

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

“Die reinste Form des Wahnsinns ist es, alles beim Alten zu lassen und gleichzeitig zu hoffen, dass sich etwas ändert.”
(Albert Einstein, 1879 – 1955)

In Anbetracht der weltweit zunehmenden Knappheit natürlicher Ressourcen steht die Menschheit vor der Herausforderung, eine Umorientierung hin zu einem ressourceneffizienten Wirtschaften zu vollziehen [WIR24]. Dieser Handlungsbedarf wird zukünftig an Bedeutung gewinnen, insbesondere bei einem weiteren Anstieg des globalen Ressourcenbedarfs, der sich in den letzten fünf Jahrzehnten verdreifacht hat [REC24]. Die Förderung und Verarbeitung von natürlichen Ressourcen verursacht einen signifikanten Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen [REC24], die die primäre Ursache des anthropogenen Klimawandels darstellen, dem bekanntesten Beispiel einer systemischen weltweiten Umweltveränderung [REU24].

Der Ressourcenbedarf der deutschen Volkswirtschaft ist zwischen 2020 und 2023 jährlich um durchschnittlich 2,0 % gestiegen [WIR24], während das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt im gleichen Zeitraum um durchschnittlich 1,6 % gewachsen ist [STA24]. Diese Diskrepanz deutet auf eine sinkende Ressourceneffizienz in der jüngsten Vergangenheit hin, was sich auch in einem Rückgang des Anteils an verarbeiteten Sekundärmaterialien um 16 % im gleichen Zeitraum zeigt [CIR23]. Um die Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft zu stärken, hat die Bundesregierung die *Steigerung der Ressourceneffizienz* als einen strategischen Schwerpunkt in der Zukunftsstrategie *Forschung und Innovation* verankert [PRE24]. Das Ziel der Zukunftsstrategie besteht darin, durch Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung die deutsche Volkswirtschaft möglichst klimaneutral und resilient zu gestalten sowie das Wirtschaftswachstum zu fördern [PRE24]. Die Ressourceneffizienz ist von hoher Relevanz für die Makroökonomie, da das Ressourceneinsparpotenzial in Form von Material und Energie alleine für das produzierende Gewerbe in Deutschland auf mehr als 10 Milliarden Euro jährlich geschätzt wird [BUN21]. Auch aus mikroökonomischer Sicht besitzt die Ressourceneffizienz eine erhebliche Relevanz, da Unternehmen durch ressourceneffizientes Wirtschaften ihre Kosten drastisch senken und ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken können [BUN21]. Dies ermöglicht die Erschließung neuer Märkte, die Sicherung von Arbeitsplätzen sowie die Generierung eines positiven Unternehmensbildes [ANS22].

Folglich kann konstatiert werden, dass die Steigerung der Ressourceneffizienz sowohl einen Beitrag zur Reduzierung der Klimaerwärmung leistet als auch, insbesondere im produzierenden Gewerbe, eine strategische Notwendigkeit zur Sicherung und zum Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit darstellt. Trotz der Notwendigkeit zur Steigerung der Ressourceneffizienz waren die bislang ergriffenen Maßnahmen unzureichend, was sich in der sinkenden Ressourceneffizienz in den vergangenen Jahren widerspiegelt. Die Forderung nach einer gesteigerten Ressourceneffizienz bei gleichzeitigem Festhalten an altbewährten Prozessabläufen kann demnach nicht zum Erfolg führen und stellt ein Dilemma, analog zur eingangs zitierten Aussage von Albert Einstein, dar.

1.2 Motivation und Handlungsbedarf

Das Formgebungsprinzip additiver Fertigungsverfahren, welches die endkonturnahe Fertigung kundenindividueller und komplexer Bauteile ermöglicht, weist ein signifikantes Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf [DIN22b, KOH24]. Dabei steht additive Fertigung laut

DIN EN ISO/ASTM 52900 als Oberbegriff für verschiedene „Technologien, bei denen Materialien sukzessive miteinander verbunden werden“ [DIN22b]. Die Branche der additiven Fertigung gilt als innovativ, was sich an einer überproportionalen Zunahme an Patentanmeldungen widerspiegelt. Die jährliche Anzahl an Patentanmeldungen im Bereich der additiven Fertigung stieg zwischen 2013 und 2020 um durchschnittlich 26,3 % und damit um das Achtfache des Durchschnitts an Patentanmeldungen im gleichen Zeitraum [EUR23].

Insbesondere die metallbasierten additiven Fertigungsverfahren, denen eine jährliche Wachstumsrate von 26,1 % prognostiziert wird, besitzen eine hohe industrielle Relevanz [AMP23]. Darunter stellt das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (engl. Powder Bed Fusion of Metals via Laser Beam; PBF-LB/M; siehe Abbildung 1) das am meisten genutzte additive Fertigungsverfahren dar [AMP24, TOY22].

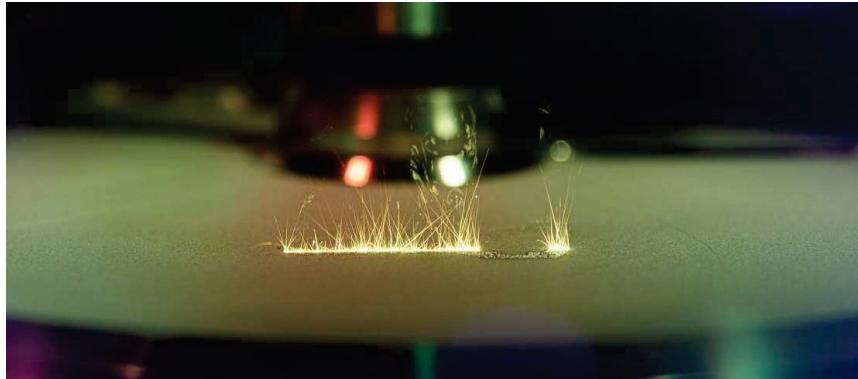


Abbildung 1: Bauteilfertigung mittels des additiven Fertigungsverfahrens Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl; Quelle: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez

Dem Potenzial zur ressourceneffizienten Fertigung kundenindividueller und komplexer Metallbauteile mittels PBF-LB/M stehen verschiedene Hemmnisse gegenüber, die eine breite industrielle Anwendung des PBF-LB/M einschränken. Ein Hemmnis hierfür stellt der Bedarf an kostenintensiven und in der Herstellung energieintensiven Materialien dar, der entlang der gesamten PBF-LB/M-Prozesskette – von der Lagerung des Ausgangsmaterials bis hin zur Fertigstellung der Bauteile – vorliegt [CAL23, MAH24]. Hierbei sind insbesondere das Metallpulver und das Inertgas sowie der energieintensive PBF-LB/M-Prozess hervorzuheben [DIE20, MAH24]. So benötigt beispielsweise der Aufbau von 1 cm³ Material mittels PBF-LB/M etwa den 200-fachen Energiebedarf im Vergleich zum Abtrag des gleichen Volumens mittels spanender Bearbeitung, vgl. Abschnitt 2.1.5 [HU17, YI18]. Weitere Hemmnisse für einen breiten industriellen Einsatz des PBF-LB/M stellen der umfangreiche manuelle Arbeitsaufwand, z. B. für die manuelle Entfernung der prozessbedingt notwendigen Stützstruktur, sowie die zeitintensive Nutzung von Maschinen und Peripheriegeräten, z. B. aufgrund der im Vergleich zur subtraktiven und formativen Fertigung geringen Produktivität von PBF-LB/M-Maschinen, dar [TAD20, MAH24].

Nach WESTKÄMPFER wird der Gewinn eines produzierenden Unternehmens als Differenz aus dem Erlös für verkaufte Produkte und den eingesetzten Ressourcen **Material, Mensch** und **Maschine** definiert [WES06]. Auf diese Definition von Ressourcen wird im Rahmen der vorlie-

genden Arbeit zurückgegriffen. Unter der Ressource *Material* wird die Menge aller für die Erzeugung von Produkten erforderlichen Materialien (z. B. in Stück) subsummiert. Nach SPINDLER werden Materialien differenziert in Rohstoffe (Grundmaterialien), Halbfertigprodukte¹ (Zukaufteile) und Hilfsstoffe² (Zusatzmaterialien), die jeweils in das Produkt eingehen, sowie Betriebsstoffe² (Verbrauchsmaterialien), die keinen Bestandteil des Produkts bilden [SPI22]. Die Ressource *Material* besitzt für produzierende Unternehmen mit steigender Tendenz den größten Anteil an den Gesamtkosten für die Fertigung von Bauteilen [STA19, STA23]. Die Ressource *Mensch* repräsentiert die Arbeitszeit der Mitarbeiter, während die Ressource *Maschine* die Laufzeit der Maschinen und Peripheriegeräte darstellt.

Die Steigerung der Effizienz einer der drei Ressourcen *Material*, *Mensch* und *Maschine* kann nicht nur die Effizienz einer anderen Ressource beeinflussen, sondern auch Auswirkungen auf die *Bauteilqualität* und *Arbeitssicherheit* besitzen [MAH24, VDI24b]. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz darf nicht zu einer Beeinträchtigung der *Bauteilqualität* und *Arbeitssicherheit* führen. Dies ist notwendig, um einerseits den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden und um Produkthaftungsrisiken zu minimieren. Andererseits ist der Arbeitgeber durch gesetzliche Vorgaben dazu verpflichtet, die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter auf einem hohen Niveau sicherzustellen [GES17, BUN23].

Zusammenfassend ergibt sich damit ein starker Handlungsbedarf zur Unterstützung der Anwender des PBF-LB/M, um den Materialbedarf (Ressource *Material*), die Arbeitszeit der Mitarbeiter (Ressource *Mensch*) und die Laufzeit der Maschinen und Peripheriegeräte (Ressource *Maschine*) entlang der PBF-LB/M-Prozesskette unter Sicherstellung von *Bauteilqualität* und *Arbeitssicherheit* systematisch zu reduzieren.

1.3 Zielsetzung und Eingrenzung des Betrachtungsraums

Basierend auf der dargelegten Ausgangssituation und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf leitet sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab:

Entwicklung einer Methodik zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim PBF-LB/M unter Sicherstellung von Bauteilqualität und Arbeitssicherheit.

Gemäß dem ökonomischen Prinzip wird *effizientes Wirtschaften* als die Erreichung eines Ziels mit dem geringstmöglichen Aufwand oder die Erreichung des höchstmöglichen Ziels bei festgelegtem Aufwand definiert [NEH23]. Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird der Begriff *Ressourceneffizienz* als die Fertigung von Bauteilen unter minimalem Einsatz der Ressourcen *Material*, *Mensch* und *Maschine* (vgl. Abbildung 2) verstanden.

¹ Bei den mittels PBF-LB/M erzeugten Produkten handelt es sich um Bauteile, die ausschließlich aus dem Rohstoff Metallpulver bestehen. Deshalb werden Zukaufteile und Hilfsstoffe im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher thematisiert.

² Gemäß SPINDLER wird die für die betriebliche Erzeugung von Produkten notwendige elektrische Energie zu den Betriebsstoffen gezählt [SPI22].

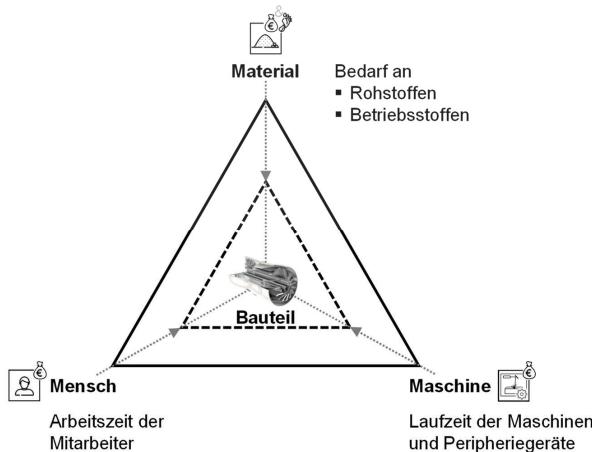


Abbildung 2: Verständnis des Begriffs Ressourceneffizienz als die Reduzierung des Bedarfs der Ressourcen Material, Mensch und Maschine bei der Fertigung von Bauteilen mittels PBF-LB/M

Um die Auswirkungen des Materialbedarfs beim PBF-LB/M auf den Klimawandel zu erfassen und zu bewerten, wird die Ressource *Material* im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch bewertet. Die ökologische Bewertung erfolgt anhand der Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung und Bereitstellung der entlang der PBF-LB/M-Prozesskette eingesetzten Roh- und Betriebsstoffe entstehen. Diese duale Bewertung steht im Einklang mit der Definition des Effizienzbegriffs nach LACHMAYER ET AL., wonach die Effizienz von Prozessen im Bereich der additiven Fertigung stets unter ökonomischen und ökologischen Aspekten zu bewerten ist [LAC21]. Eine ökologische Bewertung der Ressourcen *Mensch* (z. B. Anfahrt zum Arbeitsplatz) und *Maschine*³ (z. B. Herstellung und Transport der Maschinen und Peripheriegeräte zur PBF-LB/M-Produktionsstätte) wird nicht vorgenommen, da diese Faktoren auf Produktionsebene bei gegebener Personal- und Maschinenkapazität kaum beeinflussbar sind [FRE14].

Die Steigerung der Ressourceneffizienz beim PBF-LB/M wird durch die ursachenorientierte Ableitung und Umsetzung⁴ von Maßnahmen realisiert, die hinsichtlich drei verschiedener Wirkungsansätze unterschieden werden können:

1. Reduzierung der Bedarfsmenge einer Ressource
2. Erhöhung des Bedarfsturnus einer Ressource
3. Reduzierung der ökonomischen und/oder ökologischen Auswirkungen einer Ressource

³ Die zum Betrieb von Maschinen und Peripheriegeräten erforderlichen Betriebsstoffe (z. B. Inertgas, Energie) werden nicht durch die Ressource *Maschine*, sondern durch die Ressource *Material* bilanziert.

⁴ Unter der Umsetzung einer Maßnahme wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die technische oder organisatorische Entwicklung sowie die Anwendung einer Maßnahme subsummiert.

Um den Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit einzuschränken, wird die Taxonomie nach COOPER angewendet [COO88]. Der daraus resultierende Betrachtungsraum ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Eingrenzung des Betrachtungsraums der vorliegenden Arbeit anhand der Taxonomie nach Cooper [COO88]

Merkmal	Ausprägung						
	Kleinunternehmen	Kleine Unternehmen	Mittlere Unternehmen	Große Unternehmen			
Unternehmensgröße							
Funktionen im Unternehmen	Forschung und Entwicklung	Beschaffung	Produktion	Logistik	Vertrieb		
Unternehmensperspektive	Fertigungsprozess		Prozesskette	Produktion			
Dimensionen der Nachhaltigkeit	Ökonomie		Ökologie		Soziales		
Nachhaltigkeitsstrategie	Effizienz		Suffizienz		Konsistenz		
Produktionstyp	Einzelproduktion	Kleinserienproduktion	Serienproduktion	Sortenproduktion	Massenproduktion		
Reichweite der Maßnahmen	Prozessschritt-spezifische Maßnahme	Abteilungsweite Maßnahme		Organisationsweite Maßnahme	Organisationsübergreifende Maßnahme		
Nutzen	Ergebnisse	Methoden		Theorien	Anwendung		
Fokus der Arbeit							
Möglicher Anwendungsbereich der Arbeit							

1.4 Vorgehensweise

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

In **Kapitel 1** der vorliegenden Arbeit wird die Ausgangssituation und Motivation zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim PBF-LB/M erläutert. Darauf aufbauend wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit definiert, der Betrachtungsraum eingegrenzt sowie die Vorgehensweise dargestellt.

In **Kapitel 2** wird der Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich des Bedarfs der Ressourcen *Material*, *Mensch* und *Maschine* beim Prozess und entlang der Prozesskette des PBF-LB/M dargestellt. Zudem werden existierende Ansätze zur Bilanzierung und Steigerung der Ressourceneffizienz vorgestellt sowie der Forschungsbedarf im Kontext der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

In **Kapitel 3** werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik definiert und die Grundstruktur der Methodik vorgestellt.

In **Kapitel 4** wird die Methodik zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim PBF-LB/M unter Sicherstellung von *Bauteilqualität* und *Arbeitssicherheit* beim PBF-LB/M erarbeitet, die aus vier Modulen besteht. Basierend auf der Definition von anwenderspezifischem Ziel und Rahmenbedingungen werden Hotspots der Ressourcen *Material*, *Mensch* und *Maschine* entlang der PBF-LB/M-Prozesskette definiert. Für diese Hotspots werden ursachenorientiert Maßnahmen abgeleitet, ausgewählt und umgesetzt. Des Weiteren wird das Vorgehen zur Kontrolle der

Maßnahmen erläutert sowie erörtert, inwiefern die Methodik als kontinuierlicher Verbesserungsprozess in Unternehmen etabliert werden kann.

In **Kapitel 5** wird die Methodik anhand einer Fallstudie im Forschungs- und einer Fallstudie im Industriemfeld praktisch erprobt. Die praktische Erprobung endet mit der Evaluierung der Erfüllung von Zielsetzung und Anforderungen an die Methodik.

Zum Schluss werden in **Kapitel 6** die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick über weitere zukünftige Forschungsbedarfe gegeben.

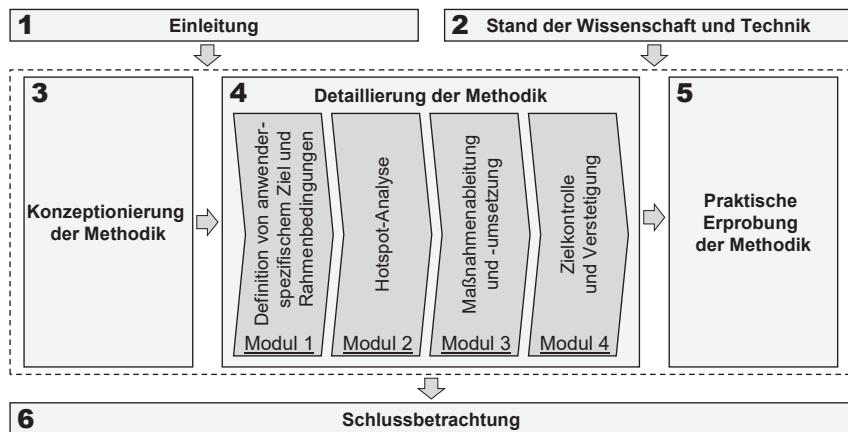


Abbildung 3: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit