaute Eisenerz hat einen Eisengehalt von ca. 60 % [Norg10].

BURCHART-KOROL bilanziert die Herstellung von Rohstahl anhand von sieben Stahlwerken in Polen. Für die Hochofen-Konverter-Route sowie für die Elektroschmelz-Route werden die in Kapitel 2.3.2 erläuterten Prozessketten für die partielle Ökobilanz herangezogen. Funktionelle

Einheit ist hierbei eine Tonne Rohstahl nach dem Stranggießen [Burc13]. Die Bilanzerstellung beruht auf den folgenden Annahmen:

- ❑ Kreislaufgeführte Elementarflüsse zwischen Prozessen innerhalb der Systemgrenze werden in der Modellierung nicht berücksichtigt.
- ❑ Der Bau und der potenzielle Rückbau der notwendigen Anlagen sowie die Nutzung und die Entsorgung des Rohstahls wird in der Modellierung nicht berücksichtigt [Burc13].

Innerhalb der partiellen Ökobilanz der Rohstahlherstellung werden drei verschiedene Szenarien betrachtet:

- ❑ Die Herstellung des Rohstahls erfolgt ausschließlich durch die Hochofen-Konverter-Route, was die ausschließliche Nutzung von Primärmaterial bedingt.
- ❑ Die Herstellung des Rohstahls erfolgt ausschließlich durch die Elektroschmelz-Route, was die ausschließliche Nutzung von Sekundärmaterial bedingt.
- ❑ Die Herstellung des Rohstahls erfolgt zu 70 % durch die Hochofen-Konverter-Route und zu 30 % durch die Elektroschmelz-Route, was annäherungsweise dem globalen Verhältnis der Anwendung der beiden Verfahren entspricht [WSA20].

Zusätzlich erfolgt die partielle Ökobilanz der Rohstahlherstellung unter den folgenden Annahmen:

- ❑ Der Prozess des Warmwalzens wird im Rahmen der partiellen Ökobilanz aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt.
- ❑ Als Outputflüsse werden lediglich Emissionen als Elementarflüsse innerhalb der partiellen Ökobilanz berücksichtigt. Weitere Outputflüsse werden aufgrund des nicht zu erwartenden Einflusses auf die gewählten Wirkungskategorien und zur Verbesserung der Übersichtlichkeit im Rahmen der partiellen Ökobilanz vernachlässigt.

Das Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Herstellung von einem Kilogramm Rohstahl ist in Anhang G in Tabelle 8-11 aufgeführt. Für die Herstellung über die Hochofen-Konverter-Route entsteht ein KEA von 19,12 MJ/kg sowie ein GWP von 1,99 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Der Hochofenprozess verursacht hierbei für beide Wirkungskategorien einen Großteil der Auswirkungen, gefolgt vom Sintern und der Reduktion des Kohlenstoffgehalts im Sauerstoffblaskonverter. Für die Elektroschmelz-Route entstehen lediglich ein KEA von 6,48 MJ/kg und ein GWP von 0,79 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Deutlich wird hierbei, dass für die Verarbeitung des Materials im Elektrolichtbogenofen ein geringerer KEA und GWP entstehen als im Hochofen. Für die Rohstahlherstellung basierend auf dem weltweiten Anteil der Verfahren entsteht ein KEA von 15,33 MJ/kg und ein GWP von 1,63 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg.

Die Legierungselemente werden individuell basierend auf den in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Prozessketten bilanziert.

Chrom ist das Legierungselement mit dem größten Massenanteil im Edelstahl 316L. Da Chrom i. d. R. als Ferrochrom zulegiert wird, erfolgt die partielle Ökobilanz von Ferrochrom unter Annahme eines Chromanteils von 53 % und eines Kohlenstoffanteils von 6,4 %. Die Quantifizierung der Elementarflüsse basiert auf dem Ansatz von HAQUE und NORGATE, die die Herstellung von Ferrochrom über den Abbau und die Aufbereitung des Chromerzes bis zur Herstellung durch das Schmelz-Reduktionsofen-Verfahren im Lichtbogenofen erfassen [Haqu13]. Das Land mit der größten Chromfördermenge ist Südafrika [USGS22]. Daher wird angenommen,

dass die Herstellung bei Johannesburg, Südafrika, Standort des größten Ferrochromproduzenten, erfolgt und von dort per Güterzug zum Industriehafen in Durban zur Verschiffung nach China transportiert wird [Meta18]. Zur Herstellung von 1 kg Ferrochrom entstehen ein KEA von 88,98 MJ/kg sowie ein GWP von 5,35 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg, wobei jeweils mehr als 98 % durch die Ferrochromproduktion und nur ein kleiner Teil durch den Erzabbau und Aufbereitung verursacht werden. Die Ergebnisse für die Ferrochromproduktion sind in Anhang G in Tabelle 8-12 weiter aufgeschlüsselt.

Das Legierungselement Nickel wird ebenfalls in Form von Ferronickel dem Edelstahl 316L zulegiert, weshalb die partielle Ökobilanz für Ferronickel unter Annahme eines Nickelgehalts von 35 % durchgeführt wird. Die quantifizierten Elementarflüsse der Gewinnung und Herstellung von Ferronickel sind dem Ansatz von WEI et al. entnommen. Im Rahmen des Ansatzes von WEI et al. werden die Transporte für Hilfsstoffe wie Kalk, Kohle und Aluminium sowie die Auswirkungen, die durch die Herstellung und Nutzung von Sprengstoff und Kühlwasser entstehen, vernachlässigt [Wei20a]. Da Indonesien das weltweit größte Abbaugelände für Nickelerz ist, wird eine Herkunft des Nickelerz aus Indonesien angenommen [USGS22, Szur21]. Die größte Nickelerzmine Indonesiens ist die Sorowako Mine auf Sulawesi [VML21]. Von dort aus wird das Ferronickel per Güterzug zum Industriehafen und anschließend weiter per Schiff nach Zhanjiang in China transportiert. Die Ergebnisse der partiellen Ökobilanz, die in Anhang G in Tabelle 8-13 zusammengefasst sind, zeigen, dass durch die Herstellung von 1 kg Ferronickel ein KEA von 180,50 MJ/kg sowie ein GWP von 11,72 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg entstehen. Der Großteil wird hierbei durch den Schmelzvorgang, gefolgt vom Kalzinieren und Vorreduzieren verursacht.

Auch Molybdän wird i. d. R. als Ferromolybdän dem Edelstahl 316L zulegiert. Die Quantifizierung der Elementarflüsse wird basierend auf einer Studie von WEI et al. vorgenommen. Es wird hierbei angenommen, dass das Ausgangsmaterial einen Molybdängehalt von 0,115 % und das resultierende Ferromolybdän einen Molybdängehalt von 60 % aufweist [Wei20b]. Zudem werden im Ansatz von WEI et al. Flussspat sowie die Transportwege für Kalk und von Reduktionsmitteln vernachlässigt. Da China der weltweit größte Hersteller von Molybdän ist, wird angenommen, dass Ferromolybdän in der Yichun Luming Molybdenum Mine in der nördlichen Provinz Heilongjiang gewonnen wird und anschließend per Güterzug weiter nach Zhanjiang transportiert wird [Poly22]. Für die Herstellung von 1 kg Ferromolybdän entstehen ein KEA von 138,81 MJ/kg sowie ein GWP von 8,38 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Die detaillierten Ergebnisse sind in Anhang G in Tabelle 8-14 aufgeführt.

Mangan wird ebenfalls hauptsächlich als Ferromangan in der Edelstahlherstellung eingesetzt. Basierend auf den Annahmen von HAQUE und NORGATE, deren Ergebnisse der Prozesskettenanalyse zur Quantifizierung der Elementarflüsse herangezogen werden, wird ein Mangananteil von 77 % am Ferromangan angenommen. Weitere Annahmen umfassen das Vernachlässigen von Transportwegen von Hilfsstoffen [Haqu13]. Mangan wird hauptsächlich in China gefördert [Stat22]. Es wird hierbei angenommen, dass sich die Manganerzmine in der Provinz Guizhou befindet, da hier das größte Manganvorkommen Asiens existiert [CIIC19]. Somit wird anschließend ein Transport des Ferromangans nach Zhanjiang per Güterzug angenommen. Die Ergebnisse sind in Anhang G in Tabelle 8-15 zusammengefasst. Für die Herstellung von 1 kg Ferromangan entsteht ein KEA von 36,55 MJ/kg sowie ein GWP von 2,32 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Der

Großteil wird hierbei durch den Bedarf an elektrischer Energie gefolgt vom notwendigen Koks für den Schmelzprozess verursacht.

Silizium wird aus Siliziumdioxid gewonnen und überwiegend als Ferrosilizium in der Stahlindustrie eingesetzt. Die Quantifizierung der Elementarflüsse erfolgt für den Abbau und die Aufbereitung des Erzes basierend auf den Ergebnissen von NORGATE und HAQUE sowie für die Weiterverarbeitung des Erzes zu Ferrosilizium basierend auf den Ergebnissen von HAQUE und NORGATE [HAQU13, NORG10]. Für den Ansatz wählen die Autoren einen Siliziumanteil von 76 % und einen Eisenanteil von 20,3 %. Weiterhin werden die Transportwege für Hilfsstoffe vernachlässigt [Haqu13]. Da China der größte Produzent von Silizium und Ferrosilizium ist, wird angenommen, dass sich der Abbauort in China in unmittelbarer Nähe zu Zhanjiang befindet [Schu22, USGS22]. Daher werden die Transportwege von Ferrosilizium nicht berücksichtigt. Die partielle Ökobilanz resultiert in einem KEA von 111,7 MJ/kg sowie in einem GWP von 8,05 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Hierbei werden jeweils 99 % durch den Schmelzprozess verursacht, wobei der Bedarf an elektrischer Energie dominiert. Die detaillierten Ergebnisse sind in Anhang G in Tabelle 8-16 aufgeführt.

Im Vergleich der Legierungselemente weist Ferronickel die höchsten spezifischen KEA und GWP auf. Hierbei verursachen die Prozesse Kalzinieren, Vorreduzieren sowie das Schmelzen über 80 % des ermittelten Umweltauswirkungen, wobei auf den Strombedarf für das Schmelzen bereits 50 % des gesamten spezifischen KEA und GWP entfällt. Zur Herstellung von Ferromolybdän entfallen ca. 42 % der Umweltauswirkungen auf den Bergbau und die initiale Aufbereitung sowie die restlichen 58 % auf den Schmelzvorgang, wobei wiederum mehr als die Hälfte durch die Bereitstellung von Eisenerz verursacht wird. Die drittgrößten spezifischen KEA und GWP weist Ferrosilizium auf, wobei mehr als 99,5 % durch den stromintensiven Schmelzprozess verursacht wird. Auch bei der Herstellung von Ferrochrom und Ferromangan wird der Großteil des KEA und des GWP durch die Schmelzprozesse, insbesondere durch den dortigen Bedarf an elektrischen Strom, verursacht. Im Vergleich zu den Legierungselementen ist die Rohstahlherstellung weniger energieintensiv. Analog zu den Legierungselementen verursacht hier der stromintensive Hochofenprozess mehr als die Hälfte des KEA und GWP.

Ausgehend von den Ergebnissen der partiellen Ökobilanzen erfolgt die Erstellung des Modells zur prognostischen Ermittlung des KEA und des GWP in Abhängigkeit vom Rohmaterialbedarf in nachgelagerten Prozessschritten sowie der anteiligen Zusammensetzung der Legierungselemente.

Die durch die Rohmaterialherstellung verursachten KEA und GWP  $KEA_{Rohmaterial}$  und  $GWP_{Rohmaterial}$  sind abhängig von den individuellen Anteilen der Legierungselemente und von Rohstahl am resultierenden Edelstahl. Es wird angenommen, dass bei der Pulverherstellung keinerlei Materialverluste entstehen, da hergestelltes Pulver, das nicht innerhalb der benötigten PGV liegt, wieder eingeschmolzen wird. Somit entspricht die benötigte Masse des Rohmaterials der während des HS DED-LB-Prozesses benötigten Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$ .

Die jeweilige Menge des Legierungselements  $m_{Legierung,b}$  wird mit dem entsprechenden Charakterisierungsfaktor des KEA  $f_{Legierung,b}$  oder des GWP  $c_{Legierung,b}$  des jeweiligen Legierungselements  $b$  multipliziert. Dies wird gemeinsam mit der Masse des Rohstahls  $m_{Rohstahl}$  und den entsprechenden Primärenergiefaktoren des KEA  $f_{Rohstahl}$  oder Treibhauspotenzialen des GWP  $c_{Rohstahl}$  aufsummiert. Das abschließende Stranggießen wird basierend auf der Masse des

Rohmaterials  $M_{HS\ DED-LB,Pulver}$  mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren des KEA  $f_{Strangguss}$  und dem Treibhauspotenzial des GWP  $c_{Strangguss}$  berechnet und ebenfalls aufsummiert. Da in der Pulverherstellung auch der Einsatz von Kreislaufmaterial als Rohmaterial möglich ist, wird mit dem Anteil an Primärmaterial an Rohmaterial  $w_{Rohmaterial,Primär}$  der resultierende KEA und GWP entsprechend des Verhältnisses zwischen dem Einsatz von Primär- und Sekundärmaterial reduziert. Somit ergeben sich für die Rohmaterialherstellung Formel 5-10 für die Berechnung des resultierenden KEA und Formel 5-11 für die Berechnung des resultierenden GWP.

$$KEA_{Rohmaterial} = \left( \left( \sum_b^B m_{Legierung,b} \cdot f_{Legierung,b} \right) + m_{Rohstahl} \cdot f_{Rohstahl} + M_{HS\ DED-LB,Pulver} \cdot f_{Strangguss} \right) \cdot w_{Rohmaterial,Primär} \quad 5-10$$

$$GWP_{Rohmaterial} = \left( \left( \sum_b^B m_{Legierung,b} \cdot c_{Legierung,b} \right) + m_{Rohstahl} \cdot c_{Rohstahl} + M_{HS\ DED-LB,Pulver} \cdot c_{Strangguss} \right) \cdot w_{Rohmaterial,Primär} \quad 5-11$$

Die Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP der Rohstahlherstellung hängen vom jeweiligen Anteil an Primärmaterial  $w_{Rohstahl,Primär}$  und Sekundärmaterial  $w_{Rohstahl,Sekundär}$  und des davon abhängigen eingesetzten Fertigungsverfahrens ab. Das Primärmaterial wird über die Hochofen-Konverter-Route hergestellt, wobei die Charakterisierungsfaktoren für den KEA  $f_{Rohstahl,Primär}$  und das GWP  $c_{Rohstahl,Primär}$  resultieren. Wiederverwendeter, d. h. sekundärer Rohstahl wird über die Elektroschmelz-Route gewonnen. Die dazugehörigen Charakterisierungsfaktoren sind für den KEA  $f_{Rohstahl,Sekundär}$  und das GWP  $c_{Rohstahl,Sekundär}$ . Die Berechnung von  $f_{Rohstahl}$  und  $c_{Rohstahl}$  ist in Formel 5-12 und Formel 5-13 gezeigt.

$$f_{Rohstahl} = f_{Rohstahl,Primär} \cdot w_{Rohstahl,Primär} + f_{Rohstahl,Sekundär} \cdot w_{Rohstahl,Sekundär} \quad 5-12$$

$$c_{Rohstahl} = c_{Rohstahl,Primär} \cdot w_{Rohstahl,Primär} + c_{Rohstahl,Sekundär} \cdot w_{Rohstahl,Sekundär} \quad 5-13$$

Die jeweilige Masse der Legierungselemente  $m_{Legierung,b}$  ist abhängig vom Anteil des Legierungselements in der zur Edelstahlherstellung eingesetzten Ferroverbindung  $w_{Element,b}$ , dem Massenanteil des Legierungselements am hergestellten Edelstahl  $w_{Legierung,b}$  sowie der Gesamtmasse an eingesetztem Rohmaterial  $M_{HS\ DED-LB,Pulver}$  und kann wie in Formel 5-14 gezeigt berechnet werden. Die Masse des notwendigen Rohstahls  $m_{Rohstahl}$  wird anschließend aus der Differenz der benötigten Gesamtmasse des eingesetzten Rohmaterials  $M_{HS\ DED-LB,Pulver}$  und der Summe der Masse der Legierungselemente berechnet, wie in Formel 5-15 gezeigt.

$$m_{Legierung,b} = \frac{w_{Legierung,b}}{w_{Element,b}} \cdot M_{HS\ DED-LB,Pulver} \quad 5-14$$

$$m_{Rohstahl} = M_{HS\ DED-LB,Pulver} - \sum_b^B m_{Legierung,b} \quad 5-15$$

Für die Massenanteile des Legierungselements in der Ferroverbindung  $w_{Element,b}$  werden im Rahmen der partiellen Ökobilanzen die in Tabelle 5-1 angegebenen Werte verwendet. Es ist hierbei zu beachten, dass eine Veränderung der Massenanteile zu einer Abweichung der ermittelten Charakterisierungsfaktoren und der darauf basierenden spezifischen Primärenergiefaktoren und Treibhauspotenziale der Legierungselemente führt. Annäherungsweise können die Massenanteile an der Ferrolegierung zur Berechnung der tatsächlich eingesetzten Masse des Legierungselements gemeinsam mit den in Tabelle 5-1 angegebenen Primärenergiefaktor  $f_{Legierung,b}$  und dem Treibhauspotenzial  $c_{Legierung,b}$  verwendet werden. Sollten zudem die exakten Mengen des Legierungselements im eingesetzten Rohstahl nicht bekannt sein, kann ebenfalls auf die angegebenen Massenanteile  $w_{Legierung}$  zurückgegriffen werden.

Tabelle 5-1: Ermittelte Massenanteile und Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP der Legierungselemente und des Rohstahls zur Edelstahlherstellung

	<b>Anteil des Elements in Ferroverbindung</b> $w_{Element,b}$ %	<b>Primärenergiefaktor</b> $f$ MJ/kg	<b>Treibhauspotenzial</b> $c$ kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg	<b>Datenherkunft</b>
<b>Legierungselemente</b>				
Chrom	53	88,98	5,35	[Wern16, Haqu13]
Nickel	35	180,50	11,72	[Wei20a, Wern16]
Molybdän	60	138,81	8,38	[Wei20b, Wern16]
Mangan	77	36,55	2,32	[Wern16, Haqu13]
Silizium	76	111,71	8,05	[Wern16, Haqu13]
<b>Rohstahl</b>				
Primärrohstahl		19,12	1,99	[Haqu22, Wern16, Norg10]
Sekundärrohstahl		6,48	0,79	[Haqu22, Wern16, Norg10]
Strangguss		0,28	0,01	[Haqu22, Wern16, Norg10]

### 5.1.3 Teilmodellentwicklung der Pulverherstellung

Edelstahl 316L wird mittels Schutzgasverdüsung hergestellt. Die Sachbilanz wurde gemeinsam mit der *Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co* (DEW) durchgeführt, wobei der betrachtete Prozess der Pulverherstellung gemeinsam mit seinen Inputflüssen in Abbildung 5-2 skizziert ist.<sup>4</sup>

Betrachtet wird die Schutzgasverdüsung eines Verdüsungssystems mit einem Fassungsvermögen von 250 kg bis 350 kg Rohmaterial je Prozess. Das eingesetzte Rohmaterial kann aus Primärmaterial, aus produktionsinternen Schrotten wie Pulverausschuss und aus zugekauften Schrotten bestehen. Um die Ziellegierung zu erreichen, werden die entsprechenden Legierungselemente als Primärmaterial zugegeben. Hierdurch wird in der Kommissionierung die entsprechende Metalllegierung für jeden Verdüsungsprozess individuell zusammengestellt. Das Rohmaterial wird anschließend sukzessive in den Induktionsofen überführt. Der Induktionsofen ist innen mit einer brennfesten Masse ausgekleidet, die zu 85 % bis 90 % aus Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und zu 10 % bis 15 % aus Magnesiumoxid (MgO) besteht und ein Eigengewicht von

<sup>4</sup> Teile dieses Abschnitts wurden bereits vorab in [Ehms25] veröffentlicht.

125 kg bzw. 250 kg aufweist. Während die Öfen selbst mehrere Jahre eingesetzt werden können, muss die brennfeste Masse nach durchschnittlich 65 Schmelzprozessen ausgetauscht werden. Die Dauer des Schmelzens ist abhängig von der Form und den Eigenschaften des zu verarbeitenden Materials sowie von der Größe des Ofens und beträgt meist zwischen 30 min und 60 min. Der hierfür notwendige Bedarf an elektrischer Energie wird über Sensoren bestimmt.

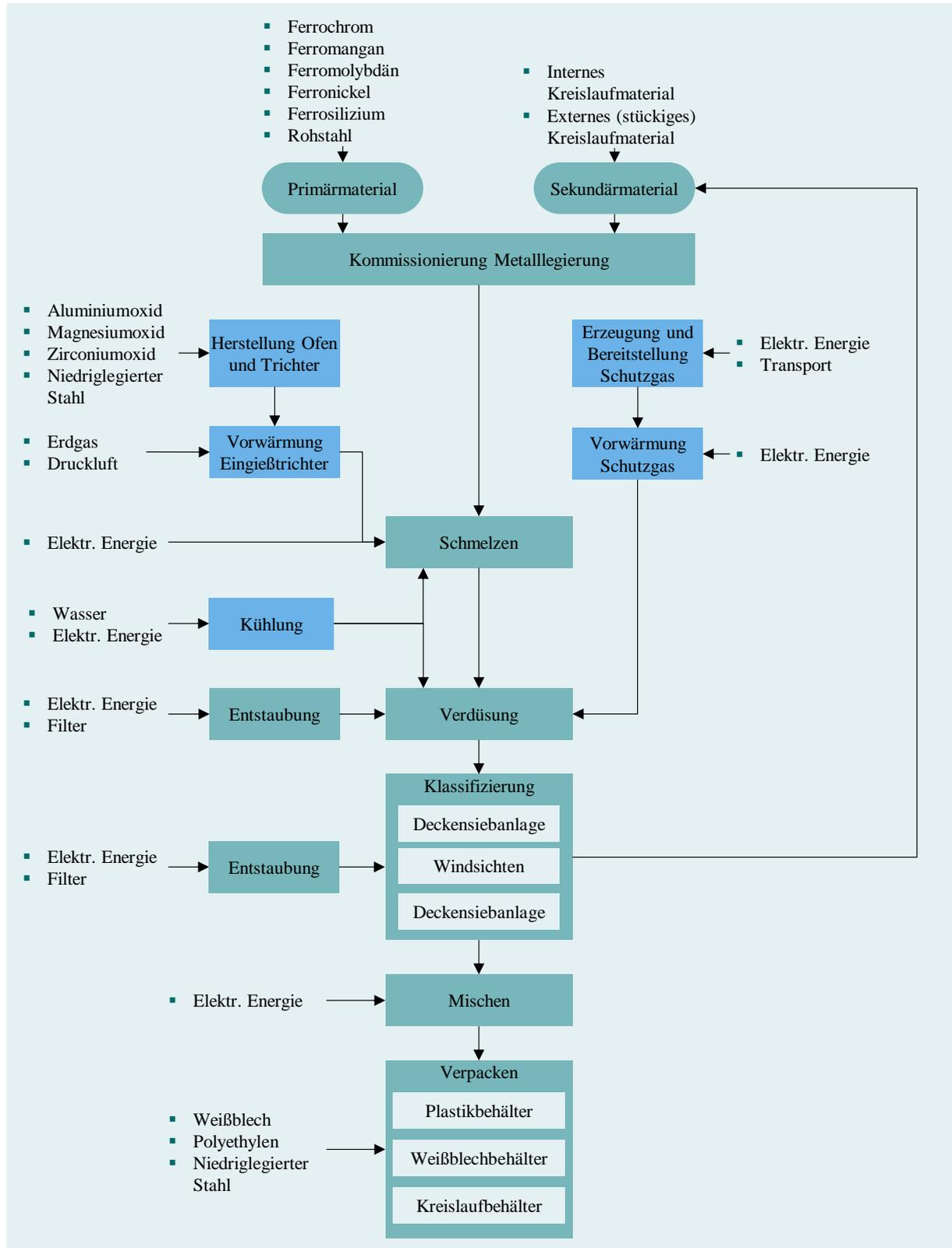


Abbildung 5-2: Prozesskette der Herstellung von Metallpulver durch Gasverdüsung

Anschließend wird die Schmelze über einen Trichter in die Verdüsungskammer überführt, der aus niedrig legiertem Stahl und einer Auskleidung mit der feuerfesten Masse besteht, die bei fünf bis 30 Verdüsungsprozessen eingesetzt werden kann. Um ein Aushärten der Schmelze bei Kontakt mit dem Trichter zu vermeiden und somit ein Verstopfen zu verhindern, wird der Trichter vor dem Einsatz erhitzt. Hierfür wird durch die Verbrennung von Erdgas mit Druckluft in einem Verbrennungsverhältnis von 1:11 eine Flamme erzeugt, wobei der Bedarf an Erdgas über Sensoren aufgenommen wird. Die Schmelze fällt anschließend durch eine Düse in die Zerstäubungskammer. Die Düse besteht aus Zirconiumoxid und wird aus Gründen der Prozesssicherheit nur einmalig verwendet. Die Düse und das feuerfeste Material werden am Ende ihrer Lebensdauer entsorgt oder recycelt. Die Anteile sind hierbei abhängig von der verfügbaren Menge, dem Verschmutzungsgrad des Materials und der Abtrennbarkeit von Schlacke.

In Abhängigkeit von der Düse sowie dem Abstand der Düsenöffnung zu den Schutzgasstrahlen wird zwischen einer Free-Fall-Verdüsung (FFA) und Closed-Coupled-Verdüsung (CCA) unterschieden. Aufgrund des geringeren Düsendurchmessers bei der CCA ist eine höhere Viskosität der Schmelze notwendig, die gemeinsam mit dem höheren Gasdruck aufgrund des kleineren Gasauslassventils zu feineren Pulverpartikeln führt. Um die geforderte Viskosität zu erreichen, ist eine höhere Temperatur der Schmelze notwendig. Zudem sind die Prozesse aufgrund der geringeren Durchflussrate länger als bei einer FFA, wobei während des Verdüsungsprozesses im Ofen die Temperatur aktiv aufrechterhalten wird, um ein Verfestigen der Schmelze zu verhindern.

Die Verdüsung erfolgt im hier analysierten Prozess durch Stickstoff. Der für die Stickstoffgewinnung notwendige Energiebedarf beträgt 549 kWh/t und wird vollständig zum Stickstoff allokiert [EIGA10]. Anschließend wird es im flüssigen Aggregatzustand per Lastkraftwagen (LKW) zum Produktionsort des Pulvers transportiert. Ein Liter flüssiger Stickstoff entspricht dabei ca. 800 l gasförmigem Stickstoff. Vor dem Einsatz des Schutzgases im Verdüsungsprozess wird der in flüssiger Form gelagerte Stickstoff durch einen Verdampfer ohne aktiven Energieeintrag zunächst auf Umgebungstemperatur erwärmt. Eine Verdüsung mit Schutzgas bei Umgebungstemperatur wird Kaltgasverdüsung genannt. Optional kann das Schutzgas vor dem Verdüsungsprozess weiter auf 300° C vorgewärmt werden. Bei einer solchen Heißgasverdüsung wird ca. ein Drittel weniger Schutzgas benötigt als bei einer Kaltgasverdüsung. Jedoch kann es zu einer Abweichung von diesem Verhältnis aufgrund des Schutzgasbedarfs zum Vor- und Nachspülen der Verdüsungskammer kommen. Der Bedarf an Stickstoff wird mittels Sensoren gemessen. Nach der Verdüsung wird der Stickstoff gefiltert, um Pulverrückstände zu entfernen und anschließend in die Umgebungsluft geleitet.

Das während der Verdüsung hergestellte Pulver wird durch einen Zyklon aus der Verdüsungskammer abgeschieden und gesammelt. Um die für die Anwendung geforderte PGV zu erzielen sowie Pulver für spezifische additive Fertigungsverfahren von Pulver für andere pulvermetallurgische Prozesse zu trennen, können zwei bis drei Siebprozesse erfolgen. Zunächst erfolgt eine initiale Klassifizierung entweder durch eine Eindecksiebanlage, wenn feines Pulver gewonnen werden soll, z. B. für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren und HS DED-LB, oder durch eine Doppeldecksiebanlage, wenn gröberes Pulver gewonnen werden soll, z. B. für andere DED-Prozesse. Die Decksiebanlagen haben jeweils einen Antriebsmotor mit einer Nennleistung von 1,5 kW sowie zwei Gebläse mit einer Leistungsaufnahme von je 1 kW. Der Durchsatz beträgt 400 kg/h, von dem massenanteilig ca. 45 % bis 55 % als Gutpulver deklariert

und somit weiterverarbeitet werden. Anschließend erfolgt das Windsichten, bei dem Pulverpartikel abgeschieden werden, die unterhalb der geförderten PGV liegen. Die Anlage hat eine Leistungsaufnahme von 16,5 kW und einen Durchsatz von 70 kg/h. Aus dem Prozess resultieren massenanteilig ca. 85 % bis 90 % Gutpulver, das anschließend in einer weiteren Decksieb-anlage nachgesiebt sowie in die gewünschten PGV für verschiedene Anwendungsfelder getrennt werden kann. Die Anlage hat eine Anschlussleistung von 1,5 kW und einen Durchsatz von 150 kg/h bis 200 kg/h. In diesem finalen Siebprozess resultiert ca. 95 % bis 96 % Gutpulver, das nachfolgend weiterverarbeitet wird. Über die Klassifizierungsprozesse hinweg erfolgt eine Entstaubung der Luft.

Um mehrere Chargen sowie das Pulver nach den Siebprozessen vollständig zu homogenisieren, erfolgt eine Mischung. Ein Mischprozess dauert bei einer durchschnittlichen Beladung mit 350 kg Pulver zwischen 30 min und 60 min, wobei eine Leistung von 13,3 kW bezogen wird.

Nach dem Mischen wird das Pulver verpackt. Hierfür stehen drei Alternativen, je nach Bestellmenge und Präferenz des Kunden, zur Verfügung. Zum einen kann die Verpackung in Kreislaufbehältern aus Edelstahl AISI 304 (Werkstoffnummer: 1.4301) mit einem Fassungsvermögen von 200 kg bis 300 kg erfolgen. Die Behälter werden zwischen Kunden und DEW stetig im Kreis geführt und nur bei Defekten entsorgt. Weiterhin ist die Verpackung des Pulvers in Kunststoffbehältern aus Polyethylen mit einer Füllmenge von ca. 5 kg möglich. Es kann auch eine Verpackung in Weißblechbehältern aus verzinktem Stahlblech mit einer Füllmenge von 20 kg bis 25 kg gewählt werden.

Die Kühlung der Induktionsöfen sowie der Verdüsungsanlagen erfolgt durch Trinkwasser mit Zusätzen wie bspw. Korrosionsschutz, das in mehreren Kreisläufen zirkulär geführt wird. Aufgrund von Verlusten durch Verdunstung ist ein regelmäßiges, aber geringfügiges Nachfüllen notwendig, dessen Menge über Sensoren aufgenommen wird. Das Kühlwasser wird durch Pumpen zu den Öfen, den Verdüsungskammern, sowie vom Wärmetauscher und zum Kühlturm gepumpt. Weitere Subsysteme mit Energiebedarf sind bspw. Ventile zur Stickstoffregelung sowie Sensoren zur Prozessparametererfassung.

Die partielle Ökobilanz des Herstellungsprozesses erfolgt basierend auf den entlang des beschriebenen Prozesses erhobenen Daten sowie auf Messwerten für sämtliche Energiebedarfe sowie den Stickstoff-, Wasser-, Erdgas- und sonstigen Materialbedarfen. Ausgenommen hiervon sind die Siebanlagen sowie der Mischer, deren Strombedarf annäherungsweise basierend auf der Leistungsaufnahme berechnet wird. Für die Erstellung der partiellen Ökobilanz wird die Software *Umberto LCA+* sowie die Datenbank *Ecoinvent 3.8* verwendet.

Beim bilanzierten Prozess wird ein austenitisches, nickelfreies Stahlpulver mit dem Markennamen „Medidur“ (Werkstoffnummer 4799.96) der DEW mittels FFA und CCA hergestellt. Für FFA wird je eine Ökobilanz für eine Heißgasverdüsung, d. h. der Stickstoff wird vor der Verdüsung erwärmt, und für eine Kaltgasverdüsung bei einer Schutzgastemperatur von ca. 20° C erstellt. Für die CCA ist der Düsendurchmesser geringer, was eine geringere Viskosität der Schmelze erfordert, weshalb die Abstichtemperatur höher als bei der FFA ist. Auch hier erfolgt die Erstellung einer Ökobilanz sowohl für eine Verdüsung mittels Heißgas und eine für eine Verdüsung mittels Kaltgas. Weiterhin wird eine Verpackung des gefertigten Pulvers in Kunststoffbehältern angenommen. Für die Verwendung von Argon anstelle von Stickstoff werden

unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichten der Gase der gleiche volumetrische Schutzgasbedarf sowie der gleiche Ertrag an Pulver für HS DED-LB-Prozesse angenommen.

Eine Übersicht der in der partiellen Ökobilanz berücksichtigten Prozesse und die jeweiligen Prozessparameter sowie Messwerte der eingegangenen Elementarflüsse ist in Tabelle 5-2 gegeben.

Tabelle 5-2: Analysierte Verdünnungsprozesse zur Pulverherstellung mit ihren Prozessparametern und Elementarflüssen

Schutzgas		CCA				FFA			
		N	N	Ar	Ar	N	N	Ar	Ar
Schutzgastemperatur	° C	300	20	300	20	300	20	300	20
Masse Rohpulver	kg	300	300	300	300	317	317	317	317
Ertrag	%	47	47	47	47	35	35	35	35
Verhältnis von Gas zu Schmelze		2,3	2,8	3,1	3,7	1,8	2,9	2,4	2,8
Energiebedarf Schmelzen	kWh	345,2	345,2	345,2	345,2	301,6	301,6	301,6	301,6
Energiebedarf Schutzgasvorwärmung	kWh	25,6	0,2	25,6	0,2	32,2	0,2	32,2	0,2
Energiebedarf Nebenaggregate	kWh	96,1	96,1	96,1	96,1	75,0	75,0	75,0	75,0
Energiebedarf Kühlwasserpumpe	kWh	48,5	48,5	48,5	48,5	37,7	37,7	37,7	37,7
Schutzgasbedarf	Nm <sup>3</sup>	650,3	817,9	650,3	817,9	672,4	997,0	672,4	997,0
	kg	812,9	1022,4	1083,8	1363,2	840,5	1246,2	1120,7	1661,7
Erdgasbedarf	Nm <sup>3</sup>	1,7	1,7	1,7	1,7	2,0	2,0	2,0	2,0

Somit ergibt sich für die Herstellung von 1 kg Pulver ein GWP zwischen 4,61 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg und 24,81 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg sowie ein KEA zwischen 77,94 MJ/kg und 602,2 MJ/kg. Aus der detaillierten Darstellung der Ergebnisse für das GWP in Tabelle 5-3 und für das KEA in Tabelle 5-4 geht hervor, dass das GWP und KEA einer CCA geringer sind als die einer FFA. Aufgrund des geringeren Düsendurchmessers dauert eine CCA zwar länger, jedoch wird hier ein größerer Anteil an feinem Pulver mit einem Partikeldurchmesser zwischen 10 µm und 53 µm, das bei einem HS DED-LB-Prozess eingesetzt werden kann, gewonnen. Der aus der längeren Prozessdauer resultierende höhere Energie- und Schutzgasbedarf wird somit bezogen auf die funktionelle Einheit durch den höheren Ertrag kompensiert.

Insbesondere der Bedarf an Schutzgas verursacht einen Großteil des GWP und des KEA in der Pulverherstellung. Eine Vorwärmung des Schutzgases auf 300° C benötigt zwar einen zusätzlichen Eintrag elektrischer Energie, jedoch wird hierdurch der Schutzgasbedarf reduziert, so dass bei einer Verdünnung mit Heißgas ein geringeres GWP und KEA resultiert als bei einer Verdünnung mit Kaltgas. Weiterhin ist die Gewinnung von Argon energieintensiver als die von Stickstoff, unter der Annahme, dass die Luftzerlegungseinheit gänzlich für die Argongewinnung betrieben wird, sodass durch die Nutzung von Argon ein größerer GWP und KEA entsteht als beim Einsatz von Stickstoff.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass das GWP und der KEA einiger Prozessbestandteile in Abhängigkeit von der gewählten Verdünnungsart konstant sind und somit zusammengefasst werden können. Dies umfasst die Prozessschritte der Herstellung des feuerfesten Materials für den Ofen und den Trichter, die Vorwärmung des Trichters, den Schmelzprozess, das Klassifizieren und

anschließende Mischen des Pulvers, das gesamte Kühlsystem sowie die zur Verdüsung notwendigen Nebenaggregate bspw. zur Prozessregelung und -überwachung. Dominierender Einfluss auf das GWP und den KEA ist der Schutzgasbedarf. Dieser variiert zum einen hinsichtlich der Quantität in Abhängigkeit von der Verdüsungsort sowie einer optionalen Vorwärmung und zum anderen hinsichtlich der Schutzgasart.

Tabelle 5-3: GWP-Ergebnis der partiellen Ökobilanz der FFA und CCA im Rahmen der industriellen Pulverproduktion

Schutzgas			CCA				FFA			
			N	N	Ar	Ar	N	N	Ar	Ar
Schutzgastemperatur		° C	300	20	300	20	300	20	300	20
Fixe Bestandteile	<i>C<sub>Pulver,fix</sub></i>									
Trichter und Ofen		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
Trichtervorwärmung		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Kühlsystem		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19
Schmelzen		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	1,40	1,40	1,40	1,40	1,55	1,55	1,55	1,55
Verdüsung		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Klassifizieren		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,33	0,33	0,33	0,33	0,43	0,43	0,43	0,43
Mischen		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bereitstellung Schutzgas	<i>C<sub>Pulver,Gas</sub></i>									
Bedarf		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	2,02	2,54	11,30	14,22	2,66	3,94	14,88	22,06
Schutzgas- vorwärmung		kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,10	0,00	0,10	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00
Verpackung	<i>C<sub>Pulver,Behälter</sub></i>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
<b>Gesamt</b>		<b>kg CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>4,61</b>	<b>5,03</b>	<b>13,89</b>	<b>16,71</b>	<b>5,58</b>	<b>6,69</b>	<b>17,80</b>	<b>24,81</b>

Tabelle 5-4: KEA-Ergebnis der partiellen Ökobilanz der FFA und CCA im Rahmen der industriellen Pulverproduktion

Schutzgas			CCA				FFA			
			N	N	Ar	Ar	N	N	Ar	Ar
Schutzgastemperatur		° C	300	20	300	20	300	20	300	20
Fixe Bestandteile	<i>f<sub>Pulver,fix</sub></i>									
Trichter und Ofen		MJ	0,62	0,62	0,62	0,62	0,79	0,79	0,79	0,79
Trichtervorwärmung		MJ	0,72	0,72	0,72	0,72	1,08	1,08	1,08	1,08
Kühlsystem		MJ	3,24	3,24	3,24	3,24	3,20	3,20	3,20	3,20
Schmelzen		MJ	23,04	23,04	23,04	23,04	25,61	25,61	25,61	25,61
Verdüsung		MJ	6,41	6,41	6,41	6,41	6,37	6,37	6,37	6,37
Klassifizieren		MJ	5,43	5,43	5,43	5,43	7,08	7,08	7,08	7,08
Mischen		MJ	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Bereitstellung Schutzgas	<i>f<sub>Pulver,Gas</sub></i>									
Bedarf		MJ	33,14	41,69	284,18	357,43	43,60	64,66	373,93	554,46
Schutzgas- vorwärmung		MJ	1,72	0,01	1,72	0,01	2,74	0,02	2,74	0,01
Verpackung	<i>f<sub>Pulver,Behälter</sub></i>	MJ	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
<b>Gesamt</b>		<b>MJ</b>	<b>77,94</b>	<b>84,78</b>	<b>328,99</b>	<b>400,53</b>	<b>94,09</b>	<b>112,43</b>	<b>424,42</b>	<b>602,20</b>

Um eine realitätsnahe Prognose des GWP und des KEA für das individuell bezogene Pulver zu ermöglichen, erfolgt eine Modularisierung der Ökobilanzergebnisse. Somit kann in der Anwendung, falls Informationen über den Herstellungsprozess des bezogenen Pulvers vorliegen, das

Modell entsprechend angepasst werden. Hierbei werden insbesondere diejenigen Teile modularisiert, die sich auf das resultierende Pulver auswirken, wie die Wahl des Verfahrens, ob FFA oder CCA, sowie ob eine Vorwärmung des Schutzgases durchgeführt wird und ob Stickstoff oder Argon als Verdüsungsgas eingesetzt wird. Zudem ist i. d. R. bekannt, in welcher Verpackung das Pulver angeliefert wird. Somit ergibt sich die grundlegende Formel 5-16 zur Berechnung des KEA der Pulverherstellung  $KEA_{Pulver}$  sowie die Formel 5-17 für die Berechnung des GWP der Pulverherstellung  $GWP_{Pulver}$ . Die Berechnung des KEA und des GWP erfolgt basierend auf der tatsächlich während des HS DED-LB-Prozess benötigten Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$ , deren Berechnung in Kapitel 5.1.1 ab Formel 5-3 erläutert ist. Die benötigte Pulvermenge wird anschließend mit den Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP der Verdüsung von 1 kg Pulver multipliziert. Der Primärenergiefaktor und das Treibhauspotenzial setzen sich dabei jeweils aus einem fixen Anteil, die von der Verdüsungsort abhängigen KEA  $f_{Pulver,fix}$  und GWP  $c_{Pulver,fix}$ , sowie einem Anteil zusammen, der vom gewählten Schutzgas und seiner Temperatur während der Verdüsung bestimmt wird,  $f_{Pulver,Gas}$  und  $c_{Pulver,Gas}$ . Dem resultierenden KEA und GWP aus der Verdüsung werden anschließend der KEA und das GWP der gewählten Verpackungsart  $KEA_{Pulver,Verpackung}$  und  $GWP_{Pulver,Verpackung}$  hinzuaddiert.

$$KEA_{Pulver} = M_{HS\ DED-LB, Pulver} \cdot (f_{Pulver,fix} + f_{Pulver,Gas}) + KEA_{Pulver,Verpackung} \quad 5-16$$

$$GWP_{Pulver} = M_{HS\ DED-LB, Pulver} \cdot (c_{Pulver,fix} + c_{Pulver,Gas}) + GWP_{Pulver,Verpackung} \quad 5-17$$

Zentral ist die Unterscheidung zwischen FFA und CCA. Der entsprechende Primärenergiefaktor  $f_{Pulver,fix}$  und das Treibhauspotenzial  $c_{Pulver,fix}$  umfassen die Prozessschritte der Herstellung des Ofens, der Düse und des Trichters sowie seine Vorwärmung, den Energiebedarf für den Schmelz-, Verdüngs-, Klassifizierungs- und Mischprozess sowie den Wasser- und Energiebedarf des Kühlsystems. In Abhängigkeit vom gewählten Verdüngsverfahren resultieren aufgrund der unterschiedlichen Prozessabläufe und Ausbringungsmengen unterschiedliche Werte für die Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP, die in Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 aufgeschlüsselt sind. Somit ergibt sich als Charakterisierungsfaktor für den KEA dieser Prozessschritte bei der FFA für  $f_{Pulver,fix,FFA}$  44,31 MJ/kg und bei der CCA  $f_{Pulver,fix,CCA}$  39,64 MJ/kg. Als Charakterisierungsfaktor für das GWP ergibt sich für die FFA für  $c_{Pulver,fix,FFA}$  2,65 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg und für die CCA  $c_{Pulver,fix,CCA}$  2,39 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Somit ergeben sich Formel 5-18 für den Primärenergiefaktor  $f_{Pulver,fix}$  und Formel 5-19 für das Treibhauspotenzial  $c_{Pulver,fix}$ . Die jeweiligen Charakterisierungsfaktoren für FFA und CCA sind ebenfalls in Anhang H in Tabelle 8-17 zusammengefasst.

$$f_{Pulver,fix} = \begin{cases} \text{wenn FFA, } f_{Pulver,fix,FFA} \\ \text{wenn CCA, } f_{Pulver,fix,CCA} \end{cases} \quad 5-18$$

$$c_{Pulver,fix} = \begin{cases} \text{wenn FFA, } c_{Pulver,fix,FFA} \\ \text{wenn CCA, } c_{Pulver,fix,CCA} \end{cases} \quad 5-19$$

Der Primärenergiefaktor  $f_{Pulver,Gas}$  und das Treibhauspotenzial  $c_{Pulver,Gas}$  der Schutzgasbereitstellung setzen sich aus den Teilen für die Vorwärmung und der für die Erzeugung des eingesetzten Schutzgases zusammen. Mögliche Schutzgase sind Argon und Stickstoff, deren Gewinnung aufgrund der verschiedenen Verfahren zu unterschiedlichen Umweltauswirkungen führen. Zudem ist eine Unterscheidung zwischen CCA und FFA notwendig, da aufgrund der unterschiedlichen Düsendurchmesser die Prozesszeiten variieren und so zu einem unterschiedlichen Schutzgasbedarf führen. Weiterhin wirkt sich eine mögliche Vorwärmung des Schutzgases

ebenfalls auf den Schutzgasbedarf aus, da durch eine Verdüsung mit Heißgas der Gasbedarf reduziert wird. Somit sind Fallunterscheidungen zwischen dem Verfahren FFA und CCA, zwischen einer Heißgas- und Kaltgasverdüsung sowie zwischen den möglichen Schutzgasen Argon und Stickstoff notwendig, wodurch jeweils acht Kombinationen mit individuellen Faktoren entstehen. Diese setzen sich aus den Primärenergiefaktoren und Treibhauspotenzialen des Schutzgasbedarfs und der Vorwärmung des Schutzgases zusammen. Für die Bestimmung des Primärenergiefaktors für die Schutzgasbereitstellung wird Formel 5-20 angewendet sowie analog für die Bestimmung des Treibhauspotenzials Formel 5-21. Die ermittelten Faktoren können Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 entnommen werden und sind zusätzlich in Anhang H in Tabelle 8-18 zusammengefasst.

$$f_{Pulver,Gas} = \begin{cases} \text{FFA mit vorgewärmtem Argon, } f_{Pulver,Gas,FFA,HG,Ar} \\ \text{FFA mit vorgewärmtem Stickstoff, } f_{Pulver,Gas,FFA,HG,N} \\ \text{FFA mit nicht vorgewärmtem Argon, } f_{Pulver,Gas,FFA,KG,Ar} \\ \text{FFA mit nicht vorgewärmtem Stickstoff, } f_{Pulver,Gas,FFA,KG,N} \\ \text{CCA mit vorgewärmtem Argon, } f_{Pulver,Gas,CCA,HG,Ar} \\ \text{CCA mit vorgewärmtem Stickstoff, } f_{Pulver,Gas,CCA,HG,N} \\ \text{CCA mit nicht vorgewärmtem Argon, } f_{Pulver,Gas,CCA,KG,Ar} \\ \text{CCA mit nicht vorgewärmtem Stickstoff, } f_{Pulver,Gas,CCA,KG,N} \end{cases} \quad 5-20$$

$$c_{Pulver,Gas} = \begin{cases} \text{FFA mit vorgewärmtem Argon, } c_{Pulver,Gas,FFA,HG,Ar} \\ \text{FFA mit vorgewärmtem Stickstoff, } c_{Pulver,Gas,FFA,HG,N} \\ \text{FFA mit nicht vorgewärmtem Argon, } c_{Pulver,Gas,FFA,KG,Ar} \\ \text{FFA mit nicht vorgewärmtem Stickstoff, } c_{Pulver,Gas,FFA,KG,N} \\ \text{CCA mit vorgewärmtem Argon, } c_{Pulver,Gas,CCA,HG,Ar} \\ \text{CCA mit vorgewärmtem Stickstoff, } c_{Pulver,Gas,CCA,HG,N} \\ \text{CCA mit nicht vorgewärmtem Argon, } c_{Pulver,Gas,CCA,KG,Ar} \\ \text{CCA mit nicht vorgewärmtem Stickstoff, } c_{Pulver,Gas,CCA,KG,N} \end{cases} \quad 5-21$$

Zum Verpacken des Pulvers stehen drei verschiedene Optionen zur Verfügung, die anhand der bestellten Pulvermenge festgelegt werden. Die Optionen bestehen aus unterschiedlichem Material und weisen daher unterschiedliche Umweltauswirkungen auf. Der entsprechende KEA und das GWP müssen dabei auf die während des HS DED-LB-Fertigungsprozesses benötigte Pulvermenge normiert werden. Hierfür werden die individuellen Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP der Verpackungsoptionen  $f_{Pulver,Behälter}$  und  $c_{Pulver,Behälter}$  anteilig durch die Relation der Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB,Pulver}$  zum Fassungsvermögen des Verpackungsbehälters  $M_{Pulver,Fassungsvermögen}$  bestimmt. Somit kann der KEA für die Behälter des Pulvers  $KEA_{Pulver,Verpackung}$  mittels Formel 5-22 und das GWP  $GWP_{Pulver,Verpackung}$  mittels Formel 5-23 berechnet werden. Das maximale Fassungsvermögen der Behälter ist in Formel 5-24 gegeben.

$$KEA_{Pulver,Verpackung} = f_{Pulver,Behälter} \cdot \frac{M_{HS\ DED-LB,Pulver}}{M_{Pulver,Fassungsvermögen}} \quad 5-22$$

$$GWP_{Pulver,Verpackung} = c_{Pulver,Behälter} \cdot \frac{M_{HS\ DED-LB,Pulver}}{M_{Pulver,Fassungsvermögen}} \quad 5-23$$

$$M_{Pulver,Fassungsvermögen} = \begin{cases} \text{wenn Kunststoff, } M_{Pulver,Fassungsvermögen,Kunststoff} = 5\ \text{kg} \\ \text{wenn Weißblech, } M_{Pulver,Fassungsvermögen,Weißblech} = 20\ \text{kg} \\ \text{wenn Edelstahlbehälter, } M_{Pulver,Fassungsvermögen,Fass} = 200\ \text{kg} \end{cases} \quad 5-24$$

Der Primärenergiefaktor  $f_{Pulver, Behälter}$  sowie das Treibhauspotenzial  $c_{Pulver, Behälter}$  der jeweiligen Behälter werden basierend auf der Fallunterscheidung in Formel 5-25 und Formel 5-26 bestimmt. Sollten die Behälterart oder die Bestellmenge nicht bekannt sein, so wird eine Verpackung im Weißblechbehälter angenommen, da dieser, bezogen auf den möglichen Inhalt, die größten Umweltauswirkungen aufweist, wodurch der konservativste Fall angenommen wird. Die aus den partiellen Ökobilanzen der Behälter resultierenden KEA und GWP sind in Anhang H in Tabelle 8-19 zusammengefasst und werden ebenfalls entsprechend der benötigten Pulvermenge anteilig zugerechnet.

$$f_{Pulver, Behälter} = \begin{cases} \text{wenn Kunststoffbehälter, } f_{Pulver, Behälter, Kunststoff} \\ \text{wenn Weißblechbehälter, } f_{Pulver, Behälter, Weißblech} \\ \text{wenn Edelstahlbehälter, } f_{Pulver, Behälter, Fass} \end{cases} \quad 5-25$$

$$c_{Pulver, Behälter} = \begin{cases} \text{wenn Kunststoffbehälter, } c_{Pulver, Behälter, Kunststoff} \\ \text{wenn Weißblechbehälter, } c_{Pulver, Behälter, Weißblech} \\ \text{wenn Edelstahlbehälter, } c_{Pulver, Behälter, Fass} \end{cases} \quad 5-26$$

Sind Prozessspezifika der Pulverherstellung unbekannt, so sollte der konservative Fall verwendet werden. Dies bedeutet die Annahme einer CCA mit nicht vorgewärmtem Argon als Verdüsungsgas mit einer Verpackung in Weißblechbehältern.

#### 5.1.4 Teilmodellentwicklung des HS DED-LB

Zur Prognose des Energiebedarfs von HS DED-LB-Prozessen wird das in Kapitel 4.1 erstellte Prognosemodell verwendet. Jedoch werden in einem HS DED-LB-Prozess neben elektrischer Energie auch Materialien eingesetzt.

Zur Vermeidung von Überhitzung der Lasereinheit werden die Laserstrahlquelle sowie die Laseroptik zur Fokussierung des Laserstrahls während der Fertigung kontinuierlich gekühlt. Dies geschieht durch einen integrierten Kühlkreislauf, der durch zwei Pumpen aufrechterhalten wird. Als Kühlmedium wird Wasser mit spezifischen Zusätzen verwendet. Das Kühlwasser wird zirkulär geführt und somit mehrfach wiederverwendet. Ein Auffüllen von bspw. durch Verdunstung verlorenem Wasser ist nur äußerst selten und in geringen Mengen notwendig. Daher wird das Kühlwasser in den nachfolgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt.

Zentraler Materialfluss ist das pulverförmige Metall aus Edelstahl 316L, aus dem das Bauteil gefertigt wird. Jedoch wird innerhalb eines Fertigungsprozesses mehr Pulver benötigt als schlussendlich im Bauteil gebunden wird. Ein Teil des nicht aufgetragenen Pulvers wird durch das Entstaubungssystem aus dem Bauraum entfernt und in einer Kassette gesammelt. Dieses Pulver kann aufbereitet und erneut eingesetzt werden, was jedoch nur teilweise praktiziert wird. Aufgrund der geringen Pulverauftragsrate von HS DED-LB-Prozessen ist von einem großen Effekt der Pulverwiederverwendung auf den KEA und das GWP auszugehen. Daher werden im Modell beide Optionen berücksichtigt, die je nach angestrebter Handhabung ausgewählt und angewandt werden können. Konsumiert, d. h. nicht mehrfach verwendet, werden Schutzgas, meist Argon, sowie Druckluft, da beide als gasförmigen Materialflüsse direkt in die Atmosphäre geleitet werden. Die zwei Schutzgasströme werden für den Pulvertransport vom Pulverförderer zur Auftragsdüse sowie zum Schutz der Laseroptik vor Verunreinigungen benötigt. Das hierfür benötigte Argon wird in Gasflaschen unter Druck gelagert. Die Druckluft wird dagegen extern erzeugt und über ein Druckluftnetz zum Fertigungssystem geleitet. Sie wird als Sperrluft am Dreh-Kipp-Tisch eingesetzt. Weiterhin wird eine Bauplatte benötigt, auf die das

Metallpulver initial aufgetragen wird. Die Bauplatte kann nach dem Ablösen des Bauteils optional wieder verwendet werden, im Bauteil verbleiben oder entsorgt werden. Eine Übersicht der Elementarflüsse innerhalb eines HS DED-LB-Prozesses ist in Abbildung 5-3 skizziert. Um den variablen Bedarf der Elementarflüsse des Prozesses im Prognosemodell abbilden zu können, wird für die Stoffflüsse zunächst ein individuelles Modell zur Berechnung des jeweiligen Bedarfs erstellt. Die prozessbedingten Bedarfe werden anschließend mit Primärenergiefaktoren und Treibhauspotenzialen aus Datenbanken verknüpft. So wird auch die Energieprognose in das Modell integriert.

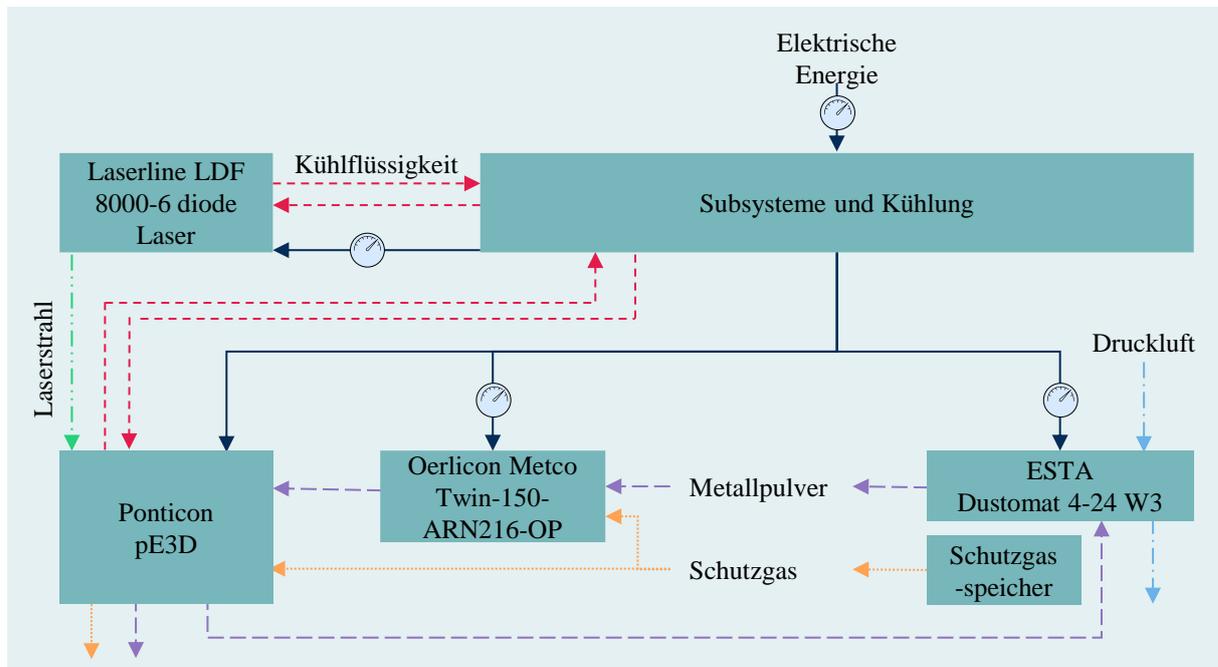


Abbildung 5-3: Übersicht der Elementarflüsse des untersuchten HS DED-LB-Prozesses

Somit ist der KEA von HS DED-LB die Summe der KEA der konsumierten Materialflüsse, die Argon als Schutzgas  $KEA_{HS\ DED-LB, Schutzgas}$ , Druckluft  $KEA_{HS\ DED-LB, Druckluft}$  sowie die Bauplatte  $KEA_{HS\ DED-LB, Bauplatte}$  umfassen, und der Energieflüsse der elektrischen Energie  $KEA_{HS\ DED-LB, el. Energie}$ . Die Berechnung folgt Formel 5-27. Der Rohmaterial- und Pulverbedarf sowie die daraus resultierenden GWP und KEA werden durch die Verknüpfung der Teilmodelle der vorherigen Kapitel berücksichtigt. Die Berechnung des GWP erfolgt analog zum KEA, wie in Formel 5-28 gezeigt.

$$KEA_{HS\ DED-LB} = KEA_{HS\ DED-LB, el.Energie} + KEA_{HS\ DED-LB, Schutzgas} + KEA_{HS\ DED-LB, Druckluft} + KEA_{HS\ DED-LB, Bauplatte} \quad 5-27$$

$$GWP_{HS\ DED-LB} = GWP_{HS\ DED-LB, el.Energie} + GWP_{HS\ DED-LB, Schutzgas} + GWP_{HS\ DED-LB, Druckluft} + GWP_{HS\ DED-LB, Bauplatte} \quad 5-28$$

Der Energiebedarf wird im Energiebedarfsprognosemodell bestimmt. Zur Ermittlung des aus dem Bedarf an elektrischer Energie resultierenden KEA wird der im Modell bestimmte Energiebedarf  $E_{HS\ DED-LB, total}$  mit dem Primärenergiefaktor für elektrische Energie  $f_{el}$  multipliziert, wie in Formel 5-29 gezeigt. Analog erfolgt die Ermittlung des resultierenden GWP mit dem Treibhauspotenzial  $c_{el}$  in Formel 5-30. Die Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP wurden basierend auf einer partiellen Ökobilanz des deutschen Strommixes im Jahr 2023

mit der Datenbank *Ecoinvent 3.8* ermittelt. Hierbei wurde für  $f_{el}$  7,23 MJ/kWh und für  $c_{el}$  bei 0,42 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh bestimmt [Stat24, Wern16].

$$KEA_{HS\ DED-LB,el.Energie} = E_{HS\ DED-LB,total} \cdot f_{el} \quad 5-29$$

$$GWP_{HS\ DED-LB,el.Energie} = E_{HS\ DED-LB,total} \cdot c_{el} \quad 5-30$$

Die zwei Schutzgasströme werden in den Prozessparametereinstellungen in Litern pro Minute definiert. Sie werden während des gesamten Pre-Steps und In-Steps konstant aufrechterhalten und mit Beginn des Post-Steps abgeschaltet. Es treten zwar beim Ein- und Ausschalten gewisse zeitliche Verzögerungen auf, bis sich beide Volumenströme homogen aufgebaut bzw. wieder vollständig abgebaut haben. Annäherungsweise kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich diese zwei Vorgänge gegenseitig ausgleichen, d. h. die Dauer zum Aufbauen der Schutzgasströme entspricht annäherungsweise der Dauer des Auflörens der Schutzgasströme. Daher werden die Zeitabschnitte hierfür jeweils vernachlässigt. Somit entspricht der Gesamtbedarf an Schutzgas innerhalb eines Prozesses  $V_G$  zunächst der Summe aus dem Schutzgasbedarf des Schutzgasstroms  $V_{G,S}$  sowie dem Bedarfs des Trägergasstroms  $V_{G,T}$ , wie in Formel 5-31 beschrieben. Der Bedarf der Volumenströme ergibt sich jeweils aus dem eingestellten Volumenstrom  $\dot{V}_{G,S}$  und  $\dot{V}_{G,T}$  über die zwei Prozessstufen, wie in Formel 5-32 für den Schutzgasstrom und Formel 5-33 für den Trägergasstrom beschrieben [Ehms23a].

$$V_G = V_{G,S} + V_{G,T} \quad 5-31$$

$$V_{G,S} = \dot{V}_{G,S} \cdot (T_{pre} + T_{in}) \quad 5-32$$

$$V_{G,T} = \dot{V}_{G,T} \cdot (T_{pre} + T_{in}) \quad 5-33$$

Der Charakterisierungsfaktor für den KEA von flüssigem Argon beträgt 34,24 MJ/kg [UBA21]. Argon besitzt bei 20° C eine Dichte von 1,784 kg/m<sup>3</sup>. Folglich kann der Primärenergiefaktor für Argon  $f_{Argon}$  entsprechend umgerechnet werden und beträgt 0,061 MJ/l. Somit ergibt sich für den KEA des Argonbedarfs beim HS DED-LB Formel 5-34.

$$KEA_{HS\ DED-LB,Schutzgas} = V_G \cdot f_{Argon} \quad 5-34$$

Die Ermittlung des Charakterisierungsfaktors des GWP für Argon  $c_{Argon}$  erfolgt analog und wurde mit Höhe von  $2,44 \cdot 10^{-3}$  kg CO<sub>2</sub>-Äq./l bestimmt [UBA21]. Somit ergibt sich Formel 5-35.

$$GWP_{HS\ DED-LB,Schutzgas} = V_G \cdot c_{Argon} \quad 5-35$$

Druckluft wird neben dem Einsatz als Sperrluft auch in weiteren Stellen im System verwendet. Zum einen wird es zur Reinigung des Filters im Entstaubungssystem eingesetzt, was i. d. R. bei Abschalten des Entstaubungssystems geschieht, bei langen Betriebszeiten aber auch zwischenzeitlich erfolgen kann. Weiterhin kann durch ein hydraulisches System der Pulvermassenstrom vor und während des Fertigungsprozesses in einen Behälter im Bauraum umgeleitet werden. Bei einem Wechsel der Bauplattform wird ebenfalls die Aufnahme der Laseroptik gewechselt. Dies bedarf für die Laserkopfaufnahme ebenfalls Druckluft. Für alle Anwendungen wird ein Druck von 6 bar benötigt. Da jedoch insbesondere die Filterreinigung sowie die Montage der Laseroptik i. d. R. selten durchgeführt werden und insbesondere der Pulverwechsel nur geringe Mengen an Druckluft erfordert, können diese Bedarfe vernachlässigt werden. Der einzige kontinuierliche Druckluftstrom, der während des gesamten Prozesses aufrechterhalten wird, ist die Sperrluft, die meist einen Volumenstrom  $\dot{V}_{HS\ DED-LB,Druckluft}$  zwischen 5 l/min bis 10 l/min,

maximal jedoch 20 l/min, beträgt. Der Druckluftbedarf  $V_{HS\ DED-LB, Druckluft}$  kann somit mit Formel 5-36 berechnet werden.

$$V_{HS\ DED-LB, Druckluft} = \dot{V}_{HS\ DED-LB, Druckluft} \cdot T_{total} \quad 5-36$$

Der Primärenergiefaktor  $f_{Druckluft}$  zur Erzeugung von 1 m<sup>3</sup> Druckluft beträgt 1,3 MJ/m<sup>3</sup> und das Treibhauspotenzial  $c_{Druckluft}$  beträgt 0,0753 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>3</sup> [UBA14]. Somit ergibt sich für die Berechnung des durch den Druckluftbedarfs verursachten KEA Formel 5-37 und für das GWP Formel 5-38.

$$KEA_{HS\ DED-LB, Druckluft} = V_{HS\ DED-LB, Druckluft} \cdot f_{Druckluft} \quad 5-37$$

$$GWP_{HS\ DED-LB, Druckluft} = V_{HS\ DED-LB, Druckluft} \cdot c_{Druckluft} \quad 5-38$$

Für einen HS DED-LB-Prozess wird eine Bauplatte benötigt, auf die die erste Lage des Metallpulvers aufgetragen wird. Je nach Bauteilgestaltung kann die Bauplatte nach dem HS DED-LB-Prozess Bestandteil des Bauteils sein. In diesem Fall werden die durch den Materialbedarf für die Bauplattform resultierenden KEA und GWP im Modell berücksichtigt. Der KEA und das GWP für die Bauplatte wird annäherungsweise durch das Produkt der Masse der Bauplatte  $m_{Bauplatte}$  mit den Charakterisierungsfaktoren für den KEA  $f_{Bauplatte}$  und das GWP  $c_{Bauplatte}$  berechnet, die abhängig vom gewählten Material sind. Sollte die verwendete Bauplatte ebenfalls aus dem Material 316L bestehen, so können Ergebnisse aus der Berechnung des KEA und des GWP der Rohstoffgewinnung aus Kapitel 5.1.2 übertragen werden. Wird das Bauteil in der Nachbearbeitung von der Bauplatte gelöst, so kann diese wiederverwendet werden, sodass der KEA und das GWP in diesem Fall vernachlässigt werden können. Somit ergibt sich für die Berechnung des KEA und des GWP der Bauplatte Formel 5-39 für den  $KEA_{HS\ DED-LB, Bauplatte}$  und Formel 5-40 für das  $GWP_{HS\ DED-LB, Bauplatte}$ .

$$KEA_{HS\ DED-LB, Bauplatte} = \begin{cases} \text{wenn Bauplatte nicht wiederverwendet, } m_{Bauplatte} \cdot f_{Bauplatte} \\ \text{wenn Bauplatte wiederverwendet, } 0 \end{cases} \quad 5-39$$

$$GWP_{HS\ DED-LB, Bauplatte} = \begin{cases} \text{wenn Bauplatte nicht wiederverwendet, } m_{Bauplatte} \cdot c_{Bauplatte} \\ \text{wenn Bauplatte wiederverwendet, } 0 \end{cases} \quad 5-40$$

### 5.1.5 Teilmodellentwicklung der Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung ist individuell für jedes Bauteil und abhängig von den jeweiligen Anforderungen. Für DED häufig angewendete Verfahren sind zunächst das Reinigen mit Druckluft sowie in einem Ultraschallbad, die thermische Nachbearbeitung bspw. durch das heißisostatische Pressen (HIP), das Ablösen des Bauteils von der Bauplatte durch Drahterosion sowie die Verbesserung der geometrischen Genauigkeit und der Oberflächengüte, die meist durch eine Fräsbearbeitung des Bauteils erreicht wird. Die Summe des KEA und des GWP aller Nachbearbeitungsprozesse hinweg bildet den gesamten KEA und das GWP der Nachbearbeitung  $KEA_{Nachbearbeitung}$  und  $GWP_{Nachbearbeitung}$ , wie in Formel 5-41 und Formel 5-42 beschrieben. Jedoch müssen nicht alle Nachbearbeitungsverfahren zwingend angewendet werden und weitere, hier nicht aufgeführte Verfahren können ergänzt werden.

$$KEA_{Nachbearbeitung} = KEA_{NB,Druckluft} + KEA_{NB,Ultra} + KEA_{NB,HIP} + KEA_{NB,Draht} + KEA_{NB,Fräs} \quad 5-41$$

$$GWP_{Nachbearbeitung} = GWP_{NB,Druckluft} + GWP_{NB,Ultra} + GWP_{NB,HIP} + GWP_{NB,Draht} + GWP_{NB,Fräs} \quad 5-42$$

Die initiale Reinigung mit Druckluft kann bei verschiedenen Druckniveaus und Luftströmen sowie in unterschiedlicher Dauer erfolgen. Aufgrund variierender Inputströme und dem daraus resultierenden Energiebedarf, divergieren die resultierenden  $KEA_{NB,Druckluft}$  und  $GWP_{NB,Druckluft}$  der Druckluftherzeugung. Für die Druckluftherzeugung kann als Charakterisierungsfaktor für den  $KEA_{f_{Druckluft}}$  1,3 MJ/m<sup>3</sup> und für das  $GWP_{c_{Druckluft}}$  0,0753 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>3</sup> herangezogen werden [UBA14]. Alternativ können basierend auf Datenbankwerten wie bspw. *Ecoinvent* detailliertere Faktoren basierend auf dem bezogenen Druckniveau und der Erzeugungseffizienz bestimmt werden.

Der individuelle  $KEA_{NB,Druckluft}$  und  $GWP_{NB,Druckluft}$  kann somit annäherungsweise durch Formel 5-43 und Formel 5-44 berechnet werden, indem die Faktoren  $f_{Druckluft}$  und  $c_{Druckluft}$  mit dem jeweiligen Luftstrom  $\dot{V}_{NB,Druckluft}$  und der Dauer des Luftstroms  $t_{Luftstrom}$ , d.h. der benötigten Druckluftmenge  $V_{NB,Druckluft}$ , deren Berechnung in Formel 5-45 gezeigt ist, multipliziert werden.

$$KEA_{NB,Druckluft} = f_{Druckluft} \cdot V_{NB,Druckluft} \quad 5-43$$

$$GWP_{NB,Druckluft} = c_{Druckluft} \cdot V_{NB,Druckluft} \quad 5-44$$

$$V_{Druckluft} = \dot{V}_{NB,Druckluft} \cdot t_{Luftstrom} \quad 5-45$$

Für die Reinigung des Bauteils durch ein Ultraschallbad wird basierend auf den analysierten Studien in Kapitel 2.3.5 ein durchschnittlicher spezifischer Energiebedarf  $SEC_{Ultra}$  von 0,39 kW, bezogen auf die Betriebsdauer  $T_{Ultra}$  angenommen. Somit kann der Energiebedarf für die Ultraschallreinigung  $E_{Ultra}$  durch Formel 5-46 berechnet werden. Daneben kann zudem zur individuellen Anpassung die Anschlussleistung des Ultraschallreinigungsgeräts  $P_{Ultra,nenn}$  herangezogen werden. Falls diese Variante gewählt wird, so ergibt sich zur Berechnung des Energiebedarfs  $E_{Ultra,individuell}$  Formel 5-47.

$$E_{Ultra} = SEC_{Ultra} \cdot T_{Ultra} = 0,39 \text{ kW} \cdot t_{Ultra} \quad 5-46$$

$$E_{Ultra,individuell} = P_{Ultra,nenn} \cdot T_{Ultra} \quad 5-47$$

Folglich ergibt sich für die Modellierung des KEA sowie des GWP der Ultraschallreinigung Formel 5-48 und Formel 5-49, wobei der Energiebedarf der Ultraschallreinigung mit den spezifischen KEA- und GWP-Faktoren als Charakterisierungsfaktor  $f_{el}$  und  $c_{el}$  multipliziert wird.

$$KEA_{NB,Ultra} = E_{Ultra} \cdot f_{el} \quad 5-48$$

$$GWP_{NB,Ultra} = E_{Ultra} \cdot c_{el} \quad 5-49$$

Für die Wärmebehandlung kann in Abhängigkeit vom gewünschten Detaillierungsgrad und den verfügbaren Informationen basierend auf dem Stand der Technik für das HIP der spezifische Energiebedarf  $SEC_{HIP}$  von 33,89 kWh/kg relativ zum Bauteilgewicht  $m_{HIP,Bauteil}$  angenommen werden [Laur17]. Die bauteilindividuelle Berechnung des  $KEA_{NB,HIP}$  sowie des  $GWP_{NB,HIP}$  erfolgt darauf basierend nach Formel 5-50 und Formel 5-51.

$$KEA_{NB,HIP} = SEC_{HIP} \cdot f_{el} \cdot m_{Bauteil} = 33,89 \frac{kWh}{kg} \cdot f_{el} \cdot m_{HIP,Bauteil} \quad 5-50$$

$$GWP_{NB,HIP} = SEC_{HIP} \cdot c_{el} \cdot m_{Bauteil} = 33,89 \frac{kWh}{kg} \cdot c_{el} \cdot m_{HIP,Bauteil} \quad 5-51$$

Falls die Leistungsaufnahme  $P_{HIP}$  sowie die Prozessdauer des HIP  $T_{HIP}$  bekannt sind, kann das Modell individuell angepasst werden. Somit ergibt sich für den bauteilindividuellen Energiebedarf  $E_{HIP,individuell}$  Formel 5-52, woraus sich für den  $KEA_{HIP,individuell}$  und  $GWP_{HIP,individuell}$  Formel 5-53 und Formel 5-54 ergeben.

$$E_{HIP,individuell} = P_{HIP} \cdot T_{HIP} \quad 5-52$$

$$KEA_{NB,HIP,individuell} = E_{HIP,individuell} \cdot f_{el} \quad 5-53$$

$$GWP_{NB,HIP,individuell} = E_{HIP,individuell} \cdot c_{el} \quad 5-54$$

Eine partielle Ökobilanz des Prozesses der Drahterosion basierend auf den quantifizierten Elementarflüssen von KELLENS ergibt für das Schruppen ein Charakterisierungsfaktor für das GWP  $c_{Draht,Schruppen}$  von 3,31 kg CO<sub>2</sub>-Äq./h Bearbeitungszeit sowie ein Charakterisierungsfaktor für den KEA  $f_{Draht,Schruppen}$  von 54,93 MJ/h. Für das Schlichten ergeben sich analog für das GWP  $c_{Draht,Schlichten}$  von 2,35 kg CO<sub>2</sub>-Äq./h sowie für den KEA  $f_{Draht,Schlichten}$  von 39,19 MJ/h [Wern16, Kell13]. Somit können der KEA sowie das GWP für das Schruppen  $KEA_{NB,Draht,Schruppen}$  und  $GWP_{NB,Draht,Schruppen}$  basierend auf der notwendigen Bearbeitungszeit für die Schrubbearbeitung des Bauteils  $T_{Draht,Schruppen}$ , wie in Formel 5-55 und Formel 5-56 gezeigt, berechnet werden. Analog erfolgt die Berechnung des KEA und des GWP für das Schlichten  $KEA_{NB,Draht,Schlichten}$  und  $GWP_{NB,Draht,Schlichten}$  in Abhängigkeit von der Bearbeitungszeit  $T_{Draht,Schlichten}$ , wie in Formel 5-57 und Formel 5-58 angegeben.

$$KEA_{NB,Draht,Schruppen} = f_{Draht,Schruppen} \cdot T_{Draht,Schruppen} \quad 5-55$$

$$GWP_{NB,Draht,Schruppen} = c_{Draht,Schruppen} \cdot T_{Draht,Schruppen} \quad 5-56$$

$$KEA_{NB,Draht,Schlichten} = f_{Draht,Schlichten} \cdot T_{Draht,Schlichten} \quad 5-57$$

$$GWP_{NB,Draht,Schlichten} = c_{Draht,Schlichten} \cdot T_{Draht,Schlichten} \quad 5-58$$

Für das Fräsen werden die Umweltauswirkungen maßgeblich durch den Energiebedarf bestimmt, der individuell von den Prozessparametern und dem zu bearbeitenden Material abhängt. Sind die aufgenommene Leistung der Fräsanlage  $P_{Fräsen}$  sowie die Prozessdauer  $T_{Fräsen}$  bekannt, so kann die Berechnung des Energiebedarfs  $E_{Fräsen,individuell}$  anhand Formel 5-59 erfolgen. Sind diese unbekannt, kann der Energiebedarf  $E_{Fräsen}$ , wie von KARA und LI beschrieben, über die Materialabtragsrate  $MRR$  mit Formel 5-60 angenähert werden [Kara11]. Entsprechende Werte für die Faktoren  $C_0$  und  $C_1$  sind in Kapitel 2.5.4 in Tabelle 2-10 zusammengefasst.

$$E_{Fräsen,individuell} = P_{Fräsen} \cdot t_{Fräsen} \quad 5-59$$

$$E_{Fräsen} = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad 5-60$$

Zur Berechnung des davon abhängigen KEA und GWP des Fräsens  $KEA_{NB,Fräsen}$  und  $GWP_{NB,Fräsen}$  wird der Energiebedarf jeweils mit dem entsprechenden Faktor multipliziert, wie in Formel 5-61 und Formel 5-62 gezeigt. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen hat zwar eine Auswirkung

auf den Energiebedarf, der Bedarf an Kühlschmierstoff wird an dieser Stelle jedoch vernachlässigt, da der Kühlschmierstoffverbrauch pro Bauteil aufgrund der Wiederverwendung nach Aufbereitung i. d. R. sehr gering ist [Link17].

$$KEA_{NB,Fräsen} = E_{Fräsen} \cdot f_{el} \quad 5-61$$

$$GWP_{NB,Fräsen} = E_{Fräsen} \cdot c_{el} \quad 5-62$$

### 5.1.6 Teilmodellentwicklung des Transports

Zwischen den beschriebenen Prozessschritten kann ein Transport des Rohmaterials, des Pulvers sowie des additiv gefertigten Bauteils erfolgen, dessen KEA und GWP im Modell berücksichtigt wird. Die jeweiligen Transportstrecken sind individuell für jeden Prozesskettenabschnitt und können sich aus mehreren Transportmitteln zusammensetzen. Üblich sind Transporte per Zug, LKW, Flugzeug sowie Schiff, die in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen können und zu unterschiedlichen Charakterisierungsfaktoren für den KEA  $f_{Transportmittel}$  und das GWP  $c_{Transportmittel}$  führen. Neben dem Transportmittel sind der KEA und das GWP auch von der Transportstrecke  $s_{Transport}$  sowie der transportierten Masse  $m_{Transportgut}$  abhängig. Der KEA und das GWP der einzelnen Transportprozesse  $l$  werden aufsummiert und ergeben somit den jeweiligen gesamten KEA  $KEA_{Transport}$  und GWP  $GWP_{Transport}$ , wie in Formel 5-63 und Formel 5-64 gezeigt.

$$KEA_{Transport} = \sum_l^L m_{Transportgut} \cdot s_{Transport} \cdot f_{Transportmittel} \quad 5-63$$

$$GWP_{Transport} = \sum_l^L m_{Transportgut} \cdot s_{Transport} \cdot c_{Transportmittel} \quad 5-64$$

Zur Ermittlung der jeweiligen Masse müssen mögliche Materialverluste innerhalb der jeweiligen Prozessschritte berücksichtigt werden. So kann bspw. eine größere Dimensionierung des additiv gefertigten Bauteils notwendig sein, damit ein entsprechender Materialabtrag bei einer spanenden Oberflächennachbearbeitung möglich ist. Diese mögliche Materialzugabe ist individuell für jedes Bauteil und abhängig von den an das Bauteil gestellten Anforderungen und den dadurch notwendigen Nachbearbeitungsschritten. Die Masse des mittels HS DED-LB gefertigten Bauteils kann über das Volumen der CAD-Zeichnung berechnet oder, falls das Bauteil bereits besteht, durch Wiegen ermittelt werden. Die für den HS DED-LB-Prozess notwendige Pulvermenge  $M_{HS\ DED-LB, Pulver}$  ist abhängig vom Fertigungsprozess sowie davon, ob das Pulver wiederverwendet wird. Die Berechnung des benötigten Pulvers ist in Formel 5-3 bis Formel 5-9 in Kapitel 5.1.1 beschrieben. Die Charakterisierungsfaktoren der Transportmittel  $f_{Transportmittel}$  und  $c_{Transportmittel}$  je Tonnenkilometer basierend auf Datenbankenwerten, sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst.

Tabelle 5-5: Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP für verschiedene Transportmittel

Transportmittel	$f_{\text{Transportmittel}}$ MJ/tkm	$c_{\text{Transportmittel}}$ kg CO <sub>2</sub> -Äq./tkm	Quelle
LKW	0,691	0,053	[UBA20a]
Binnenschiff	0,325	0,025	[UBA20b]
Übersee – Containerschiff	0,155	0,012	[UBA20c]
Güterzug – Diesellok	0,439	0,034	[UBA20d]
Güterzug – Elektrolok	0,253	0,019	[UBA20e]
Luftfracht – International	9,300	0,709	[UBA20f]

## 5.2 Beispielhafte Anwendung des Prognosemodells

Zum besseren Verständnis sowie zur Überprüfung der Anforderungserfüllung wird das zuvor entwickelte Modell zur Prognose des KEA und des GWP an drei mittels HS DED-LB gefertigten Bauteilen beispielhaft angewendet.

### 5.2.1 Fallbeispiele

Zur beispielhaften Anwendung des in Kapitel 5.1 erstellten Modells zur Prognose des GWP und des KEA wird auf die Validierungsbauteile aus Kapitel 4.1.6 zurückgegriffen. Um mögliche Ansatzpunkte zur Reduktion der Umweltauswirkungen zu identifizieren, wurden die jeweiligen Prozessketten der Bauteile unterschiedlich gestaltet und somit verschiedene Ausprägungsformen angenommen. Ziel ist es daher, die unterschiedlichen Randbedingungen zu untersuchen und die Prozessketten zu vergleichen. Die jeweiligen Prozessketten der Bauteile sowie der modellierte Energiebedarf sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Mit Ausnahme des Rohstahls wird für alle Bauteile der ausschließliche Einsatz von Primärmaterial angenommen.

Das leichteste Bauteil ist mit 4,69 g der Quader, gefolgt vom Logo mit 31,41 g. Der Zylinder ist mit 59,43 g das schwerste Bauteil. Zentrale Größe für das KEA- und GWP-Prognosemodell ist die benötigte Pulver- und Rohstoffmenge. Basierend auf der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe des Pulverförderers kann mittels Formel 5-4 der jeweilige Pulvermassenstrom berechnet werden. Für den Quader und das Logo wurden Pulvermassenströme von ca. 35 g/min und für den Zylinder von ca. 21 g/min verwendet. Darauf basierend wird die während des Prozesses genutzte Pulvermenge über die Prozesszeit berechnet, wobei eine mögliche Wiederverwendung des Pulvers berücksichtigt wird. Die Ermittlung der Prozesszeit erfolgt anhand des in Kapitel 4.1.5.1 erläuterten Berechnungsmodells.

Für den Quader und für den Zylinder wird angenommen, dass nicht aufgetragenes Pulver nicht wieder verwendet wird. Somit entspricht die für den Prozess benötigte Pulvermenge der während des Prozesses geförderten Pulvermenge, die anhand von Formel 5-3 und Formel 5-9 berechnet wird. Dies resultiert in einem Pulverbedarf von 120,84 g für den Quader und von 92,76 g für den Zylinder. Beim Logo werden eine Rückgewinnung und Wiederverwendung von 85 % des nicht aufgetragenen Pulvers angenommen. Zunächst werden anhand von Formel 5-6, Formel 5-7 und Formel 5-8 die Pulververluste berechnet. Mit einer modellierten Laseranzahl  $T_{L,an}$  von 73,89 s sowie der Dauer des Pre-Steps  $T_{pre}$  von 15 s und des modellierten In-Steps  $T_{in}$  von 369,82 s ergibt sich für das Logo ein Pulverbedarf von 61,01 g. Ohne eine Wiederverwendung des nicht aufgetragenen Pulvers würde der Pulverbedarf bei 234,69 g liegen.

Tabelle 5-6: Prozessparameter und Annahmen der Fallbeispiele

		Quader	Logo	Zylinder
<b>Bauteilcharakteristika</b>				
Gewicht	$m_{HS\ DED-LB, Bauteil}$	4,69 g	31,41 g	59,43 g
<b>Rohmaterial</b>				
Anteil Silizium	$W_{Legierung, b}$		1,0 %	1,0 %
Anteil Mangan	$W_{Legierung, b}$		1,0 %	1,0 %
Anteil Chrom	$W_{Legierung, b}$	16,5 %	17,0 %	17,0 %
Anteil Molybdän	$W_{Legierung, b}$	2,0 %	2,5 %	2,0 %
Anteil Nickel	$W_{Legierung, b}$	10,0 %	13,0 %	13,0 %
<b>Pulverherstellung</b>				
Prozess		CCA	FFA	FFA
Verdüsungsgas		Stickstoff	Argon	Stickstoff
Gastemperatur		300° C	300° C	20° C
Verpackung		Kunststoff	Kreislaufbehälter	Unbekannt
<b>HS DED-LB</b>				
Modellierte Prozessdauer	$T_{total}$	207,00 s	394,82 s	264,80 s
Drehzahl Förderscheibe	$n_F$	5,5 U/min	5,6 U/min	3,3 U/min
Geförderte Pulvermenge		114,21 g	60,37 g	87,43 g
Modellierter Energiebedarf	$E_{HS\ DED-LB, total}$	608,82 Wh	917,97 Wh	713,82 Wh
Wiederverwendung von Pulver	$M_{HS\ DED-LB, Pulver}$	nein	ja	nein
Trägergasvolumenstrom	$\dot{V}_{G, T}$	8 l/min	8 l/min	8 l/min
Schutzgasvolumenstrom	$\dot{V}_{G, S}$	14 l/min	14 l/min	14 l/min
Druckluftvolumenstrom	$\dot{V}_{HS\ DED-LB, Druckluft}$	10 l/min	5 l/min	20 l/min
Wiederverwendung Bauplatte		ja	nein	ja
<b>Nachbearbeitung</b>				
Reinigung mit Druckluft				
Dauer	$t_{Luftstrom}$	10 s	60 s	30 s
Luftvolumenstrom	$\dot{V}_{NB, Druckluft}$	180 l/min	100 l/min	150 l/min
Ultraschallreinigung				
Dauer	$T_{Ultra}$	5 min	15 min	10 min
Leistungsaufnahme	$P_{Ultra, nenn}$	unbekannt	1780 W	2500 W
Hot Isostatic Pressing		ja		
Dauer	$T_{HIP}$	unbekannt		
Leistungsaufnahme	$P_{HIP}$	unbekannt		
Drahterodieren		ja		ja
Dauer	$T_{Draht}$	3,8 min		17,8 min
Modus		Schruppen		Schichten
Fräsen		ja		
Dauer	$T_{Fräsen}$	1 min		
Leistungsaufnahme	$P_{Fräsen}$	44 kW		
<b>Transport</b>				
Rohmaterial zur Pulverherstellung				
Abschnitt 1				
Transportmittel		Überseeschiff		Überseeschiff
Transportstrecke	$S_{Transport}$	9.000 km		14.500 km
Abschnitt 2				
Transportmittel		Zug (Diesellok)		Binnenschiff
Transportstrecke	$S_{Transport}$	200 km		800 km
Pulver zur Bauteilherstellung				
Transportmittel		LKW	Luftfracht	LKW
Transportstrecke	$S_{Transport}$	300 km	2.200 km	300 km

### 5.2.2 Anwendung des Teilmodells der Rohstoffgewinnung

Unter der hier getroffenen Annahme, dass der Bedarf an Pulver dem Rohstoffbedarf entspricht, d. h. dass keine Materialverluste während der Pulverherstellung auftreten, erfolgt die Ermittlung des KEA und des GWP der Rohmaterialherstellung. Hierfür werden zunächst für die Bauteile anhand von Formel 5-14 der jeweilige Bedarf der Legierungselemente sowie anhand von Formel 5-15 der Bedarf an Rohstahl quantifiziert. Die jeweiligen Massen werden anschließend mit den jeweiligen Charakterisierungsfaktoren multipliziert und der KEA und das GWP des Stranggießens einbezogen, wie in Formel 5-10 für den KEA und in Formel 5-11 für das GWP gezeigt. Hieraus ergeben sich der KEA und das GWP für das benötigte Rohmaterial.

Für den verwendeten Edelstahl des Quaders wird angenommen, dass jeweils die minimalen Massenanteile der Legierungselemente zulegiert werden. Gemeinsam mit dem größten Materialbedarf der drei betrachteten Bauteile ergibt sich daraus ein KEA in Höhe von 10,84 MJ und ein GWP in Höhe von 0,70 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Für den verwendeten Edelstahl des Zylinders wurden die maximalen Massenanteile der Legierungselemente angenommen. Der daraus resultierende KEA beträgt 9,84 MJ und das GWP 0,64 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Das Logo weist aufgrund der angenommenen Wiederverwendung des nicht aufgetragenen Pulvers den niedrigsten Materialbedarf der betrachteten Bauteile auf. Gemeinsam mit den gewählten Massenanteilen der Legierungselemente führt dies mit einem KEA von 6,46 MJ und einem GWP von 0,42 kg CO<sub>2</sub>-Äq. zu den geringsten Umweltauswirkungen. Die Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP der Rohmaterialherstellung sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP der Rohmaterialherstellung der Fallbeispiele

	Quader		Logo		Zylinder	
	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Chrom	3,35	0,20	1,74	0,10	2,65	0,16
Nickel	6,23	0,40	4,09	0,27	6,22	0,40
Molybdän	0,56	0,03	0,28	0,02	0,43	0,03
Mangan	0,00	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00
Silizium	0,00	0,00	0,09	0,01	0,14	0,01
Primärrohstahl	0,60	0,06	0,20	0,02	0,31	0,03
Sekundärrohstahl	0,09	0,01	0,03	0,00	0,04	0,01
Strangguss	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>Summe</b>	<b>10,84</b>	<b>0,70</b>	<b>6,46</b>	<b>0,42</b>	<b>9,84</b>	<b>0,64</b>

### 5.2.3 Anwendung des Teilmodells der Pulverherstellung

Die Berechnung des KEA und des GWP für die Pulverherstellung erfolgt basierend auf Formel 5-16 und Formel 5-17. Der Primärenergiefaktor und das Treibhauspotenzial setzen sich hierbei aus mehreren Bestandteilen zusammen.

Hauptbestandteil ist jeweils der fixe Anteil, der den Schmelzprozess, die Nebenaggregate des Verdünnungsprozesses sowie die vor- und nachgelagerten Prozessschritte umfasst. Er wird maßgeblich durch die gewählte Prozessart bestimmt. Die hierfür notwendige Fallunterscheidung erfolgt anhand von Formel 5-18 und Formel 5-19. Somit entstehen für das mittels CCA-Verdünnung hergestellte Pulver, wie es für den Quader angenommen wird, ein Primärenergiefaktor von 39,64 MJ/kg und ein Treibhauspotenzial von 2,39 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Für die Herstellung des

Pulvers für den Zylinder und das Logo werden FFA-Verdünungen angenommen, sodass für beide Bauteile der Primärenergiefaktor  $f_{Pulver,fix}$  44,31 MJ/kg und das Treibhauspotenzial  $c_{Pulver,fix}$  2,65 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg für den fixen Anteil betragen.

Daneben werden der KEA und das GWP des Verdünnungsprozesses ebenfalls durch die Wahl und den Bedarf an Schutzgas sowie durch die Festlegung, ob eine Vorwärmung des Schutzgases erfolgt, maßgeblich beeinflusst. Die Berechnung der daraus resultierenden Faktoren erfolgt basierend auf der Fallunterscheidung anhand von Formel 5-20 für den KEA und Formel 5-21 für das GWP. Argon weist im Vergleich zu Stickstoff etwa den sechsfachen KEA und GWP auf. Somit entstehen durch den Einsatz und die Vorwärmung von Argon im FFA-Prozess, wie für das Logo angenommen, ein KEA von 22,98 MJ und ein GWP von 0,92 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Für den Quader und den Zylinder wird dagegen die Verwendung von Stickstoff in der Pulverherstellung angenommen. Für den Quader wird eine Vorwärmung des Stickstoffs angenommen, sodass ein KEA von 4,21 MJ und ein GWP von 0,26 kg CO<sub>2</sub>-Äq. bestimmt werden. Das Pulver für den Zylinder wird unter Annahme einer Kaltgasverdünnung hergestellt, wodurch ein KEA von 6,00 MJ und ein GWP von 0,37 kg CO<sub>2</sub>-Äq. resultieren.

Die zuvor für die Prozessart sowie den Schutzgasbedarf ermittelten spezifischen Primärenergiefaktoren und Treibhauspotenziale werden aufsummiert und mit der benötigten Pulvermenge eines jeden Bauteils multipliziert.

Um den KEA und das GWP der Verpackung zu berücksichtigen, werden die spezifischen Faktoren je Verpackungseinheit anteilig auf die benötigte Pulvermenge zugerechnet. Hierfür wird anhand von Formel 5-22 und Formel 5-23 der Anteil der benötigten Pulvermenge an der Füllmenge einer Verpackungsart berechnet und anschließend mit dem KEA und GWP einer Einheit der Verpackungsart multipliziert. Es wird angenommen, dass das Pulver des Quaders in einer Kunststoffverpackung angeliefert wird. Somit entstehen für die Verpackung der Pulvermenge für den Quader ein KEA von 0,23 MJ und ein GWP von 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Für das Pulver des Logos wird eine Verpackung im Edelstahlbehälter angenommen, was zu einem KEA von 0,02 MJ und einem GWP von nahezu 0 kg CO<sub>2</sub>-Äq. führt. Der KEA und das GWP des Edelstahlbehälters übersteigen zwar pro Stück die der Kunststoffverpackung und die des Weißblechbehälters, aufgrund des großen Fassungsvermögens sind sie jedoch anteilig je verpackter Pulvermenge wesentlich geringer. Die Verpackung des Pulvers des Zylinders wird als unbekannt angenommen. Daher wird der konservativste Fall herangezogen und eine Verpackung im Weißblechbehälter angenommen. Hierfür entstehen ein KEA in Höhe von 0,27 MJ und ein GWP in Höhe von 0,02 kg CO<sub>2</sub>-Äq.

Insgesamt weist somit das Logo, trotz des geringsten Materialbedarfs aller Bauteile, mit 25,70 MJ und 1,08 kg CO<sub>2</sub>-Äq. den größten KEA und GWP der Pulverherstellung auf. Dies ist maßgeblich auf die Verwendung von Argon als Verdünnungsgas zurückzuführen, das 85 % bzw. 89 % des KEA und des GWP verursacht. Die Pulverherstellung für den Quader weist einen KEA von 9,23 MJ und ein GWP von 0,54 kg CO<sub>2</sub>-Äq. auf, der sich somit auf einem ähnlichen Niveau wie die Pulverherstellung für den Zylinder mit einem KEA von 10,38 MJ und einem GWP von 0,64 kg CO<sub>2</sub>-Äq. befindet. Die Ergebnisse der Modellanwendung für die Pulverherstellung sind in Tabelle 5-8 zusammengefasst.

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP der Pulverherstellung der Fallbeispiele

	Quader		Logo		Zylinder	
	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP
	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Verdünsungsart	4,79	0,29	2,70	0,16	4,11	0,25
Schutzgas	4,21	0,26	22,98	0,92	6,00	0,37
Verpackung	0,23	0,01	0,02	0,00	0,27	0,02
<b>Summe</b>	<b>9,23</b>	<b>0,54</b>	<b>25,70</b>	<b>1,08</b>	<b>10,38</b>	<b>0,64</b>

#### 5.2.4 Anwendung des Teilmodells des HS DED-LB

Der KEA und das GWP für die Fertigung der Bauteile mittels HS DED-LB setzen sich neben dem Bedarf an Pulver aus dem Energiebezug, dem Bedarf an Schutzgas und Druckluft sowie optional der Bauplatte zusammen. Der Energiebedarf des Fertigungsprozesses wird anhand des in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Modells bestimmt. Der jeweilige prognostizierte Energiebedarf für die Bauteile wird in Kapitel 4.1.6 beschrieben. Zur Herstellung des Quaders werden 0,61 kWh, für das Logo 0,92 kWh sowie für den Zylinder 0,71 kWh an elektrischer Energie benötigt. Die Berechnung des daraus resultierenden KEA erfolgt nach Formel 5-29 und für das GWP nach Formel 5-30, indem der Energiebedarf mit dem Charakterisierungsfaktor für elektrische Energie verrechnet wird. Somit ergeben sich für den Energiebedarf des Quaders ein KEA von 4,40 MJ und ein GWP von 0,26 kg CO<sub>2</sub>-Äq., für das Logo ein KEA von 6,64 MJ und ein GWP von 0,39 kg CO<sub>2</sub>-Äq. sowie für den Zylinder ein KEA von 5,16 MJ und ein GWP von 0,30 kg CO<sub>2</sub>-Äq.

Aus Gründen der Prozessstabilität sind die Trägergas- und die Schutzgasströme für alle Bauteile identisch und betragen 8 l/min bzw. 14 l/min. Der KEA und das GWP des aus diesen Volumenströmen resultierenden Bedarfs an Schutzgas werden anhand von Formel 5-34 und Formel 5-35 bestimmt. Um zunächst den Schutzgasbedarf über die gesamte Prozesszeit zu bestimmen, werden die Volumenströme nach Formel 5-32 und Formel 5-33 über die Prozesszeit integriert und anschließend nach Formel 5-31 aufsummiert. Hieraus ergeben sich für den Quader ein Bedarf von 72,23 l, für das Logo ein Bedarf von 141,10 l und für den Zylinder ein Bedarf von 93,43 l. Verrechnet mit den Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP für Argon resultiert aus dem Schutzgasbedarf für den Quader ein KEA von 4,41 MJ und ein GWP von 0,18 kg CO<sub>2</sub>-Äq., für das Logo ein KEA von 8,61 MJ und ein GWP von 0,34 kg CO<sub>2</sub>-Äq. sowie für den Zylinder ein KEA von 5,70 MJ und ein GWP von 0,23 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Der KEA und das GWP aus dem Bedarf an Argon sind somit auf einem ähnlichen Niveau wie die aus dem Strombedarf resultierenden KEA und GWP und machen in diesen Anwendungsbeispielen unter Vernachlässigung der Bauplatte zwischen 41 % und 56 % des KEA und des GWP des HS DED-LB-Fertigungsprozesses aus.

Die Berechnung des KEA und des GWP für den Druckluftbedarf erfolgt analog. Basierend auf dem Volumenstrom und der Prozessdauer wird nach Formel 4-44 der Bedarf an Druckluft berechnet. Dieser wird wiederum durch die Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP für Druckluft nach Formel 5-37 und Formel 5-38 verrechnet. Hieraus ergeben sich für den Quader ein KEA von 0,04 MJ und ein GWP von 0,003 kg CO<sub>2</sub>-Äq., für das Logo ein KEA von 0,04 MJ und ein GWP von 0,002 kg CO<sub>2</sub>-Äq. sowie für den Zylinder ein KEA von 0,11 MJ

und ein GWP von 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Der Druckluftbedarf hat somit nur einen geringen Anteil am KEA und GWP des HS DED-LB-Prozesses.

Für das Logo wird angenommen, dass es auf der Bauplatte verbleibt, d. h. es wird in der Nachbearbeitung nicht von ihr gelöst, wodurch die Bauplatte Bestandteil des Bauteils wird. Die Bauplatte hatte vor Prozessbeginn ein Gewicht von 381,59 g. Zudem wird angenommen, dass die Bauplatte wie das Pulver aus 316L besteht und hierbei auch die gleiche Legierungszusammensetzung aufweist. Für das Material ergibt sich somit ein spezifischer KEA von 91,25 MJ/kg und ein spezifisches GWP von 6,04 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Die aus dem Materialbedarf der Bauplatte resultierenden KEA und GWP können somit nach Formel 5-39 und Formel 5-40 berechnet werden. Somit ergeben sich für die Bauplatte des Logos ein zusätzlicher KEA von 34,82 MJ und ein zusätzliches GWP von 2,30 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Beim Quader und Zylinder wird das Ablösen der Bauplatte in der Nachbearbeitung angenommen, wodurch diese erneut verwendet werden können. Daher werden die für die Bauplatten dieser Bauteile resultierenden KEA und GWP vernachlässigt.

In Summe hat somit der HS DED-LB-Prozess zur Fertigung des Logos mit 50,11 MJ und 3,03 kg CO<sub>2</sub>-Äq. den größten KEA und GWP. Die Fertigung des Zylinders weist einen KEA von 10,97 MJ und ein GWP von 0,54 kg CO<sub>2</sub>-Äq. auf. Die Fertigung des Quaders hat mit 8,85 MJ und 0,44 kg CO<sub>2</sub>-Äq. den geringsten KEA und GWP. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-9 zusammengefasst. Werden die spezifischen KEA und GWP des HS DED-LB-Prozesses für die Anwendungsbeispiele unter Vernachlässigung der Bauplatzform und des Pulverbedarfs berechnet, so verändert sich diese Reihenfolge. Der Quader ist hinsichtlich seiner Masse das kleinste Bauteil. Für ihn resultieren ein spezifischer KEA von 1886,99 MJ/kg und ein spezifisches GWP von 93,82 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg. Das Logo hat zwar absolut betrachtet den größten KEA und GWP, relativ betrachtet je Masseneinheit, weist der HS DED-LB-Prozess zur Fertigung des Logos einen spezifischen KEA von lediglich 486,79 MJ/kg und ein spezifisches GWP von 23,24 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg auf. Das schwerste Bauteil ist der Zylinder. Er weist zudem den geringsten spezifischen KEA mit 184,59 MJ/kg und spezifischen GWP von 9,08 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg auf. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit zunehmender Bauteilmasse die spezifischen Umweltauswirkungen reduziert werden. Jedoch sollte hierbei ebenfalls berücksichtigt werden, dass aufgrund der rotationssymmetrischen Form des Zylinders ein ununterbrochener Materialauftrag erfolgt, was zu einer effizienteren Nutzung des Energie- und Materialeinsatzes führt. Weiterhin bestimmen die gewählten Prozessparameter die Höhe der bezogenen Leistung und wirken sich somit ebenfalls auf den Energiebedarf aus.

Tabelle 5-9: Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP des HS DED-LB-Prozesses der Fallbeispiele

	Quader		Logo		Zylinder	
	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP
	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Energiebedarf	4,40	0,26	6,64	0,39	5,16	0,30
Schutzgas	4,41	0,18	8,61	0,34	5,70	0,23
Druckluft	0,04	0,00	0,04	0,00	0,11	0,01
Bauplatte			34,82	2,30		
<b>Summe</b>	<b>8,85</b>	<b>0,44</b>	<b>50,11</b>	<b>3,03</b>	<b>10,97</b>	<b>0,54</b>

### 5.2.5 Anwendung des Teilmodells der Nachbearbeitung

Welche Nachbearbeitungsverfahren für die Bauteile angewendet werden und wie diese gestaltet sind, ist individuell und unterscheidet sich daher für jedes Bauteil. In den hier betrachteten Anwendungsbeispielen wird angenommen, dass der Quader zunächst mit Druckluft und danach in einem Ultraschallbad gereinigt wird. Anschließend erfolgt eine Reduktion der Eigenspannungen durch ein HIP. Das Bauteil wird nachfolgend mittels Drahterosion von der Bauplatte gelöst und durch Fräsen hinsichtlich seiner Geometrie und Oberflächengüte korrigiert. Für das Logo wird lediglich eine Reinigung durch Druckluft sowie durch ein Ultraschallbad angenommen. Für die Reinigung des Zylinders wird ebenfalls der Einsatz von Druckluft und einem Ultraschallbad angenommen. Anschließend wird es zudem durch Drahterosion von der Bauplatte gelöst.

Zur Ermittlung des KEA und des GWP des Druckluftbedarfs zur initialen Reinigung der Bauteile wird zunächst die benötigte Druckluftmenge basierend auf dem Volumenstrom und der entsprechenden Dauer mittels Formel 5-45 bestimmt. Gemeinsam mit den Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP werden basierend auf Formel 5-43 und Formel 5-44 der KEA und das GWP des Druckluftbedarfs zur Reinigung bestimmt. Aufgrund der vergleichsweise komplizierten Geometrie des Logos wird eine Reinigungsdauer von 60 s angenommen, was von allen Bauteilen die längste Reinigung ist. Dies führt mit 0,13 MJ und 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq. zum höchsten KEA und GWP. Im mittleren Bereich ist mit einem KEA von 0,10 MJ und einem GWP von 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq. der Zylinder. Für den Quader wird aufgrund seiner einfachen Geometrie nur eine kurze Reinigung mit Druckluft von 10 s angenommen. Dies führt zu einem KEA von 0,04 MJ und einem GWP von 0,002 kg CO<sub>2</sub>-Äq.

Nach der initialen Reinigung mit Druckluft wird für alle Bauteile eine Reinigung im Ultraschallbad angenommen. Für das Logo wird angenommen, dass die Leistungsaufnahmen während des Betriebs des Ultraschallbads von 1.780 W und für den Zylinder von 2.500 W bekannt sind. Die Berechnung des daraus resultierenden Energiebedarfs erfolgt nach Formel 5-47. Mit Formel 5-48 ergibt dies ein KEA von 3,22 MJ für das Logo und von 3,01 MJ für den Zylinder. Das GWP wird mittels Formel 5-49 berechnet. Für das Logo ergibt sich somit ein GWP von 0,19 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und für den Zylinder von 0,18 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Die Leistungsaufnahme des Ultraschallreinigungsgeräts, mit dem der Quader gesäubert wird, wird als unbekannt angenommen. Daher wird Formel 5-46 angewendet. Dies resultiert in einem KEA von 0,23 MJ und einem GWP von 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Der aus Formel 5-46 resultierende Energiebedarf ist somit geringer als die Energiebedarfe der Geräte, in denen die anderen Bauteile gereinigt werden. Dies ist auf eine unterschiedliche Größe der Ultraschallgeräte zurückzuführen sowie auf die geringere Reinigungsdauer des Bauteils.

Anschließend wird lediglich für den Quader ein HIP angenommen. Die Berechnung des KEA und des GWP erfolgt basierend auf der Masse des Bauteils mittels Formel 5-50 und Formel 5-51. Hieraus ergeben sich ein KEA von 1,15 MJ und ein GWP von 0,07 kg CO<sub>2</sub>-Äq.

Danach wird für den Quader und den Zylinder das Ablösen von der Bauplatte mittels Drahterosion angenommen. Beim Quader erfolgt dies unter Annahme einer höheren Vorschubgeschwindigkeit. Dies führt gemeinsam mit dem geringen Querschnitt des Quaders zu einer kurzen Bearbeitungszeit von 3,8 min. Mit Formel 5-55 ergibt sich ein KEA von 3,48 MJ und mit Formel 5-56 ein GWP von 0,21 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Der Zylinder weist einen wesentlich größeren Querschnitt auf. Zudem sind hier die angenommenen Vorschubgeschwindigkeiten wesentlich geringer,

sodass sich hier eine Prozesszeit von 17,8 min ergibt. Basierend auf Formel 5-57 resultiert hieraus ein KEA von 11,63 MJ und basierend auf Formel 5-58 ein GWP von 0,70 kg CO<sub>2</sub>-Äq.

Für den Quader wird schlussendlich bei einer Leistungsaufnahme von 44 kW für 1 min eine spanende Nachbearbeitung angenommen. Der hierfür notwendige Energiebedarf kann durch Formel 5-59 ermittelt werden. Der aus dem Energiebedarf resultierende KEA beträgt nach Formel 5-61 5,30 MJ und das GWP nach Formel 5-62 0,31 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Die Ergebnisse der einzelnen Nachbearbeitungsschritte sind zudem in Tabelle 5-10 zusammengefasst.

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP der Nachbearbeitungsprozesse der Fallbeispiele

	Quader		Logo		Zylinder	
	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.	KEA MJ	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Druckluftreinigung	0,04	0,00	0,13	0,01	0,10	0,01
Ultraschallbad	0,23	0,01	3,22	0,19	3,01	0,18
HIP	1,15	0,07				
Drahterodieren	3,48	0,21			11,63	0,70
Fräsen	5,30	0,31				
<b>Summe</b>	<b>10,20</b>	<b>0,60</b>	<b>3,35</b>	<b>0,20</b>	<b>14,74</b>	<b>0,89</b>

Somit resultieren für die Nachbearbeitung des Quaders ein KEA von 10,20 MJ und ein GWP von 0,60 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Mit insgesamt 86 % werden diese maßgeblich durch die Fräsbearbeitung sowie das Drahterodieren beeinflusst, gefolgt vom HIP. Da das Logo lediglich gereinigt wird, ist die Nachbearbeitung insgesamt wesentlich weniger aufwändig. Somit entstehen hier ein geringerer KEA in Höhe von 3,35 MJ und GWP in Höhe von 0,20 kg CO<sub>2</sub>-Äq., wobei diese nahezu ausschließlich durch die Reinigung im Ultraschallbad verursacht werden. Den größten KEA und GWP für die Nachbearbeitung der drei Fallbeispiele weist der Zylinder auf. Der Prozess des Drahterodierens verursacht 78 % des KEA und GWP, die über alle Nachbearbeitungsprozesse hinweg 14,73 MJ und 0,89 kg CO<sub>2</sub>-Äq. betragen.

### 5.2.6 Anwendung des Teilmodells des Transports

Das Rohmaterial sowie das Pulver werden zwischen den jeweiligen Produktionsstandorten transportiert. Die in diesem Fallbeispiel verwendeten Transportstrecken entsprechen an die Realität angelehnten, jedoch fiktiven Werten. Für Metallzeugnisse werden weite Distanzen meist per Schiff zurückgelegt. Somit werden für das Rohmaterial des Quaders ein Transport von China in die Niederlande per Überseeschiff, was einer Strecke von ca. 9.000 km entspricht, und ein Weitertransport mit dem Zug nach Deutschland mit einer Transportstrecke von 200 km angenommen. Das Pulver wird anschließend in Deutschland hergestellt und anschließend mit einem LKW innerhalb Deutschlands 300 km zum Standort des HS DED-LB-Prozesses und der Nachbearbeitung transportiert. Für das Logo wird angenommen, dass sowohl der Edelstahl als auch das Pulver am gleichen Standort hergestellt werden. Weiterhin wird die Notwendigkeit eines zeitsparenden Transports des Pulvers per Flugzeug auf einer Strecke von 2.200 km innerhalb von Europa angenommen. Für das Rohmaterial des Zylinders wird eine Herstellung in Australien und anschließend ein Transport per Überseeschiff über 14.500 km in die Niederlande angenommen. Von dort aus wird es per Binnenschiff 800 km in die Schweiz transportiert, wo die Pulverherstellung erfolgt. Das Pulver wird anschließend 300 km mit einem LKW zum Produktionsort des Bauteils transportiert. Die Transportdistanzen werden mit ihrem jeweiligen

Primärenergiefaktoren und Treibhauspotenzialen sowie der entsprechenden Masse des Transportguts multipliziert und alle Transportvorgänge nach Formel 5-63 und Formel 5-64 aufsummiert. Hieraus ergeben sich für den Quader ein KEA von 0,21 MJ und ein GWP von 0,01 kg CO<sub>2</sub>-Äq., wobei der Großteil durch den Transport des Rohmaterials entsteht. In der Prozesskette des Logos existiert zwar nur ein Transportvorgang, dieser verursacht jedoch einen KEA von 1,25 MJ und ein GWP von 0,10 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und somit die höchsten Werte der drei Fallbeispiele. Die Transportvorgänge des Zylinders verursachen einen KEA in Höhe von 0,25 MJ und ein GWP in Höhe von 0,02 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Die Ergebnisse der durch die Transportprozesse verursachten KEA und GWP sind in Tabelle 5-11 zusammengefasst.

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Modellierung des KEA und des GWP der Transportprozesse der Fallbeispiele

	Quader		Logo		Zylinder	
	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP
	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Rohmaterial	0,18	0,01			0,23	0,02
Pulver	0,03	0,00	1,25	0,10	0,02	0,00
<b>Summe</b>	<b>0,21</b>	<b>0,01</b>	<b>1,25</b>	<b>0,10</b>	<b>0,25</b>	<b>0,02</b>

Die hier gewählten Transportmittel besitzen eine große Zuladung, sodass sich der KEA und der GWP pro transportierter Mengeneinheit reduziert. In diesen Anwendungsfällen wird davon ausgegangen, dass der HS DED-LB-Prozess sowie die Nachbearbeitung an einem Standort stattfinden. Falls weitere Transportprozesse im Modell berücksichtigt werden sollen, können diese nach Formel 5-63 und Formel 5-64 entsprechend ergänzt werden. Hierbei ist jedoch eine mögliche Änderung der Masse des Transportguts zu berücksichtigen.

### 5.2.7 Gesamtbewertung und anforderungsbezogene Diskussion

In Summe ergeben sich für die Prozesskette des Quaders ein KEA von 39,32 MJ und ein GWP von 2,30 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Für die Prozesskette des Logos dominiert der HS DED-LB-Prozess den resultierenden KEA und GWP, gefolgt von der Pulverherstellung. Aufgrund des geringen Nachbearbeitungsbedarfs bei diesem Bauteil hat die Nachbearbeitung einen entsprechend geringen Anteil am KEA und GWP. Insgesamt werden für das Logo ein KEA von 86,86 MJ und ein GWP von 4,82 kg CO<sub>2</sub>-Äq. ermittelt. Die Prozesskette des Zylinders verursacht ein KEA von 46,18 MJ und ein GWP von 2,72 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Dies ist insbesondere auf die energieintensive Nachbearbeitung durch Drahterosion zurückzuführen, die knapp die Hälfte des KEA und des GWP verursacht. Es zeigt sich, dass alle Prozessschritte, mit Ausnahme der Transportprozesse, anteilig zwischen 4 % und 63 %, ohne Berücksichtigung der Bauplatte stets zwischen 6 % und 49 % des GWP und des KEA verursachen. Der durch die Transportprozesse verursachte KEA und GWP ist mit Anteilen von maximal 2 % über alle Bauteile hinweg vergleichsweise gering. Die Ergebnisse des KEA sind in Abbildung 5-4 und des GWP sind in Abbildung 5-5 visualisiert.

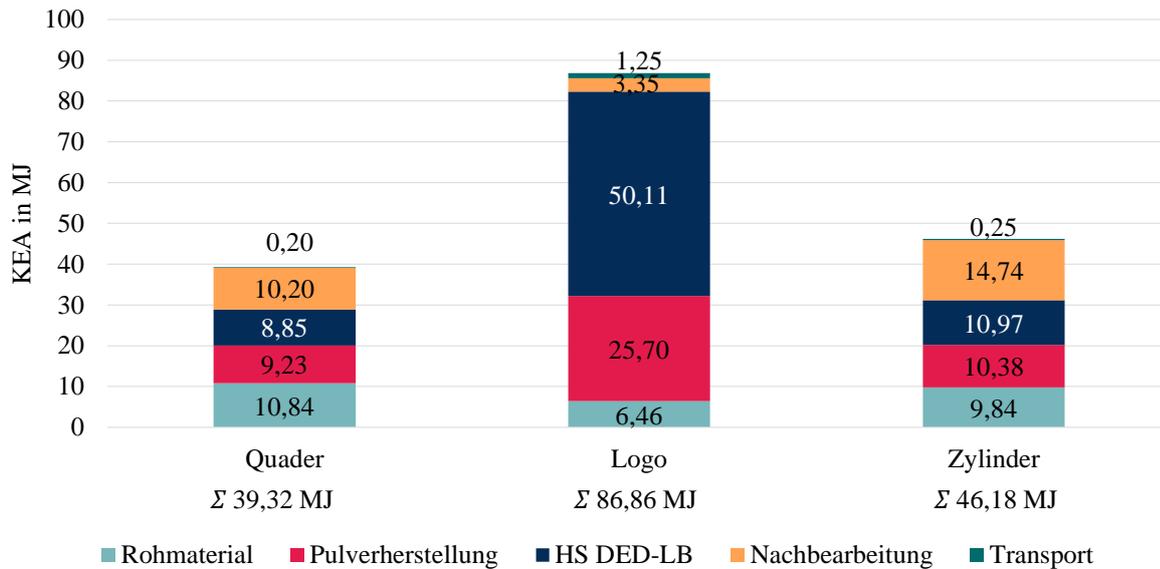


Abbildung 5-4: Visualisierung des KEA der Fallbeispiele

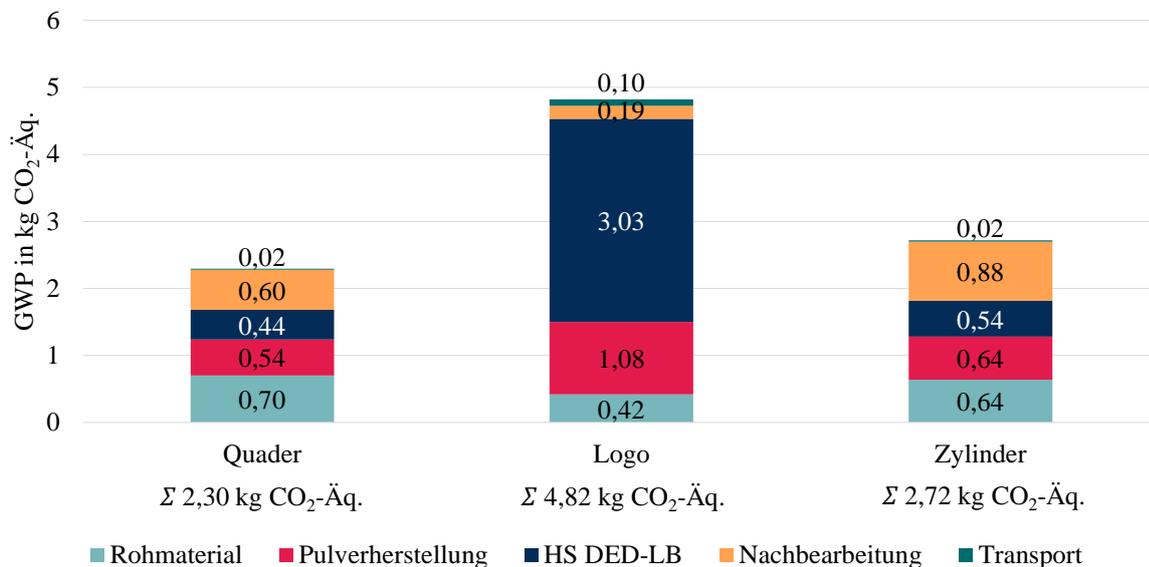


Abbildung 5-5: Visualisierung des GWP der Fallbeispiele

Es zeigt sich somit, dass alle Prozessschritte einen signifikanten Einfluss auf den KEA und das GWP der Prozesskette zur Herstellung eines Bauteils mittels HS DED-LB aufweisen. Welcher Prozessschritt hierbei die größten Auswirkungen hat, ist individuell, weshalb eine übertragbare oder allgemeingültige Aussage nicht getätigt werden kann. So verursacht beim Quader die Rohmaterialherstellung, beim Logo der HS DED-LB-Prozess und beim Zylinder die Nachbearbeitung jeweils den größten KEA und das größte GWP. Dies zeigt zudem, dass aufgrund unterschiedlicher Ausgestaltung der Prozessschritte kein Prozessschritt stets den resultierenden KEA und GWP dominiert. Durch eine Vernachlässigung eines Prozessschritts wird somit ein potenziell wesentlicher Anteil der Umweltauswirkungen in die Analyse nicht einbezogen. Dies unterstreicht die Relevanz der in Kapitel 3.2 an das Modell gestellten Anforderung zur gleichwertigen Berücksichtigung aller Prozessschritte. Zur Erfüllung der Anforderung wurden im Modell alle Prozessschritte integriert, wobei jedoch die jeweilige Verfügbarkeit von Informationen über die Auslegung des Prozessschritts für potenzielle Anwendende des Modells berücksichtigt

wurde, da insbesondere bei frühen Phasen der Prozesskette häufig Herstellungsverfahren- und Inputparameter unbekannt sind. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle Prozessschritte stets berücksichtigt werden können. Das Modell ermöglicht somit eine umfassende Analyse und Beurteilung der Bauteilherstellung und bietet die Grundlage für einen ökologischen Vergleich mit Fertigungsalternativen.

Die unterschiedlichen Anteile der Prozessschritte am KEA und GWP werden durch die individuelle Prozessgestaltung und die damit verbundenen variierenden Quantitäten der Inputflüsse hervorgerufen. Durch die Erfüllung der Anforderung der Integration sämtlicher Elementarflüsse durch Nutzung einer objektiven Vergleichsbasis wird es durch das Modell möglich, diesen Einfluss in der Berechnung des KEA und des GWP abzubilden. So zeigt sich bspw., dass eine Wiederverwendung des im HS DED-LB-Prozess nicht aufgetragenen Pulvers zu einer deutlichen Reduktion der Umweltauswirkungen der Rohmaterial- und Pulverherstellung führt. Bei DED-Prozessen ist dies jedoch noch nicht weit verbreitet, da die chemischen und physikalischen Eigenschaften des nicht aufgetragenen Pulvers sowie der Einfluss auf die Bauteilqualität noch nicht ausreichend untersucht sind. Für die Herstellung des Logos wird eine solche Wiederverwendung angenommen, wodurch lediglich 61,01 g an Rohmaterial und Pulver benötigt werden. Ohne eine Wiederverwendung würde der Bedarf auf 234,69 g Rohmaterial und Pulver steigen, was zu einem KEA von 24,93 MJ und 98,87 MJ sowie zu einem GWP von 1,62 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und 4,16 kg CO<sub>2</sub>-Äq. für die Rohmaterialherstellung und die Pulverherstellung führt. Der KEA und das GWP des Bauteils würden somit auf 182,06 MJ und 9,38 kg CO<sub>2</sub>-Äq. steigen und sich nahezu verdoppeln. Weiterhin zeigt sich, dass die Wahl des Verdüsungsgases zur Pulverherstellung einen großen Einfluss auf den resultierenden KEA und GWP besitzt. Stickstoff führt lediglich zu ca. einem Sechstel des KEA und GWP im Vergleich zu Argon. Die Verwendung von Stickstoff kann somit bei der Pulverherstellung, aber auch beim HS DED-LB-Prozess, zu einer Reduktion des KEA und des GWP führen. Beim Logo ist die Bauplatte Bestandteil des fertigen Bauteils. Der KEA und das GWP, die für die Herstellung des Rohmaterials der Bauplatte entstehen, werden somit dem Bauteil zugerechnet. Die Bauplatte allein verursacht im hier betrachteten Fallbeispiel ca. die Hälfte des KEA und des GWP des Logos über alle betrachteten Prozessschritte hinweg. Die Bauplatte ist für HS DED-LB-Prozesse zwar unerlässlich, eine dem Bauteil angepasste Dimensionierung der Bauplatte kann hier die Umweltauswirkungen entsprechend reduzieren.

Weiterhin divergieren der KEA und das GWP der Nachbearbeitung der Bauteile stark in Abhängigkeit von den angewendeten Prozessen und deren Auslegung. Die Nachbearbeitungsprozesse führen somit zu einem zusätzlichen KEA und GWP der additiven Bauteilfertigung, die oftmals vernachlässigt werden, jedoch aus technologischer Sicht und auch aus ökologischer Sicht essenzieller Bestandteil sind. Insbesondere das Drahterodieren hat einen hohen Energiebedarf, der den KEA und das GWP entsprechend stark ansteigen lässt.

Aufgrund der Modularität des Modells, die sowohl die Abbildung einzelner Prozessschritte als auch die spezifische Anpassung von Prozessparametern oder bauteilbezogenen Inputdaten erlaubt, ist eine präzise Quantifizierung von KEA und GWP möglich. Somit können auch verschiedene Optionen der Auslegung einzelner Prozessschritte im Vorfeld der Bauteilherstellung verglichen und aus ökologischer Sicht analysiert werden. Dies ermöglicht die Berücksichtigung des KEA und des GWP in Entscheidungsprozessen zur Prozessauswahl und -gestaltung. So konnte beispielsweise ermittelt werden, dass neben dem Energiebedarf insbesondere das

Schutzgas sowohl bei der Pulverherstellung als auch während des HS DED-LB-Prozesses einen maßgeblichen Einfluss auf KEA und GWP hat. Darüber hinaus ist die Wiederverwendung des nicht aufgetragenen Pulvers ein wichtiger Ansatzpunkt, um den KEA und das GWP zu reduzieren. Dies zeigt, dass das Modell eine Analyse der Zusammensetzung von KEA und GWP ermöglicht, womit die dritte Anforderung an das Modell erfüllt ist.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachhaltigkeit in der Produktion ist aufgrund eines zunehmenden Umweltbewusstseins der Öffentlichkeit und der Wirtschaft sowie der zunehmenden politischen Regularien von steigender Relevanz. Ein Ansatzpunkt dies zu erreichen ist die Nutzung ressourcen- und energieeffizienter Fertigungsverfahren.

Im Vergleich zu subtraktiven oder formativen Fertigungsverfahren wird der additiven Fertigung ein großes Potenzial zugesprochen, den Ressourcenbedarf nicht nur in der Fertigung, sondern aufgrund der Möglichkeit des Leichtbaus und der Funktionsintegration auch während der Nutzung von Bauteilen zu reduzieren. Ökologische Analysen additiver Fertigungsverfahren deuten jedoch auf einen gesteigerten Energie- und Ressourcenbedarf innerhalb der gesamten Prozesskette der Bauteilherstellung hin. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass für additive Fertigungsverfahren das Material häufig in spezifischer Form vorliegen muss, was in vorgelagerten Prozessschritten erfolgt. Zum anderen ist aufgrund der geringen geometrischen Genauigkeit und der schlechten Oberflächenqualität oftmals eine Nachbearbeitung der additiv gefertigten Bauteile notwendig, was zu zusätzlichen Prozessschritten und damit verbundenen Umweltauswirkungen führt.

Daher ist es wichtig, die Umweltauswirkungen additiver Fertigungsverfahren zu analysieren, um Ansatzpunkte zur Reduktion der Umweltauswirkungen zu identifizieren und eine Möglichkeit zur Einbeziehung der Umweltauswirkungen als Entscheidungsfaktor bei der Prozessauswahl und -gestaltung zu schaffen. Insbesondere für vergleichsweise junge Fertigungstechnologien ist dies von hoher Wichtigkeit, da hier meist große Potenziale existieren, die bereits vor einer breiten Adaption der Technologie realisiert werden sollten.

Das HS DED-LB ist eine solche vergleichsweise junge additive Fertigungstechnologie. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip des Materialauftrags von Metallpulver mit gerichteter Energieeinbringung. Da beim HS DED-LB im Vergleich zu anderen DED-Verfahren der Laser- und Pulverfokus oberhalb der Bauteiloberfläche liegt, wird das Metall im Laserstrahl geschmolzen und in flüssiger Form aufgetragen. Dies ermöglicht wesentlich höhere Vorschubgeschwindigkeiten und Materialauftragsraten, was zu deutlich kürzeren Prozesszeiten führt. Aus energetischer Sicht führen die kürzeren Prozesszeiten jedoch nicht zwingend zu einem geringeren Energiebedarf, da insbesondere die für den Prozess notwendigen hohen Vorschubgeschwindigkeiten und Laserleistungen zu einer Erhöhung der Leistungsaufnahme führen können. Zudem hat das Prozessprinzip eine vergleichsweise geringe Pulverauftragsrate zur Folge. Weiterhin ist häufig eine Nachbearbeitung der Bauteile notwendig, sodass zusätzliche Prozessschritte in die Prozesskette integriert werden müssen. Somit muss für eine umfassende ökologische Beurteilung des Prozesses die gesamte Prozesskette von der Rohmaterialherstellung, der Pulverproduktion und dem HS DED-LB Prozess bis hin zu verschiedenen Nachbearbeitungsprozessen analysiert werden.

Ziel dieser Arbeit war es daher eine Transparenz des KEA und des GWP, die bei der Herstellung eines Bauteils mittels HS DED-LB entstehen, zu schaffen.

### 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus der Zielsetzung resultiert die Forschungsfrage, wie der KEA sowie das GWP der einzelnen Prozessschritte eines mittels HS DED-LB gefertigten Bauteils verallgemeinert berechnet und zusammengeführt werden können. Hierfür wurde zunächst der Energiebedarf des HS DED-LB-

Prozesses analysiert. Dabei zeigt sich, dass er in drei Prozessstufen unterteilt werden kann. Während des Pre-Steps wird der Pulvermassenstrom homogen aufgebaut. Im anschließenden In-Step erfolgt die Bauteilherstellung und im darauffolgenden Post-Step wird die vollständige Auflösung des Pulvermassenstroms abgewartet. Der Großteil des Energiebedarfs wird während des In-Steps bezogen, da er i. d. R. die längste Prozessphase ist und zudem hier die Herstellung des Bauteils erfolgt. Hierfür wird die Bauplattform in einem auf der Bauteilgeometrie basierenden Scanpfad bewegt und der Laserstrahl bedarfsweise zu- und abgeschaltet. Analysen zeigen, dass die Lasereinheit sowie die Antriebe der Bauplattform den größten Anteil der Leistungsaufnahme des gesamten Fertigungssystems hervorrufen. Die Leistungsaufnahme des Lasers ist hierbei alleinig von der eingestellten Laserleistung abhängig. Wie lange der Laserstrahl zugeschaltet ist, ist abhängig vom Scanpfad und somit auch von der Bauteilgeometrie. Der Scanpfad wirkt sich weiterhin auf den Energiebedarf der Antriebe der Bauplattform aus. Hier verursachen insbesondere Beschleunigungsvorgänge der Bauplattform nach einem Richtungswechsel eine hohe Leistungsaufnahme. Das gewählte Absaugungsvolumen des Entstaubungssystems sowie die Rotationsgeschwindigkeiten des Rührers sowie der Förderscheibe des Pulverförderers tragen nur untergeordnet zum Energiebedarf eines HS DED-LB-Prozesses bei.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde anschließend ein Modell zur bauteilindividuellen Prognose des Energiebedarfs eines HS DED-LB-Prozesses erstellt. Die Modellentwicklung erfolgte dabei in vier Schritten:

- Zunächst wurde die Struktur des zu untersuchenden Systems erfasst, wobei die individuellen Systemeinheiten sowie die dazugehörigen Prozessparameter identifiziert wurden.
- Anschließend erfolgte die Analyse des Prozesses, indem durch initiale Experimente die Prozessphasen untersucht wurden.
- Darauf aufbauend wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Leistungsaufnahme ihrer zugeordneten Systemeinheit analysiert. Hierbei wurde untersucht, welche Prozessparameter einen signifikanten Einfluss haben und ob Wechselwirkungen bestehen.
- Für die als relevant eingeordneten Prozessparameter wurde anschließend die Änderung der Leistungsaufnahme bei schrittweiser Erhöhung der Einstellung analysiert. Dies bildet die Datengrundlage für die Entwicklung des Prognosemodells, indem anhand von Regressionsmodellen die Leistungsaufnahmen der Systemeinheiten in Abhängigkeit von der Einstellung der Prozessparameter quantifiziert werden konnten.

Das entwickelte Modell kann dabei durch das Austauschen der Datengrundlage auf andere HS DED-LB-Fertigungssysteme übertragen werden. Für eine Übertragung des Modells auf andere additive Fertigungssysteme wurde das Vorgehen abstrahiert zusammengefasst.

Das Energiebedarfsprognosemodell wurde anschließend um die Quantifizierung der Materialflüsse erweitert und in ein Modell zur Prognose des KEA und des GWP der Prozesskette zur Herstellung eines Bauteils mittels HS DED-LB integriert. Für die Rohmaterialherstellung und Pulverproduktion wurden zur Modellerstellung partielle Ökobilanzen unter Betrachtung der Wirkungskategorien des KEA und des GWP durchgeführt, deren Ergebnisse modularisiert wurden. Hierdurch können die Inputflüsse individuell variiert werden, was eine präzise Berechnung des resultierenden KEA und GWP ermöglicht. Auch die Elementarflüsse des HS DED-LB-Prozesses wurden mit den jeweiligen Charakterisierungsfaktoren verknüpft und hierdurch die Ermittlung des resultierenden KEA und GWP ermöglicht. Für die Nachbearbeitung wurden typische Nachbearbeitungsprozesse ausgewählt und ebenfalls entsprechend modularisiert

modelliert. Das Modell ermöglicht somit die Berechnung des KEA und des GWP eines Bauteils, das mittels HS DED-LB gefertigt wird und erlaubt dabei die Quantifizierung der ursächlichen Zusammensetzung des KEA und des GWP sowie die Analyse von Zusammenhängen.

Während der Anwendung der Modelle zeigt sich, dass mit Ausnahme der Transportprozesse alle Prozessschritte einen signifikanten Einfluss auf den KEA und das GWP besitzen und diese sowohl durch die Energie- als auch die Stoffflüsse verursacht werden. Eine Vernachlässigung eines Prozessschritts führt daher für eine umfassende ökologische Beurteilung zu einem unzureichenden Betrachtungsraum. Die Rohmaterialherstellung ist zwar unabhängig von den späteren Fertigungsprozessen. Sie ist jedoch aufgrund der variierenden Pulverauftragsrate des HS DED-LB-Prozesses und des dadurch bedingten erhöhten oder reduzierten Materialbedarfs eine zentrale Größe. Die Pulverherstellung ist für eine Fertigung mittels HS DED-LB ein zwingender Bestandteil der Prozesskette. Die Pulverherstellung kann durch verschiedene Verdünnungsprozesse erfolgen, wobei das größte Reduktionspotenzial in der Nutzung von Stickstoff anstelle von Argon als Verdünnungsgas liegt. Auch beim HS DED-LB-Prozess verursacht der Argonbedarf einen erheblichen Anteil des KEA und des GWP. Zudem ist die Nachbearbeitung für einen späteren Einsatz der gefertigten Bauteile meist unabdingbar. Dabei gilt, dass insbesondere der KEA und das GWP der Nachbearbeitung hoch variabel sind, da eine Vielzahl verschiedener Prozesse angewendet werden können, die zudem individuell gestaltet sein können. Dies führt zu einem stark schwankenden Einfluss der Nachbearbeitung auf den gesamten KEA und GWP.

Ein Vergleich der Umweltauswirkungen eines HS DED-LB-Prozesses mit anderen DED-Prozessen ist nur eingeschränkt möglich, da der Energie- und Materialbedarf sowie die damit verbundenen vor- und nachgelagerten Prozessschritte hochgradig individuell sind. Dies spiegelt sich ebenfalls in der großen Divergenz der im Stand der Technik analysierten SEC wider. Wird dieser als Vergleichswert herangezogen, so ist von einem vergleichbaren Energiebedarf je aufgetragener Mengeneinheit für beide Verfahren auszugehen. Für einen quantifizierten Vergleich der Verfahren bedarf es tiefergehender Analysen.

## 6.2 Ausblick auf weiterführende Forschung

Aus den Erkenntnissen lassen sich die folgenden Forschungsrichtungen sowie Entwicklungspotenziale ableiten:

- Durch die Untersuchung und den Vergleich des Energie- und Materialbedarfs sowie die daraus resultierenden Umweltauswirkungen von HS DED-LB mit konventionellen DED-Verfahren können Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Energie- und Materialbedarfe identifiziert werden.
- Das Energiebedarfprognosemodell des HS DED-LB Prozesses kann sowohl hinsichtlich des Zeitmodells als auch des Leistungsmodells weiterentwickelt werden. Für eine präzisere Vorhersage der Prozesszeit kann ein automatisiertes Auslesen des Scanpfads gemeinsam mit der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen. Als Grundlage hierfür ist zunächst eine tiefgehende Analyse der Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge durchzuführen. Durch die Verknüpfung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgänge mit dem G-Code kann eine präzise Prognose der Prozesszeit ermöglicht werden. Hierbei sollte sich insbesondere auf die präzise Prognose der Leistungsaufnahme für verschiedene Scanpfade fokussiert werden. Bspw. kann durch die Erweiterung des datenbasierten Modells mit physikalischen Zusammenhängen ein hybrides Modell, das auf Methoden des Machine Learnings beruht, entwickelt werden, was die Prognosequalität weiter erhöhen kann.

- Das Prognosemodell kann als Grundlage für eine automatisierte Prozessgestaltung zur Reduktion des Energiebedarfs sowie zum Ecodesign in der Bauteilgestaltung eingesetzt werden. Mögliche Ansatzpunkte für die Reduktion des Energiebedarfs in der Prozessgestaltung können sowohl eine Anpassung der Prozessparameter als auch eine energieeffiziente Gestaltung des Scanpfads sein. Das Modell ermöglicht aufgrund seiner Prognosefähigkeit die Ermittlung des Energiebedarfs basierend auf den Prozessparametereinstellungen und bildet somit den Einfluss unterschiedlicher Prozessparameterkombinationen und Bauteilgeometrien ab. Durch eine gezielte Optimierung unter Berücksichtigung der Bauteilqualität können so energieeffiziente Prozessparameter und Bauteilcharakteristika identifiziert werden. Zur energieeffizienten Gestaltung des Scanpfads sollte sich zuerst auf diejenigen Abschnitte fokussiert werden, bei denen kein Materialauftrag stattfindet. Hier erfolgen energieintensive Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge, die durch eine Anpassung der Wendestrategien Potenziale zur Reduktion des Energiebedarfs bieten.
- Neben der Verbesserung der Energieeffizienz sollte auch eine Verbesserung der Pulverauftragsrate angestrebt werden. Zum einen weist HS DED-LB in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie eine vergleichsweise schlechte Pulverauftragsrate auf. Dies kann zum einen durch eine entsprechende Optimierung des Scanpfads zur Minimierung derjenigen Zeiten innerhalb des Prozesses erfolgen, in denen kein Materialauftrag stattfindet. Hierdurch können die maschinenbedingten Pulververluste reduziert werden. Zum anderen ist zur Reduktion der prozessbedingten Pulververluste zunächst ein tiefgehendes Verständnis der Einflüsse der Prozessparametereinstellungen aufzubauen. Anschließend kann basierend auf diesen Erkenntnissen die Auswahl von Prozessparametern zur Erhöhung Pulverauftragsrate erfolgen.
- Der Ansatz zur energieeffizienten Prozessgestaltung sowie der Ansatz zur Erhöhung der Pulverauftragsrate sind zusammenzuführen, sodass mögliche Zielkonflikte koordiniert werden können. Dies ermöglicht die Reduktion der Umweltauswirkungen des HS DED-LB-Prozesses über alle Material- und Energieflüsse und ermöglicht das Finden eines gemeinsamen Minimums. Hierbei sind jedoch die Prozessstabilität und die resultierende Bauteilqualität stets zu berücksichtigen.
- Weiterhin sollten die Möglichkeiten der Wiederverwendung von nicht aufgetragenem Pulver untersucht werden. Dies umfasst zum einen die Untersuchung und Implementierung von notwendigen Voraussetzungen zur Pulverwiederverwendung innerhalb des HS DED-LB-Prozesses. Weiterhin sollten hierfür die Auswirkungen von wiederverwendetem Pulver auf die Bauteilqualität analysiert werden. Die Möglichkeit der Kreislaufführung des Pulvers muss hierbei nicht nur auf den HS DED-LB-Prozess beschränkt sein. Zusätzlich ist auch eine Rückführung des Pulvers zur Pulverproduktion möglich, das dort erneut eingeschmolzen und verdüst wird. Hierbei können die Auswirkungen auf die Pulverqualität und das resultierende Bauteil sowie die notwendigen Voraussetzungen für eine Rückführung des Pulvers untersucht werden.
- Zur Reduktion der Umweltauswirkungen innerhalb des HS DED-LB Prozesses sollte die Verwendung von Stickstoff anstelle von Argon als Schutzgas vertieft untersucht werden. Hierfür ist eine Analyse der resultierenden Prozessstabilität sowie der Bauteilqualität für verschiedene Materialien notwendig.
- Das HS DED-LB-Verfahren sollte einer ganzheitlichen Untersuchung der Nachhaltigkeit unterzogen werden, sodass neben dem KEA und dem GWP weitere ökologische Wirkungskategorien wie das Ozonabbaupotenzial, das Versauerungspotenzial und das

Eutrophierungspotenzial untersucht werden. Weiterhin sollten neben der ökologischen Dimension auch soziale und ökonomische Aspekte analysiert werden. Aus sozialer Sicht kann bspw. die Nutzung des Metallpulvers zu gesundheitlichen Folgen führen, wodurch die Berücksichtigung eines ausreichenden Mitarbeiterschutzes unabdingbar ist. Zudem ist das Abwägen von ökonomischen Potenzialen, die bspw. aus der verkürzten Prozesszeit resultieren, mit ökonomischen Risiken, wie dem erhöhten Bedarf an Metallpulver und entsprechenden Kostensteigerungen, für eine weitere industrielle Einführung der Technologie notwendig.

- ❑ Zur Reduktion der Umweltauswirkungen der Pulverherstellung sollte sich primär auf eine energieeffiziente Schutzgasgewinnung sowie auf die Implementierung einer möglichen Kreislaufführung des Schutzgases fokussiert werden.
- ❑ Es bedarf zudem einer weiterführenden Analyse der Umweltauswirkungen der Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen. Hierbei ist zu untersuchen, ob hierbei Unterschiede im Energie- und Materialbedarf zwischen zunächst additiv gefertigten Bauteilen und Bauteilen bestehen, die direkt subtraktiv oder formativ hergestellt werden. Weiterhin kann das Modell zur Abschätzung des KEA und des GWP der Nachbearbeitung von HS DED-LB gefertigten Bauteilen zum einen durch die Ergänzung weiterer Nachbearbeitungsprozesse erweitert werden und zum anderen die bestehenden Teilmodelle durch die Berücksichtigung weiterer Materialflüsse weiter detailliert und präzisiert werden.
- ❑ Das abstrahierte Vorgehen zur Entwicklung eines Prognosemodells für den Energiebedarf ist hinsichtlich seiner Übertragbarkeit auf weitere additive Fertigungsprozesse zu prüfen und eine Übertragung auf subtraktive und formative Fertigungssysteme zu erproben sowie die hierfür notwendigen Voraussetzungen und Anpassungen zu ermitteln.

Es existieren einige identifizierte Forschungsbedarfe, die für die Weiterentwicklung und Optimierung der Nachhaltigkeit des HS DED-LB-Prozesses von zentraler Bedeutung sind. Ein besonders relevantes Handlungsfeld ist die Ressourceneffizienz, insbesondere im Hinblick auf die Pulverauftragsrate und die Wiederverwendung von nicht aufgetragenem Pulver. Hier liegen erhebliche Potenziale zur Reduzierung von Materialverlusten und damit von Umweltbelastungen. Darüber hinaus bildet die Weiterentwicklung und Präzisierung des entwickelten Prognosemodells die Grundlage für eine energieeffiziente Prozessauslegung, die mit einer ressourceneffizienten Prozessgestaltung koordiniert werden sollte. Dies kann zusammen mit der Erprobung des Einsatzes von Stickstoff anstelle von Argon als Schutzgas die Umweltauswirkungen des HS DED-LB Prozesses deutlich reduzieren. Darüber hinaus ist die Nachhaltigkeit des gesamten HS DED-LB-Prozesses ein wesentliches Forschungsfeld. Dies umfasst sowohl eine ganzheitliche ökologische Bewertung über den gesamten Lebenszyklus als auch soziale und ökonomische Aspekte, die für eine industrielle Adaption berücksichtigt werden müssen. Untersuchungen zur Wiederverwendung des Schutzgases in der Gasverdüsung können zu einer signifikanten Reduktion der Umweltauswirkungen in der Prozesskette beitragen. Schließlich sind Analysen zu den Umweltauswirkungen der Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile erforderlich, da diese Prozesse einen erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz haben können, woraus sich die Notwendigkeit einer engen Abstimmung des HS DED-LB-Prozesses mit den Nachbearbeitungsprozessen ergibt. Die energie- und ressourceneffiziente Auslegung der gesamten Prozesskette ermöglicht eine signifikante Reduzierung der Umweltauswirkungen des HS DED-LB-Prozesses, wodurch dieser zu einer nachhaltigen Produktion beitragen kann.

## 7 Quellenverzeichnis

- [Al-G19] K.A. Al-Ghamdi: Sustainable FDM additive manufacturing of ABS components with emphasis on energy minimized and time efficient lightweight construction. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 2/4 (2019): S. 338-345. 10.1016/j.ijlmm.2019.05.004
- [Al-M18] Y. Al-Meslemi, N. Anwer, L. Mathieu: Environmental Performance and Key Characteristics in Additive Manufacturing: A Literature Review. *Procedia CIRP* 69 (2018): S. 148-153. 10.1016/j.procir.2017.11.141
- [Anto03] L.V.M. Antony, R.G. Reddy: Processes for production of high-purity metal powders. *JOM* 55/3 (2003): S. 14-18. 10.1007/s11837-003-0153-4
- [Atze21] E. Atzeni, A.R. Catalano, P.C. Priarone, A. Salmi: The technology, economy, and environmental sustainability of isotropic superfinishing applied to electron-beam melted Ti-6Al-4V components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 117/1-2 (2021): S. 437-453. 10.1007/s00170-021-07739-3
- [Ausb15] L. Ausberg, A. Ciroth, S. Feifel, J. Franze, M. Kaltschmitt, I. Klemmayer, K. Meyer, P. Saling, L. Schebek, J. Weinberg, C. Wulf: Lebenszyklusanalysen. In: Kaltschmitt, M.; Schebek L. (Hrsg.): *Umweltbewertung für Ingenieure*, Springer (2015): S. 203-314. 10.1007/978-3-642-36989-6\_5
- [Awad08] S.B. Awad, R. Nagarajan: Ultrasonic Cleaning. In: Kohli, R.; Mittal, K. L. (Hrsg.): *Development in Surface Contamination and Cleaning*, William Andrew (2008): S. 225-280. ISBN: 978-1-4377-7830-4
- [Azev18] J.M. Azevedo, A. Cabrera Serrenho, J.M. Allwood: Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. *Powder Technology* 328 (2018): S. 329-336. 10.1016/j.powtec.2018.01.009
- [Baeh16] H.D. Baehr, S. Kabelac: *Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen*. 16. Auflage. Springer, (2016). 10.1007/978-3-662-49568-1
- [Balo15] V.A. Balogun, N. Kirkwood, P.T. Mativenga: Energy consumption and carbon footprint analysis of Fused Deposition Modelling: A case study of RP Stratasys Dimension SST FDM. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6/8 (2015): S. 442-447. ISSN: 2229-5518
- [Bamb17] M.D. Bambach, M. Bambach, A. Sviridov, S. Weiss: New process chains involving additive manufacturing and metal forming – a chance for saving energy? *Procedia Engineering* 207 (2017): S. 1176-1181. 10.1016/j.proeng.2017.10.1049
- [Bart15] G. Bartzas, K. Komnitsas: Life cycle assessment of ferronickel production in Greece. *Resources, Conservation and Recycling* 105 (2015): S. 113-122. 10.1016/j.resconrec.2015.10.016
- [Bass13] J. Basson, J. Daavittila: High Carbon Ferrochrome Technology. In: Gasik, M. (Hrsg.): *Handbook of ferroalloys*, Butterworth-Heinemann Ltd, (2013): S. 317-363. 10.1016/B978-0-08-097753-9.00009-5
- [Baum17] M. Baumers, J.R. Dufflou, W. Flanagan, T.G. Gutowski, K. Kellens, R. Lifset: Charting the Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing. *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017): 9-14. 10.1111/jiec.12668
- [Baum13] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, E. Rosamond, R. Hague: Transparency Built-in: Energy Consumption and Cost Estimation for Additive Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology* 17/3 (2013): S. 418-431. 10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x
- [Baum11] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildmann, I. Ashcroft, R. Hague: Energy Inputs to additive Manufacturing: Does Capacity Utilization Matter. *Eos* 1000/270 (2011): S. 30-40. 10.26153/tsw/15275

- [Beck05] J. Becker, M. Kugeler, M. Rosemann: Prozessmanagement – Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 5. Auflage. Springer, (2005). ISBN: 3-540-23493-4
- [Bjør18] A. Bjørn, M.Z. Hauschild: Cradle to Cradle and LCA. In: Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Hrsg.): Life Cycle Assessment – Theory and Practice, Springer, (2018): S. 605-631. 10.1007/978-3-319-56475-3\_25
- [Bjør18] A. Bjørn, M. Owsianiak, A. Laurent, S.I. Olsen, A. Corona, M.Z. Hauschild: Scope Definition. In: Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Hrsg.): Life Cycle Assessment – Theory and Practice, Springer, (2018): S. 75-116. 10.1007/978-3-319-56475-3\_8
- [Bocc83] G.F. Bocchini: Energy Requirements of Structural Components: Powder Metallurgy v. Other Production Processes. Powder Metallurgy 26/2 (1983): S. 101-113. 10.1179/pom.1983.26.2.101
- [Bonv13] J. Bonvoisin, S. Thiede, D. Brissaud, C. Herrmann: An implemented framework to estimate manufacturing-related energy consumption in product design. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 26/9 (2013): S. 866-880. 10.1080/0951192X.2013.799782
- [Boul04] M. Boulos: Plasma power can make better powders. Metal Powder Report 59/5 (2004): S. 16-21. 10.1016/S0026-0657(04)00153-5
- [Bour17] D. Bourell, J.P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, A. Clare: Materials for additive manufacturing. CIRP Annals 66/2 (2017): S. 659-681. 10.1016/j.cirp.2017.05.009
- [Bour16] D.L. Bourell: Perspectives on Additive Manufacturing. Annual Review of Materials Research 46/1 (2016): S. 1-18. 10.1146/annurev-matsci-070115-031606
- [Breu13] J. Breuninger, R. Becker, A. Wolf, S. Rommel, A. Verl: Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Springer, (2013). 10.1007/978-3-642-24325-7
- [Büch00] K.H. Büchel, H.-H. Moretto, P. Woditsch: Industrial inorganic chemistry. 2. Auflage, Wiley-VCH, (2000). ISBN: 978-3-527-29849-5
- [Burc13] D. Burchart-Korol: Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. Journal of Cleaner Production 54 (2013): S. 235-243. 10.1016/j.jclepro.2013.04.031
- [Camp19a] A. Campitelli, J. Cristóbal, J. Fischer, B. Becker, L. Schebek: Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology. Journal of Cleaner Production 222 (2019): S. 464-475. 10.1016/j.jclepro.2019.03.073
- [Camp19b] A. Campitelli, J. Cristóbal, J. Fischer, B. Becker, L. Schebek: Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology – Supplementary material. Journal of Cleaner Production 222 (2019): S. 464-475. 10.1016/j.jclepro.2019.03.073
- [Chen15] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J.G. Steingrímsson, S. Thiede: Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. Journal of Cleaner Production 107 (2015): S. 615-625. 10.1016/j.jclepro.2015.05.009
- [CIIC19] China Internet Information Center (CIIC): Chinesische Provinz Guizhou hat Asiens größtes Manganerzvorkommen. <[http://german.china.org.cn/txt/2019-06/18/content\\_74896145.htm](http://german.china.org.cn/txt/2019-06/18/content_74896145.htm)> – 30.07.2023.
- [Choi16] H. Choi, J.M. Byun, W. Lee, S.-R. Bang, Y.D. Kim: Research Trend of Additive Manufacturing Technology. J. Korean Powder Metall. Inst. 23/2 (2016): S. 149-169. 10.4150/KPMI.2016.23.2.149
- [Clay14] J. Clayton: Optimising metal powders for additive manufacturing. Metal Powder Report 69/5 (2014): S. 14-17. 10.1016/S0026-0657(14)70223-1

- [Colo20] H.A. Colorado, E.I.G. Velásquez, S.N. Monteiro: Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology* 9/4 (2020): S. 8221-8234. 10.1016/j.jmrt.2020.04.062
- [Cook20] S. Cooke, K. Ahmadi, S. Willerth, R. Herring: Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. *Journal of Manufacturing Processes* 57 (2020): S. 978-1003. 10.1016/j.jmapro.2020.07.025
- [Curr14] M.A. Curran: Strengths and Limitations of Life Cycle Assessment. In: Klöpffer, W. (Hrsg.): *Background and future prospects in life cycle assessment*, Springer, (2014): S. 189-206. 10.1007/978-94-017-8697-3\_6
- [Curr13] M.A. Curran: Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering* 2/3 (2013): S. 273-277. 10.1016/j.coche.2013.02.002
- [Dahm04] J.B. Dahmus, T.G. Gutowski: An Environmental Analysis of Machining. *ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (2004): S. 643-652. 10.1115/IMECE2004-62600
- [Davi20] W. Davis, V. Lunetto, P.C. Priarone, D. Centea, L. Settineri: An appraisal on the sustainability payback of additively manufactured molds with conformal cooling. *Procedia CIRP* 90 (2020): S. 516-521. 10.1016/j.procir.2020.01.064
- [Dawe15] J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton: Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. *Johnson Matthey Technology Review* 59/3 (2015): S. 243-256. 10.1595/205651315X688686
- [DE19] DE102018114883 A1: O. Schulte: Vorrichtung und Verfahren zum (Hochgeschwindigkeits-) Laserauftragschweißen, Anmeldedatum: 20.06.2018
- [DE12] DE 10 2011 100 456: W. Küppers, G. Backes, J. Kittel: Extremes Hochgeschwindigkeitslaserauftragsschweißverfahren, Anmeldedatum: 04.05.2011.
- [Desp15] M. Despeisse, S. Ford: The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. *IFIP International Federation for Information Processing* 460 (2015): S. 129-136. 10.1007/978-3-319-22759-7\_15
- [Desp17] M. Despeisse, M. Yang, S. Evans, S. Ford, T. Minshall: Sustainable Value Roadmapping Framework for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 61 (2017): S. 594-599. 10.1016/j.procir.2016.11.186
- [DEW21] Swiss Steel Group, Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG: *Printdur*. <[https://www.dew-powder.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/Brosch\\_8S\\_Printdur\\_DE\\_2021-0004\\_de-SSG\\_2\\_072023\\_web.pdf](https://www.dew-powder.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/Brosch_8S_Printdur_DE_2021-0004_de-SSG_2_072023_web.pdf)> - 02.06.2024.
- [Diaz11] N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld: Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering* (2011): S. 263-267. 10.1007/978-3-642-19692-8\_46
- [Dieg19] O. Diegel, A. Nordin, D. Motte: *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer, (2019). 10.1007/978-981-13-8281-9
- [Diet09] A. Dietmair, A. Verl: A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing. *International Journal of Sustainable Engineering* 2/2 (2009): S. 123-133. 10.1080/19397030902947041

- [Diet16] S. Dietrich, M. Wunderer, A. Huissel, M.F. Zaeh: A New Approach for a Flexible Powder Production for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 6 (2016): S. 88-95. 10.1016/j.promfg.2016.11.012
- [DIN22] DIN 8580:2022: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. (2022). 10.31030/9500683
- [DIN21a] DIN EN ISO 6501:2021-03: Ferronickel – Spezifikation und Lieferbedingungen. (2021). 10.31030/3232114
- [DIN21b] DIN EN ISTO/ASTM 52900:2021: Additive Fertigung – Grundlagen, Terminologie. (2021). 10.31030/3290011
- [DIN18a] DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. (2018). 10.31030/2761237
- [DIN18b] DIN EN ISO 14067: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. (2018). 10.31030/2851769
- [DIN17] DIN EN ISO/ASTM 52900:2017 (D): Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. (2017). 10.31030/2631641
- [DIN16] DIN EN ISO 17296-2: Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe. (2016). 10.31030/2580024
- [DIN15] DIN EN ISO 9000:2015: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. (2015). 10.31030/2325650
- [DIN14] DIN EN 10088-3:2014-12: Nichtrostende Stähle – Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung. (2014). 10.31030/2102108
- [DIN13] DIN IEC 60050-351:2013: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leitetchnik. (2013). 10.31030/2159569
- [DIN09] DIN EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. (2009). 10.31030/3179655
- [DIN04] DIN 17561:2004-02: Ferromolybdän- Technische Lieferbedingungen. (2004). 10.31030/9531250
- [Dong19] K. Dong, H. Jiang, R. Sun, X. Dong: Driving forces and mitigation potential of global CO<sub>2</sub> emissions from 1980 through 2030: Evidence from countries with different income levels. *The Science of the total environment* 649 (2019): S. 335-343. 10.1016/j.scitotenv.2018.08.326
- [Dopl21] M. Dopler, C. Weiß: Energy Consumption in Metal Powder Production. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 166/1 (2021): S. 2-8. 10.1007/s00501-020-01068-w
- [Dube15] R. Dubey, A. Gunasekaran, A. Chakrabarty: World-class sustainable manufacturing: framework and a performance measurement system. *International Journal of Production Research* 53/17 (2015): S. 5207-5223. 10.1080/00207543.2015.1012603
- [Dufl12] J.R. Duflou, J.W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, K. Kellens: Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals* 61/2 (2012): S. 587-609. 10.1016/j.cirp.2012.05.002
- [Dunk13] J.J. Dunkley: Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders. *Advances in Powder Metallurgy* (2013): S. 3-18. 10.1533/9780857098900.1.3
- [Ehms25] S. Ehmsen, J. Conrads, M. Klar, J.C. Aurich: Environmental Impact of Powder Production for Additive Manufacturing: Carbon Footprint and Cumulative Energy Demand of Gas Atomization (Preprint - under Review). *Journal of Manufacturing Systems* (2025). 10.21203/rs.3.rs-6202700/v1

- [Ehms23a] S. Ehmsen, L. Yi, M. Glatt, B.S. Linke, J.C. Aurich: Reusable unit process life cycle inventory for manufacturing: high speed laser directed energy deposition. *Production Engineering* (2023). 10.1007/s11740-023-01197-4
- [Ehms23b] S. Ehmsen, M. Glatt, J.C. Aurich: Influence of process parameters on the power consumption of high-speed laser directed energy deposition. *Procedia CIRP* 116 (2023): S. 89-94. 10.1016/j.procir.2023.02.016
- [Ehms23c] S. Ehmsen, L. Yi, M.F. Glatt, J.C. Aurich: Evaluating the environmental impact of high-speed laser directed energy deposition: A life cycle assessment. *56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23, South Africa* 120 (2023): S. 1606-1611. 10.1016/j.procir.2023.12.003
- [Ehms23d] S. Ehmsen, M. Glatt, B.S. Linke, J.C. Aurich: A Methodology for Developing a Model for Energy Prediction in Additive Manufacturing Exemplified by High-Speed Laser Directed Energy Deposition. In: Aurich, J.C.; Garth, C.; Linke, B.S. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes*, Springer, (2023): S. 189-212. 10.1007/978-3-031-35779-4\_11
- [Ehms21] S. Ehmsen, L. Yi, J.C. Aurich: Process Chain Analysis of Directed Energy Deposition: Energy flows and their influencing factors. *Procedia CIRP* 98 - 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (2021): S. 607-612. 10.1016/j.procir.2021.01.162
- [EIGA10] European Industrial Gases Association (EIGA): Indirect CO2 emissions compensation: – Benchmark proposal for Air Separation Plants. Position Paper 33/19, (2010).
- [EU22] European Parliament, European Commission: Zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. (2022).
- [EU12] Europäische Union (EU): Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG. (2012).
- [Falu17] J. Faludi, M. Baumers, I. Maskery, R. Hague: Environmental Impacts of Selective Laser Melting: Do Printer, Powder, Or Power Dominate? *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017): 144-156. 10.1111/jiec.12528
- [Falu15] J. Faludi, C. Bayley, S. Bhogal, M. Iribarne: Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal* 21/1 (2015): S. 14-33. 10.1108/RPJ-07-2013-0067
- [Fern17] D. Fernández-González, I. Ruiz-Bustanza, J. Mochón, C. González-Gasca, L.F. Verdeja: Iron Ore Sintering: Process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 38/4 (2017): S. 215-227. 10.1080/08827508.2017.1288115
- [Ford16] S. Ford, M. Despeisse: Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137 (2016): S. 1573-1587. 10.1016/j.jclepro.2016.04.150
- [Fred19] C. Fredriksson: Sustainability of metal powder additive manufacturing. *Procedia Manufacturing* 33 (2019): S. 139-144. 10.1016/j.promfg.2019.04.018
- [Fris20] R. Frischknecht: *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. 1. Auflage. 2020. Springer, (2020). 10.1007/978-3-662-54763-2
- [Frit18] A.H. Fritz, J. Schmütz, B. Wieneke-Toutaoui: Urformen. In: Fritz, A.H. (Hrsg.): *Fertigungstechnik*, Springer, (2018): S. 7-132. 10.1007/978-3-662-56535-3\_2

- [Fu14] D. Fu, C.Q. Zhou, Y. Chen: Numerical Methods for Simulating the Reduction of Iron Ore in Blast Furnace Shaft. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 6/2 (2014): 021014. 10.1115/1.4025946
- [Gada17] A. Gadatsch: *Grundkurs Geschäftsprozess-Management – Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen*. 8. Auflage. Springer, (2017). 10.1007/978-3-658-17179-7
- [Gasi13] M. Gasik: Technology of Molybdenum Ferroalloys. In: Gasik, M. (Hrsg.): *Handbook of ferroalloys*, Butterworth-Heinemann Ltd, (2013): S. 387-396. 10.1016/B978-0-08-097753-9.00012-5
- [Geb114] M. Gebler, A.J. Schoot Uiterkamp, C. Visser: A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74 (2014): S. 158-167. 10.1016/j.enpol.2014.08.033
- [Gebh13] A. Gebhardt: *Generative Fertigungsverfahren – Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping ; Tooling ; Produktion*. 4. Auflage. Carl Hanser Fachbuchverlag, (2013). ISBN: 978-3-446-43652-7
- [Ghos10] A. Ghosh, A. Chatterjee: *Ironmaking and steelmaking – Theory and practice*. 3. Auflage. PHI Learning, (2010). ISBN: 978-81-203-3289-8
- [Gibs21] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani: *Additive manufacturing technologies*. 3. Auflage. Springer, (2021). ISBN: 978-3-030-56127-7
- [Gibs15] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: *Additive manufacturing technologies – 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. 2. Auflage. Springer, (2015). ISBN: 978-1-4939-2113-3
- [Glat21] M. Glatt, S. Greco, L. Yi, B. Kirsch, J.C. Aurich: Development and implementation of a system for the automated removal of parts produced by Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 103 (2021): S. 109-114. 10.1016/j.procir.2021.10.017
- [Graf12] B. Graf, A. Gumenyuk, M. Rethmeier: Laser Metal Deposition as Repair Technology for Stainless Steel and Titanium Alloys. *Physics Procedia* 39 (2012): S. 376-381. 10.1016/j.phpro.2012.10.051
- [Gu12] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe: Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews* 57/3 (2012): S. 133-164. 10.1179/1743280411Y.0000000014
- [Gu09] D. Gu, Y. Shen: Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design* 30/8 (2009): S. 2903-2910. 10.1016/j.matdes.2009.01.013
- [Gülc21] O. Gülcan, K. Günaydın, A. Tamer: The State of the Art of Material Jetting – A Critical Review. *Polymers* 13/16 (2021). 10.3390/polym13162829
- [Guo20] K. Guo, C. Liu, S. Chen, H. Dong, S. Wang: High pressure EIGA preparation and 3D printing capability of Ti6Al4V powder. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 30/1 (2020): S. 147-159. 10.1016/S1003-6326(19)65187-3
- [Gupt19] K. Gupta: *Innovations in Manufacturing for Sustainability*. Springer, (2019). ISBN: 978-3-030-03275-3
- [Guto17] T. Gutowski, S. Jiang, D. Cooper, G. Corman, M. Hausmann, J.-A. Manson, T. Schudeleit, K. Wegener, M. Sabelle, J. Ramos-Grez, D.P. Sekulic: Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017): S69-S79. 10.1111/jiec.12664
- [Guto06] T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez: Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. 13th CIRP international conference on life cycle engineering 31/1 (2006): S. 623-628.

- [Hamu21] J. Hamuyuni, H. Johto, A. Bunjaku, S. Vatanen, T. Pajula, P. Mäkelä, M. Lindgren: Simulation-based life cycle assessment of ferrochrome smelting technologies to determine environmental impacts. *Journal of Cleaner Production* 295 (2021): 126503. 10.1016/j.jclepro.2021.126503
- [Haqu22] N. Haque: Life cycle assessment of iron ore mining and processing. In: Lu, L. (Hrsg.): *Iron ore – Mineralogy, processing and environmental sustainability*, Woodhead Publishing, (2022): S. 691-710. 10.1016/B978-0-12-820226-5.00007-0
- [Haqu13] N. Haque, T. Norgate: Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia. *Journal of Cleaner Production* 39 (2013): S. 220-230. 10.1016/j.jclepro.2012.08.010
- [Haus18] M.Z. Hauschild: Introduction to LCA Methodology. In: Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Hrsg.): *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*, Springer, (2018): S. 59-66. 10.1007/978-3-319-56475-3\_6
- [Herr21] C. Herrmann, O. Vetter: *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion*. VDI-Zentrum Ressourceneffizienz, (2021).
- [Herr10] C. Herrmann: *Ganzheitliches Life Cycle Management – Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Springer, (2010). ISBN: 978-3-642-01421-5
- [Herz16] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann: Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117 (2016): S. 371-392. 10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [Hoeg17] S. Hoeges, A. Zwiren, C. Schade: Additive manufacturing using water atomized steel powders. *Metal Powder Report* 72/2 (2017): S. 111-117. 10.1016/j.mprp.2017.01.004
- [Hsia21] T.-C. Hsiao, N.-C. Vu, M.-C. Tsai, X.-P. Dang, S.-C. Huang: Modeling and optimization of machining parameters in milling of INCONEL-800 super alloy considering energy, productivity, and quality using nanoparticle suspended lubrication. *Measurement and Control* 54/5-6 (2021): S. 880-894. 10.1177/0020294020925842
- [Huan16] R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E. Masanet: Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016): S. 1559-1570. 10.1016/j.jclepro.2015.04.109
- [Huan15] Y. Huang, M.C. Leu, J. Mazumder, A. Donmez: Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137/1 (2015): 014001. 10.1115/1.4028725
- [Inga20] G. Ingarao, P.C. Priarone: A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches. *Journal of Manufacturing Processes* 56 (2020): S. 1219-1229. 10.1016/j.jmapro.2020.06.009
- [IPCC21] Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate change 2021 – The physical science basis: summary for policymakers: working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, (2021). ISBN: 978-92-9169-158-6
- [Iqba16] A. Iqbal, K.A. Al-Ghamdi, G. Hussain: Effects of tool life criterion on sustainability of milling. *Journal of Cleaner Production* 139 (2016): S. 1105-1117. 10.1016/j.jclepro.2016.08.162
- [Jack16] M.A. Jackson, A. van Asten, J.D. Morrow, S. Min, F.E. Pfefferkorn: A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 5 (2016): S. 989-1005. 10.1016/j.promfg.2016.08.087
- [Jian19] Q. Jiang, Z. Liu, T. Li, W. Cong, H.-C. Zhang: Emergy-based life-cycle assessment (Em-LCA) for sustainability assessment: a case study of laser additive manufacturing versus CNC

- machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102/9-12 (2019): S. 4109-4120. 10.1007/s00170-019-03486-8
- [John08] J. Johnson, B.K. Reck, T. Wang, T.E. Graedel: The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy* 36/1 (2008): S. 181-192. 10.1016/j.enpol.2007.08.028
- [Jung23] S. Jung, L.B. Kara, Z. Nie, T.W. Simpson, K.S. Whitefoot: Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production? *Environmental science & technology* 57/16 (2023): S. 6373-6386. 10.1021/acs.est.2c04927
- [Kaki16] Y. Kakinuma, M. Mori, Y. Oda, T. Mori, M. Kashihara, A. Hansel, M. Fujishima: Influence of metal powder characteristics on product quality with directed energy deposition of Inconel 625. *CIRP Annals* 65/1 (2016): S. 209-212. 10.1016/j.cirp.2016.04.058
- [Kalp10] S. Kalpakjian, S. Schmid: *Manufacturing engineering and technology*. 6. Auflage. Prentice Hall, (2010). ISBN: 978-0-13-608168-5
- [Kara20] I. Karakurt, L. Lin: 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. *Current Opinion in Chemical Engineering* 28 (2020): S. 134-143. 10.1016/j.coche.2020.04.001
- [Kara11] S. Kara, W. Li: Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals* 60/1 (2011): S. 37-40. 10.1016/j.cirp.2011.03.018
- [Kell17a] K. Kellens, M. Baemers, T.G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J.R. Dufloy: Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications. *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017): 49-68. 10.1111/jiec.12629
- [Kell17b] K. Kellens, R. Mertens, D. Paraskevas, W. Dewulf, J.R. Dufloy: Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? *Procedia CIRP* 61 (2017): S. 582-587. 10.1016/j.procir.2016.11.153
- [Kell13] K. Kellens: *Energy and Resource Efficient Manufacturing*. Dissertation, KU Leuven, (2013).
- [Kell11] K. Kellens, E. Yasa, R. Renaldi, W. Dewulf, J.P. Kruth, J.R. Dufloy: Energy and Resource Efficiency of SLS/SLM Processes. *Proceedings 22th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (2011): S. 1-16. 10.26153/tsw/15272
- [Kerb16] O. Kerbrat, F. Le Bourhis, P. Mognol, J.-Y. Hascoët: Environmental Impact Assessment Studies in Additive Manufacturing. *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing 2* (2016): S. 31-63. 10.1007/978-981-10-0606-7\_2
- [Kero19] I.T. Kero, P.A. Eidem, Y. Ma, H. Indresand, T.A. Aarhaug, S. Grådahl: Airborne Emissions from Mn Ferroalloy Production. *JOM* 71/1 (2019): S. 349-365. 10.1007/s11837-018-3165-9
- [Kirc17] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017): S. 221-232. 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- [Klah18] C. Klahn, M. Meboldt: *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung – Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten*. 1. Auflage. Vogel Business Media, (2018). ISBN: 9783834333957
- [Klau08] P. Klaus, W. Krieger: *Gabler Lexikon Logistik – Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. 4. Auflage. Gabler, (2008). ISBN: 978-3-8349-0149-1
- [Kloc15] F. Klocke: *Fertigungsverfahren 5 – Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing*. 4. Auflage. Springer, (2015). ISBN: 978-3-540-69512-7
- [Klop09] W. Klöpffer, B. Grahl: *Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley-VCH, (2009). 10.1002/9783527627158
- [Krut98] J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa: Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals* 47/2 (1998): S. 525-540. 10.1016/S0007-8506(07)63240-5

- [Kruz12] V. Kruzhanov, V. Arnhold: Energy consumption in powder metallurgical manufacturing. *Powder Metallurgy* 55/1 (2012): S. 14-21. 10.1179/174329012X13318077875722
- [Kumb18] N.N. Kumbhar, A.V. Mulay: Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 99/4 (2018): S. 481-487. 10.1007/s40032-016-0340-z
- [Kumk18] M. Kumke: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, (2018). 10.1007/978-3-658-22209-3
- [Kust23] P. Kustron, M. Korzeniowski, A. Sajbura, T. Piwowarczyk, P. Kaczynski, P. Sokolowski: Development of High-Power Ultrasonic System Dedicated to Metal Powder Atomization. *Applied Sciences* 13/15 (2023): 8984. 10.3390/app13158984
- [Laur17] R.E. Laureijs, J.B. Roca, S.P. Narra, C. Montgomery, J.L. Beuth, E.R.H. Fuchs: Metal Additive Manufacturing: Cost Competitive Beyond Low Volumes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 139/8 (2017): 081010. 10.1115/1.4035420
- [LeBo14] F. Le Bourhis, O. Kerbrat, L. Dembinski, J.-Y. Hascoet, P. Mognol: Predictive Model for Environmental Assessment in Additive Manufacturing Process. *Procedia CIRP* 15 (2014): S. 26-31. 10.1016/j.procir.2014.06.031
- [LeBo13] F. Le Bourhis, O. Kerbrat, J.-Y. Hascoet, P. Mognol: Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69/9-12 (2013): S. 1927-1939. 10.1007/s00170-013-5151-2
- [Lehm16] D. Lehmhus, C. Aumund-Kopp, F. Petzoldt, D. Godlinski, A. Haberkorn, V. Zöllmer, M. Busse: Customized Smartness: A Survey on Links between Additive Manufacturing and Sensor Integration. *Procedia Technology* 26 (2016): S. 284-301. 10.1016/j.protcy.2016.08.038
- [Li19] T. Li, L. Zhang, G.G.P. Bultel, T. Schopphoven, A. Gasser, J.H. Schleifenbaum, R. Poprawe: Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA) of AISI 4340 Steel. *Coatings* 9/12 (2019): 778. 10.3390/coatings9120778
- [Link17] B. Linke, M. Overcash: Reusable unit process life cycle inventory for manufacturing: grinding. *Production Engineering* 11/6 (2017): S. 643-653. 10.1007/s11740-017-0768-x
- [Liu18a] Z. Liu, Q. Jiang, W. Cong, T. Li, H.-C. Zhang: Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes. *International Journal of Environmental Science and Technology* 15/11 (2018): S. 2273-2282. 10.1007/s13762-017-1622-6
- [Liu18b] Z. Liu, Q. Jiang, F. Ning, H. Kim, W. Cong, C. Xu, H.-C. Zhang: Investigation of Energy Requirements and Environmental Performance for Additive Manufacturing Processes. *Sustainability* 10/10 (2018): 3606. 10.3390/su10103606
- [Liu16] N. Liu, S.B. Wang, Y.F. Zhang, W.F. Lu: A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075. *International Journal of Mechanical Sciences* 118 (2016): S. 13-20. 10.1016/j.ijmecsci.2016.09.002
- [Long19] Y. Long, F. Bai, Y. Zhang, K.-A. Saalbach, J. Twiefel: Impacts of ultrasound on oxide removal – An attempt towards acid-free cleaning. *Ultrasonics sonochemistry* 57 (2019): S. 1-11. 10.1016/j.ultsonch.2019.05.003
- [Lyon21] R. Lyons, A. Newell, P. Ghadimi, N. Papakostas: Environmental impacts of conventional and additive manufacturing for the production of Ti-6Al-4V knee implant: a life cycle approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112/3-4 (2021): S. 787-801. 10.1007/s00170-020-06367-7

- [Ma21] Z. Ma, M. Gao, Q. Wang, N. Wang, L. Li, C. Liu, Z. Liu: Energy consumption distribution and optimization of additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 116/11-12 (2021): S. 3377-3390. 10.1007/s00170-021-07653-8
- [Ma17] K. Ma, T. Smith, E.J. Lavernia, J.M. Schoenung: Environmental Sustainability of Laser Metal Deposition: The Role of Feedstock Powder and Feedstock Utilization Factor. *Procedia Manufacturing* 7 (2017): S. 198-204. 10.1016/j.promfg.2016.12.049
- [Madi13] J. Madias: Electric Furnace Steelmaking. In: Seetharaman, S. (Hrsg.): *Treatise on Process Metallurgy*, Elsevier Science, (2013): S. 271-300. 10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4
- [Male21] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. Guagliano: Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities. *Additive Manufacturing* 37 (2021): 101619. 10.1016/j.addma.2020.101619
- [Matt21] J. Matthews, V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger: *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2021)*.
- [Matt18] T.J. Mattila: Use of Input–Output Analysis in LCA. In: Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Hrsg.): *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*, Springer, (2018): S. 349-372. 10.1007/978-3-319-56475-3\_14
- [Maye42] J.R. von Mayer: Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. *Liebigs Ann* 42 (1842): S. 233-240.
- [Meta18] Metals Hub GmbH: Ferrochrome plants & their annual production capacity. <<https://www.metals-hub.com/en/blog/ferrochrome-plants-worldwide-and-their-annual-production-capacity/>> – 30.07.2023.
- [Mogn06] P. Mognol, D. Lopicart, N. Perry: Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal* 12/1 (2006): S. 26-34. 10.1108/13552540610637246
- [Mora10] M. Morakotjinda, K. Fakpan, T. Yotkaew, N. Tosangthum, R. Krataithong, A. Daraphan, P. Siriphon, P. Wila, B. Vetayanugul, R. Tongsri: Gas Atomization of Low Melting-Point Metal Powders. *Chiang Mai Journal of Science* 37/1 (2010): S. 55-63.
- [Morr07] W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos: Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 15/10 (2007): S. 932-943. 10.1016/j.jclepro.2005.11.030
- [Müll09] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler, J. Strauch: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer, (2009). 10.1007/978-3-540-89644-9
- [Muth16] S.S. Muthu, M.M. Savalani: *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing*. 2. Auflage. Springer, (2016). 10.1007/978-981-10-0606-7
- [Myhr13] G.D. Myhre, F.-M. Shindell, W. Bréon, J. Collins, J. Fuglestvedt, D. Huang, J.-F. Koch, D. Lamarque, B. Mendoza: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex V.; Midgley, P.M. (Hrsg.): *Anthropogenic and Natural Radiative Forc- Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, (2013).
- [Nasr02] G.G. Nasr, A.J. Yule, L. Bendig: *Industrial sprays and atomization – Design, analysis and applications*. Springer, (2002). 10.1007/978-1-4471-3816-7

- [Ning15] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang: Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering* 80 (2015): S. 369-378. 10.1016/j.compositesb.2015.06.013
- [Norg10] T. Norgate, N. Haque: Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18/3 (2010): S. 266-274. 10.1016/j.jclepro.2009.09.020
- [Norg07] T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W.J. Rankin: Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production* 15/8-9 (2007): S. 838-848. 10.1016/j.jclepro.2006.06.018
- [Ochs21] D. Ochs, K.K. Wehnert, J. Hartmann, A. Schiffler, J. Schmitt: Sustainable Aspects of a Metal Printing Process Chain with Laser Powder Bed Fusion (LPBF). *Procedia CIRP* 98 (2021): S. 613-618. 10.1016/j.procir.2021.01.163
- [Olse07] S.E. Olsen, M. Tangstad, T. Lindstad: *Production of manganese ferroalloys*. Tapir Akademisk Forlag, (2007). ISBN: 978-82-519-2191-6
- [Pand11] D. Pandey, M. Agrawal, J.S. Pandey: Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental monitoring and assessment* 178/1-4 (2011): S. 135-160. 10.1007/s10661-010-1678-y
- [Pari16] H. Paris, H. Mokhtarian, E. Coatanéa, M. Museau, I.F. Ituarte: Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals* 65/1 (2016): S. 29-32. 10.1016/j.cirp.2016.04.036
- [Pate19] N. Patel, S. Standbridge, M. van den Berghe, V. Devalaraju: Design and Additive Manufacturing Considerations for Liquid Rocket Engine Development. *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*. (2019): 4392. 10.2514/6.2019-4392
- [Peng21] X. Peng, L. Kong, J.Y.H. Fuh, H. Wang: A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5/2 (2021): 38. 10.3390/jmmp5020038
- [Peng18] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, G. Chen: Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing* 21 (2018): S. 694-704. 10.1016/j.addma.2018.04.022
- [Peng17] S. Peng, T. Li, X. Wang, M. Dong, Z. Liu, J. Shi, H. Zhang: Toward a Sustainable Impeller Production: Environmental Impact Comparison of Different Impeller Manufacturing Methods. *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017). 10.1111/jieec.12628
- [Pere20] J.C.P. Perera: *Sustainability-Based Expert System for Additive Manufacturing and CNC Machining*. Dissertation, West Virginia University, (2020). 10.33915/etd.7719
- [Père06] F. Pérès, D. Noyes: Envisioning e-logistics developments: Making spare parts in situ and on demand. *Computers in Industry* 57/6 (2006): S. 490-503. 10.1016/j.compind.2006.02.010
- [Petr11] V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramón Blasco Puchades, L. Portolés Griñan: Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research* 49/4 (2011): S. 1061-1079. 10.1080/00207540903479786
- [Poly22] D.E. Polyak: *2018 Minerals Yearbook – Molybdenum*. U.S. Department of the Interior (USGS), (2022).
- [Pont24] Ponticon GmbH: *3DMD Dynamic Material Deposition – Neue Dimensionen im Laserauftragsschweißen*. <<https://ponticon.de/>> – 06.01.2024.
- [Popr15] R. Poprawe, C. Hinke, W. Meiners, J. Schrage, S. Bremen, S. Merkt: SLM Production Systems: Recent Developments in Process Development, Machine Concepts and Component Design. In:

- Brecher, C. (Hrsg.): *Advances in production technology*, Springer, (2015): S. 49-65. 10.1007/978-3-319-12304-2\_5
- [Pria20] P.C. Priarone, E. Pagone, F. Martina, A.R. Catalano, L. Settineri: Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing. *CIRP Annals* 69/1 (2020): S. 37-40. 10.1016/j.cirp.2020.04.010
- [Pria17] P.C. Priarone, G. Ingarao, R. Di Lorenzo, L. Settineri: Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions – Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions. *Journal of Industrial Ecology* 21/S1 (2017): 191-202. 10.1111/jiec.12523
- [Qian16] M. Qian, W. Xu, M. Brandt, H.P. Tang: Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin* 41/10 (2016): S. 775-784. 10.1557/mrs.2016.215
- [Qin20] J. Qin, Y. Liu, R. Grosvenor, F. Lacan, Z. Jiang: Deep learning-driven particle swarm optimisation for additive manufacturing energy optimisation. *Journal of Cleaner Production* 245 (2020): 118702. 10.1016/j.jclepro.2019.118702
- [Reic11] A. Reichel, G. Schnell: Stahl – Herstellung und Produkte. In: Bollinger, K. (Hrsg.): *Atlas Moderner Stahlbau – Stahlbau Im 21. Jahrhundert*, Detail Business Information GmbH, (2011): S. 66-91. 10.11129/detail.9783955530044.66
- [Sark95] J. Sarkis, A. Rasheed: Greening the manufacturing function. *Business Horizons-Bloomington* 38 (1995): S. 17-30. 10.1016/0007-6813(95)90032-2
- [Scha21] J. Schaible, L. Sayk, T. Schopphoven, J.H. Schleifenbaum, C. Häfner: Development of a high-speed laser material deposition process for additive manufacturing. *Journal of Laser Applications* 33/1 (2021): 12021. 10.2351/7.0000320
- [Scha07] W. Schatt: *Pulvermetallurgie – Technologien und Werkstoffe*. 2. Auflage. Springer, (2007). ISBN: 10 3-540-23652-X
- [Sche19] U. Schelling: *Energietechnische Grundlagen*. In: Zahoransky, R.; Allelein, H.-J.; Bollin, E.; Schelling, U.; Schwarz, H.; Wörsdörfer, D. (Hrsg.): *Energietechnik – Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung*, Springer, (2019). 10.1007/978-3-658-21847-8\_2
- [Sche16] L. Schebek, E. Abele, A. Campitelli, B. Becker, M. Joshi: *Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion – Zerspanungsprozesse*. Hessen Trade & Invest GmbH, (2016).
- [Schl21] J. Schlegel: *Die Welt des Stahls – Zur Geschichte, Herstellung und Verwendung eines Basiswerkstoffes*. Springer, (2021). ISBN: 978-3658339159
- [Schm15] C. Schmidt, W. Li, S. Thiede, S. Kara, C. Herrmann: A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 2/2 (2015): S. 163-172. 10.1007/s40684-015-0021-z
- [Schm95] M. Schmidt, A. Schorb: *Stoffstromanalysen – In Ökobilanzen und Öko-Audits*. Springer, (1995). 10.1007/978-3-642-79793-4
- [Schm22] Schmidt, M., Greco, S., Kirsch, B., Aurich, J.C.: Analysis of Material Properties of Additively Manufactured Workpieces Using High-Speed Laser Directed Energy Deposition. *Production at the Leading Edge of Technology* (2022): S. 357-365. 10.1007/978-3-030-78424-9\_40
- [Scho20a] T. Schopphoven: *Experimentelle und modelltheoretische Untersuchungen zum Extremen Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen*. Dissertation, Fraunhofer ILT Aachen, (2020). ISBN: 978-3-8396-1587-4

- [Scho20b] T. Schopphoven, N. Pirch, S. Mann, R. Poprawe, C.L. Häfner, J.H. Schleifenbaum: Statistical/Numerical Model of the Powder-Gas Jet for Extreme High-Speed Laser Material Deposition. *Coatings* 10/4 (2020): 416. 10.3390/coatings10040416
- [Scho17] T. Schopphoven, A. Gasser, G. Backes: EHLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition. *Laser Technik Journal* 14/4 (2017): S. 26-29. 10.1002/latj.201700020
- [Scho16] T. Schopphoven, A. Gasser, K. Wissenbach, R. Poprawe: Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying. *Journal of Laser Applications* 28/2 (2016): 22501. 10.2351/1.4943910
- [Schu22] R.F. Schulte: 2018 Minerals Yearbook – Ferroalloys. U.S. Department of the Interior (USGS), (2022).
- [Serr11] N. Serres, D. Tidu, S. Sankare, F. Hlawka: Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 19/9-10 (2011): S. 1117-1124. 10.1016/j.jclepro.2010.12.010
- [Sham17] D. Shamvedi, O. McCarthy, E. O'Donoghue, P. O'Leary, R. Raghavendra: Surface treatment of 3D metal printed microwave components. 18th Research Colloquium on Radio Science and Communications for a Smarter World (2017).
- [Shen19] B. Shen, B. Du, M. Wang, N. Xiao, Y. Xu, S. Hao: Comparison on Microstructure and Properties of Stainless Steel Layer Formed by Extreme High-Speed and Conventional Laser Melting Deposition. *Frontiers in Materials* 6 (2019): 248. 10.3389/fmats.2019.00248
- [Shiy21] K.A. Shiyas, R. Ramanujam: A review on post processing techniques of additively manufactured metal parts for improving the material properties. *Materials Today: Proceedings* 46 (2021): S. 1429-1436. 10.1016/j.matpr.2021.03.016
- [Sing20] A. Singh, S. Kapil, M. Das: A comprehensive review of the methods and mechanisms for powder feedstock handling in directed energy deposition. *Additive Manufacturing* 35 (2020): 101388. 10.1016/j.addma.2020.101388
- [Slot15] J.A. Slotwinski, E.J. Garboczi: Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders. *JOM* 67/3 (2015): S. 538-543. 10.1007/s11837-014-1290-7
- [Stat22] Statista Research Department: Größte Förderung von Mangan nach Ländern weltweit im Jahr 2021. <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1128303/umfrage/foerderung-von-mangan-nach-laendern-weltweit/>> – 30.07.2023.
- [Stat24] Statistisches Bundesamt: Bruttostromerzeugung in Deutschland. <<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html>> – 09.05.2024.
- [Sun17] P. Sun, Z.Z. Fang, Y. Zhang, Y. Xia: Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM* 69/10 (2017): S. 1853-1860. 10.1007/s11837-017-2513-5
- [Sun16] P. Sun, Z.Z. Fang, Y. Xia, Y. Zhang, C. Zhou: A novel method for production of spherical Ti-6Al-4V powder for additive manufacturing. *Powder Technology* 301 (2016): S. 331-335. 10.1016/j.powtec.2016.06.022
- [Suth20] J.W. Sutherland, S.J. Skerlos, K.R. Haapala, D. Cooper, F. Zhao, A. Huang: Industrial Sustainability: Reviewing the Past and Envisioning the Future. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 142/11 (2020): 110806. 10.1115/1.4047620
- [Szur21] M. Szurlies, A. Schippers, T. Kuhn, J. Duba: Rohstoffrisikobewertung – Nickel. Datenstand: Februar 2021. DERA, (2021). ISBN: 9783948532383

- [Tan20] K.A. Tan, Y. Mohan, K.J. Liew, S.H. Chong, P.E. Poh: Development of an effective cleaning method for metallic parts using microbubbles. *Journal of Cleaner Production* 261 (2020): 121076. 10.1016/j.jclepro.2020.121076
- [Tesi22] S. Tesic, D. Cica, S. Borojevic, B. Sredanovic, M. Zeljkovic, D. Kramar, F. Pusavec: Optimization and Prediction of Specific Energy Consumption in Ball-End Milling of Ti-6Al-4V Alloy Under MQL and Cryogenic Cooling/Lubrication Conditions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 9/6 (2022): S. 1427-1437. 10.1007/s40684-021-00413-9
- [Thie12] S. Thiede: *Energy efficiency in manufacturing systems*. Springer, (2012). ISBN: 978-3-642-25914-2
- [Trum24] TRUMPF SE + Co. KG (Holding): Laserschweißanlagen. TruLaser Cell 3000. Technischer Daten. <[https://www.trumpf.com/de\\_DE/produkte/maschinen-systeme/laserschweissanlagen-und-lichtbogenschweisszelle/trulaser-cell-3000/](https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/maschinen-systeme/laserschweissanlagen-und-lichtbogenschweisszelle/trulaser-cell-3000/)> – 14.07.2024.
- [Tuck08] C.J. Tuck, R.J.M. Hague, M. Ruffo, M. Ransley, P. Adams: Rapid manufacturing facilitated customization. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21/3 (2008): S. 245-258. 10.1080/09511920701216238
- [Tukk00] A. Tukker: Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 20/4 (2000): S. 435-456. 10.1016/S0195-9255(99)00045-1
- [UBA21] Umweltbundesamt: Markt für Argon, flüssig; Technologiemit; Produktionsmix, ab Werk. <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d9b58b15-1376-5ac8-9c7e-acfeeaddb51&version=02.01.000>> – 07.05.2024.
- [UBA20a] Umweltbundesamt, L. Rausch: Prozess-Datensatz: LKW-2020-mix-DE (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=34e43606-ab76-4f83-b066-b866f93bddd&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA20b] Umweltbundesamt, F. Hacker: Prozess-Datensatz: Schiff-Binnen-Diesel-DE-2020-Basis; 905t (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f6ec3e28-9e02-4ef5-bf1f-7088946db225&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA20c] Umweltbundesamt, International Institute for Sustainability Analysis: Prozess-Datensatz: Überseeschiff-2020 (Container - mittel); Öl-Bunker-C (0,5 % S), 60000t (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5d8cef4c-55f9-4a63-8083-48922f512ba7&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA20d] Umweltbundesamt, F. Hacker: Prozess-Datensatz: Zug-Güter-Diesel-DE-2020-Basis; 392t (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bc837acf-f16c-4a8c-9f83-e24e65817ccd&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA20e] Umweltbundesamt, F. Hacker: Prozess-Datensatz: Zug-Güter-Elektro-DE-2020-Basis; Elektrizität, 392t (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d14b171f-8f9f-495c-a4a7-d9112e9866e2&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA20f] Umweltbundesamt, Öko-Institut: Prozess-Datensatz: Flugzeug-Fracht-international-DE-2020; Kerosin-DE-2020, 52t (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=ee1883c3-b3da-4318-b2f1-2f6ea759e2c1&lang=de>> – 09.05.2024.
- [UBA14] Umweltbundesamt, C. Lauwigi: Prozess-Datensatz: Druckluft (de). <<https://data.probas.umweltbundesamt.de/datasetdetail/process.xhtml?uuid=829eb397-8f7c-4bad-9fb9-037c8957b82a&version=02.44.152&stock=PUBLIC&lang=de>> – 09.05.2024.
- [USGS22] U.S. Geological Survey (USGS): Mineral commodity summaries 2022. (2022). 10.3133/mcs2022

- [Vast21] J. Vasters, G. Franken, M. Szurlies: Nickel – Informationen zur Nachhaltigkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, (2021)
- [VDI12] VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Berechnungsmethoden. (2012).
- [VML21] Verdict Media Limited: Five largest nickel mines in Indonesia in 2020. <<https://www.mining-technology.com/marketdata/five-largest-nickel-mines-indonesia-2020/>> - 30.07.2023.
- [Volk53] G. Volkert: Ferromolybdän – Erschmelzung von Ferromolybdän im Elektroofen. In: Andreae, F.V.; Dautzenberg, W.; Driller, A.; Durrer, R.; Fiore, G.; Freigang, W.; Rösner, O.; Bergkamp, E.; Sernitz, P.; Smetana, O.; Volkert, G.; Wilke, W.; Wotschke, J. (Hrsg.): Die Metallurgie der Ferrolegierungen, Springer, (1953): S. 274-284. 10.1007/978-3-642-80579-0\_12
- [Wang18] Y.-C. Wang, D.-W. Kim, H. Katayama, W.-C. Hsueh: Optimization of machining economics and energy consumption in face milling operations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 99/9-12 (2018): S. 2093-2100. 10.1007/s00170-018-1848-6
- [Wats15] J.K. Watson, K.M.B. Taming: A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. Journal of Cleaner Production 176 (2015): S. 1316-1322. 10.1016/j.jclepro.2015.12.009
- [Wats11] R.T. Watson, M.-C. Boudreau, A.J. Chen, H.H. Sepúlveda: Green projects: An information drives analysis of four cases. The Journal of Strategic Information Systems 20/1 (2011): S. 55-62. 10.1016/j.jsis.2010.09.004
- [Wege16] M. Wegener: Ressourceneffiziente Gestaltung von Prozessketten mit additiven Fertigungsverfahren. Dissertation, RWTH Aachen, (2016). ISBN: 978-3-86359-487-9
- [Wei20a] W. Wei, P.B. Samuelsson, A. Tilliander, R. Gyllenram, P.G. Jönsson: Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Nickel Products. Energies 13/21 (2020): 5664. 10.3390/en13215664
- [Wei20b] W. Wei, P.B. Samuelsson, A. Tilliander, R. Gyllenram, P.G. Jönsson: Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions During Ferromolybdenum Production. Journal of Sustainable Metallurgy 6/1 (2020): S. 103-112. 10.1007/s40831-019-00260-8
- [Weid08] B.P. Weidema, M. Thrane, P. Christensen, J. Schmidt, S. Løkke: Carbon Footprint. Journal of Industrial Ecology 12/1 (2008): S. 3-6. 10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x
- [Wern16] G. Wernet, C. Bauer, B. Streubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, B. Weidema: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> - 15.12.2022.
- [Wiec09] D. Wieczorek: Statistische Versuchsplanung. In: Bandow, G. und Holzmüller, H.H. (Hrsg.): "Das ist gar kein Modell!" Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, Gabler, (2009): S. 167-187. 10.1007/978-3-8349-8484-5\_8
- [Wied08] T. Wiedmann, J. Minx: A definition of "carbon footprint". Ecological economics research trends 1 (2008): S. 1-11. ISBN: 1-60021-941-1
- [Wils14] J.M. Wilson, C. Piya, Y.C. Shin, F. Zhao, K. Ramani: Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. Journal of Cleaner Production 80 (2014): S. 170-178. 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
- [Wipp20] A. Wippermann, T.G. Gutowski, B. Denkena, M.-A. Dittrich, Y. Wessarges: Electrical energy and material efficiency analysis of machining, additive and hybrid manufacturing. Journal of Cleaner Production 251 (2020): 119731. 10.1016/j.jclepro.2019.119731
- [Wits16] W.W. Wits, J.R.R. García, J.M.J. Becker: How Additive Manufacturing Enables more Sustainable End-user Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Strategies. Procedia CIRP 40 (2016): S. 693-698. 10.1016/j.procir.2016.01.156

- [Wohl19] Wohlers Associates: Wohlers report 2019 – 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Wohlers Associates, (2019). ISBN: 978-0-9913332-5-7
- [WSA21] World steel association: World Steel in Figures 2021. <<https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>> – 26.05.2024.
- [WSA20] World steel association: Steel Statistical Yearbook -2020 conciene version – A cross section of steel industry statistics 2010-2019. (2020).
- [Xion08] Y. Xiong, K. Lau, X. Zhou, J.M. Schoenung: A streamlined life cycle assessment on the fabrication of WC–Co cermets. *Journal of Cleaner Production* 16/10 (2008): S. 1118-1126. 10.1016/j.jclepro.2007.05.007
- [Yan15] M. Yan, P. Yu: An Overview of Densification, Microstructure and Mechanical Property of Additively Manufactured Ti-6Al-4V — Comparison among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition and Selective Laser Sintering, and with Conventional Powder. In: Lakshmanan, A. (Hrsg.): *Sintering Techniques of Materials*, Intech, (2015). 10.5772/59275
- [Yap17] Y.L. Yap, C. Wang, S.L. Sing, V. Dikshit, W.Y. Yeong, J. Wei: Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering* 50 (2017): S. 275-285. 10.1016/j.precisioneng.2017.05.015
- [Ye21] C. Ye, C. Zhang, J. Zhao, Y. Dong: Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review. *Journal of materials engineering and performance* 30/9 (2021): S. 6407-6425. 10.1007/s11665-021-06021-7
- [Yi21a] L. Yi: Eco-Design for Additive Manufacutring Using Energy Performance Quantification and Assessment. Dissertation, TU Kaiserslautern, (2021). ISBN: 978-3-95974-157-6
- [Yi21b] L. Yi, K. Gutzeit, S. Ehmsen, P. Kölsch, M. Glatt, J.C. Aurich: Exploration of the potential of polymer 4D printing: Experiments on the printing quality and the impact of temperature and geometry on the shape-changing effect. *Procedia CIRP* 103 (2021): S. 103-108. 10.1016/j.procir.2021.10.016
- [Yi20] L. Yi, M. Glatt, P. Sridhar, K. de Payrebrune, B.S. Linke, B. Ravani, J.C. Aurich: An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment. *Additive Manufacturing* 33 (2020): 101120. 10.1016/j.addma.2020.101120
- [Yoon14] H.-S. Yoon, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, E.-S. Kim, Y.-J. Shin, W.-S. Chu, S.-H. Ahn: 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 (2014): S. 261-279. 10.1007/s40684-014-0033-0
- [Zaho19] R. Zahoransky, H.-J. Allelein, E. Bollin, U. Schelling, H. Schwarz, D. Wörsdörfer: *Energietechnik*. 8. Auflage. Springer, (2019). 10.1007/978-3-658-21847-8
- [Zhan21] X. Zhang, X. Gu, Y. Han, N. Parra-Álvarez, V. Claremboux, S.K. Kawatra: Flotation of Iron Ores: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 42/3 (2021): S. 184-212. 10.1080/08827508.2019.1689494
- [Zhan20] Y. Zhang, Z. Zhang, G. Zhang, W. Li: Reduction of Energy Consumption and Thermal Deformation in WEDM by Magnetic Field Assisted Technology. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7/2 (2020): S. 391-404. 10.1007/s40684-019-00086-5
- [Zhan14] K. Zhang, S. Wang, W. Liu, X. Shang: Characterization of stainless steel parts by Laser Metal Deposition Shaping. *Materials & Design* 55 (2014): S. 104-119. 10.1016/j.matdes.2013.09.006

- [Zhon16a] C. Zhong, J. Chen, S. Linnenbrink, A. Gasser, S. Sui, R. Poprawe: A comparative study of Inconel 718 formed by High Deposition Rate Laser Metal Deposition with GA powder and PREP powder. *Materials & Design* 107 (2016): S. 386-392. 10.1016/j.matdes.2016.06.037
- [Zhon16b] Q. Zhong, R. Tang, J. Lv, S. Jia, M. Jin: Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82/9-12 (2016): S. 2087-2099. 10.1007/s00170-015-7477-4
- [Zirn06] O. Zirn, S. Weikert: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme – Eine praxisnahe Einführung*. Springer, (2006). 10.1007/3-540-29279-9

**Verzeichnis im Themenbereich betreuter Studien- und Diplomarbeiten:**

Klag, Andreas	Ökobilanzierung der Herstellung von nichtrostendem Stahl 316L (2022)
Siegfried, Adrian	Energetische Analyse und Bewertung der Nachbearbeitung der additiven Fertigung (2023)
Weber, Lukas	Energetische Analyse und Bewertung der Pulverherstellung für die additive Fertigung (2023)

## 8 Anhang

### 8.1 Anhang A: Experimentalplan zur Untersuchung des Verhaltens der Leistungsaufnahme des HS DED-LB-Fertigungssystems

Tabelle 8-1: Einstellung der zu untersuchenden Prozessparameter

Lasereinheit	Antrieb der Bauplattform		Pulverförderer		Entstaubungs- system
Laserleistung	Kreis Vorschubge- schwindigkeit	Quadrat Vorschubge- schwindigkeit	Rührer Rotationsge- schwindigkeit	Förderscheibe Rotationsge- schwindigkeit	Absaugungs- volumen
W	m/min	m/min	U/min	U/min	m <sup>3</sup> /h
504	20	10	330	1	770
840	40	20	660	2	870
1.260	60	30	990	3	970
1.680	80	40	1.320	4	1.120
2.100	100	50	1.650	5	1.270
2.520	120	60	1.980	6	1.420
2.940	140	70	2.310	7	1.570
3.360	160	80	2.640	8	1.720
3.780	180	90	2.970	9	1.870
4.200	200	100	3.300	10	2.020
4.620					2.170
5.040					2.320
5.460					2.470
5.880					2.540
6.300					
6.720					
7.140					
7.560					
7.980					
8.400					

## 8.2 Anhang B: Energetische Analyse der Lasereinheit

Tabelle 8-2: Übersicht der mittleren Leistungsaufnahme für das Einschalten  $P_{L,an}$ , das Einpendeln  $P_{L,Pendel}$ , das Halten der Leistung  $P_{L,B}$  und das Ausschalten  $P_{L,aus}$  des Laserstrahls und der jeweiligen Dauer bei steigender eingestellten Laserleistung

Eingestellte Laserleistung		Anfahren		Einpendeln		Leistung halten		Herunterfahren	
W	%	$P_{L,an}$ W	$t_{L,an}$ ms	$P_{L,Pendel}$ W	$t_{L,Pendel}$ ms	$P_{L,B}$ W	$t_{L,B}$ ms	$P_{L,aus}$ W	$t_{L,aus}$ ms
Stand-by Bereithalte-modus						2.343,40			
						4.368,36			
504	6 %	5.812,60	67,33			6.317,74	418,67	5.282,68	64,33
840	10 %	6.379,38	58,33			7.434,81	443,00	3.554,54	60,67
1.260	15 %	6.720,61	40,67			8.435,24	451,67	5.841,73	72,00
1.680	20 %	6.628,20	26,00	9.522,72	38,00	9.197,99	442,67	5.343,26	69,33
2.100	25 %	7.359,20	26,00	10.010,47	45,33	10.413,87	424,00	4.304,28	64,33
2.520	30 %	8.149,55	24,00	11.670,36	47,67	11.450,24	414,67	6.846,33	72,33
2.940	35 %	7.503,26	22,33	12.701,06	60,33	12.517,63	412,67	6.823,76	63,33
3.360	40 %	8.734,33	22,00	13.810,00	40,50	13.569,63	441,50	6.327,73	53,00
3.780	45 %	9.228,01	20,67	14.994,66	56,67	14.692,47	418,00	8.784,79	46,00
4.200	50 %	9.064,97	20,00	16.894,18	56,67	15.707,74	425,67	9.274,64	31,33
4.620	55 %	10.822,64	20,00	17.330,68	58,00	16.975,20	421,33	10.312,55	29,00
5.040	60 %	10.461,50	20,00	19.238,30	61,33	18.108,32	416,67	10.572,16	29,33
5.460	65 %	11.647,70	20,00	19.587,95	72,00	19.241,86	405,67	12.072,39	29,00
5.880	70 %	11.646,26	18,67	20.921,16	60,67	20.401,36	416,33	13.301,72	30,67
6.300	75 %	11.566,77	19,33	22.023,21	74,67	21.570,81	404,67	13.604,40	29,00
6.720	80 %	12.113,89	18,00	23.353,99	60,33	22.777,04	417,67	14.669,19	31,33
7.140	85 %	13.511,63	16,00	24.446,65	83,67	23.987,18	396,00	15.352,39	28,33
7.560	90 %	13.436,23	16,67	25.697,28	81,00	25.187,04	399,33	14.999,36	30,67
7.980	95 %	14.743,46	16,67	27.005,40	64,33	26.328,29	420,00	14.368,49	27,00
8.400	100 %	15.081,04	16,00	28.229,05	69,00	27.640,28	411,67	15.656,76	29,33

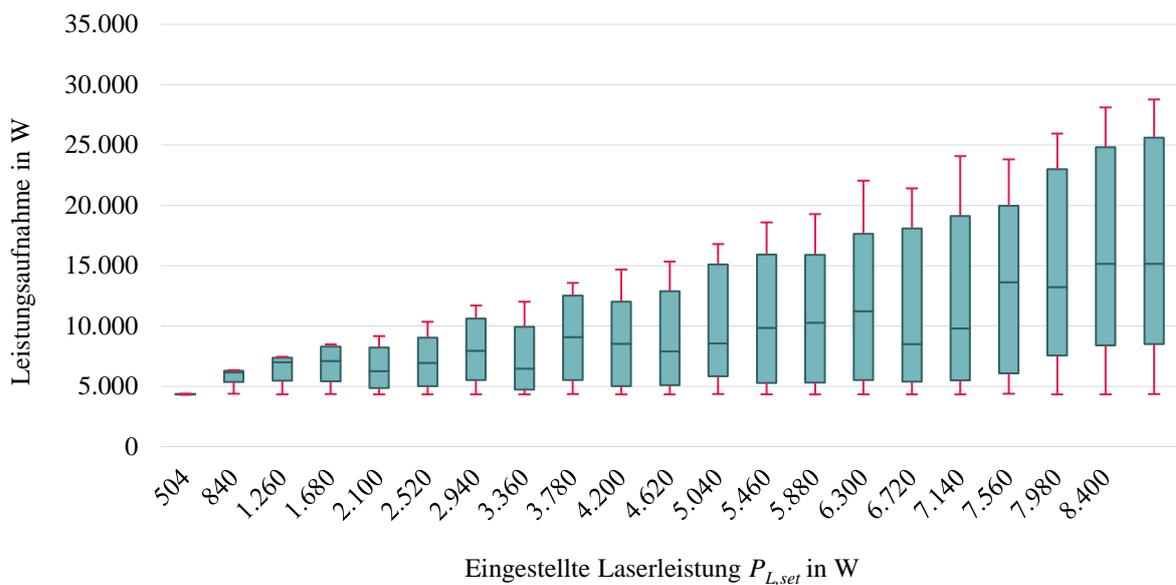


Abbildung 8-1: Verlauf der Leistungsaufnahme für das Anfahren beim Anfordern des Laserstrahls in Abhängigkeit von der definierten Laserleistung  $P_{L,set}$



Abbildung 8-2: Verlauf der Leistungsaufnahme für das Einpendeln auf eine konstante Leistungsaufnahme bei Anforderung des Laserstrahls in Abhängigkeit von der definierten Laserleistung  $P_{L,set}$

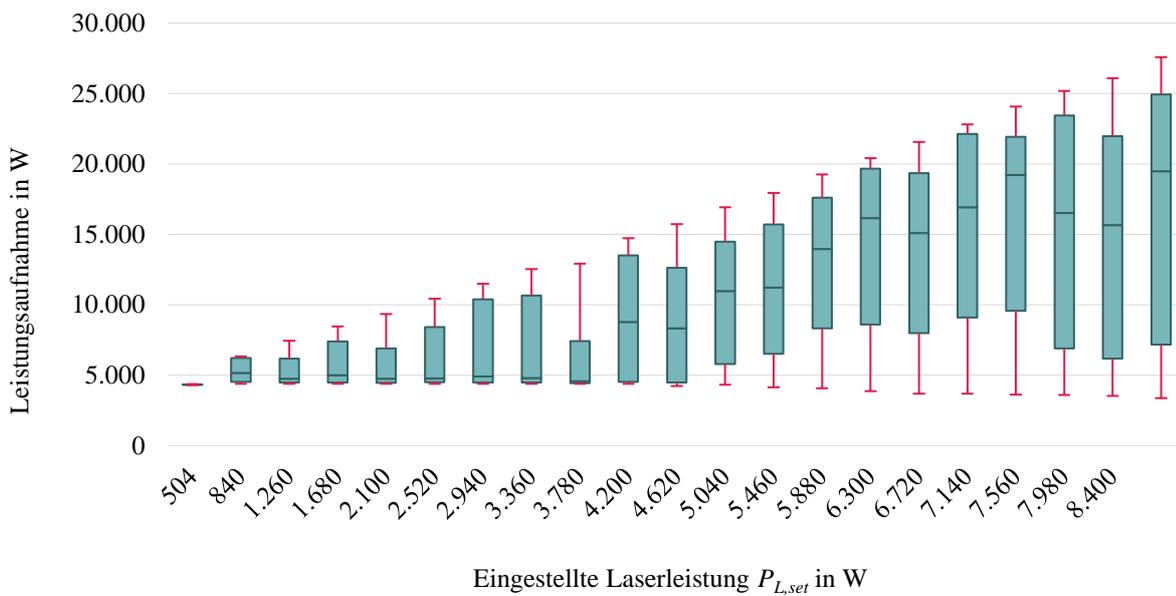


Abbildung 8-3: Verlauf der Leistungsaufnahme für das Herunterfahren vom angeforderten Laserstrahl in Abhängigkeit von der definierten Laserleistung  $P_{L,set}$

### 8.3 Anhang C: Energetische Analyse des Pulverförderers

Tabelle 8-3: Übersicht der mittleren Leistungsaufnahme während des Betriebs  $P_{PF,B}$  des Pulverförderers

Rotationsgeschwindigkeit des Rührers		Betrieb	Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe		Betrieb
$n_R$		$P_{PF,B}$	$n_F$		$P_{PF,B}$
U/min	%	W	U/min	%	W
Stand-by		92,70	Stand-by		
330	10 %	117,27	1	10 %	120,71
660	20 %	117,57	2	20 %	121,27
990	30 %	117,92	3	30 %	121,90
1.320	40 %	118,44	4	40 %	123,02
1.650	50 %	118,92	5	50 %	124,38
1.980	60 %	119,75	6	60 %	125,48
2.310	70 %	120,74	7	70 %	127,05
2.640	80 %	122,33	8	80 %	128,15
2.970	90 %	122,23	9	90 %	129,58
3.300	100 %	123,07	10	100 %	130,63

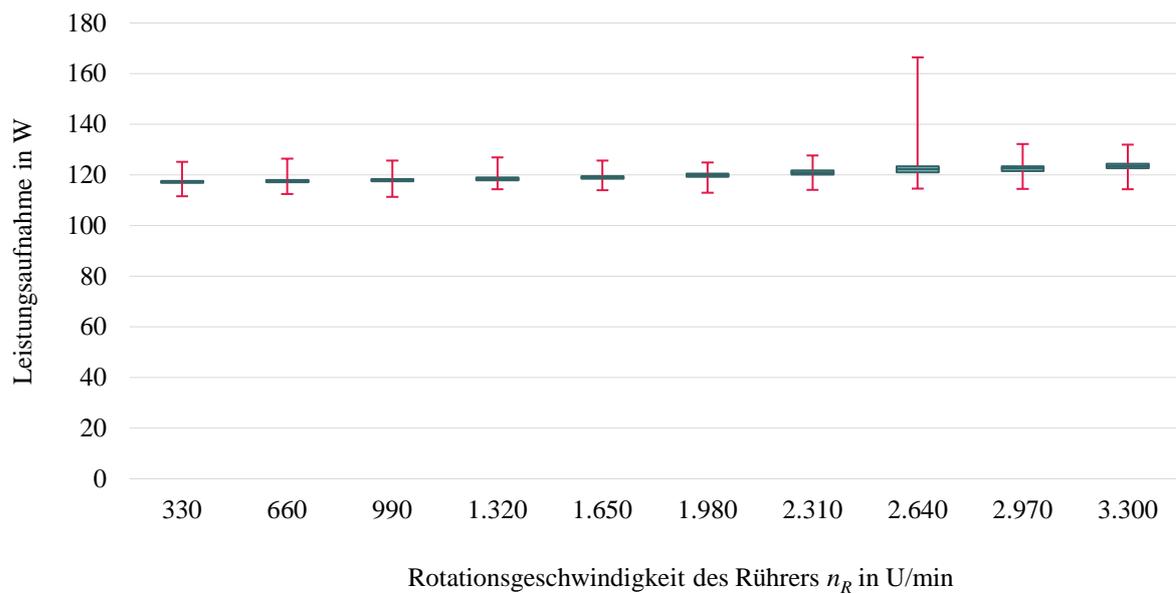


Abbildung 8-4: Verlauf der Leistungsaufnahme des Pulverförderers für den Betrieb des Rührers in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit des Rührer  $n_R$



Abbildung 8-5: Verlauf der Leistungsaufnahme des Pulverförderers für den Betrieb der Förderscheibe in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit der Förderscheibe  $n_F$

## 8.4 Anhang D: Energetische Analyse des Entstaubungssystems

Tabelle 8-4: Übersicht der mittleren Leistungsaufnahme während des Einschaltens  $P_{S,an}$ , des Betriebs  $P_{S,B}$  und des Ausschaltens  $P_{S,aus}$  des Entstaubungssystems

Eingestelltes Absaugungsvolumen		Anfahren		Betrieb	Herunter- fahren
$\dot{V}_{S,set}$ m <sup>3</sup> /h	%	$P_{S,an}$ W	$t_{S,an}$ ms	$P_{S,B}$ W	$P_{S,aus}$ W
Stand-by				120,21	
770	30 %	2.206,91	3.827	400,08	122,10
870	34 %	2.001,64	4.343	402,11	122,30
920	36 %	2.013,09	4.683	397,90	
1.020	40 %	2.094,33	4.961	475,68	
1.120	44 %	2.308,73	4.986	582,36	122,05
1.220	48 %	2.543,01	3.531	702,56	
1.320	52 %	2.627,66	2.756	809,83	
1.420	56 %	2.692,80	4.137	963,41	122,23
1.520	60 %	2.738,15	4.330	1.128,80	
1.620	64 %	2.883,26	4.747	1.299,90	
1.720	68 %	2.801,55	6.216	1.477,13	121,52
1.820	72 %	2.958,01	5.102	1.687,78	
1.920	76 %	3.046,46	5.099	1.884,17	
2.020	80 %	2.931,16	5.322	2.176,89	122,04
2.120	83 %	3.101,85	6.922	2.396,71	
2.220	87 %	3.396,08	5.545	2.743,34	
2.320	91 %	3.515,08	6.371	3.138,44	121,99
2.420	95 %	3.769,13	5.649	3.467,61	
2.520	99 %	3.632,40	5.602	3.977,64	
2.540	100 %	3.918,42	5.646	4.007,76	123,02

## 8.5 Anhang E: Energetische Analyse des Antriebs der Bauplattform

Tabelle 8-5: Übersicht der mittleren Leistungsaufnahme  $P_A$  des Antriebs der Bauplattform für kreisförmige Scanpfade  $P_{A,B,rot}$  und für lineare Scanpfade für das Beschleunigen  $P_{A,ac,lin}$ , das Halten der Geschwindigkeit  $P_{A,B,lin}$  und das Bremsen  $P_{A,dec,lin}$  der Bauplattform

		Kreisförmiger Scanpfad		Linearer Scanpfad					
Vorschubgeschwindigkeit		Geschwindigkeit halten		Beschleunigen		Geschwindigkeit halten		Bremsen	
m/min	%	$P_{A,B,rot}$ W	$t_{A,B,rot}$ ms	$P_{A,ac,lin}$ W	$t_{ac}$ ms	$P_{A,B,lin}$ W	$t_{Bahn}$ ms	$P_{A,dec,lin}$ W	$t_{dec}$ ms
Stand-by									
10	5 %			2.246,32	77,88	2.056,00	2.354,38		
20	10 %	2.700,43	5.162,97	3.084,33	86,92	2.322,19	1.092,02	2.504,88	63,78
30	15 %			3.996,26	81,62	2.395,79	698,02	2.763,57	71,10
40	20 %	2.856,19	2.568,80	4.828,73	87,63	2.469,83	494,12	3.044,38	76,68
50	25 %			5.749,46	91,25	2.561,18	372,05	3.328,15	82,72
60	30 %	3.087,39	1.706,33	6.735,53	94,22	2.655,76	292,58	3.648,62	84,30
70	35 %			7.675,88	97,68	2.745,52	231,05	3.905,38	90,07
80	40 %	3.496,69	1.272,27	8.581,10	102,25	2.848,53	186,10	4.134,03	93,47
90	45 %			9.467,20	106,25	2.945,62	148,65	4.361,01	98,05
100	50 %	4.237,43	1.011,90	10.285,79	110,58	3.105,72	119,70	4.629,00	100,43
120	60 %	5.459,17	855,60						
140	70 %	7.339,97	734,56						
160	80 %	10.110,84	643,03						
180	90 %	14.142,77	572,17						
200	100 %	19.741,19	514,68						

## 8.6 Anhang F: Datengrundlage des Modells zur Prognose des Energiebedarfs eines HS DED-LB Prozesses

Tabelle 8-6: Experimentell erhobene Daten zur Erstellung des Zeitmodells

Variable	Einheit	Wert
$a_{ac}$	m/s <sup>2</sup>	10
$a_{dec}$	m/s <sup>2</sup>	10
$t_{Wechsel}$	h	1,47E-05

Tabelle 8-7: Experimentell erhobene Daten für das Energiebedarfsprognosemodell der Lasereinheit

Variable	Einheit	Wert
$\eta_L$	%	0,31
$P_{L,an,max}$	W	15.081,04
$P_{L,an,min}$	W	4.900,00
$P_{L,aus,max}$	W	15.656,76
$P_{L,aus,min}$	W	2.729,90
$P_{L,bereit}$	W	4.368,36
$P_{L,B,max}$	W	26.652,89
$P_{L,set,max}$	W	8.400,00
$P_{L,stand-by}$	W	2.343,40
$t_{L,an,max}$	ms	16,00
$t_{L,an,min}$	ms	67,33
$t_{L,aus,max}$	ms	29,33
$t_{L,aus,min}$	ms	64,33

Tabelle 8-8: Experimentell erhobene Daten für das Energiebedarfsprognosemodell des Pulverförderers

Variable	Einheit	Wert
$E_{PF,an}$	Wh	0,0914
$E_{PF,aus}$	Wh	0,1102
$n_{F,max}$	U/min	10,00
$n_{R,max}$	U/min	3.300,00
$P_{PF,B,F,basis}$	W	1,27
$P_{PF,B,F,max}$	W	10,14
$P_{PF,B,R,basis}$	W	23,30
$P_{PF,B,R,max}$	W	30,38
$P_{PF,stand-by}$	W	92,70
$t_{PF,an}$	s	3,00
$t_{PF,aus}$	s	3,96

Tabelle 8-9: Experimentell erhobene Daten für das Energiebedarfsprognosemodell des Entstaubungssystems

Variable	Einheit	Wert
$P_{S,basis}$	W	402,60
$P_{S,50\%}$	W	757,41
$P_{S,max}$	W	4.007,76

Tabelle 8-10: Experimentell erhobene Daten für das Energiebedarfsprognosemodell der Antriebe der Bauplattform und der peripheren Subsysteme

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
$P_{A,ac,lin,50\%}$	W	10.285,79
$P_{A,ac,lin,min}$	W	1.282,20
$P_{A,B,lin,50\%}$	W	3.105,72
$P_{A,B,lin,min}$	W	2.044,05
$P_{A,B,rot,50\%}$	W	4.237,43
$P_{A,B,rot,75\%}$	W	8.622,20
$P_{A,B,rot,max}$	W	19.741,19
$P_{A,B,rot,min}$	W	2.020,60
$P_{A,dec,lin,50\%}$	W	4.629,00
$P_{A,dec,lin,min}$	W	1.986,50
$P_{A,stand-by}$	W	1.250,29
$v_{A,max}$	m/min	200,00

## 8.7 Anhang G: Ergebnisse der Ökobilanzierung von Rohstahl sowie der Legierungselemente des Edelstahl 316L

Tabelle 8-11: Partielle Ökobilanz der Herstellung von 1 t Rohstahl ohne Legierungselemente [Wern16, Burc13]

Prozess	Hochofen-Konverter-Route		Elektroschmelz-Route		Kombiniert	
	KEA	GWP	KEA	GWP	KEA	GWP
	MJ/t	kg CO <sub>2</sub> -Äq./t	MJ/t	kg CO <sub>2</sub> -Äq./t	MJ/t	kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
Bergbau und Aufbereitung	304,14	9,09			212,90	6,36
Sintern	2.945,90	563,23			2.062,13	394,26
Hochofen	13.473,22	1.179,13			9.431,25	825,39
Sauerstoffblaskonverter	2.114,52	225,07			1.480,16	157,55
Elektrolichtbogenofen			6.195,19	778,62	1.858,56	233,59
Strangguss	285,34	12,87	285,34	12,87	285,34	12,87
<b>Summe</b>	<b>19.123,12</b>	<b>1.989,39</b>	<b>6.480,53</b>	<b>791,49</b>	<b>15.330,34</b>	<b>1.630,02</b>

Tabelle 8-12: Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Gewinnung und Herstellung von 1 t Ferrochrom [Wern16, Haqu13]

Prozess	KEA MJ/t	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
Bergbau und Aufbereitung		
Diesel	216,61	1,81
Elektr. Energie	1.380,94	95,00
Summe	1.597,55	96,81
Ferrochromproduktion		
Elektr. Energie	68.705,40	4.726,63
Koks	18.154,10	457,37
Bauxit	35,13	2,50
Quarzsand	23,07	1,88
Kalk	146,29	9,87
Elektrode	320,00	58,61
Summe	87.383,99	5.256,86
<b>Summe</b>	<b>88.981,54</b>	<b>5.353,67</b>

Tabelle 8-13: Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Gewinnung und Herstellung von 1 t Ferronickel [Wei20a, Wern16]

Prozess	KEA MJ/t	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
<b>Bergbau und Aufbereitung</b>		
Diesel	4.033,10	34,06
Elektr. Energie	4.948,05	418,35
Summe	8.981,15	452,41
<b>Trocknen</b>		
Erdgas	12.612,01	146,96
Summe	12.612,01	146,96
<b>Kalzinieren und Vorreduzieren</b>		
Erdgas	12.612,01	146,96
Steinkohle	12.727,27	36,42
Druckluft	26.222,27	1.826,13
Summe	51.561,55	2.009,51
<b>Schmelzen</b>		
Elektr. Energie	91.583,15	7.743,29
Elektrode	380,00	69,60
Summe	91.963,15	7.812,89
<b>Veredelung</b>		
Elektr. Energie	13.679,89	1.156,62
Kalk	5,85	0,39
Ferrosilizium	358,23	15,94
Aluminium	1.334,21	125,82
Summe	15.378,18	1.298,77
<b>Summe</b>	<b>180.496,04</b>	<b>11.720,54</b>

Tabelle 8-14: Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Gewinnung und Herstellung von 1 t Ferromolybdän [Wei20b, Wern16]

Prozess	KEA MJ/t	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
<b>Bergbau und Aufbereitung</b>		
Diesel	48.954,43	413,47
Elektr. Energie	10.501,72	1.063,05
Summe	59.456,15	1.476,52
<b>Schmelzen</b>		
Eisenschrott	39,59	2,65
Eisenerz	124,52	4,43
Kalk	66,12	4,46
Aluminium	20.455,28	2.173,98
Ferrosilizium	41.862,17	3.013,83
Elektr. Energie	16.803,67	1.700,98
Summe	79.351,35	6.900,33
<b>Summe</b>	<b>138.807,50</b>	<b>8.376,85</b>

Tabelle 8-15: Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Gewinnung und Herstellung von 1 t Ferromangan [Wern16, Haqu13]

Prozess	KEA MJ/t	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
<b>Bergbau</b>		
Diesel	33,03	0,28
Elektr. Energie	58,48	5,23
Wasser	2,66	0,16
Summe	94,17	5,67
<b>Aufbereitung</b>		
Koks	2.826,85	71,22
Elektr. Energie	286,55	25,65
Summe	3.113,40	96,87
<b>Schmelzen</b>		
Eisenerz	33,82	0,98
Kalk	105,33	7,11
Koks	8.932,97	225,05
Steinkohle	3.040,39	69,21
Elektrode	200,00	36,62
Elektr. Energie	21.031,21	1.882,42
Summe	33.343,72	2.221,39
<b>Summe</b>	<b>36.551,29</b>	<b>2.323,93</b>

Tabelle 8-16: Ergebnis der partiellen Ökobilanz der Gewinnung und Herstellung von 1 t Ferrosilizium [Wern16, Haqu13]

Prozess	KEA MJ/t	GWP kg CO <sub>2</sub> -Äq./t
<b>Pelletierung</b>		
Eisenerz	66,57	1,94
Elektr. Energie	4,05	0,34
Wasser	0,47	0,03
Kalk	2,90	0,20
Dolomit	28,26	1,97
Steinkohle	51,57	1,17
Bentonit	1,53	0,11
Summe	155,35	5,76
<b>Pellethärtung</b>		
Elektr. Energie	121,60	10,26
Erdgas	203,46	2,37
Summe	325,06	12,63
<b>Schmelzen</b>		
Quarzsand	925,96	75,26
Koks	11.756,94	296,20
Steinkohle	12.652,71	288,00
Elektrode	1.260,00	230,77
Elektr. Energie	84.638,25	7.138,32
Summe	111.233,87	8.028,55
<b>Summe</b>	<b>111.714,28</b>	<b>8.046,94</b>

## 8.8 Anhang H: Charakterisierungsfaktoren des KEA und GWP für die Pulverherstellung

Tabelle 8-17: Charakterisierungsfaktoren für den von der Verdüsungsort abhängigen KEA und GWP der Pulverherstellung von je 1 kg Pulver für die additive Fertigung

Verfahren	KEA		GWP	
	MJ/kg		kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg	
FFA	$f_{Pulver,fix,FFA}$	44,31	$C_{Pulver,fix,FFA}$	2,65
CCA	$f_{Pulver,fix,CCA}$	39,64	$C_{Pulver,fix,CCA}$	2,39

Tabelle 8-18: Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP für den Schutzgasbedarf inklusive Vorwärmung in der Pulverherstellung von je 1 kg Pulver für die additive Fertigung

Verfahren	Temperatur	Schutzgas	KEA		GWP	
			MJ/kg		kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg	
FFA	Heißgas	Argon	$f_{Pulver,Gas,FFA,HG,Ar}$	376,67	$C_{Pulver,Gas,FFA,HG,Ar}$	15,05
	Heißgas	Stickstoff	$f_{Pulver,Gas,FFA,HG,N}$	46,34	$C_{Pulver,Gas,FFA,HG,N}$	2,83
	Kaltgas	Argon	$f_{Pulver,Gas,FFA,KG,Ar}$	554,47	$C_{Pulver,Gas,FFA,KG,Ar}$	22,06
	Kaltgas	Stickstoff	$f_{Pulver,Gas,FFA,KG,N}$	64,68	$C_{Pulver,Gas,FFA,KG,N}$	3,94
CCA	Heißgas	Argon	$f_{Pulver,Gas,CCA,HG,Ar}$	285,90	$C_{Pulver,Gas,CCA,HG,Ar}$	11,40
	Heißgas	Stickstoff	$f_{Pulver,Gas,CCA,HG,N}$	34,86	$C_{Pulver,Gas,CCA,HG,N}$	2,12
	Kaltgas	Argon	$f_{Pulver,Gas,CCA,KG,Ar}$	357,44	$C_{Pulver,Gas,CCA,KG,Ar}$	14,22
	Kaltgas	Stickstoff	$f_{Pulver,Gas,CCA,KG,N}$	41,70	$C_{Pulver,Gas,CCA,KG,N}$	2,54

Tabelle 8-19: Charakterisierungsfaktoren für den KEA und das GWP für die Verpackung von Pulver in der Pulverherstellung von je 1 kg Pulver für die additive Fertigung

Verpackungsart	KEA		GWP	
	MJ/kg		kg CO <sub>2</sub> -Äq./kg	
Kunststoffbehälter	$f_{Pulver,Behälter,Kunststoff}$	9,69	$C_{Pulver,Behälter,Kunststoff}$	0,27
Weißblechbehälter	$f_{Pulver,Behälter,Weißblech}$	57,46	$C_{Pulver,Behälter,Weißblech}$	3,62
Kreislaufbehälter	$f_{Pulver,Behälter,Fass}$	60,56	$C_{Pulver,Behälter,Fass}$	3,57

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Svenja Ehmsen  
Geburtsort: Weinheim

## Studium

10/2013 – 03/2017 Technische Universität Kaiserslautern  
Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau (B. Sc.)  
10/2017 – 10/2019 Technische Universität Kaiserslautern  
Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau (M. Sc.)

## Berufstätigkeit

03/2014 – 04/2014 Praktikum  
09/2014 – 10/2014 Freudenberg Service KG, Weinheim  
03/2017 – 09/2017 Praktikum  
Heidelberger Druckmaschinen AG  
11/2017 – 09/2019 Wissenschaftliche Hilfskraft  
Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieökonomik  
Technische Universität Kaiserslautern  
Seit 12/2019 Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

## Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

---

### bereits veröffentlicht wurden

- 01/09 Aurich, J.C.: Radio Frequency Identification (RFID) in der Fertigung – Handbuch zur Einführung in neue Anwendungsfelder.  
2009, ISBN 978-3-941438-08-8 € 30,-
- 02/09 Stürenburg, B.: Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen.  
2009, ISBN 978-3-941438-13-2 € 30,-
- 03/09 Eyrich, T.: Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen – Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen.  
2009, ISBN 978-3-941438-12-5 € 30,-
- 04/09 von Killisch-Horn, G.: Erfahrungsbasierte Implementierung von APS-Systemen in der Einzel- und Kleinserienproduktion.  
2009, ISBN-978-3-941438-17-0 € 30,-
- 05/09 Naab, C.: Auslaufmanagement – Konzept zur Abwicklung des Serienauslaufs in der Produktion.  
2009, ISBN-978-3-941438-26-2 € 35,-
- 06/09 Herzenstiel, P.: Hochleistungsplanschleifen mit einer definiert gesetzten CBN-Schleifscheibe.  
2009, ISBN-978-3-941438-28-6 € 35,-
- 07/09 Aurich, J.C.: Lebenszyklusorientierte Konfiguration von Produkt-Service Systemen – Ein Leitfaden für die Praxis.  
2009, ISBN-978-3-941438-27-9 € 30,-
- 01/10 Aurich, J.C.: Organisationsveranstaltung und Kompetenzaufbau bei der Gestaltung und Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.  
2010, ISBN-978-3-941438-37-8 € 35,-
- 02/10 Aurich, J.C.: Gestaltung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.  
2010, ISBN-978-3-941438-38-5 € 35,-
- 03/10 Aurich, J.C.: Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.  
2010, ISBN-978-3-941438-39-2 € 35,-
- 04/10 Franke, V.: Einfluss der Werkzeugschneidkante auf die Bohrungsqualität bei der spanenden Bearbeitung langfaserverstärkter Kunststoffe.  
2010, ISBN-978-3-941438-53-8 € 35,-

- |       |   |        |
|-------|---|--------|
| 05/10 | Sudermann, H.: Gratbildung beim Schleifen – Experimentelle Analyse und Modellierung der Gratbildung sowie Ansätze zur Gratminimierung.<br>2010, ISBN-978-3-941438-54-5    | € 35,- |
| 06/10 | Shahzad, M.A.: Analysis of the Machinability of an Aluminum Matrix Composite Material.<br>2010, ISBN-978-3-941438-56-9  | € 35,- |
| 07/10 | Gómez Kempf, F.A.: Flexibilitätsorientierte Produktionssysteme – Modulare Gestaltung, Einführung und Nutzung.<br>2010, ISBN-978-3-941438-58-3                             | € 35,- |
| 01/11 | Engmann, J.: Galvanisch gebundene Mikroschleifstifte – Entwicklung, Herstellung und Einsatz.<br>2011, ISBN-978-3-941438-59-0  | € 35,- |
| 02/11 | Leitz, L.: Beitrag zur Beherrschung der Gratbildung bei Bohrungsverschneidungen.<br>2011, ISBN-978-3-941438-72-9  | € 35,- |
| 03/11 | Siener, M.: Sicherung der Qualitätsfähigkeit von Produktionsprozessen.<br>2011, ISBN-978-3-941438-79-8  | € 35,- |
| 04/11 | Wolf, N.: Modell zur Unterstützung der Analyse von Ausfallursachen bei komplexen mechatronischen Systemen.<br>2011, ISBN-978-3-941438-89-7                                | € 35,- |
| 01/12 | Faltin, M.: RFID-Einsatz in fertigungstechnischen Prozessketten – Identifikation und Beurteilung von Einsatzpotentialen.<br>2012, ISBN-978-3-941438-97-2                  | € 35,- |
| 01/13 | Lauer, C.: Integriertes Modell zur Materialflusssimulation und zur Visualisierung in der Virtuellen Realität.<br>2013, ISBN 978-3-943995-19-0                             | € 35,- |
| 02/13 | Aurich, J.C.: Qualitätsorientierte Instandhaltungsplanung und -steuerung in produktionstechnischen Prozessketten Handbuch für die Praxis.<br>2013, ISBN 978-3-943995-21-3 | € 35,- |
| 03/13 | Kirsch, B.: Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Zufuhr beim Schleifen – Analyse externer und interner Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden.<br>2013, ISBN 978-3-943995-25-1   | € 35,- |
| 04/13 | Schweitzer, E.J.: Prozessorientiertes Dienstleistungsproduktionssystem.<br>2013, ISBN 978-3-943995-30-2   | € 35,- |

05/13	Malak, R. C.: Methode zur softwarebasierten Planung technischer Änderungen in der Produktion. 2013, ISBN 978-3-943995-34-3	€ 35,-
06/13	Yang, X.: Sound Simulation and Visualization in virtual Manufacturing Systems. 2013, ISBN 978-3-943995-39-8	€ 35,-
07/13	Kranz, J.-N.: Konzept zur Vermeidung von Produkt-Piraterie Risiken – Ein Ansatz für die Ersatzteile der Investitionsgüterindustrie – 2013, ISBN 978-3-943995-46-6	€ 35,-
01/14	Mannweiler, C.: Konfiguration investiver Produkt-Service Systeme. 2014, ISBN 978-3-943995-61-9	€ 35,-
02/14	Aurich J. C. (Hrsg.): Produktivität und Qualität von Serviceprodukten – Ein Leitfaden für die Praxis. 2014, ISBN 978-3-943995-65-7	€ 35,-
03/14	Waltemode S.: Qualitätsbewertung technischer Produkt-Service Systeme. 2014, ISBN 978-3-943995-68-8	€ 35,-
04/14	Bohr C. L.: Vermeidung struktureigener Produktpiraterie bei Ersatzteilen. 2014, ISBN 978-3-943995-69-5	€ 35,-
05/14	Olenburg A.: Tribologisches Prozessverhalten beim Bearbeiten von Feinsteinzeug-Fliesen. 2014, ISBN 978-3-943995-76-3	€ 35,-
01/15	Zimmermann M.: Drehen von Aluminium - Matrix - Verbundwerkstoffen – Analyse thermischer und mechanischer Einflüsse auf die Fertigungsgenauigkeit bei der Trockenbearbeitung. 2015, ISBN 978-3-943995-94-7	€ 35,-
01/16	Adam M.: Konzept zum Umgang mit scheinbar zufälligen Fehlern an technischen Systemen – eine Systematik. 2016, ISBN 978-3-95974-008-1	€ 35,-
02/16	Walk M.: Integriertes Desktopmaschinensystem für die Herstellung und Anwendung ultrakleiner Mikroschleifwerkzeuge. 2016, ISBN 978-3-95974-021-0	€ 35,-
03/16	Carrella M.: Zerspanungsmechanismen beim Mikroschleifen von einkristallinem Silizium. 2016, ISBN 978-3-95974-032-6	€ 35,-
01/17	Reichenbach I. G.: Beitrag zur Beherrschung der Mikrofräsbearbeitung von Polymethylmethacrylat. 2017, ISBN 978-3-95974-042-5	€ 35,-

- 02/17 Fallenstein F.: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei VHM-Wendelbohrern  
- Analyse der Einflüsse von Kühlkanalaustrittsposition und  
KSS-Volumenstrom auf die Temperatur im Schneidkeil.  
2017, ISBN 978-3-95974-056-2 € 35,-
- 03/17 Winkes P.: Vorgehensmodell für den systematischen Einsatz  
der Virtuellen Realität zur Unterstützung des Montageplanungsprozesses.  
2017, ISBN 978-3-95974-057-9 € 35,-
- 04/17 Schneider F.: Analyse der Spanbildung und Oberflächenmorphologie  
beim Mikrospanen von Titanwerkstoffen  
2017, ISBN 978-3-95974-059-3 € 35,-
- 05/17 Mert G.: Kumulierter Energieaufwand technischer Produkt-Service Systeme  
2017, ISBN 978-3-95974-074-6 € 35,-
- 06/17 Weidig C.: Konzept zum prozessgetriebenen Anforderungsmanagement  
für die Entwicklung mobiler Fabrikplanungs-Apps  
2017, ISBN 978-3-95974-075-3 € 35,-
- 07/17 Cichos D.: Physikalische Modellierung technischer Änderungen  
in der Produktion  
2017, ISBN 978-3-95974-073-9 € 35,-
- 01/18 Effgen C.: Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen  
Schleifwerkzeugen – Konzeptionierung, Entwicklung und Bewertung  
am Beispiel von Vollhartmetallfräswerkzeugen  
2018, ISBN 978-3-95974-089-0 € 35,-
- 02/18 Kasakow G.: Entwicklung einer ereignisdiskreten Produktionssteuerung  
2018, ISBN 978-3-95974-090-6 € 35,-
- 03/18 Mayer P.: Verformungsinduzierte Martensitbildung beim kryogenen  
Drehen von metastabilem austenitischem Stahl  
2018, ISBN 978-3-95974-098-2 € 35,-
- 04/18 Herder C.: Konzept zur impliziten Identifikation und Planung  
von Technologien für die Produktion  
2018, ISBN 978-3-95974-101-9 € 35,-
- 01/19 Müller C.: Kompakte Luftlagerspindeln für die spanende Mikrobearbeitung  
auf Desktop-Werkzeugmaschinen  
2019, ISBN 978-3-95974-105-7 € 35,-
- 01/20 Meissner H. M.: Integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung  
cyber-physischer Produktionssysteme  
2020, ISBN 978-3-95974-125-5 € 35,-

- 02/20 Sinnwell C.: Methode zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis früherer Produktinformationen – Ein Beitrag zur Integration von Produktionssystemplanung und Produktentwicklung unter Einsatz des MBSE  
2020, ISBN 978-3-95974-127-9 € 35,-
- 03/20 Bohley M.: Prozess-Maschine-Interaktion beim Mikrofräsen von cp-Titan  
2020, ISBN 978-3-95974-130-9 € 35,-

### **Veröffentlichung erfolgt nur noch über KLUEDO**

- 01/21 Hotz H.: Kryogenes Drehen metastabiler austenitischer Stähle – Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Einstellgrößen, Prozessgrößen und Oberflächenmorphologie  
2021
- 02/21 Arrabiyeh P. A.: Electroless Plated Micro Pencil Grinding Tools: Conception, Manufacturing, and Application  
2021
- 03/21 Yi L.: Eco-Design for Additive Manufacturing Using Energy Performance Quantification and Assessment  
2021
- 01/22 Kölsch P.: Agile Planung von Produkt-Service Systemen durch den Einsatz von Design Thinking  
2022
- 02/22 Klauer K.: Mikrofräsen flächenhafter Kalibriernormale auf Basis realer Bauteiloberflächen  
2022
- 03/22 Greco S.: Additiv-Subtraktive Prozesskette in der Mikrobearbeitung – Analyse der Einflüsse auf die Prozess- und Prozessergebnisgrößen beim selektiven Laserschmelzen und Mikrofräsen von Edelstahl 1.4404  
2022
- 04/22 Siedler C.: Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU  
2022
- 05/22 Kirsch B.: Spezialanwendungen von Schleifscheiben – Technologische Möglichkeiten und Anforderungen sowie deren Nachhaltigkeit  
2022
- 01/23 Basten S.: Sub-zero Kühlschmierstoffe: Wirkmechanismen und Einsatzverhalten am Beispiel der Drehbearbeitung  
2023

- 02/23 Lange A.: Interaktion zwischen Prozess, Werkzeug, Spindel und Maschine bei der spanenden Mikrobearbeitung. Simulationsgestützte Untersuchung des Mikrofräsens und Mikroschleifens  
2023
- 03/23 Glatt M. F.: Untersuchung des Einsatzes eines Digitalen Zwillings zur Physiksimulation von Materialflüssen in Cyber-Physischen Produktionssystemen  
2023
- 01/24 Weber D.: Simulationsgestützte Vorhersage und Minimierung des eigenspannungsbedingten Verzugs beim Fräsen dünnwandiger Aluminium-Strukturbauteile  
2024
- 02/24 Klar M.: Automatisierte und simulationsbasierte Fabriklayoutplanung mittels Reinforcement Learning  
2024
- 03/24 Hartig J.: Einsatz elastisch gebundener Schleifscheiben bei der Schneidkantenpräparation von Hartmetall-Wendescheidplatten  
2024
- 04/24 Gutzeit K.: Tiefkalte Kühlstrategien bei der Fräsbearbeitung - Einfluss auf den Werkzeugverschleiß sowie die Prozess- und Prozessergebnisgrößen beim Fräsen von Ti-6Al-4V  
2024
- 01/25 Kieren-Ehse S.: Analyse zum Kühlschmierstoffeinsatz beim Mikrofräsen von cp-Titan  
2025
- 02/25 Ehmsen S.: Untersuchung der Nachhaltigkeit des Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißens - ein Modell zur Prognose spezifischer Umweltauswirkungen  
2025

ISSN 0937-9061