

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen, speziell in Hochlohnländern, sind mit den durch die zunehmende Volatilität und Globalisierung der Märkte, dem wachsenden Preisdruck und kürzeren Produktinnovationszyklen sowie Aspekten der Nachhaltigkeit und Individualisierung bedingten Herausforderungen konfrontiert [Bal21a; Die15; Bra15, S. 1ff].

Hinzu kommt das Risiko des Produktionsausfalls, durch kurzfristige Änderungen in der Supply Chain, wie vor allem Ereignisse der jüngeren Vergangenheit gezeigt haben, [Sak21, S. 2ff]. Der Produktionsausfall ist auf die aktuellen Prozessketten zurückzuführen, welche durch globale Vernetzung sowie eine enge Taktung („Just in Sequence“) geprägt sind und eine große Abhängigkeit von nicht beeinflussbaren oder planbaren Ereignissen globalen Ausmaßes aufweisen (z. B. COVID19, Ukraine-Krieg, Handelsembargos, Naturkatastrophen/ Starkwetterereignisse oder das Schiffsunglück im Suez-Kanal) aufweisen. [tag22; Fro21; Woe20]

Jedoch bieten diese Herausforderungen und Risiken zeitgleich auch eine Möglichkeit, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, sofern die Unternehmen kundenspezifische Produkte zu geringen Kosten bei optimalem und nachhaltigem Ressourceneinsatz sowie einer schnellen Anpassungsfähigkeit an die Marktdynamik anbieten können. Derzeit stehen produzierende Unternehmen in Hochlohnländern oft vor der Wahl, entweder Massenproduktion zu betreiben oder kundenindividuelle Produkte herzustellen [Bre12, S. 17–76].

Moderne und innovative Fertigungstechnologien, wie das Additive Manufacturing (AM), spielen eine wichtige Rolle bei der Meisterung der vorher genannten Herausforderungen zur Produktion nachhaltiger, kundenindividueller und kostenoptimaler Produkte [Pil18]. Darüber hinaus bieten diese auch die Möglichkeit der Risikominimierung durch resiliente Lieferketten, indem die global vernetzten Prozessketten um einen lokalen flexiblen Produktionsansatz unter Verwendung von AM erweitert oder ergänzt werden.

Diese Fertigungstechnologien versprechen eine ressourcenschonende, werkzeuglose Herstellung von nahezu beliebig komplexen Produkten mit einem großen Maß an Flexibilität hinsichtlich Größe, Stückzahl und Material [Woh21, S. 60ff] für vielfältige Anwendungen aus beispielweise der Automobilindustrie [Car20a; Mic21], der Luft- und Raumfahrt [Ale21], der Medizintechnik [Adr19] und dem Werkzeugbau [Wol18]. Hierbei hat das laser- und pulverbettbasierte Verfahren Laser Powder Bed Fusion (LPBF) zur Herstellung metallischer Funktionsbauteile eine besondere Bedeutung. [Woh21, S. 65ff; AMP20; Gib15, S. 19–42]

Zur vollen Ausschöpfung der wirtschaftlichen [Zäh13; Woh21, S. 205ff] und technologischen [Neu19; Woh21, S. 248ff] Potenziale von LPBF sowie zu dessen Etablierung in der Produktion [Adr20; Woh21, S. 148ff] müssen bereits bei der Konzeptionierung von neuen LPBF-Produktionsmaschinen Anforderungen von den herzustellenden Produktprogrammen, aber auch von den diese Maschinen nutzenden Anwendern und

Branchen berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Frage, inwiefern in einer frühen Phase der Produktentwicklung von LPBF-Produktionsmaschinen diese diversen Anforderungen systematisch erfasst, gewichtet, bewertet und bezüglich der Auswirkungen auf die resultierenden wirtschaftlichen (z. B. Herstellungskosten) und produktionstechnischen (z. B. Durchlaufzeit, Maschinenauslastung) Kennzahlen abgeschätzt werden können.

1.1 Motivation und Problemstellung

Neben der Entwicklung und Vermarktung von Universalmaschinen war die Entwicklung von branchen- bzw. anwendungsspezifischen LPBF-Produktionsmaschinen in der Vergangenheit Bestandteil verschiedener Unternehmen, wie z. B. im Fall der Realizer 50 (der Firma Realizer) für Dental-Anwendungen [Geb10] oder der Concept X line 1000R (der Firma Concept Laser) für die Automobilbranche [Joh12]. Der Produktionsfokus dieser Maschinen lag hier jedoch immer in der Fertigung von Prototypen, Werkzeugen sowie Kleinserien zur signifikanten Verkürzung von Innovations- und Entwicklungszyklen [Gib15, S. 475ff]. Bedingt durch die zunehmende Industrialisierung des LPBF in den letzten Jahren, wird der Bedarf einer Integration in ein bestehendes, auf konventionellen Fertigungstechnologien basierendes Produktionsumfeld für eine wirtschaftliche Fertigung größer. Dadurch bedingt ändern sich die Anforderungen an LPBF-Produktionsmaschinen verstärkt [Adr20] und der Druck auf die Maschinenhersteller zur Erfüllung dieser Anforderungen durch eine passende, unternehmerisch sinnvolle Maschinentechnik steigt zunehmend. Um die effiziente und effektive Produktentstehung im Bereich der Investitionsgüter zu ermöglichen, wurden verschiedene Methodiken und Werkzeuge entwickelt und etabliert [Bre15, S. 201ff]. Diese Methodiken können für alle Anwendungsfälle und Branchen gleichermaßen genutzt werden und verfolgen im Allgemeinen die gleichen Ziele (siehe Abbildung 1-1), welche sich nach Wert- und Kostenorientierung gliedern lassen.

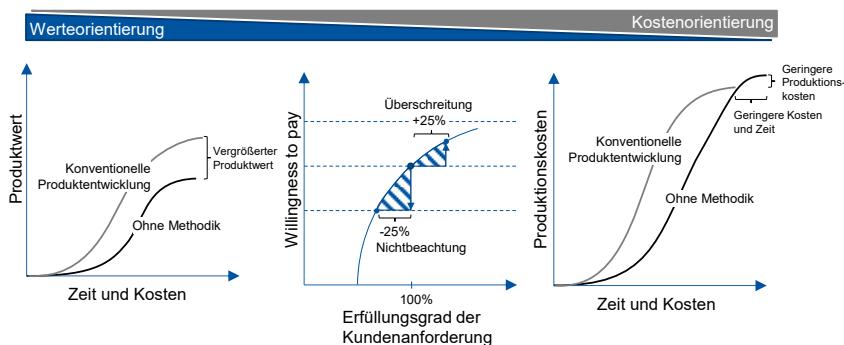


Abbildung 1-1: Die Verwendung von Produktentwicklungsmethoden soll einerseits zur Steigerung des Produktwerts (links) und zur Reduzierung der Produktionskosten (rechts) in Abhängigkeit der Zahlungsbereitschaft und Erfüllungsgrad der Kundenanforderungen (Mitte) führen [Bre15, S. 202]

Diese Allgemeine Ziele der konventionellen Produktentwicklungsmethoden können wie folgt beschrieben werden:

- 1) **Wertorientierung:** Die systematische und nachvollziehbare Formulierung von produkt- sowie projektbezogenen Anforderungen (u. a. basierend auf Kundenanforderungen, Regularien) führt bei der Verwendung einer Produktentwicklungsmethode zur Steigung des Produktwerts (siehe Abbildung 1-1, links) und zur Erreichung einer hohen Zahlungsbereitschaft (engl. willingness to pay, WTP) bei 100 % Erfüllungsquote der Kundenanforderung (siehe Abbildung 1-1, Mitte). In diesem (theoretischen) Punkt liegt die Kaufwahrscheinlichkeit bei annähernd 100 %. Eine Unter- oder Überschreitung führt zu einem nicht linearen Abfall bzw. Anstieg der WTP und damit einhergehend auch einer nicht linearen Änderung der Kaufwahrscheinlichkeit. [Die19; Spa01; Ben21, S. 27ff]
- 2) **Kostenorientierung:** Eine Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes (siehe Abbildung 1-1, rechts) kann durch die in der Methodik beschriebenen Strategien auf der Tätigkeits- und Geschäftsprozessebene erfolgen [Sei05]. Die Kostenbeeinflussung ist in der frühen Phase der Produktentwicklung am größten und verhält sich damit in entgegengesetzter Richtung zu den kumulierten Kosten, die mit zunehmender Zeit steigen (siehe auch Kapitel 2.3.3). [Die19; Ehr07, S. 35ff]

Für die Entwicklung von LPBF-Maschinen bedarf es neben den oben genannten allgemeinen Zielen auch der Berücksichtigung LPBF-spezifischer Anforderungen und Abhängigkeiten. Nur so kann die wirtschaftliche Integration in eine bestehende Produktionsumgebung ermöglicht werden. Hierzu ist folglich die Kombination eines methodischen Ansatzes zur Produktentwicklung mit einer systematischen Betrachtung notwendig, bei der die resultierenden wirtschaftlichen (z. B. Herstellungskosten) und produktionstechnischen (z. B. Durchlaufzeit, Maschinenauslastung) Kennzahlen basierend auf einem branchen- oder anwendertypischen Produktionsprogramm berücksichtigt werden. Im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien wird der größte Kostenanteil von mittels LPBF gefertigten Bauteilen durch die anteilige Abschreibung der Produktionsmaschinen verursacht [Chr18; Sch16b], weswegen die resultierenden wirtschaftlichen (z. B. Herstellungskosten) und produktionstechnischen (z. B. Durchlaufzeit, Maschinenauslastung) Kennzahlen des Produktprogramms für die Bewertung von LPBF-Produktionsmaschinenkonzepten eine wesentliche Rolle im Entwicklungsprozess einnehmen. Da in der Phase der Konzipierung noch zahlreiche Freiheitsgrade in der Produktionsmaschinenentwicklung bestehen, ist eine schnelle und zielgerichtete Reduzierung des Lösungsraumes Voraussetzung für einen effizienten Entwicklungsprozess.

Bestehende Methodiken können diesen Entwicklungsprozess bisher nicht adäquat unterstützen, auch weil in dieser frühen Phase eine unvollständige Daten- und Informationsbasis eine Reihe von Annahmen und Vereinfachungen erforderlich macht. Es fehlt somit eine Methodik, die in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses alle

maßgeblichen Aspekte basierend auf möglichst robusten Informationen berücksichtigt, um anforderungsgerechte LPBF Produktionsmaschinen in den Markt zu bringen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Gesamtzielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer praxisnahen Methodik zur systematischen Ermittlung von Anforderungen zur Konzeptionierung von branchen- und anwendungsspezifischen LPBF-Produktionsmaschinen unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen (z. B. Herstellungskosten) und produktionstechnischen (z. B. Durchlaufzeit, Maschinenauslastung) Kennzahlen für das Produktprogramm. Hierbei wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Produktprogramm als Menge aller Bauteile, welche mittels der zu entwickelnden LPBF-Maschine hergestellt werden soll definiert.

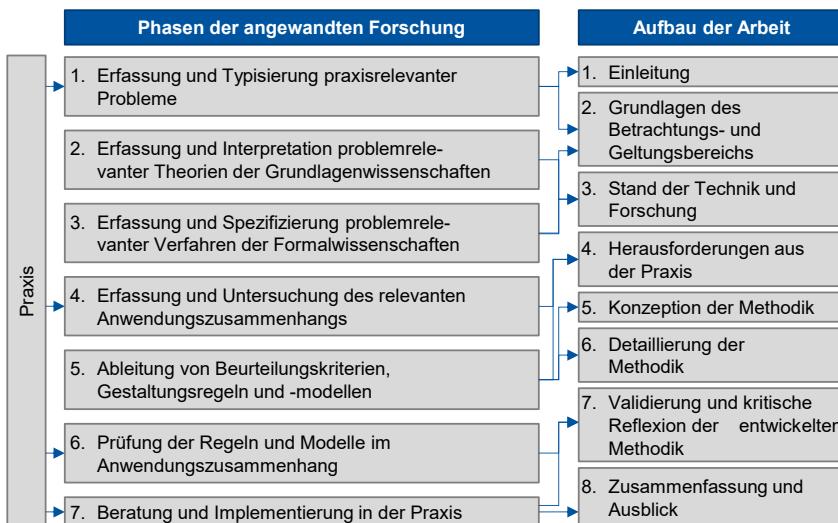
Der Fokus liegt hierbei auf der frühen Phase der Produktentwicklung (insbesondere Produktplanung, Aufgabenklärung und Konzipierung; siehe [Ben21, S. 58ff]), um inkonsistente Entwicklungspfade schnell evaluieren sowie redundante oder konträre Aktivitäten vermeiden zu können. Die Methodik soll damit einen Beitrag zur Aufwandsreduzierung und eine damit einhergehende Verkürzung der Time-to-Market erlauben.

Die zu entwickelnde Methodik soll bei der Berücksichtigung von technischen, leistungsbezogenen und wirtschaftlichen Kenngrößen dem Anspruch der ganzheitlichen Betrachtungsweise entsprechen, um dabei sowohl die Unternehmens- und Kunden- als auch die Marktperspektive erfassen zu können. Dabei soll eine möglichst große Automatisierbarkeit zur Vermeidung einer Überkompensation des Mehrwerts durch den etwaigen Mehraufwand bei der Anwendung der Methodik berücksichtigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich an dem Ansatz der angewandten Forschung nach ULRICH ET AL. und dem explorativen Forschungsansatz nach KUBICEK. Demzufolge ist ein starker Bezug zur Praxis in der angewandten Wissenschaft nicht nur zwingend erforderlich, sondern gleichzeitig Initiator für den Forschungsprozess. Von der aktuellen Situation in der Praxis ausgehend werden Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und -modelle erarbeitet sowie anschließend im Anwendungszusammenhang geprüft (siehe Abbildung 1-2, links). [Kub76, S. 14ff; Ulr84, S. 131ff]

Abgeleitet aus diesem Ansatz gliedert sich die Arbeit in acht inhaltliche Kapitel, wie in Abbildung 1-2 dargestellt. Im Fokus des ersten Kapitels stehen die Motivation und Problemstellung, die Zielsetzung sowie der Aufbau der Arbeit.



**Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit, basierend auf dem Ansatz nach ULRICH ET AL.
[Ulr16, S. 192ff]**

Die für die Arbeit relevanten Grundlagen werden im zweiten Kapitel (Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs) beschrieben. Hierfür werden zunächst das Additive Manufacturing, insbesondere das Laser Powder Bed Fusion, sowie der Produktentwicklungsprozess beschrieben.

Im dritten Kapitel (Stand der Technik und Forschung) erfolgt, auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Eingrenzung, die detaillierte Darstellung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklungsprozess, LPBF-Maschinentechnik und der daraus resultierenden wirtschaftlichen (z. B. Herstellungs-kosten) und produktionstechnischen (z. B. Durchlaufzeit, Maschinenauslastung) Kennzahlen für das Produktprogramm. Gefolgt von der Erläuterung problemrelevanter Modelle und methodischer Ansätze der Produktentwicklung sowie die Analyse und Bewertung dieser Modelle und Ansätze hinsichtlich der Eignung zur Berücksichtigung der vorher genannten Wechselwirkungen sowie zur kunden- und branchenzentrierten Produktentwicklung. Davon ausgehend werden die Herausforderungen aus der Theorie abgeleitet.

Im vierten Kapitel erfolgt die Herleitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis über eine Umfrage sowie gestützt durch die Herausforderungen aus dem Stand der Technik. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik dargestellt und anschließend die Forschungsfrage formuliert.

Basierend auf dem Handlungsbedarf für Praxis und Wissenschaft wird im fünften Kapitel (Konzeption der Methodik) zunächst eine wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit sowie die Motivation der forschungsmethodologischen Vorgehensweise

unter Berücksichtigung der Herausforderungen gegeben. Anschließend werden unter Berücksichtigung der Grundlagen der Modelltheorie und Systemtechnik die Grundlagen für die Methodik vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgen die Darstellung Erläuterung der Grobkonzeption der Methodik.

Im sechsten Kapitel (Detaillierung der Methodik) erfolgt eine Detaillierung der Methodik zur branchen- und kundenzentrierten Gestaltung von LPBF-Produktionsmaschinen. Basierend auf der Grobkonzeption sowie den Grundlagen der System- und Modelltheorie werden der Aufbau und die verwendeten Hilfsmittel der einzelnen Elemente der Methodik sowie die dazugehörigen Begrifflichkeiten auf systematische und detaillierte Weise vermittelt.

Im siebten Kapitel (Validierung und kritische Reflexion der entwickelten Methodik) liegt der Fokus auf der Überprüfung der Anwendungszusammenhänge für die entwickelte Methodik. Hierzu wird der Anwender innerhalb von drei Phasen dazu befähigt, die entwickelte Methodik anzuwenden. Die erste Phase (Analysephase) adressiert die Aufnahme von Anforderungen vom Kunden, Markt/Wettbewerb, des Produktprogramms sowie die Herleitung von Funktions- und Kostenstrukturen. Basierend auf der ersten Phase erfolgt in der anschließenden zweiten Phase (Bewertungsphase) eine systematische Kategorisierung, Gewichtung, Bewertung und Auswahl der Anforderungen sowie die Generierung von Maschinenkonzepten und deren Vorselektion. In der dritten und letzten Phase (Gestaltungsphase) erfolgt die Beurteilung von LPBF-Produktionsmaschinen mit dem Ziel der finalen Festlegung eines anforderungsgerechten LPBF-Produktionsmaschinenkonzepts. Das Kapitel schließt mit der Zusammenfassung der Ergebnisse und einer kritischen Evaluierung der entwickelten Methodik.

Im achten Kapitel (Zusammenfassung und Ausblick) werden die zentralen Aspekte der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und basierend auf der kritischen Evaluierung der Methodik der weitere Forschungsbedarf in Ausblick gestellt.