

Laser-Strahlschmelzen – Technologie mit Zukunftspotenzial

Ein Handlungsleitfaden



Impressum

Autoren

Gisela Lanza
Robin Kopf
Marielouise Zaiß
Nicole Stricker
Niclas Eschner
Shun Yang
Alexander Jacob
Andreas Schönle
Lisa Webersinke
Lisa Wirsig

Gestaltung und Satz

DER PUNKT GmbH, Karlsruhe

Stand

Juni 2017

Druck

Stober GmbH

Titelbildnachweis

Quelle: Trumpf

ISBN-Nummer

978-3-00-056913-5

Gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

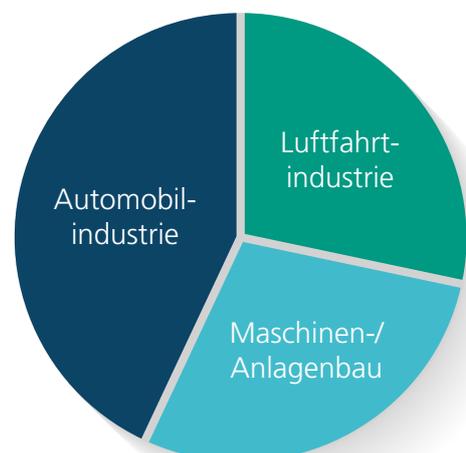
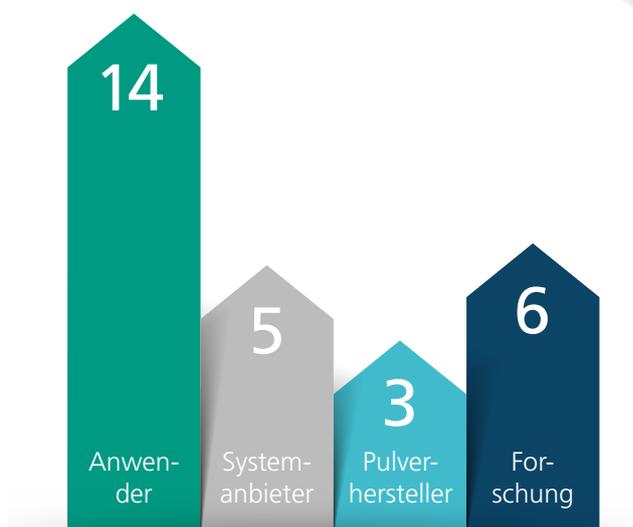
Betreut vom



Studienteilnehmer

- Additive Industries
- Autodesk
- BMW Group
- Bosch
- Bosch Rexroth
- Daimler
- Direct Manufacturing Research Center (DMRC)
- EDAG Engineering
- Rosswag
- Fraunhofer ILT
- GKN Sinter Metals Engineering
- GKN Aerospace
- H&H
- John Deere
- MTU Engines
- National Institute of Standards and Technology (NIST)
- Renishaw
- Siemens
- SLM Solutions
- Trumpf
- Witzmann
- Huazhong University of Science and Technology (HUST)
- Nanjing University of Science and Technology (NUST)
- Northwest Institute for Nonferrous Metal Research (NIN)
- und weitere

28 Teilnehmer



Vorwort der Verfasserin

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien ist vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft ein entscheidender Wettbewerbsfaktor für produzierende Unternehmen. Von additiven Fertigungsverfahren versprechen sich viele Unternehmen aktuell ein besonders großes Innovationspotenzial. Viele Anwendungsfelder scheinen denkbar, aber wenige sind aktuell wirtschaftlich darstellbar. Vor diesem Hintergrund ist eine zielgerichtete Entwicklung umso wichtiger, um die realistischen Anwendungsfelder voranzutreiben und somit die Technologie zu etablieren.

Handlungsleitfäden erlauben abgestimmte Entwicklungsaktivitäten und ermöglichen es, Technologien gezielter auf die Bedürfnisse der Industrie zu entwickeln. Sie tragen damit zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie am Produktionsstandort Deutschland bei. Vor diesem Hintergrund entstand durch das Institut für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) dieser Handlungsleitfaden zur Industrialisierung der additiven Fertigungstechnologie Laser-Strahlschmelzen (LBM). Diese additive Technologie weckt für die metallische Fertigung aktuell das breite Interesse potenzieller Anwender.

Im Rahmen von zahlreichen Experteninterviews und Workshops konnten Handlungsfelder und Entwicklungsaktivitäten im Feld des Laser-Strahlschmelzens identifiziert werden. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen werden in diesem Handlungsleitfaden Forschungsbedarfe bzw. zukünftige Förderempfehlungen abgeleitet.

Wir möchten uns an dieser Stelle für die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), die Unterstützung des Projektträgers VDI Technologiezentrum GmbH und insbesondere bei den vielen aktiven Teilnehmern aus der Industrie und Forschung, die zum Gelingen der Studie und dem entstandenen Handlungsleitfaden beigetragen haben, bedanken.



Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
1. Einleitung	12
1.1 Laser-Strahlschmelzen	14
1.2 Methodik	15
2. Aktueller Stand und erwartete Entwicklung	18
2.1 Produktion mit LBM heute	19
2.2 Erwartete Weiterentwicklung und Einflüsse auf die LBM-Fertigung	23
2.3 Benötigte Partner zur Industrialisierung des LBM-Verfahrens	26
2.4 Bedeutende Fortschritte einzelner Branchen für das LBM-Verfahren	27
2.5 Entwicklung des Marktes	29
3. Anforderungen der Anwender	30
3.1 Variantenreiche individualisierte Serienproduktion	31
3.2 Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile	33
3.3 Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen	34
3.4 Individualisierte Produktion mit Multi-Material Bearbeitung	35
3.5 Produktion auf Basis forschungsgetriebenen moderatem technologischen Fortschritts	36
3.6 Eingrenzung der Zielklassen	37
4. Entwicklungsmaßnahmen zur Industrialisierung von LBM	40
4.1 Variantenreiche individualisierte Serienproduktion	42
4.2 Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile	47
4.3 Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen	51
5. Handlungsempfehlungen	54
6. Literatur	58

Zusammenfassung

Additive Fertigungsverfahren haben sich in den vergangenen Jahren im Prototypenbau etabliert: Der deutlich höhere Freiheitsgrad im Bauteildesign sowie der Wegfall von Werkzeugkosten wecken das Interesse der Industrie, diese Verfahren auch für die Serienproduktion zu verwenden.

Für die Fertigung mit Metallen verspricht vor allem das Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting, LBM) großes Potenzial. Aus dem jetzigen Stand der Technik eignet sich dieses allerdings nur bedingt für die Serienanwendung. Um LBM an die Anforderungen und Bedürfnisse möglicher Anwender anzupassen, muss es entsprechend weiterentwickelt werden. Die vorliegende Studie leitet geeignete Maßnahmen ab, die das Verfahren für eine zielgerichtete Industrialisierung vorbereiten und priorisiert diese.

Experten schreiben dem LBM-Verfahren ein großes Potenzial für die Serienfertigung zu. Allerdings müssen hierfür weitere Entwicklungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Die Studie zeigt zudem zukünftige Entwicklungstrends des LBM-Verfahrens auf und kategorisiert potenzielle wirtschaftliche Einsatzgebiete der Anwender. Entwicklungsrroadmaps helfen dabei, die Anwenderbedürfnisse dieser Einsatzgebiete zu erfüllen. Basierend auf 28 Interviews sowie Workshops mit anerkannten Experten aus der Industrie und Forschung ließen sich letztlich Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung, Verbände und Politik ableiten. Die notwendigen Entwicklungstätigkeiten wurden in einer Roadmap festgehalten.

Durch Experteninterviews und einen Workshop konnten Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung, Verbände und Politik abgeleitet werden.

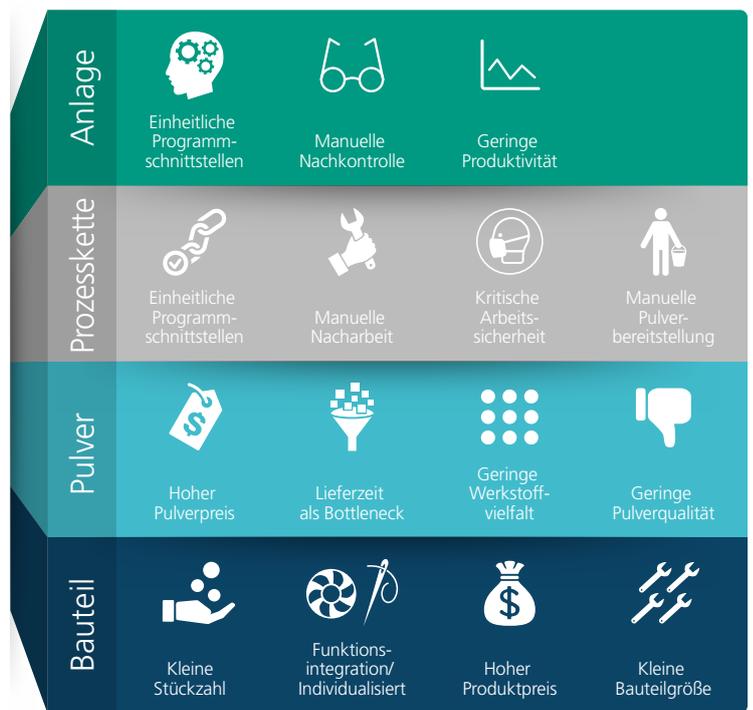


Abb. 1: Die Eigenschaften von LBM heute

LBM heute und Erwartungen

Abbildung 1 beschreibt diejenigen Bereiche des LBM-Produktionsprozess, in denen die heute verfügbaren LBM-Systeme vor Herausforderungen bezüglich der Serienanwendung stehen. Die geringe Prozessstabilität und Produktivität der LBM-Anlagen sowie der gesamten Prozesskette gelten dabei als größte Hürden. Im Bereich der Anlagen sehen sich vor allem Anlagen- und Softwarehersteller vor große Erwartungen gestellt, um Defizite in der Technik zu beheben. Entlang der Prozesskette müssen Automatisierungstechniker unterstützen, um Programm-schnittstellen, Arbeitsprozesse und Sicherheitsmaßnahmen an die Anforderungen einer Serienproduktion anzupassen. Doch nicht nur Anlagen und Prozesse müssen angepasst werden, auch bei den verwendeten Materialien und von den entstehenden Bauteilen erwartet die Industrie große Entwicklungen: So sollen die Pulverwerkstoffe eine größere Werkstoffvielfalt, eine höhere Qualität und geringere Preise aufweisen. Das LBM-Verfahren eignet sich zum heutigen Zeitpunkt vor allem für Bauteile in kleinen Stückzahlen.

Anwender von LBM achten vor allem auf Akteure der Luft- und Raumfahrt sowie auf Turbinenbauer. Von Ihnen werden vor allem qualitätsrelevante Kenntnisse erwartet, wie etwa ein grundlegendes Verständnis der Wirkzusammenhänge im Prozess, die Weiterentwicklung der Prozessstabilität sowie verfahrensgerechte Konstruktionsansätze. Daneben verlangen Automobilbauer Fortschritte in der Prozessoptimierung entlang der Prozesskette. Der Einstieg von Herstellern konventioneller Werkzeugmaschinen sowie Anbieter aus dem asiatischen Raum verschärft voraussichtlich den Wettbewerb unter den Anlagenherstellern.

In der Automobilindustrie wird die Elektromobilität als großer Hebel eingestuft. Dabei ist das Stimmungsbild uneinheitlich, ob die weniger komplexen Antriebsstränge die Entwicklung von LBM verlangsamen, oder die neu zu entwickelnden Antriebskonzepte in kleiner Stückzahl die Entwicklung beschleunigen.

Anforderungen der Anwender an die Serienfertigung mit LBM

Die Anforderungen der Anwender hängen vom individuell geplanten Einsatzzweck ab. Die Studie definiert aus den Anforderungen der Anwender Klassen, die als besonders relevant betrachtet werden:

- Variantenreiche, individualisierte Serienproduktion
- Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile
- Kostengünstige Produktion in hoher Stückzahl

Diese drei Klassen stellen Extremausprägungen dar, zwischen denen sich die Anwender mehrheitlich einordnen lassen. Die Interviews zeigten zudem Szenarien einer „Individualisierten Produktion mit Multi-Material Bearbeitung“ und einer „Produktion auf Basis forschungsgetriebenen, moderaten technologischen Fortschritts“. Die beiden Szenarien galten aber bei der Mehrzahl der Anwender als weniger relevant oder ihre technische Machbarkeit wurde deutlich in Frage gestellt.

Handlungsempfehlungen zur Erreichung der Serienreife von LBM

Um die einzelnen Anforderungen zu erfüllen, wurden Entwicklungsmaßnahmen erarbeitet und in Roadmaps zeitlich eingeordnet. Durch die Identifikation von Schnittmengen

sowie eine anschließende individuelle Priorisierung der Maßnahmen, können die folgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Diese richten sich an Unternehmen, Forschung, Verbände und Politik.

Die **Steigerung der Produktivität** ist eine Serienanforderung, die unabhängig von der Anwenderklasse ist. Hierfür muss die Effizienz des LBM-Verfahrens gesteigert werden, etwa durch Multi-Laser-Konzepte oder eine Parallelisierung von Belichtung und Beschichtung. Zudem ist es wichtig, neue Konzepte für die Anlagen inkl. der Vor- und Nachbearbeitungsstationen zu entwickeln. Eine Verteilung der Arbeitsschritte auf einzelne Stationen und eine Parallelisierung der Tätigkeiten führt zu kürzeren Nebenzeiten. Auch die Kombination mit konventionellen Fertigungsverfahren (Aufbauen auf Halbzeugen, Umgießen oder -sintern) ist zu befähigen.

Die **Erhöhung der Prozessstabilität** stellt ebenfalls eine Kernforderung dar. Dafür müssen Prozessgrundlagen und deren Abbildung in geeigneten Simulationstools erforscht und das Personal entsprechend qualifiziert werden. Besonders der Einfluss von Materialien und Pulverwerkstoffen ist zu beschreiben. Normen und Richtlinien müssen Eingriffsgrenzen definieren. Parallel muss die existierende Messtechnik und deren Anwendung für die Qualitätssicherung im LBM-Prozess angepasst werden. Geeignete Sensorik und eine intelligente Regelung sind notwendig, um insbesondere in der Anfangsphase der Serienanwendung, aber auch darüber hinaus die Qualität abzusichern.

Anwender benötigen eine **produktive intelligente Prozesskette**. Dies beinhaltet digitale Software- und Sensorlösungen zur Steuerung der Nachverfolgbarkeit von Bauteilen, insbesondere bei einer variantenreichen Produktion. Außerdem sind an CAD-Systeme gekoppelte Softwarelösungen für die Vorbereitung von Aufträgen, wie etwa dem Nesting, erforderlich. Modelle zur Herstellkostenberechnung helfen, die Fertigungsverfahren entlang der Prozesskette optimal auszuwählen. Ein Modell zur Lebenszykluskostenberechnung kann in Zukunft den Nutzen des Verfahrens im Einsatz zeigen. Auch konventionelle zerspanende Nachbearbeitungsschritte müssen für eine konturnahe Fertigung mit LBM angepasst werden. Konventionelle Prozesse wie etwa die Zerspanung und Sekundärprozesse, wie etwa beim Entfernen von Stützen oder das Entfernen von Pulver, sollten automatisiert werden, falls dies wirtschaftlich sinnvoll ist.

Des Weiteren sind Handhabungssysteme anzupassen: Spannsysteme müssen so etwa auf bionische Bauteile eingestellt werden.

Organisationsübergreifend gilt es, vor allem diejenigen Geschäftsmodelle weiterzuentwickeln, die den Nutzen von LBM einsetzen. Um die Fertigung durch das Verfahren zu erleichtern, ist es wichtig, Konstruktionselemente und

Designrichtlinien in zentralen Bibliotheken festzuhalten. Verbände und Gremien sollten Normen für LBM, in enger, aktiver Zusammenarbeit mit Unternehmen und Forschung, weiter vorantreiben. Dabei sollten sie insbesondere Qualitätskriterien für Werkstoffe sowie Anlagen- und Prozesskennzahlen vereinheitlichen. Zudem müssen Plattformen aufgebaut werden, um Wissenstransfer und Dienstleistungen darzustellen.

Entwicklungsmaßnahmen zur Erreichung der Serienanforderungen:



Abb. 2: Entwicklungsmaßnahmen zur Erreichung der Serienanforderungen

1. Einleitung



Vorgehen

Teil 1 (Expertenbefragung): Anforderungen an den Serieneinsatz



Anwenderspezifische Entwicklungsziele für den Serieneinsatz

Teil 2 (Workshop): Roadmap



Handlungsempfehlungen für die Entwicklung zum Serieneinsatz

Abb. 3: Vorgehen zur Entwicklung des Handlungsleitfadens

In der Industrie steigt seit Jahren das Interesse additive Fertigungsverfahren in der Serienproduktion einzusetzen. Dabei wird für Metalle vorrangig das Fertigungsverfahren Laser-Strahlschmelzen (LBM) fokussiert.

Regelmäßig werden von Anwendern und potenziellen Anwendern Anforderungen zur Industrialisierung an das Fertigungsverfahren, die Hersteller von Anlagen und die Politik hinsichtlich Förderschwerpunkten gestellt. Bei den Anwendern selbst zeichnen sich unterschiedliche Entwicklungsbedarfe an die Serienanwendung ab. So sind etwa der erwartete Automatisierungsgrad und geforderte Werkstoffeigenschaften unterschiedlich. Fragen zu benötigten Anlagenkonzepten sowie die Akzeptanz bei den Anwendern sind noch nicht geklärt. Dennoch zeichnet sich bei den Anwendern ein Trend ab, der es erlaubt Synergien und Überschneidungen aufzuzeigen und so die Entwicklungsbedarfe zur Priorisieren.

Die vorliegende Studie „Laser-Strahlschmelzen – Technologie mit Zukunftspotenzial“ fokussiert die Erwartungen und Vorgehensweise der nächsten 10 Jahre. Sie befasst sich mit der Frage, wie die Gemeinsamkeiten aus den Entwicklungsbedarfen der unterschiedlichen Anwender genutzt werden können, um schneller einen für Viele akzeptablen Stand des LBM-Verfahrens zu erreichen. Es wird aufgezeigt, welche Anforderungen sich bei Anwendern abzeichnen und somit in der Entwicklung des Laser-Strahlschmelzens beachtet werden müssen. Die Anforderungen werden in Klassen zusammengefasst und geben Auskunft über die jeweiligen Entwicklungsziele. Für jede Zielklasse wird untersucht, wie beispielsweise Anlagen und Prozessketten in 10 Jahren aussehen müssen oder welche Erwartungen an Pulverwerkstoffe gestellt werden.

Die Zielsetzung der Studie sind festgelegte Entwicklungsmaßnahmen für eine zielgerichtete Industrialisierung des

Laser-Strahlschmelzens (LBM). Dazu sollen zukünftige Entwicklungen des LBM-Verfahrens und potenzielle wirtschaftliche Einsatzgebiete eruiert werden. Hieraus werden Handlungsempfehlungen für Unternehmen, Forschung, Verbände und Politik abgeleitet und priorisiert.

Die Studie richtet sich wesentlich an Hersteller von Anlagen, deren Peripherie, Softwarehersteller, Forschung und Politik, um durch gezielte Entwicklung und Förderung, die drängendsten Entwicklungsbedarfe der Anwender zu treffen. Gleichzeitig soll die Studie Anwendern helfen, ihre eigenen strategische Ausrichtung im Branchenumfeld zu positionieren und damit die eigenen Entwicklungsanstrengungen richtig einzusetzen.

Die Studienergebnisse wurden zweistufig durch Expertenbefragungen und Workshops erarbeitet (Abbildung 3). In den Expertenbefragungen wurden mit den Anwendern individuellen Anforderungen an den Serieneinsatz erfasst. Aus diesen Interviews konnten die resultierenden Erwartungen extrahiert und die abgeleiteten Entwicklungsziele in Klassen zusammengefasst werden.

Im zweiten Teil der Studie wurden in Workshops Roadmaps zur Erreichung der Erwartungen und Vorgehensweisen erarbeitet. Die einzelnen Roadmaps zeigen die zeitliche Abhängigkeit der erforderlichen Vorgehensweise, um ein definiertes Entwicklungsziel zu erreichen, auf. Durch einen Abgleich der Roadmaps lassen sich Gemeinsamkeiten, die zur Erfüllung der Entwicklungsziele erforderlich sind, aufzeigen.

Anwender aus den Branchen Luftfahrt, Automobil sowie Maschinen- und Anlagenbau, Anlagenhersteller und Pulverproduzenten waren bei dieser Studie beteiligt, so dass eine breite Betrachtung auf die Entwicklung und Potenziale des Laser-Strahlschmelzens gegeben ist.

1.1 Laser-Strahlschmelzen

Beim additiven Fertigungsverfahren Laser-Strahlschmelzen (eng. Laser Beam Melting, LBM) handelt es sich um ein pulverbettbasiertes metallisches Verfahren. (Witt & Marquardt 2014).

Das LBM-Verfahren war vor allem im Bereich des Rapid Prototyping zu finden und hat sich heute zu einem industriellen Fertigungsverfahren weiterentwickelt.

Dabei findet es derzeit vor allem in der Dentaltechnik, im Gesundheitsbereich (bspw. Implantate, chirurgische Instrumente) sowie im Werkzeugbau erste Anwendungen für eine wirtschaftliche (Serien-) Produktion. In weiteren Branchen wie der Energietechnik (z.B. Turbomaschinen) oder dem Luftfahrzeugbau wird das Verfahren derzeit qualifiziert oder wie im Bereich des Automobilbaus intensiv dahingehend weiterentwickelt.

In der Automobilbranche liegt der Fokus der F&E-Aufwendungen für LBM noch im Wesentlichen auf der Kostenreduzierung und der Produktivitätssteigerung durch eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Anlagentechnik. Im Turbomaschinenbau überwiegen hingegen die Entwicklungsziele der Steigerung der Bauteilqualität, der Prozessrobustheit und der Reproduzierbarkeit.

Insgesamt gilt das LBM-Verfahren als eines der vielversprechendsten additiven Verfahren für die industrielle Anwendung (Lindemann et al. 2013; Kief, Roschiwal & Schwarz 2015), vor allem im Bereich der metallverarbeitenden Werkstoffe (Ciupek 2016).

Verfahrensbeschreibung

Beim LBM-Verfahren schmilzt ein Laserstrahl eine festgelegte Geometrie in eine Pulverschicht und baut dadurch ein Bauteil Schicht für Schicht auf.

Als Grundlage für den schichtweisen Aufbau dient eine CAD-Datei, welche in Schichtmodelle mit konstanter Schichtdicke umgewandelt wird (Kief, Roschiwal & Schwarz 2015).

Je nach Geometrie müssen Bauteilüberhänge gegebenenfalls durch Stützkonstruktionen gesichert werden (Kief, Roschiwal & Schwarz 2015). Diese werden virtuell am PC hinzugefügt und während des Fertigungsprozesses mit dem Bauteil schichtweise mit aufgebaut. Im Anschluss an den Bauprozess müssen die Stützkonstruktionen wieder (nach heutigem Stand manuell) entfernt werden (VDI 3405).

Gefertigt wird innerhalb der Baukammer der LBM-Anlage, deren Größe die Dimensionen des zu fertigenden Bauteils beschränken (Kief, Roschiwal & Schwarz 2015). Grundsätzlich ist es möglich, mehrere Bauteile gleichzeitig in einer Baukammer zu fertigen, sofern das Baukammer-volumen dies zulässt. Um die Oxidation des metallischen Werkstoffs während des Bauprozesses zu vermeiden, wird unter Schutzgas- bzw. Inertgas-Atmosphäre wie Argon oder Stickstoff gearbeitet (Gebhardt 2013). Nach Beendigung des Bauprozesses wird das fertige Bauteil von der Bauplatte abgetrennt (Kief, Roschiwal & Schwarz 2015).

Der eigentliche Bauprozess gliedert sich in drei Vorgänge, welche sich zyklisch solange wiederholen, bis das gesamte Bauteil aufgebaut ist. Dies sind die Vorgänge Beschichten, Belichten und Absenken (Kief, Roschiwal & Schwarz 2015). Anschließend wird das Bauteil aus der Anlage genommen und nachbearbeitet. Dabei wird zum einen das überschüssige, nicht verschmolzene Pulver entfernt zum anderen, das Bauteil von der Bauplatte getrennt und die Stützen entfernt. Die einzelnen Verfahrensschritte sind in *Abbildung 4* dargestellt. Im Regelfall schließen sich daran noch Verfahren zur Wärme- und Oberflächenbehandlung sowie zerspanende Fertigungsverfahren an.

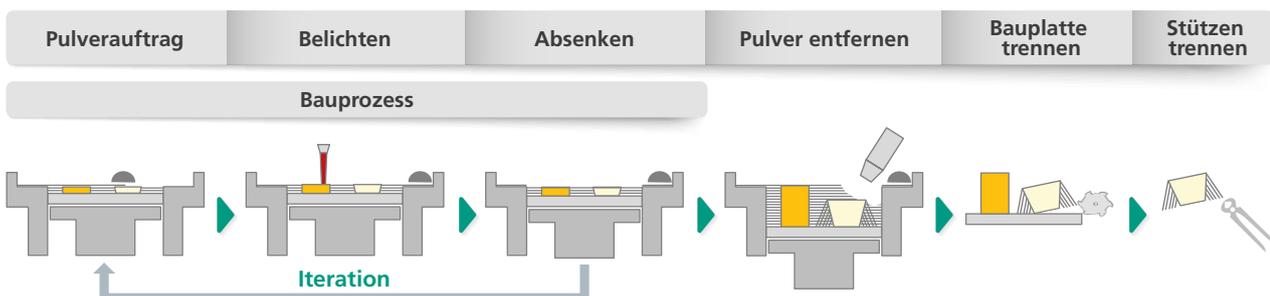


Abb. 4: Verfahrensbeschreibung Laser-Strahlschmelzen

1.2 Methodik

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Ableitung der Handlungsempfehlungen vorgestellt. Leser, die lediglich an den finalen Ergebnissen interessiert sind, können dieses Kapitel überspringen.

Das methodische Vorgehen orientiert sich an der Zielsetzung der Studie: Das Ableiten von Entwicklungsmaßnahmen für eine zielgerichtete Industrialisierung des Laser-Strahlschmelzens (LBM).

Zur Zielerreichung werden drei Teilschritte definiert. Den ersten Schritt stellen die Analyse des aktuellen Stands des LBM-Verfahrens und Herausforderungen sowie die erwartete Entwicklung dar. Dadurch wird die heutige Situation beschrieben. Dies erfolgt vor allem durch Experteninterviews. Den zweiten Schritt stellt die Definition der Anforderungen der Anwender, welche das zu erreichende Ziel beschreiben. Zur Strukturierung erfolgt die Definition einzelner Zielklassen. Diese werden auf Basis von Experteninterviews erstellt und in Workshops konkretisiert. Im dritten Schritt werden konkrete Maßnahmen zur Erreichung der

Ziele in Workshops abgeleitet und in Roadmaps als Handlungsempfehlungen festgehalten. Vor einer genaueren Beschreibung dieser Schritte wird zunächst der Betrachtungsrahmen dargelegt.

Betrachtungsrahmen

Die Studie betrachtet einen Zeithorizont von 10 Jahren. Während die ersten meist 3-5 Jahre durch unternehmens-eigene Roadmaps abgedeckt sind, ermöglicht der weitere Zeitraum den Teilnehmern, über zukünftige Idealvorstellungen im benannten Zeitraum nachzudenken.

Die Studie setzt sich zum Ziel, Entscheidungen über zukünftige Entwicklungsmaßnahmen und Förderinitiativen am Wirtschaftsstandort Deutschland zu unterstützen. Aus diesem Grund werden neben der fokussierten Betrachtung des deutschsprachigen Raums global konkurrierende Märkte in Nordamerika und Asien ebenfalls untersucht.

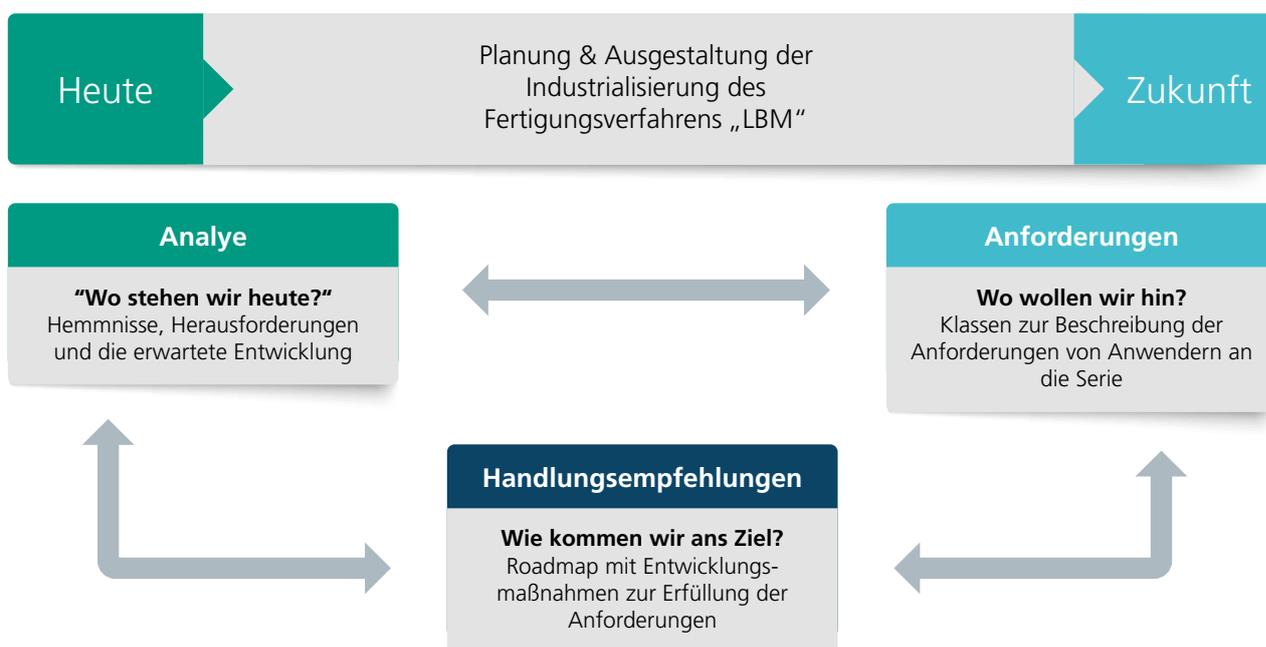


Abb. 5: Grundlegendes methodisches Vorgehen

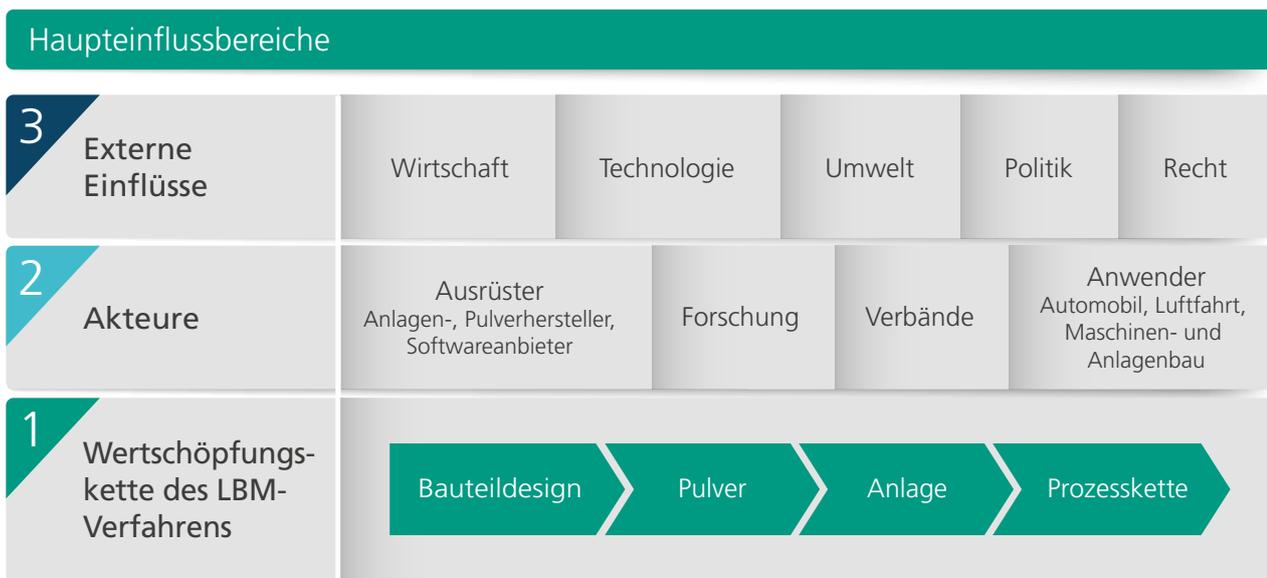


Abb. 6: Betrachtungsrahmen der Studie

Die zu betrachtenden Einflussbereiche auf die Industrialisierung des LBM-Verfahrens lassen sich den drei folgenden Kategorien zuordnen:

- (1) Wertschöpfungskette des LBM-Verfahrens
- (2) Akteure, welche sich mit der (Weiter-) Entwicklung des LBM-Verfahrens beschäftigen.
- (3) Nicht beeinflussbare Faktoren im Umfeld der additiven Fertigung.

Innerhalb von Kategorie 1 ergeben sich die untergeordneten Einflussbereiche Pulver, Bauteile und Konstruktion, die Prozesskette mit Anlagenvorbereitung und Nachbearbeitung sowie der eigentliche Fertigungsprozess und der LBM-Anlage.

In Kategorie 2 können die Akteure: Ausrüster (Anlagen- und Softwarehersteller), Anwender, Forschung und Verbände identifiziert werden. Die Fokussierung der Studie erfolgt auf die in Deutschland starken Branchen des Automobilbaus, der Luftfahrt sowie dem Maschinen- und Anlagenbau. Für eine ganzheitliche Betrachtung werden neben Anwendern aus diesen Branchen auch Ausrüster, wie LBM-Anlagen-, Pulverhersteller und Softwareanbieter sowie neutrale Forschungseinrichtungen in die Erstellung der Studie eingebunden.

Kategorie 3 stellt nur bedingt beeinflussbare externe Einflüsse dar. Die Bereiche Wirtschaft, Umwelt, Politik, Recht und andere Technologien stellen deshalb Randbedingungen dar. Handlungsempfehlungen müssen unter Berücksichtigung dieser externen Einflüsse abgeleitet werden.

Die erste Kategorie stellt die Systemgrenze der Studie und die zweite das Teilnehmerfeld dar. Die dritte Kategorie umfasst externe Einflüsse, wie bspw. der Trend zur Elektromobilität.

Aktueller Stand und erwartete Entwicklung

Auf Basis geführter Interviews werden der aktuelle Stand der Technologie und die von den Experten erwartete Entwicklung beschrieben. Die Interviews werden als teilstandardisierte Interviews mittels eines Leitfadens geführt.

Für die Entwicklung des Interviewleitfadens dient der zuvor beschriebene Betrachtungsrahmen als Grundlage. Mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring 1983) werden die Aussagen der Experten den Kategorien Bauteil, Pulver, Anlage und Prozesskette zugeordnet. Die Signifikanz einer Kategorie kann dann auf Basis der Häufigkeit mit der diese durch verschiedene Experten adressiert wird, bestimmt werden. Eine eigene Kategorie adressiert

die Analyse der zu erwartenden Entwicklung des Marktes. Durch den offenen Interviewcharakter, können auch zuvor nicht bedachte Aspekte berücksichtigt werden. Somit ist die Nennung eines einzelnen Aspektes stärker zu gewichten als bei geschlossenen oder quantitativen Frageformen.

Anforderungsszenarien der Anwender

Ziel ist es, einen zielgerichteten Weg vom heutigen LBM-Fertigungsverfahren zu einer anwendergerechten Serienanwendung in der Zukunft zu beschreiben. Dazu muss zunächst das in der Zukunft liegende Ziel beschrieben werden. Zur Erstellung konsistenter Zielbilder dient die Szenariotechnik (Gomeringer 2007). Diese wird entsprechend angepasst, um in den Zielszenarien Anforderungen unterschiedlicher Anwendertypen zu beschreiben. Auf Basis der Interviews werden nun die für die Zielsituation relevanten Aussagen der Experten, ebenfalls mit der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring, zugeordnet. Durch eine Clusteranalyse werden die Aussagen der einzelnen Experten gruppiert. Somit entstehen Expertencluster (Zielklassen) mit ähnlichen Zielvorstellungen für das LBM-Fertigungsverfahren.

Da sich die Zielvorstellungen selten in allen Punkten decken, entstehen Streuungen innerhalb der Cluster, die zu inkonsistenten Szenarien (Zielklassen) führen können. Daher müssen diese Zielklassen auf Konsistenz, d.h. Stimmigkeit der Kriterienausprägungen zueinander überprüft werden. Hierfür wird eine Konsistenzanalyse durchgeführt in der die Sinnhaftigkeit der Kombination zweier Ausprägungen der Kriterien bewertet wird (Jenssen & Weimer-Jehle 2012). Für jede Zielklasse ergibt sich somit ein Konsistenzwert. Innerhalb der Streuungen sind die Zielklassen so anzupassen, dass sie einerseits eine hohe Konsistenz und andererseits möglichst unterschiedlich zu anderen sind.

Einzelne Kriterien können quantifiziert beschrieben werden. Dazu werden im Verlauf der Interviews quantitative Ausprägungen in Form von Faktoren zur Leistungssteigerung im Vergleich zum heutigen Wert oder direkt konkrete Zielwerte abgeleitet. Über die Vielzahl der Ausprägungen ergibt sich eine Verteilung, aus denen quantitative Beschreibungen der Ausprägung eines Kriteriums interpretiert und zugeordnet werden können. Dadurch ergibt sich eine quantifizierte Beschreibung der erwarteten Zielklasse.

Roadmapping

Zwischen der heutigen Anwendung und der Anwendung in der Zukunft (Zielklasse) liegt der Prozess zur Industrialisierung des LBM-Verfahrens für den Entwicklungsmaßnahmen erforderlich sind. Die Maßnahmen können durch Erstellung einer Entwicklungs-Roadmap (Kostoff & Schaller 2001) identifiziert und systematisiert werden. Für jede Klasse der Anforderungsziele werden dazu erforderliche Entwicklungstätigkeiten definiert und in einen kausalen Zusammenhang gebracht. Das Roadmapping erfolgt im Rahmen von gemeinschaftlichen Workshops interaktiv mit den Experten.

Im ersten Schritt werden für die wichtigsten Kriterien der Zielklassen (in 10 Jahren), Zwischenziele in 2, 3 und 5 Jahren definiert. Das Problem lässt sich somit in Teilprobleme zerlegen. Zur Erreichung der Zwischenziele werden Entwicklungsmaßnahmen abgeleitet und zeitlich strukturiert in der Roadmap dargestellt.

Die zunächst für alle Zielklassen einzeln vorliegenden Entwicklungsmaßnahmen lassen sich durch Identifikation von Überschneidungen in eine Schnittmengen-Roadmap überführen. Diese beinhaltet Entwicklungsmaßnahmen, die für alle Zielklassen erforderlich sind. Die Genese der Handlungsempfehlungen erfolgt zum einen aus diesen gemeinsamen Entwicklungsmaßnahmen (den Schnittmengen) und zum anderen durch Priorisierung der Maßnahmen durch die Experten innerhalb der Roadmaps individueller Zielklassen. So können auch Entwicklungsmaßnahmen, die nur in einer Roadmap auftauchen, als relevant bewertet und somit in die Handlungsempfehlungen aufgenommen werden.

Laserteilung	Tol. -3% + 5%	MTU	6370
Fokus		MTU	6370
DT-Kamera		MTU	4281

Maßstab für bzw. Anzeigen, die nicht eutrahaltet sind, unterliegen nicht der Kalibrierpflicht

2. Aktueller Stand und erwartete Entwicklung



Die Entwicklung des LBM-Fertigungsverfahrens hin zur Serienfertigung steht aktuell im Fokus. Defizite hinsichtlich der Serienanwendung des bislang im Rapid Prototyping angewendeten Verfahrens sind zu beheben. Das folgende Kapitel stellt deshalb dar, welche Defizite und Herausforderungen aktuell von den Anwendern gesehen werden.

Des Weiteren werden wesentliche Treiber im Umfeld der Fertigung mittels Laser-Strahlschmelzen sowie benötigte Partner für eine Industrialisierung dargelegt. Abschließend werden die erwartete Entwicklung der Technologie und des Marktes (national und global) auf dem Weg zur Serie adressiert.

2.1 Produktion mit LBM heute

Die Ist-Situation der Fertigung mit LBM lässt sich anhand der Expertenbefragung in den Kategorien Bauteil, Pulver, Anlage und Prozesskette beschreiben.

In der Kategorie Bauteile werden vor allem solche als geeignet beurteilt, die in kleinen Stückzahlen benötigt oder individualisiert werden. Somit handelt es sich um Bauteile die üblicherweise im Prototypenbau hergestellt werden. Zudem sind Bauteile interessant, an denen sich durch die Fertigung mit LBM Funktionsvorteile realisieren lassen. Weiterhin sollte der erzielbare Preis am Markt hoch und die Bauteilgröße gering sein.

Die Metallpulver sind heute teuer, die Lieferzeit lange und die Werkstoffvielfalt gering. Des Weiteren weißt die Qualität der Pulverwerkstoffe vor allem aufgrund fehlender Standards und Wissen für die Relevanz einzelner Kennwerte noch Defizite auf.

Die digitale Prozesskette besteht aus zahlreichen Softwarelösungen unterschiedlicher Anbieter (Insellösungen), wohingegen die physische Prozesskette vor allem durch manuelle Tätigkeiten in der Nacharbeit und der Pulverbereitung bei noch unzureichender Standardisierung von Maßnahmen zur Arbeitssicherheit geprägt ist.

Anlagen sind vor allem durch ein geringes Prozessverständnis, die aufwändige manuelle Nachkontrolle und eine geringe Produktivität gekennzeichnet. Nachfolgend werden die einzelnen adressierten Kategorien detailliert betrachtet.

Bauteile

Die Beschaffenheit heutiger Bauteile stellt *Abbildung 8* dar. Bei den Bauteilen, die heute schon mittels LBM-Verfahren gefertigt werden, stellen für viele Unternehmen die hohen Herstellkosten eine große Hürde dar, um die Bauteile wirt-

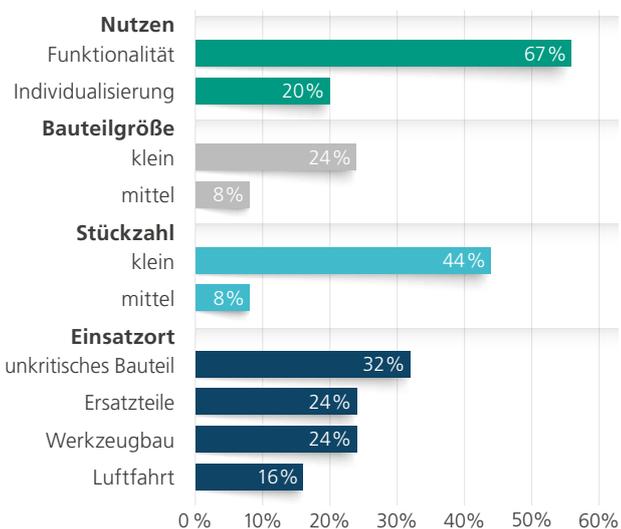


Abb. 7: Die Eigenschaften von LBM heute

schaftlich rentabel herzustellen. Aus diesem Grund sind heute vorrangig Sonderserien und Bauteile des hochpreisigen Segments von Interesse.

Die Bauteilkonstruktion setzt heute rudimentär Freiheitsgrade im Design, die durch das LBM-Verfahren gegeben sind, um. Es gilt, die klassischen Denkweisen in mathematischen Volumenköpern aufzubrechen, um somit nicht nur die Substitution bestehender Bauteile in Betracht zu ziehen,

sondern neue, speziell für das LBM-Verfahren konturierte Funktionsgruppen zu entwickeln. In der Ausbildung der Konstruktionslehre wird überwiegend klassisch gedacht und nicht auf Freiheitsgrade additiver Fertigungsverfahren eingegangen. Dies zeigt sich auch in Ausbildungsberufen oder Studiengängen, die nicht auf die additive Fertigung angepasst sind. Letztlich fehlt so die Akzeptanz, das Verfahren in der Konstruktion für die Serie und der Fertigung einzusetzen.



Frage durch 25 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Abb. 8: Beschaffenheit heutiger LBM-Bauteile

Weiterhin wird die Bauteilqualität bemängelt, insbesondere die der Oberfläche, wodurch bionische Strukturen nur bei geeigneten Verfahren zur Nachbearbeitung hergestellt werden können.

Pulverwerkstoffe

Insbesondere die Vielfalt der auf dem Markt für LBM angebotenen Pulverwerkstoffe wird als zu gering angesehen, dies stellt ein Hindernis bei der Erfüllung von individuellen Kundenanforderungen dar. Bei einem Großteil der Unternehmen fehlen Werkstoffe für die Herstellung unternehmensspezifischer Anwendungen. So werden beispielsweise für die Herstellung von Abgasanlagen oder Turboladern temperaturbeständige Werkstoffe benötigt, wohingegen für typische Karosserieanwendungen höherfeste Stähle benötigt werden, die dabei möglichst günstig sind. Für Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau besteht



Abb. 9: LBM Metallpulver (Quelle: Rosswag)

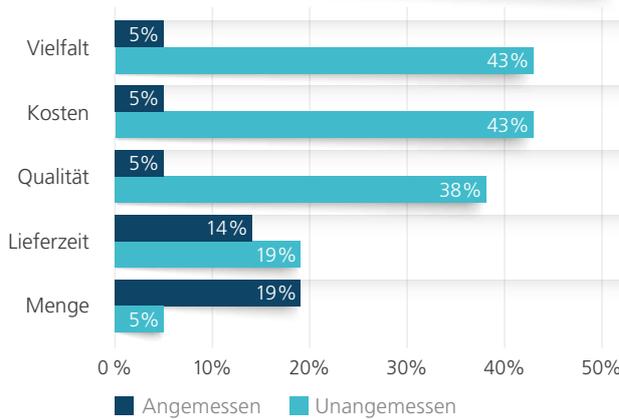
ein Mangel an Werkzeugstählen und für Anwendungen im Hochtemperaturbereich sind weitere Nickelbasislegierungen erforderlich. Ein Problem beim Einsatz verschiedener Pulver ist, dass die Befähigung oder Freigabe der Werkstoffe mit hohen Kosten und einem hohen Zeitaufwand von im Mittel 6,5 Monaten verbunden ist. *Abbildung 10* gibt einen Überblick über Pulverwerkstoffe, die nach Angabe der befragten Unternehmen heute noch fehlen.

Existierende LBM-Werkstoffe haben zum Ziel Gusswerkstoffe möglichst gut nachzubilden. Um Vorteile aus dem Einsatz des LBM-Verfahrens generieren zu können, sollten Pulverwerkstoffen entwickelt werden, die ihre Eigenschaft erst durch den LBM-Prozess erlangen, die also im Guss gar nicht herstellbar sind.

Die Kosten für die Pulverwerkstoffe, die aktuell auf dem Markt angeboten werden, wurden häufig als zu hoch eingeschätzt. Darin wird auch eine der Ursachen gesehen, weshalb eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens für viele Unternehmen noch nicht möglich ist. Allerdings wird hier bereits eine starke Kostendegression beobachtet. Eine weitere Regulierung der Kosten durch Angebot und Nachfrage wird erwartet.

Die Pulverwerkstoffe sind heute noch durch starke Streuungen hinsichtlich der Beschaffenheit zwischen den einzelnen Chargen eines Lieferanten und vor allem zwischen den Chargen unterschiedlicher Lieferanten gekennzeichnet. Hier besteht noch unzureichendes Wissen über die Einflussgrößen auf die Pulverbeschaffenheit und die benötigte Pulverbeschaffenheit der einzelnen Werkstoffe.

Welche Hemmnisse existieren im Zusammenhang mit Pulverwerkstoffen?



Frage durch 21 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Abb. 10: Barrieren zum Einsatz von LBM durch Pulverwerkstoffe

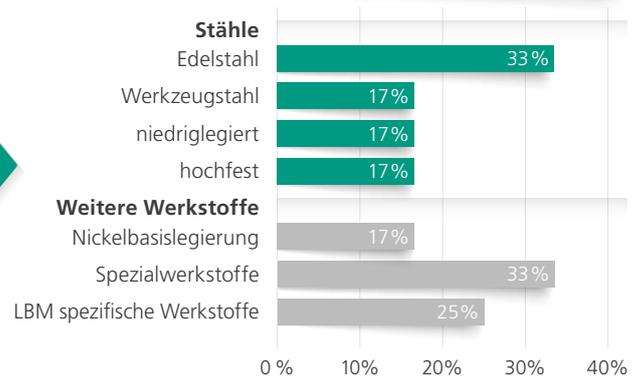
Bei der Lieferzeit der Werkstoffe lässt sich keine klare Tendenz erkennen, da die Lieferzeiten teilweise als angemessen angesehen werden, aber auch davon gesprochen wird, dass die aktuelle Lieferzeit von durchschnittlich acht bis zwölf Wochen noch deutlich zu lang ist. Die verfügbaren Abnahmemengen der existierenden Werkstoffe werden überwiegend als angemessen beschrieben.

Anlage

Die wesentlichen Hemmnisse der LBM-Anlagen lassen sich auf die Prozessqualität, die Prozessüberwachung und die Produktivität zurückführen.

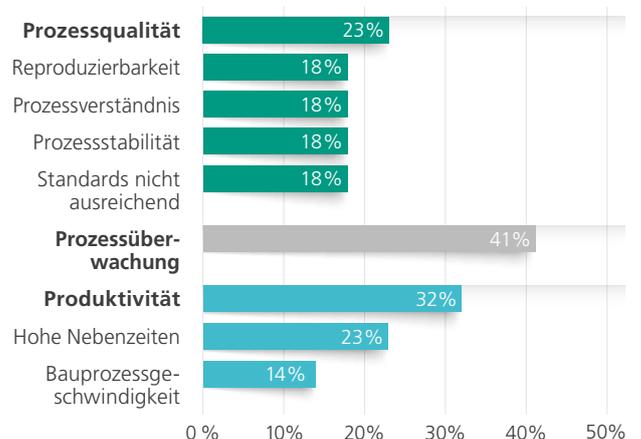
Die Prozessqualität wird allgemein als zu gering beschrieben. Sie lässt sich u.a. auf eine zu geringe Reproduzierbarkeit zurückführen. Die Reproduzierbarkeit bezieht sich dabei sowohl auf die Reproduzierbarkeit von Bauteilen zwischen verschiedene Anlagen (von demselben oder unterschiedlichen Herstellern) als auch zwischen zwei baugleichen Bauteilen, sei es innerhalb eines Auftrags oder zwischen zwei Aufträgen. Vor allem ein geringes Prozessverständnis der Anwender wird hier als maßgebend eingestuft. Neben fehlenden Erfahrungswerten bei der Nutzung fehlen auch Grundlagen für eine Prozesssimulation. Die geringe Prozessstabilität führt neben Qualitätseinbußen auch zu häufigen Anlagenausfällen. Letztlich fehlt es an

Welche Werkstoffe fehlen um die Vielfalt entsprechend ihrer Bedürfnisse zu steigern?



Frage durch 12 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Standards und Kennzahlen, um die Anlagen miteinander vergleichen zu können. Voraussetzung für ein einheitliches Prozessverständnis bilden technologische Grundlagen wie Normen oder Standards. Die existierenden Standards und DIN-Normen sind für einen Einsatz des LBM-Verfahrens in der Serie aktuell noch nicht ausreichend. Mit Hilfe von Normen müssen Grenzwerte für die Prozessparameter, wie bspw. die Menge des Restsauerstoffs in der Baukammer, festgelegt werden, um eine Übertragbarkeit von Erkenntnissen zwischen den Anlagen zu ermöglichen.



Frage durch 22 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Abb. 11: Hemmnisse der LBM-Anlagentechnik

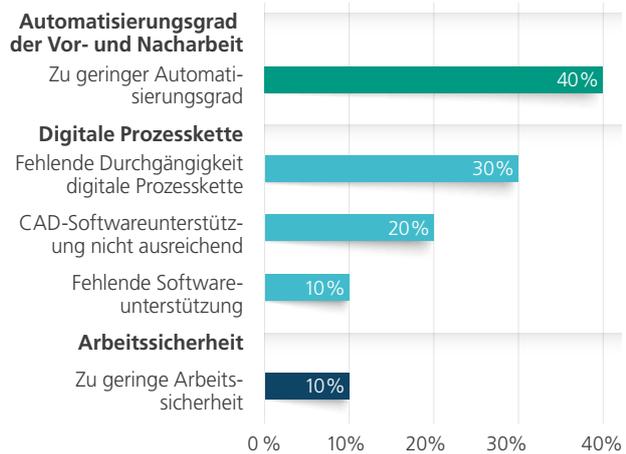
Die heutige LBM-Fertigung kann meist mit einer Manufaktur verglichen werden, da Vorbereitungs- und Weiterbearbeitungsprozesse zu aufwendig für eine Serienanwendung sind und durch einen hohen Anteil an manuellen Arbeitsschritten gekennzeichnet sind.

Eine weitere Herausforderung auf dem Weg zum Serieinsatz des Verfahrens stellt die fehlende Überwachung der Bauteile während des Prozesses und der Prozessparameter an sich dar. Die Qualitätssicherung ist bisher nicht ausreichend in den Produktionsprozess integriert, um die Einhaltung der Qualitätsvorschriften für die Bauteile über den gesamten Prozess hinweg zu garantieren. Neben der Überwachung des Prozesses sind Grenzwerte zur Arbeitssicherheit noch nicht vorhanden.

Neben der zu geringen Prozessqualität und der fehlenden Qualitätssicherung hat die Produktivität der LBM-Anlage einen großen Einfluss auf die Nutzung des Verfahrens. Für viele Einsatzzwecke ist die Produktivität der Anlagen noch zu niedrig, insbesondere in Relation zu den hohen Investitionskosten, die für eine LBM-Anlage aufgebracht werden müssen. Einerseits beeinflusst die geringe Bauprozessgeschwindigkeit die Produktivität, andererseits spielen aber auch die hohen Nebenzeiten der heutigen Anlagen eine Rolle. Die langen internen Rüstzeiten führen zu einer erhöhten Fertigungsdauer und einem geringen Nutzungsgrad der Strahlquelle.

Prozesskette

Der noch hohe Anteil an manuellen Tätigkeiten während des Produktionsprozesses stellt eine der Hauptbarrieren auf der Ebene der Prozesskette dar. Der Automatisierungsgrad der LBM-Prozesskette ist für eine Industrialisierung des Verfahrens zu gering. Sowohl aus Gründen der Produktivität als auch der Qualität ist ein höherer Automatisierungsgrad anzustreben. Des Weiteren gibt es Herausforderungen im Bereich der digitalen Werkzeuge zu lösen. Zum einen wird die fehlende Durchgängigkeit der digitalen Prozesskette aufgeführt sowie einer Kommunikation der Anlage mit Datenbanken für eine einfachere Datenverwaltung und -dokumentation. Zum anderen werden die aktuell verfügbaren CAD-Software zur Prozessunterstützung als nicht



Frage durch 10 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Abb. 12: Hemmnisse der LBM-Prozesskette

ausreichend beschrieben. Werkzeuge, die das Design der Bauteile unterstützen, beispielsweise durch Anzeigen optimaler Stützstrukturen, sind heute nicht ausgereift, würden den Konstruktionsprozess jedoch deutlich vereinfachen. Ebenso wie die CAD-Software stellen fehlende Simulationssoftware zur Ableitung von Produkteigenschaften und des Prozesses eine Barriere auf dem Weg zur Industrialisierung des LBM-Verfahrens dar.

Insgesamt sind Maßnahmen zur Arbeitssicherheit nicht ausreichend umgesetzt und Grenzwerte sowie notwendige Maßnahmen nicht einheitlich standardisiert. Vielmehr werden diese individuell von jedem Unternehmen selbst festgelegt. *Abbildung 12* stellt die wesentlichen Hemmnisse der LBM-Prozesskette dar.

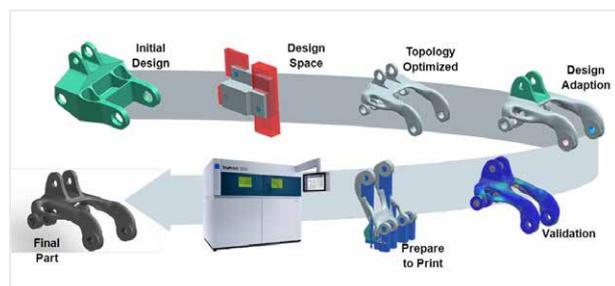


Abb. 13: Ausschnitt der digitalen Prozesskette in der Vorbereitung (Quelle: Trumpf, Siemens)

2.2 Erwartete Weiterentwicklung und Einflüsse auf die LBM-Fertigung

Die heute von den Experten erwarteten Entwicklungen der LBM-Fertigung werden anhand einer quantitativen Einschätzung der Entwicklung einzelner Parameter beschrieben. Darüber hinaus wird der Einfluss bestimmter externer Einflüsse qualitativ diskutiert und vorgestellt.

Erwartete Entwicklung

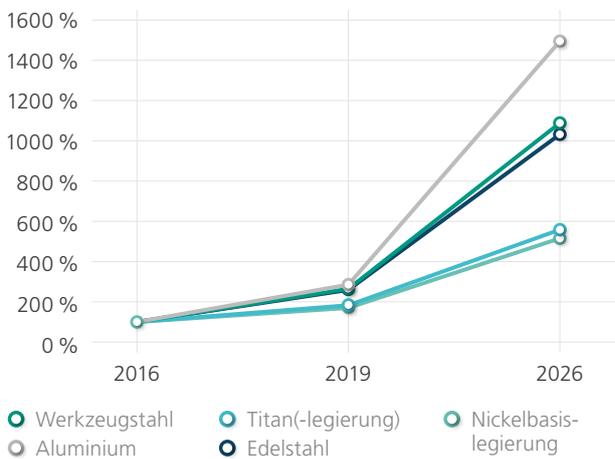


Abb. 14: Entwicklung der Aufbauraten für verschiedene Werkstoffe

Zur Entwicklung der Aufbauraten wird bis zum Jahr 2019 mit einem moderaten Anstieg um den Faktor 2 bis 3 gerechnet. Für Stahl und Aluminium Werkstoffe wird bis zum Jahr 2026 eine Steigerung um den Faktor 10 bis 15 erwartet. Nickelbasis- und Titanlegierungen werden dagegen mit einer Steigerung um den Faktor 6 erwartet. Diese Abweichung liegt nicht zwangsweise am eingesetzten Werkstoff. Vielmehr ist festzuhalten, dass Anwender der Nickelbasis- und Titanlegierungen die Entwicklung eher schwächer einschätzen.

Neben der Produktivität des Bauprozesses sind die Anschaffung und der Betrieb der Anlage kostentreibend. Die erwartete Entwicklung einzelner Kostentreiber ist in Abbildung 15 dargestellt. Unter anderem wird eine starke Reduktion von Ausschuss und ungeplanten Ausfällen erwartet. Diese technische Verbesserung der heutigen Anlagenkonzepte, und die Steigerung der Aufbauraten, wird nach Expertenmeinung in den nächsten Jahren zu einem weiteren Anstieg von Instandhaltungs- und Anschaffungskosten führen. Anzumerken ist auch das der Einfluss der

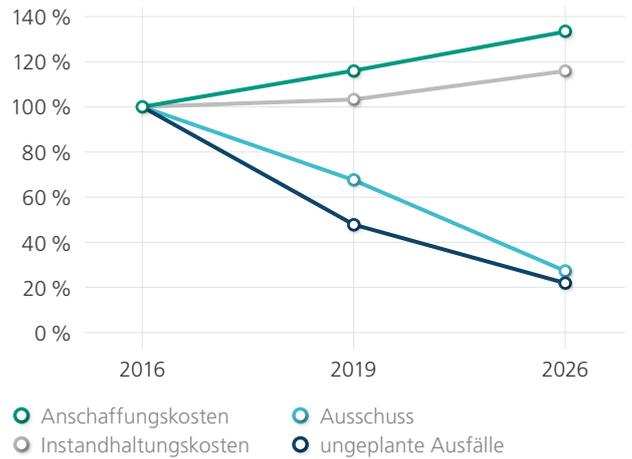


Abb. 15: Entwicklung der Investitions- und Betriebskosten

Kostentreiber je nach Anwendungsfall unterschiedliche hoch ausfällt und somit durch einen individuellen Faktor mit einer Änderung der Herstellkosten korreliert.

Entlang der Prozesskette werden die Prozesse zum Vorbereiten der LBM-Anlage, dem Auspacken der Bauteile und dem Entfernen der Stützen zunächst etwa 70% der heutigen Aufwände in Anspruch nehmen und im Jahr 2026 auf 30% bis 50% im Vergleich zu heute gesunken sein (Abbildung 16).

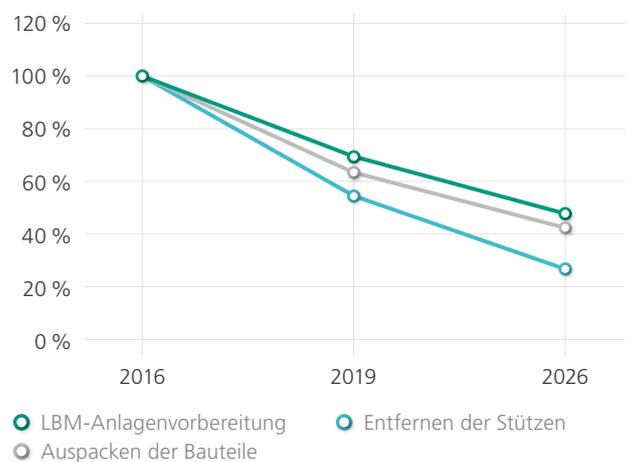


Abb. 16: Entwicklung ausgewählter Aufwände entlang der Prozesskette

Die Pulverkosten unterlagen in der Vergangenheit bereits einer deutlichen Kostenreduktion. Die Experten gehen durchschnittlich davon aus, dass die Kosten bis 2019 auf 70% der heutigen Kosten sinken werden und bis 2026 auf 40% des heutigen Preises fallen werden. Wie *Abbildung 17* zeigt, spielt der Werkstoff dabei eine untergeordnete Rolle.

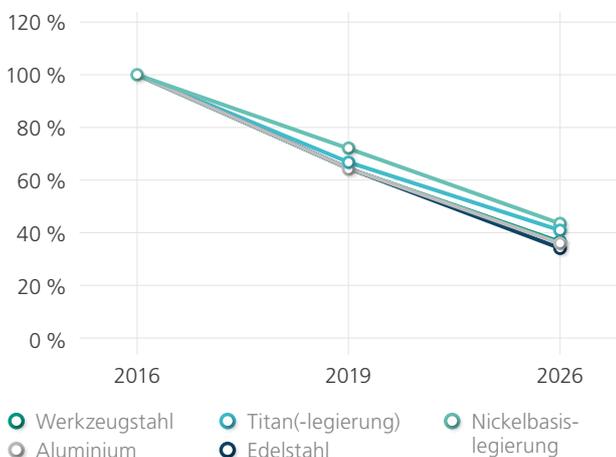


Abb. 17: Entwicklung der Pulverkosten

Einfluss des Leichtbaus auf LBM

Das LBM-Verfahren ist geeignet, um durch angepasste Bauteilkonstruktionen Gewicht zu reduzieren. Für viele der Anwender in der Luft- und Raumfahrt ist dies ein wesentliches Argument in die Fertigung mit LBM einzusteigen. Insbesondere bei Verwendung teurer Leichtbauwerkstoffe (z.B. Titan oder Tantal) ist der Pulverpreis im Vergleich zu dem der konventionellen Materialien prozentual unwesentlich höher, so dass sich eine LBM-Fertigung eher lohnen kann. Andere Anwender, z.B. im Automobilbau, haben deutlich geringere Nutzenvorteile durch Leichtbau und eine Anwendung des LBM-Verfahrens geschieht aus anderen Gründen, wie etwa der Individualisierung. Eine Zunahme des Trends Bauteile gewichtsreduziert zu entwickeln, würde womöglich weitere Anwendungen insbesondere aus der Luftfahrt ermöglichen, insgesamt aber nur geringfügig zu einer breiteren Verwendung des LBM beitragen.

Die Elektromobilität ist gleichermaßen Chance und Bremse für die Fertigung mit LBM. Neue Einsatzgebiete bei kleinen Stückzahlen bieten ein großes Potenzial. Allerdings sinkt die Anzahl und Komplexität der verbauten Teile im Antriebsstrang.

Einfluss der Elektromobilität auf LBM

Die Elektromobilität kann ein großes Potenzial für die Weiterentwicklung des LBM-Verfahrens haben. Die Potenziale werden insbesondere im Bereich der Abwärme und neuer Kühlkonzepte für die Batterien, Leistungselektronik (*Abbildung 18*) und den Elektromotor gesehen.



Abb. 18: Kühlplatte einer Leistungselektronik (Quelle: EDAG Engineering)

Andere Anwendungsfälle können Zahnräder mit innenliegenden Gitterstrukturen zur akustischen Schwingungsdämpfung sein, wie das dargestellte Zahnrad einer Getriebestufe zeigt.



Abb. 19: Zahnrad mit innenliegenden Gitterstrukturen zur akustischen Dämpfung (Quelle: GKN Sinter Metals Engineering)

Da für die Elektromobilität aktuell nur kleine Stückzahlen benötigt werden, lassen sich wirtschaftliche Business-Cases durch einen erhöhten Kundennutzen einfacher darstellen. Durch das erwartete Wachstum der Elektromobilität kann das LBM-Verfahren mitwachsen. Gleichzeitig wird der Antriebsstrang durch elektrische Antriebskonzepte deutlich an Komplexität verlieren und sich die Anzahl vorhandener Bauteile reduzieren. Daraus ergeben sich weniger Anwendungsfälle für das LBM-Verfahren und die Elektromobilität könnte so in bestimmten Bereichen zu einer Bremse für die Entwicklung des Verfahrens werden.

Einfluss der Individualisierung auf LBM

Ein zunehmender Wunsch nach Individualisierung hat positive Auswirkungen auf die Entwicklung des Laser-Strahlschmelzens. Eine kundenindividuelle Fertigung spielt eine stetig zunehmende Rolle. So können durch das LBM-Verfahren Produkte teilweise oder komplett individualisiert und auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst, dargestellt werden. Insgesamt ist der wachsende Wunsch nach Individualisierung zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht der wesentlich treibende Faktor für eine zunehmende Nutzung des LBM-Verfahrens.

Einfluss der Ressourceneffizienz auf LBM

Durch endkonturnahe Herstellung von Bauteilen mittels LBM-Verfahren und durch ein optimiertes Design zur Reduktion der Ressourcenverbräuche während der Lebensdauer des Bauteils lassen sich durch das LBM-Verfahren Ressourcen schonen. Verstärkt sich dieser Trend z.B. durch strengere Emissionsgrenzwerte können neue Bauteilkonstruktionen, die mit dem LBM-Verfahren ermöglicht werden eine Lösung sein und zu einer höheren Effizienz führen. Bei allen Effizienzsteigerungen, die nicht durch gesetzliche Grenzwerte induziert sind, gilt, dass diese im Bauteil oder einem für den Kunden relevanten Leistungsfaktor sichtbar sein müssen, damit er bereit ist mehr für das Produkt zu zahlen.

2.3 Benötigte Partner zur Industrialisierung des LBM-Verfahrens

Da die Industrialisierung des LBM-Verfahrens nicht durch die einzelnen Unternehmen alleine erreicht werden kann, werden Partner benötigt, die an der Zielerreichung beteiligt sind.

Die Aussagen, die dazu in den Expertenbefragungen getroffen wurden, lassen sich drei Kategorien zuordnen:

- **Anwender** des LBM-Verfahrens, um die Anlage verstärkt auf die Kundenbedürfnisse auszurichten.
- **Ausrüster** für Anlagen- und Software sowie Pulverhersteller.
- **Impulsgeber** die durch Forschung Prozessgrundlagen vermitteln, als Dienstleister ihr Prozesswissen bereitstellen oder Start-ups, die mit neuen Ideen auf den Markt treten.

Zu der ersten Kategorie werden die Anwender bzw. deren Kunden (z.B. OEMs) gezählt, die das LBM-Verfahren im Jahr 2026 für den Serieneinsatz in ihrer Prozesskette integriert haben könnten. Ziel muss es sein entsprechend ihren Bedürfnissen das LBM-Verfahren weiterzuentwickeln. Die Anwender selbst müssen Prozesse implementieren, welche

die Flexibilität des LBM-Verfahrens nicht ausbremsen. Beispielsweise ist zu definieren wie der Prozess zur Sachnummernvergabe bei individualisierten Bauteilen mit Stückzahl 1 aussehen kann.

Ausrüster sind zunächst einmal Anlagenhersteller, diese müssen zu einer kundenspezifischen Verbesserung und Weiterentwicklung der Anlagen- und Prozesstechnik beitragen. Um die Produktivität der LBM-Anlage zu erhöhen, ist eine Zusammenarbeit mit Automatisierungstechnikern sowie Produktionsplanern erforderlich. Zudem werden Partner für Steuerungs- und Simulationssoftware benötigt. Eine Zusammenarbeit mit Messtechnik- und Sensorherstellern ermöglicht eine verbesserte Qualitäts- und Prozessregelung. Pulverhersteller sind erforderlich, um den Einfluss des Werkstoffs auf die Bauteilqualität zu verstehen.

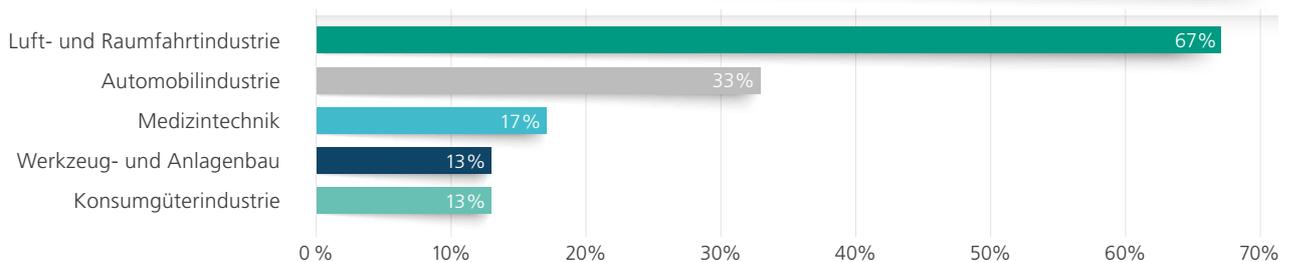
Impulsgeber können Forschungseinrichtungen und Engineering-Beratungen, wie auch Dienstleister sein, die durch Wissenstransfer zur Entwicklung der Technologie beitragen. Von Start-ups werden allgemein neue Geschäftsmodelle durch die Anwendung des LBM-Verfahrens erwartet. Neue Anlagenkonzepte könnten ebenfalls von diesen Partnern stammen.



Abb. 20: Übersicht der benötigten Partner zur Industrialisierung des LBM-Verfahrens

2.4 Bedeutende Fortschritte einzelner Branchen für das LBM-Verfahren

Von Fortschritten welcher anderen Branchen können Sie profitieren?



Frage durch 24 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Von welchen Fortschritten der Luft- und Raumfahrtindustrie können Sie profitieren?

- Maßnahmen zur Qualitätssicherung
- Technologieverständnis
- Qualifizierung von Pulverwerkstoffen
- Verbreitung und Etablierung des Verfahrens (Gesellschaft und Ingenieure)
- Bionisches Designen

Von welchen Fortschritten der Automobilindustrie können Sie profitieren?

- Optimierung von Prozessabläufen in der Anwendung
- Qualifizierung von Pulverwerkstoffen
- Industrialisierung des Verfahrens für die Serie

Abb. 21: Nutzbare Fortschritte in der Industrialisierung von LBM nach Branche

Im Rahmen der Expertenbefragung wurde darauf eingegangen, von welchen Branchen die Unternehmen wesentliche Fortschritte im Hinblick auf die Serienertüchtigung des LBM-Verfahrens erwarten.

So wurde etwa kürzlich die Zusammenarbeit von Premium Aerotec und Daimler bekannt gegeben, um die Potenziale branchenübergreifend zu nutzen (Premium Aerotec 2017). Wie in *Abbildung 21* zu erkennen ist, wird der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie der Automobilindustrie die größte Bedeutung beigemessen.

Die Luft- und Raumfahrtindustrie adressiert sowohl Strukturbauteile als auch den Turbinenbau. Das Ziel, das aktuell in der Luft- und Raumfahrtindustrie verfolgt wird, liegt in der Sammlung von langfristigen Erfahrungen durch den Einsatz des LBM-Verfahrens in für die Sicherheit unkritischen Bereichen. Durch Qualitätsfortschritte können Ausschusskosten langfristig sinken. Auch eine Verbesserung des aktuell noch zu geringen Prozessverständnisses wird durch die Luftfahrtindustrie erwartet. Die benötigte Qualifizierung von Pulverwerkstoffen wird hauptsächlich durch die Luftfahrtindustrie getrieben. Zudem existiert

in der Luftfahrtbranche bereits ein großes Wissen über die Pulverwerkstoffe sowie ihre Eigenschaften, von dem auch andere Branchen profitieren könnten. Von weiteren Fortschritten kann im Bereich Bauteildesign ausgegangen werden. Hierzu zählt zum Beispiel eine bessere Integration von Funktionen in das Bauteil durch bionisches Design oder eine Optimierung der Topologie neuer Bauteile, die gezielt für das LBM-Verfahren entwickelt werden. Damit wird das LBM-gerechte Konstruieren weiterentwickelt. Insgesamt nimmt durch die Aktivitäten die Verbreitung und



Abb. 22: Bionisch optimiertes Design einer Drohne (Quelle: Autodesk)

Etablierung des Verfahrens zu. Durch die sehr viel höheren Sicherheitsanforderungen der Luftfahrt im Vergleich zu anderen Branchen wird das Vertrauen in diese neue Technologie gefördert.

Fortschritte aus der Automobilindustrie werden hingegen hauptsächlich in der Optimierung von Prozessabläufen entlang der Prozesskette erwartet. Die Anforderungen der Automobilindustrie an die Serienproduktion liegen in der Herstellung vergleichsweise großer Stückzahlen und hoher Reproduzierbarkeit der Fertigung. Verbesserungen der Prozessabläufe, insbesondere der CAD/CAM-Kette werden erwartet. Aufgrund der langjährigen Anwendung des LBM-Verfahrens im Prototypenbau besitzt die Automobilindustrie bereits Erfahrungswerte bezogen auf die Robustheit des Prozesses, wovon die Weiterentwicklung partizipieren kann.

In der Dentalbranche wird bereits heute kundenindividuell bei kurzen Lieferzeiten und hohem Kostendruck gefertigt. Aus diesem Grund sind eine Betrachtung der gesamten Prozesskette sowie Schnittstellen zu Zulieferern wichtig. Von den dort etablierten Prozessen können andere Anwender bei einer Serienertüchtigung des LBM-Verfahrens lernen.

Der Werkzeug- und Anlagenbau wird durch die Individualisierung und Weiterentwicklung der Werkstoffvielfalt weitere Erkenntnisse gewinnen. Hierzu zählt auch der stationäre Turbinenbau zur Energieerzeugung. Dort finden sich bereits erste Serienanwendungen in der Einführung. Im schwedischen Finspong werden etwa Brennerspitzen bereits mit LBM gefertigt.

Da die Preise für Werkstoffe im Energiemaschinenbau auch für eine konventionelle Fertigung hochpreisig sind, ist der Anteil der Fertigungskosten geringer, so dass Anwendungsfälle mit dem vergleichsweise teuren LBM-Verfahren eher zu finden sind. Weiterhin entsteht der größte Teil der Kosten während des Lebenszyklus. Eine Effizienzsteigerung hat somit einen größeren Nutzen für den Kunden. Durch diese Anwendungsfälle werden erste Erkenntnisse einer industriellen Produktion mit LBM gesammelt. Neben der Fabrikorganisation werden auch Fortschritte im Bereich Qualitätssicherung sowie Reproduzierbarkeit des Prozesses erwartet.

Weitere Branchen sind die Schmuck- oder Konsumgüterindustrie, da dort hohe Stückzahlen, bionische Designs und Individualisierung eine wichtige Rolle spielen.



Abb. 23: Fertigung von Brennerspitzen mit LBM im schwedischen Finspong (Quelle: Siemens AG)

2.5 Entwicklung des Marktes

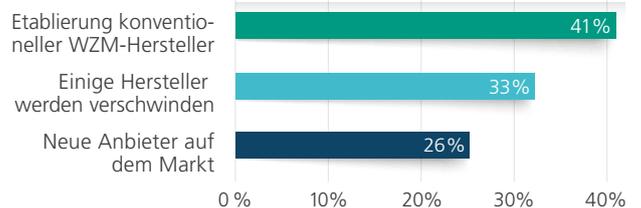
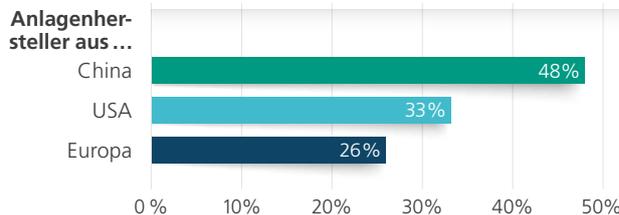
Es wird davon ausgegangen, dass die LBM-Anlagenhersteller in den nächsten Jahren in China, den USA sowie in Europa anzutreffen sind.

Aus China wird dabei die größte Konkurrenz für die deutschen Anlagenhersteller erwartet. Diese Anlagen werden nach einhelliger Expertenmeinung günstige Anlagen sein. Sie werden für einfache Anwendungen des Verfahrens geeignet sein. Hinsichtlich der erzielbaren Prozessqualität dieser Anlagen besteht keine Einigkeit. Es wird von Einzelnen aber durchaus erwartet, dass zu etablierten deutschen Herstellern stark aufgeschlossen werden kann. Neben den LBM-Anlagenherstellern aus China werden auch weiterhin Anlagenhersteller aus Europa und insbesondere

aus Deutschland kommen. Mit dem Auslaufen wichtiger Patente werden Anlagenhersteller aus den USA einen deutlichen Marktanteil einnehmen.

Insgesamt werden konventionelle Werkzeugmaschinenherstellern – also Hersteller die bisher andere Technologien am Markt anbieten – in den Markt eintreten. Diese Unternehmen besitzen weltweite Servicenetzwerke und können robuste Anlagen mit Blick auf die gesamte Prozesskette entwickeln. Weiter werden Start-ups auf den Markt treten, so dass eine teilweise Verdrängung der Anlagenhersteller stattfinden wird. Der Wettbewerb wird sich durch zunehmende Anzahl der LBM-Anlagenhersteller verschärfen.

Wie wird sich der Markt für Anlagenhersteller weiter entwickeln? Wer wird in den Markt eintreten?



Frage durch 25 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Warum werden sich konventionelle WZM-Hersteller am Markt etablieren?

- Erfahrungen mit den Bedürfnissen der Kunden (vor allem Service)
- Blick auf die gesamte Prozesskette

Warum werden sich Anlagenhersteller aus Asien am Markt etablieren?

- Günstigere Anlagen
- Anlagen für den Einsatz bei geringeren Qualitätsanforderungen

Abb. 24: Entwicklung des Anlagenherstellermarktes



3. Anforderungen der Anwender

Die Entwicklung des Laser-Strahlschmelzens hin zur Serienproduktion muss sich an den Anforderungen der Anwender orientieren. Die Anforderungen, die an die Serie gestellt werden sind allerdings von Anwender zu Anwender unterschiedlich. Ziel des nachfolgenden Kapitels ist es Klassen zu beschreiben, welche die unterschiedlichen Wunschziele in der Technologieentwicklung aus Anwendersicht abbil-

den. Die einzelnen Klassen stellen Extremausprägungen der Anforderungen dar. Der einzelne Anwender wird sich je nach Anforderungen im Spannungsfeld verschiedener Klassen einordnen können. Insgesamt können die Ziele der Anwender durch fünf Klassen beschrieben werden, von denen die ersten drei besondere Relevanz besitzen.

3.1 Variantenreiche individualisierte Serienproduktion

In dieser Klasse findet das Laser-Strahlschmelzen (LBM) zukünftig vor allem bei individualisierten und variantenreichen Bauteilen (Prototypen und Endprodukte) Anwendung.

Daher werden lediglich kleine Stückzahlen gefertigt und die Anforderungen an die Produktivität sind gering, was weiterhin zu einem hohen Preis der Produkte führt. Die Kunden wünschen Produkte in unterschiedlichsten Größen, die keine versagenskritische Funktion erfüllen.



Abb. 25: Die Eigenschaften der variantenreichen, individualisierten Serienproduktion

Aufgrund der Individualisierung liegt der Fokus vor allem auf der Werkstoffvielfalt, die Qualität der Werkstoffe spielt eine untergeordnete Rolle. Die hohe Vielfalt führt zu Komplexität auf dem Pulvermarkt, sodass die Belieferung oftmals Schwierigkeiten bereitet und die Lieferzeit einen Engpass darstellt. Dennoch ist das Preisspektrum der verschiedenen Pulver im niedrigen bis mittleren Bereich, was insbesondere auf die Entwicklung des Pulvermarkts mit steigendem Wettbewerb sowie auf die geringeren Ansprüche an die Pulverqualität zurückzuführen ist.

Eine Multi-Material Bearbeitung ist nicht möglich, jedoch ist die Anlage flexibel für Werkstoffwechsel, sodass über die Lebensdauer der Anlage hinweg Werkstoffwechsel, wenn auch nur selten, realisiert werden können. Die Pulverbereitstellung erfolgt dabei manuell direkt an der Anlage. Hierbei ist Atemschutz für den Werker notwendig. Generell sind die Pulver allerdings so beschaffen, dass sie kaum schädlich sind, sodass laut Normen und Richtlinien keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen. Daher ist auch eine teilautomatisierte Nacharbeit unbedenklich. Die Steuerung und Anwendung wird durch einheitliche Programmschnittstellen entlang der Prozesskette erleichtert.

Anlagen für das LBM besitzen einen stabilen und robusten Fertigungsprozess, welcher den Ausschuss stark reduziert. Dieser wird durch eine intelligente Regelung unterstützt, die insbesondere erforderlich ist, um die unterschiedlichen Varianten prozesssicher zu fertigen. Um Bauteile unterschiedlicher Größe zu fertigen, ist eine große Baukammer mit großem Baukammervolumen erforderlich. Bedingt durch die Größe ist die Baukammer mit einem parallelen Belichtungs- und Beschichtungskonzept ausgestattet. Die Produktivität der Anlage ist dadurch deutlich höher als heute.

3.2 Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile

LBM hat sich im Leichtbau bewiesen, insbesondere hinsichtlich großer Strukturbauteile, die bzgl. Systemausfällen versagenskritisch sind.

Dabei ist noch nicht klar, ob ein Einsatz auch für versagenskritische Bauteile hinsichtlich der Gefährdung von Personen denkbar ist. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderung dieser Strukturbauteile können die Bauteile zu höheren Preisen verkauft werden. Es handelt sich oftmals um Bauteile mit kleinen bis mittleren Stückzahlen.

Der Pulvermarkt erfüllt die Wünsche nach hoher Qualität. Dies bringt einen hohen Pulverpreis mit sich. Durch die aufwändige Qualitätssicherung kann es zu Lieferengpässen kommen. Diese hohen Anforderungen können lediglich für eine begrenzte Auswahl an Werkstoffen garantiert werden, sodass die Anzahl unterschiedlicher Werkstoffe auf dem Markt limitiert ist.

Aufgrund der kleinen bis mittleren Stückzahlen erfolgt die Nacharbeit teilautomatisiert, die Pulverbereitstellung erfolgt je nach Hersteller automatisiert per Pipeline-System oder manuell an der Anlage. Die Steuerung und Datenbereitstellung erfolgt durch ein universelles Programm oder mithilfe von einheitlichen Programmschnittstellen. Eine Spezialisierung der Anlage auf genau einen Werkstoff trägt zur Sicherung der Qualität bei. Die Anlage samt Vor- und Nacharbeit ist dicht gebaut, sodass Sicherheitsvorkehrungen für Mitarbeiter nur bei Wartungsarbeiten erforderlich sind.

Eine 100%- Kontrolle der Produkte verhindert zusätzlich die Auslieferung von Schlechteilen, wobei dank hoher Prozessstabilität lediglich wenig Ausschuss produziert wird. Die kleine bis mittlere Stückzahl der mittelgroßen bis großen Bauteile fordert eine gestiegene Produktivität im Vergleich zum Stand der Technik. Je nach produktspezifischem Bedarf ist jede Baukammergröße erhältlich. Diese ist meist mit einer parallelen Belichtungs- und Beschichtungsstrategie oder alternativ mit einer neuartigen Belichtungstechnologie ausgestattet.



Abb. 26: Die Eigenschaften der qualitätsorientierten Produktion großer Bauteile

3.3 Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen

LBM hat sich als Produktionsverfahren für Großserien von Bauteilen mit Funktionsintegration durchgesetzt.

Die Möglichkeit, komplexe Strukturen herzustellen, stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren dar. Neue Anlagenkonzepte haben zu einer Produktivitätssteigerung geführt, was sich auch im Produktpreis positiv bemerkbar macht. In der Regel werden Bauteile kleiner bis mittlerer Größe produziert, die einen unkritischen Einsatzort haben.

Es gibt lediglich wenige Werkstoffe, die zur Produktion zur Verfügung stehen. Die Ansprüche an die Qualität sind dabei moderat. Diese beiden Aspekte führen zu hohem Wettbewerb und daher zu niedrigen Pulverpreisen und einer kurzen Lieferzeit und ermöglichen so die günstige Produktion in hohen Stückzahlen.

Die Anlagen sind jeweils auf einen Werkstoff spezialisiert. Die Prozesskette ist technologisch hoch entwickelt – automatisiertes Entfernen der Stützen, Auspacken der Bauteile und Pulverbereitstellung sind üblich. Durch ein, für die Prozesskette universelles, Programm können Auftragsdaten bereitgestellt werden. So kann der Betrieb ohne menschliches Eingreifen vor Ort geschehen, wodurch Regularien bezüglich Arbeitssicherheit unproblematisch sind.

Durch die starke Automatisierung können die Forderungen der Großserie nach hoher Produktivität eingehalten werden. Hierbei unterstützt eine neuartige Belichtungsinnovation, die das Verfahren beschleunigt und positiv auf die Prozessstabilität wirkt. Eine hohe Prozessstabilität ist der Standard, so dass nur noch eine integrierte Kontrolle durch Sensoren während des Produktionsprozesses erforderlich ist. Da die Bauteile klein bis mittelgroß sind, genügt eine mittelgroße Baukammer.



Abb. 27: Die Eigenschaften der kostengünstigen Produktion hoher Stückzahlen

3.4 Individualisierte Produktion mit Multi-Material Bearbeitung

Diese Zielklasse basiert auf der Annahme, dass bis 2026 die Multi-Material Bearbeitung möglich ist, also ein Produkt bestehend aus unterschiedlichen Werkstoffen in einem Bauprozess durch LBM produziert werden kann.

Damit dies realisierbar ist, muss eine Anlage mehrere Werkstoffe handhaben können. Eine Zuführung mehrerer Werkstoffe erschwert wiederum die automatische Zuführung der Metallpulver, sodass die Pulverbereitstellung manuell geschehen wird. Gleichzeitig erfordert die Multi-Material Bearbeitung eine besonders hohe Qualität des Metallpulvers – schließlich ist die parallele Handhabung mehrerer Werkstoffe besonders fehleranfällig. Die hohen Anforderungen an die Qualität bedingen, dass es lediglich wenige und dafür teure, geeignete Pulver gibt, bei denen zudem die Verfügbarkeit durch die aufwendige Aufbereitung begrenzt ist. So sind die Pulverhersteller mit Lieferschwierigkeiten konfrontiert. Der so entstehende hohe Pulverpreis wirkt sich außerdem direkt auf den Produktpreis aus.

Die Multi-Material Bearbeitung setzt einen technologisch fortschrittlichen Prozess voraus, was sowohl hinsichtlich

der Qualitätssicherung und Automatisierung als auch in Bezug auf einen stabilen Prozess gilt. So wird der Prozess durch eine intelligente Regelung gesteuert, kombiniert mit einheitlichen Programmschnittstellen entlang der Prozesskette oder einem Universalprogramm, welches die komplette digitale Prozesskette steuert. Durch die geschlossene digitale Prozesskette wird ein bauteilindividuelles Übertragen von Informationen an die Anlagen ermöglicht, wodurch eine teilautomatisierte Nacharbeit realisiert werden kann. Um diese komplexe Regelung zu ermöglichen, erfolgt die Belichtung und Beschichtung sequentiell. Die Arbeitssicherheit wird durch dicht gebaute Anlagensysteme gewährleistet, die bei Wartung oder Reparaturmaßnahmen Schutz-ausrüstung bedingt.

Die Anwender nutzen LBM vor allem, um ihrem Bedarf nach individualisierten Bauteilen in kleinen Stückzahlen für den unkritischen Einsatz nachzukommen. Dementsprechend reicht eine geringe Produktivität aus. Da sehr unterschiedliche Produkte hergestellt werden, gibt es diese in allen möglichen Größen. Dennoch wird eine mittlere Baukammergröße als ausreichend betrachtet.



Abb. 28: Die Eigenschaften der individualisierten Produktion mit Multi-Material Bearbeitung

3.5 Produktion auf Basis forschungsgetriebenen moderatem technologischen Fortschritts

Diese Zielklasse behandelt den Fall, in dem zukünftig zwar der technologische Fortschritt angemessen voranschreitet, LBM sich jedoch wirtschaftlich lediglich langsam durchsetzt.

So ist der Prozess hinsichtlich der Qualität unkritisch: Durch intensive Forschung wurde etwa die Prozessstabilität sichergestellt, einheitliche Schnittstellen oder ein Universalprogramm erarbeitet und eine intelligente Regelung des Prozesses sind ebenfalls vorhanden; die Pulverbereitstellung kann automatisiert, aber auch manuell stattfinden. Auch in der parallelen Belichtung und Beschichtung sowie in der technischen Möglichkeit des Werkstoffwechsels zeigt sich der Fortschritt. Eine Multi-Material-Bearbeitung wird es jedoch voraussichtlich nicht geben und die Nacharbeit ist aufgrund der mangelnden Industrialisierung nur in Teilen automatisiert.

Bedingt durch die Möglichkeit des Werkstoffwechsels muss der Werkstoff zumindest mittleren Qualitätsanforderungen entsprechen. Dies kann lediglich für gewisse Metallpulver garantiert werden, sodass die Werkstoffvielfalt auf dem Markt begrenzt ist. Durch den Fokus auf wenige geeignete Werkstoffe können allerdings kurze Lieferzeiten und niedrige Preise ermöglicht werden. Dies wirkt sich positiv auf die Herstellkosten aus, sodass der Produktpreis auf einem mittleren Niveau gehalten werden kann.

LBM hat sich dennoch nicht als Produktionstechnologie durchgesetzt, insbesondere nicht in der Großserie. Dies ist auf die geringe Produktivität der Anlagen und somit hohe Produktionszeiten zurückzuführen. Anwendung findet es wenn überhaupt vorwiegend bei Bauteilen mit Funktionsintegration, deren Einsatzort teils kritisch sein kann.



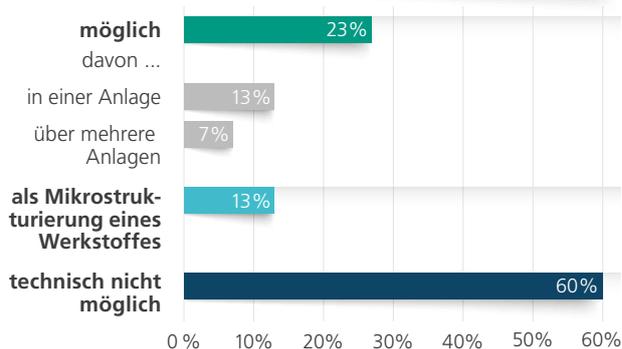
Abb. 29: Die Eigenschaften der Produktion auf Basis forschungsgetriebenen moderatem technologischen Fortschritts

3.6 Eingrenzung der Zielklassen

Die fünf Zielklassen der Anwender werden im Rahmen der Studie für die weitere Betrachtung eingegrenzt. Die Entwicklung der Roadmaps wird so auf möglichst realistische, relevante und divergente Klassen fokussiert.

Aus den Interviews ist zu entnehmen, dass heute insbesondere die Qualität des Bauteils und des Prozesses sowie die Wirtschaftlichkeit Barrieren für das LBM-Verfahren darstellen. Weiter wird die Durchsetzung von Multi-Material Bearbeitung mit dem Fertigungsverfahren LBM als nicht wahrscheinlich eingestuft. Demnach schätzen 27% der Befragten, dass Multi-Material Verarbeitung bis 2026 generell möglich ist, 13% spezifizierten, dass Multi-Material Verarbeitung mit mehreren Werkstoffen integriert in einer Anlage und 7% über mehre Anlagen möglich sein wird. Weitere 13% sind der Meinung, dass Multi-Material Verarbeitung mit einem Werkstoff durch Strukturierung auf Mikrostruktur-Ebene (z.B. unterschiedlicher Härte) umsetzbar sein könnte. 60% der Befragten äußerten explizit, dass sich Multi-Material Verarbeitung bis 2026 technisch nicht ausreichend entwickelt haben wird bzw. nicht ausreichend relevant sein wird, um marktfähig zu sein.

Ist Multi-Materialbearbeitung mit LBM bis 2026 möglich?



Frage durch 15 Teilnehmer beantwortet, %-Anteil entspricht der Häufigkeit mit der eine Eigenschaft adressiert wurde.

Abb. 30: Auswertung zur technischen Möglichkeit von Multi-Materialbearbeitung

Mit der qualitätsorientierten Produktion großer Bauteile und der kostengünstigen Produktion hoher Stückzahlen wird vor allem den in Kapitel 2 genannten Barrieren der Prozessqualität und der Produktivität entgegnet. Mit dem Gedanken, dass heutige Barrieren zukünftig besonders stark fokussiert werden, sind diese beiden Klassen also von hoher Relevanz.

Die variantenreiche individualisierte Serienproduktion setzt an dem heutigen Punkt an, dass LBM oftmals im Prototypenbau Anwendung findet und so der Vorteil einer form- und werkzeuglosen Herstellung genutzt wird. Somit verfolgt diese Klasse diesen Anwendungsfall und baut ihn durch den Aspekt der Vielfalt weiter aus.

Der forschungsgetriebene moderate Fortschritt hingegen ist geprägt durch ein hohes Technologieniveau. Es stellt in vielen Bereichen eine Mischform der anderen Klassen dar. Handlungsempfehlungen für anderen Klassen besitzen somit auch ihre Gültigkeit für diese Klasse. Abgesehen von einer anderen Priorisierung der Handlungsempfehlungen sind hierbei keine neuen Erkenntnisse zu erwarten, weshalb eine gesonderte Betrachtung nicht zielführend ist. Somit haben die folgenden drei Klassen die höchste Relevanz und werden als Grundlage für die Erarbeitung von Roadmaps herangezogen. *Abbildung 31* stellt diese nochmal dar:

- Variantenreiche individualisierte Serienproduktion
- Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile
- Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen

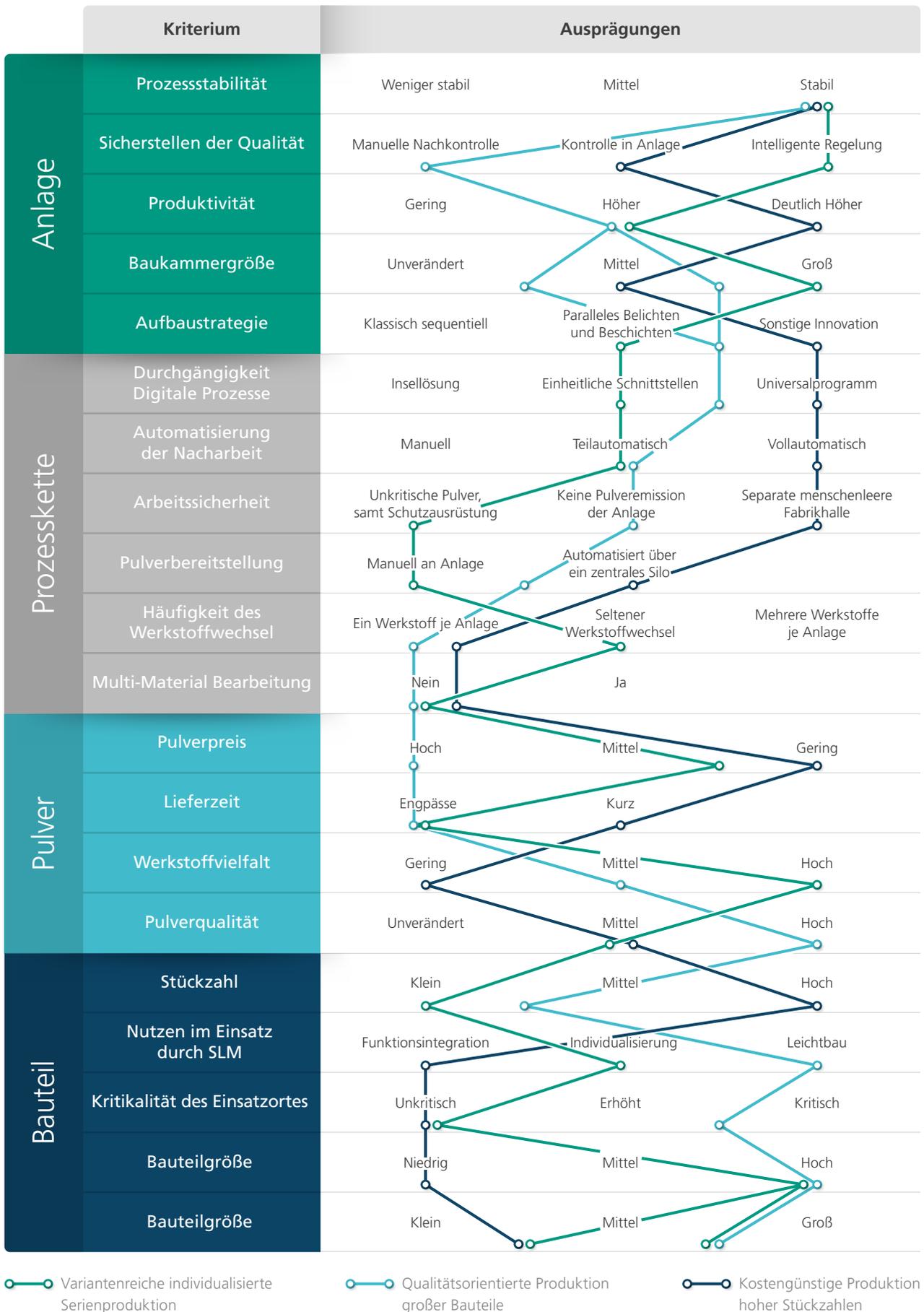


Abb. 31: Ausprägungen der relevanten Zielklassen

The image shows a close-up of several metallic engine components, likely pistons or valves, arranged in a row. The components are highly detailed and show signs of wear. A teal-colored rectangular overlay is positioned in the upper left quadrant, containing white text. The background is a blurred industrial setting.

4. Entwicklungsmaßnahmen zur Industrialisierung von LBM

Die zielgerichtete Entwicklung des Laser-Strahlschmelzens bedarf abgestimmter, aufeinander aufbauender Entwicklungsmaßnahmen. Diese lassen sich in einer Roadmap zeitlich priorisiert darstellen. Das nachfolgende Kapitel beschreibt mögliche Wege, die nach Expertenmeinung zur Erreichung der drei anwenderspezifischen Zielklassen:

„Variantenreiche individualisierte Serienproduktion“, „Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile“ und „Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen“. Die Roadmaps beschreiben die notwendigen Entwicklungsmaßnahmen, um diese Zielklassen zu erreichen und wurden in einzelnen Workshops interaktiv mit Experten erarbeitet.

Lesehinweise:

Die Roadmaps weisen unterschiedliche Färbungen und Rahmengestaltungen auf. Zum einen sind den Szenarien unterschiedliche Farben zugeordnet, um die Roadmaps der Szenarien intuitiv voneinander abzugrenzen. Zum anderen bedeutet ein farbiger Rahmen, dass die Maßnahme von den Experten als wichtig eingestuft wurde. Ein graue Färbung zeigt, dass sich eine Maßnahme inhaltlich mit einer Maßnahme einer anderen Roadmap deckt. Als Legende und zur Verdeutlichung dieses Schemas dient die Abbildung 32.

Die links dargestellten Bereiche zeigen den Einflussbereich der Maßnahme. Der Bereich Organisation adressiert Unternehmen und den Austausch zwischen Unternehmen; die Technologie adressiert die eigentliche Verfahrensentwicklung und der sozio-ökonom. Einfluss gesellschaftliche Aufgaben.



Abb. 32: Legende der Roadmaps

4.1 Variantenreiche individualisierte Serienproduktion

Zielbeschreibung

In einer variantenreichen individualisierten Serienproduktion werden lediglich kleine Stückzahlen je Variante erreicht. Eine intelligente Regelung und stabile Prozesse ermöglichen die prozesssichere Produktion dieser Varianten. Trotz der hohen Werkstoffvielfalt, werden auf den Anlagen nur selten Werkstoffe gewechselt. Eine CAD-CAM-Kette mit einheitlichen Schnittstellen erlaubt eine Nachverfolgbarkeit der Bauteile und damit die Kontrolle über die Prozesskette.

Besonders relevant sind die Ausprägungen der Prozessstabilität, der Produktivität sowie der intelligenten, integrierten Prozesskette. Dabei wird die Produktivität als Steigerung der Ausbringung je Anlage und Zeit im Vergleich zu heute gemessen. Die Prozessstabilität wird durch die Ausschussquote erfasst.

Im Jahr 2026 werden die variantenreichen Produkte nach wie vor hochpreisig sein. Dennoch können die Produkte um den Faktor 5 günstiger hergestellt werden. Durch stabile Prozesse lässt sich selbst in einer variantenreichen Produktion der Ausschuss auf ca. 2% reduzieren und effizientere Prozessketten sorgen für eine Erhöhung der Produktivität

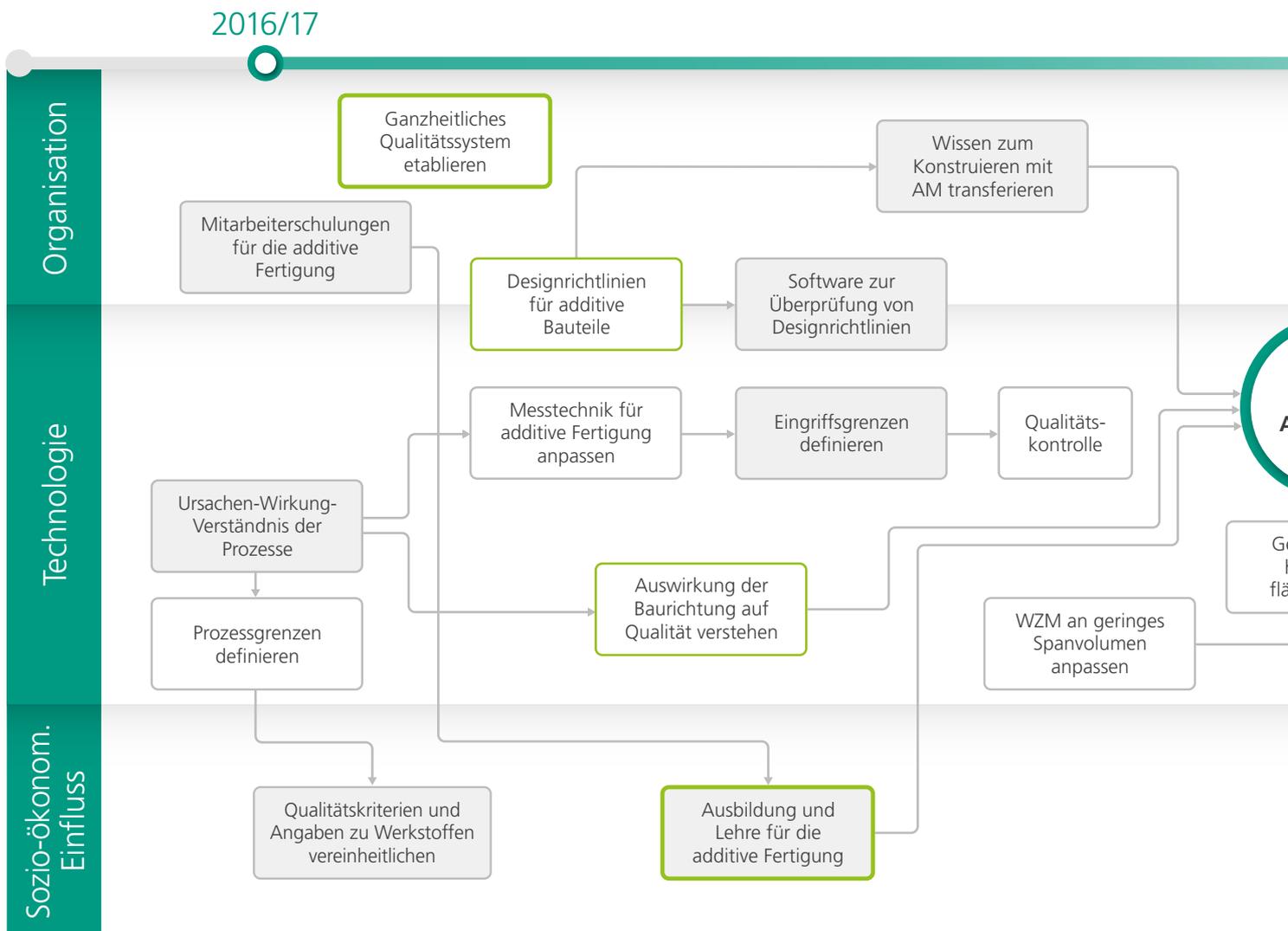


Abb. 33: Roadmap Variantenreiche individualisierte Serienproduktion - Ausschnitt Prozessstabilität

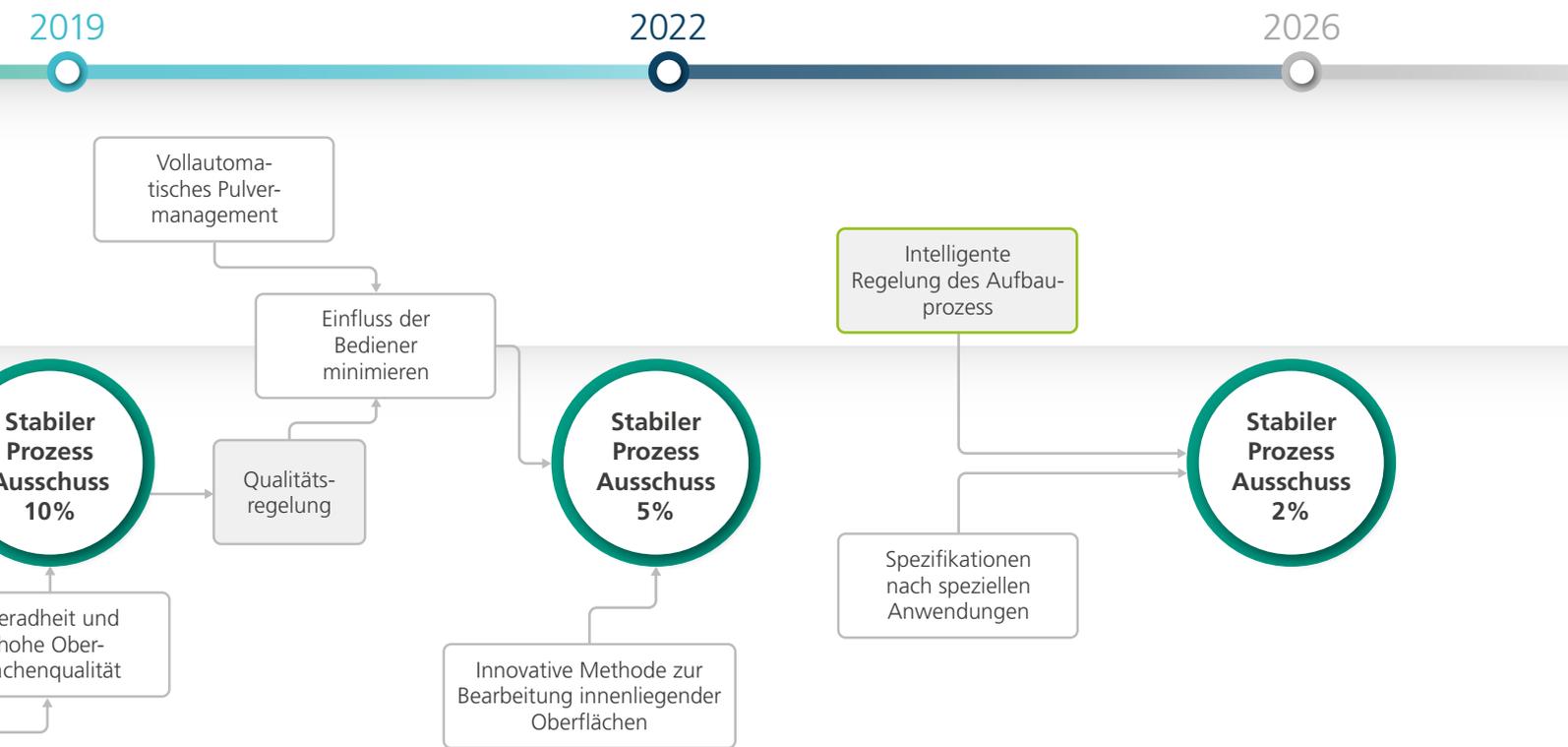
um das 5- bis 10-fache. Daneben ist eine intelligente und integrierte Prozesskette erforderlich. Werkstoffwechsel müssen möglich sein, sind aber aufgrund des hohen Aufwands eher selten durchzuführen.

Zwischenziele

Alle Verbesserungen werden letztlich in den Herstellkosten wirksam werden, sodass sich diese in 2019 halbiert und in 2022 auf 1/3 reduziert haben. Bis 2026 werden lediglich 1/5 der heutigen Herstellkosten erwartet. Die reduzierten

Herstellkosten werden vor allem indirekt durch stabilere Prozesse und damit weniger Ausschuss, eine höhere Produktivität der Anlagen sowie eine intelligente Prozesskette erzielt. Die integrierte Prozesskette ermöglicht es, die Komplexität der variantenreichen individualisierten Fertigung beherrschbar zu machen und somit Verschwendung in der Fertigung zu reduzieren.

Für variantenreiche Bauteile wird sich der Ausschuss ausgehend von heute mit 15% zunächst auf 10% in 2019 und 5% in 2022 reduzieren. Letztlich kann in 2026 ein Ausschuss von 2% erzielt werden.



Die Produktivität des Laser-Strahlschmelzens wird zunächst bis 2019 um das Zweifache ansteigen und im Jahr 2022 das 3-fache erreicht haben. 2026 wird dann mit einer 5-10mal höheren Produktivität der Anlagen gerechnet.

Maßnahmen

Die Steigerung der Prozessstabilität ist in *Abbildung 33* dargestellt und lässt sich auf drei Hauptstränge zurückführen: Eine automatisierte Kontrolle bzw. Regelung der Prozesse, wofür die Definition von Prozess- und Eingriffsgrenzen erforderlich ist; die Aus- und Weiterbildung von Mitarbeitern sowie das fertigungsgerechte Konstruieren für das Laser-Strahlschmelzen.

Zunächst müssen Einflussgrößen der Werkstoffe und Prozessparameter auf die Bauteilbeschaffenheit in spezifischen Versuchsreihen ermittelt werden. Dies ist parallel zur Entwicklung geeigneter Messtechnik bzw. Sensorik zur Messung der Einflussgrößen durchzuführen. Aus den Versuchsreihen lassen sich Prozessgrenzen für Werkstoffe und Bauteileigenschaften ableiten. Diese werden anschließend in Standards überführt. Für die entwickelte Messtechnik lassen sich Eingriffsgrenzen definieren, die letztlich als Qualitätskontrolle in der Anlage eine Prüfung der Bauteile ermöglichen. Neben Versuchsreihen zu allgemeinen Einflussgrößen müssen in einem weiteren Schritt Untersuchungen zum Einfluss der Baurichtung auf die

Qualität durchgeführt werden. Zudem müssen die geometrische und die Oberflächenqualität durch angepasste zerspanende Fertigungsprozesse in der Nacharbeit verbessert werden. Dies beinhaltet etwa das Weiterentwickeln von Schlichtwerkzeugen, die heute für ein Zerspanen von geraden Oberflächen entwickelt sind und in konturnahen Fertigungen des LBM auf wellige Oberflächen treffen. Für die Oberflächenbearbeitung von innen-liegenden Strukturen sind neue Fertigungsverfahren zu entwickeln oder etablierte für LBM-Bauteile zu befähigen. Zum Betrieb der gesamten Prozesskette ist ein Qualitätsmanagementsystem einzuführen. Dieses definiert Qualitätssicherungsmaßnahmen entlang der Lieferkette (Qualitätsmerkmale für Pulverwerkstoffe, Häufigkeit und Zeitpunkt von Qualitätsmessungen, etc.) und ermöglicht eine fertigungsgerechte Entwicklung und Produktionsplanung von Bauteilen.

Die Weiterbildung der Mitarbeiter muss zunächst innerhalb der Unternehmen geschehen. Auf diesen Erfahrungen können Berufsausbildungen und Weiterbildungen zum Wissenstransfer erarbeitet werden. Letztlich werden alle Erkenntnisse der einzelnen Maßnahmen in der Ausbildung münden. Angelehnt daran sind Maßnahmen für eine fertigungsgerechte Konstruktion erforderlich. Zunächst müssen weitere Design-Richtlinien erarbeitet werden, die es ermöglichen die Grenzen und Freiheitsgrade des Laser-Strahlschmelzens verständlich zu vermitteln. Die Richtlinien müssen darüber hinaus in Design-Tools bzw. kommerzielle CAD-Software implementiert werden.

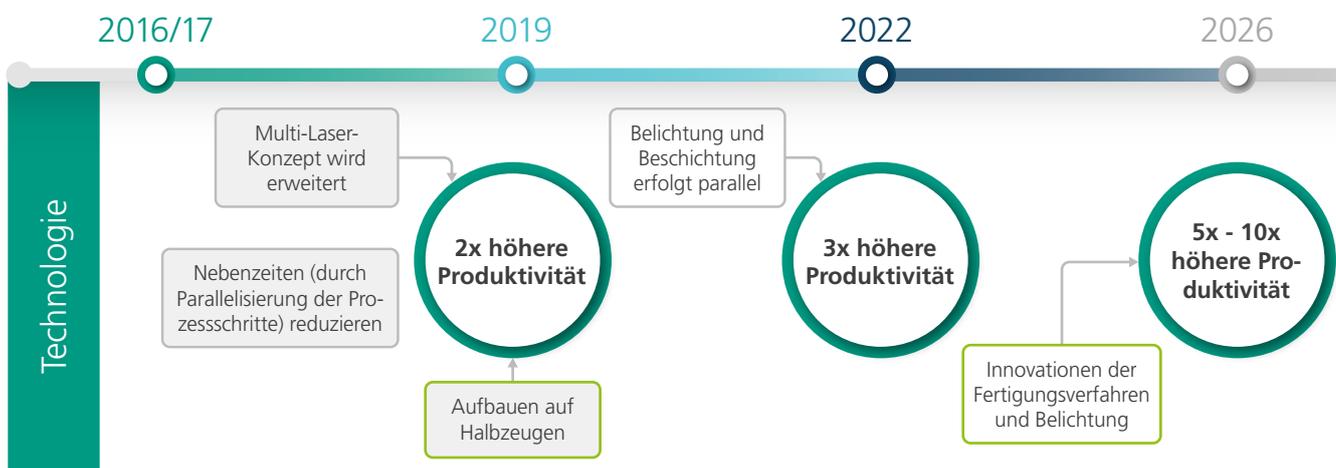


Abb. 33: Roadmap Variantenreiche individualisierte Serienproduktion - Ausschnitt Produktivität

Die zuvor genannten Maßnahmen werden bis 2019 angestoßen und eine Reduktion des Ausschusses auf 10% ermöglichen. Die Maßnahmen werden insgesamt erst nach 2019 komplett wirksam werden. Weiterhin muss nach 2019 die Qualitätskontrolle zu einer vollständigen Qualitätsregelung der Prozessparameter erweitert werden, zusammen mit einem vollautomatischen Pulvermanagement kann so der Bedienerinfluss deutlich verringert und der Ausschuss bis 2022 auf 5% reduziert werden. Zwischen 2022 und 2026 sind die Aufbauprozesse mit einer vollständigen Selbstregelung auszustatten, so dass unabhängig vom Bauteil eine ausreichende Qualität erzielt werden kann. Daneben sind für Spezialanwendungen, wie dünnwandige Bauteile oder unter großen Zugkräften belastete Bauteile, Spezifikationen und Prozessgrenzen für die Fertigung zu definieren. Letztlich lässt sich so die Variantenvielfalt weiter erhöhen und das LBM-Verfahren auf weitere Anwendungen übertragen.

Zur Produktivitätssteigerung sind bis 2019 Multilasersysteme weiterzuentwickeln und zur Marktreife zu bringen. Neben der reinen Produktivitätssteigerung muss die Reduktion von Nebenzeiten durch neue serienfähige Anlagenkonzepte vorangetrieben werden. Durch die Kombination mit etablierten Fertigungsverfahren, wie zum Beispiel dem Aufbauen auf Halbzeugen können weitere Produktivitätssteigerungen erreicht werden. Nach 2019 wird ein stärkerer Fokus auf neue Aufbaustrategien gesetzt. Hierzu gehört insbesondere ein gleichzeitiges Belichten und Beschichten während des Aufbauprozesses. Alle Maßnahmen werden bis 2022 eine Erhöhung der Produktivität um das 3-fache ermöglichen. Erst nach 2022 werden innovative additive Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Beispielhaft seien Diodenlaserkonzepte, Binder-Jetting-Verfahren oder neue Belichtungskonzepte für das Laser-Strahlschmelzen genannt. Damit diese Konzepte bis 2026 einsatzfähig sind muss bereits heute mit deren Entwicklung begonnen werden. Je nach Erfolg dieser Konzepte kann eine Produktivitätssteigerung für die variantenreiche Fertigung um das 5- bis 10-fache erreicht werden (s. *Abbildung 34*).

Eine intelligente integrierte Prozesskette ermöglicht die Planung und Steuerung variantenreicher Bauteile, durch Planungstools unter Beachtung der gesamten Prozesskette, d.h. auch aller Nachbearbeitungsschritte. Die einzelnen Maßnahmen sind in *Abbildung 35* dargestellt. Hierfür sind Kostenmodelle zu entwerfen, die eine Prognose der Herstellkosten ermöglichen und dabei nicht nur den Sta-

tus quo, sondern auch die große Entwicklungsdynamik des Laser-Strahlschmelzens mitberücksichtigen. Darüber hinaus muss die Berechnung der Lebenszykluskosten eines Bauteils ermöglicht werden, um die Vorteile der additiv gefertigten Bauteile im Einsatz bewerten zu können. Um bionische Freiformflächen handhaben und weiter bearbeiten zu können, sind neue Spannkonzepete zu erarbeiten. Für eine Steuerung der Prozesskette sind Konzepte für die Bauteilverfolgbarkeit zu erarbeiten. Neben RFID-Tags könnten auch während des Prozesses eingebrachte dreidimensionale QR-Codes möglich sein. Auf Basis der Bauteilverfolgbarkeit werden unterstützende Softwarelösungen für die Steuerung von additiven Fabriken erarbeitet.

Nach 2019 sollen Designrichtlinien entstehen, welche neben dem Laser-Strahlschmelzen auch Weiterbearbeitungsschritte berücksichtigen. Darauf aufbauend kann der Einfluss der Baurichtung auf die Prozesskette untersucht werden (bspw. Aufwand zum Entfernen der Stützstruktur in Abhängigkeit der Lage).

Zu entwickelnde Optimierungsmodelle für ein automatisiertes Nesting eines Baujobs und Software zur Auftragseinplanung in die Fertigung ermöglichen schließlich eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette. So können Modelle entwickelt werden, die Stützstrukturen automatisiert reduzieren, dabei aber eine kostenoptimale Lösung in Abhängigkeit des Aufbauprozesses und der Nachbearbeitung liefern. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die Prozessparameter mit den CAD-Dateien an die Software zur Auftragseinplanung übergeben. Neben der Steuerung innerhalb der Fabrik werden durch Einbindung der Anlagenhersteller Serviceleistungen, die dem heutigen Standard der Werkzeugmaschinenhersteller entsprechen, möglich sein.

Die Prozessstabilität führt zu einer Reduktion von Qualitätskosten, die Produktivität zu einer besseren Anlagenausnutzung und eine intelligente integrierte Prozesskette zur Reduktion von Verschwendung innerhalb der Fertigung. So lassen sich letztlich die niedrigeren Herstellkosten erzielen. Hinzu kommt eine eintretende Senkung der Anlagenkosten aufgrund des zunehmenden Wettbewerbs und positiver Skaleneffekte.

Allgemeine Maßnahmen sind vor allem neue Geschäftsmodelle im Vertrieb variantenreicher Produkte oder der Anwendung des Laser-Strahlschmelzens. Diese müssen gefördert werden, um eine Marktdurchdringung des Verfahrens zu erreichen.

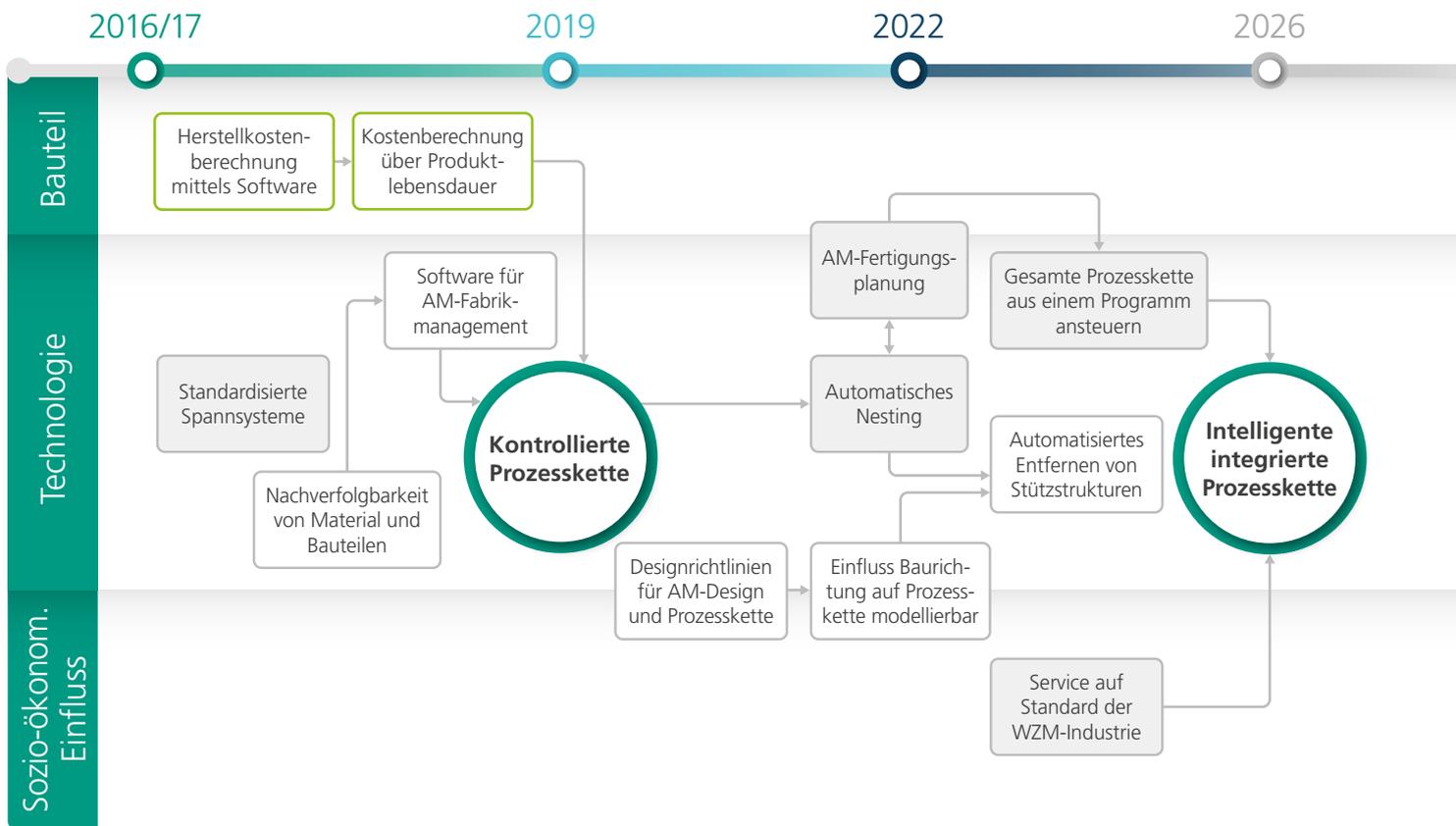


Abb. 35: Roadmap Variantenreiche individualisierte Serienproduktion - Ausschnitt Prozesskette

4.2 Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile

Zielsetzung

Eine qualitätsorientierte Produktion mit mittleren bis großen Bauteilen fokussiert sich auf Bauteile in einem versagenskritischen Umfeld, wie etwa Strukturbauteile mit Leichtbaugeometrien. Die hohen Qualitätsanforderungen werden durch den Pulvermarkt bedient und durch Automatisierung der Nacharbeit sowie eine Qualitätssicherung in der Anlage sichergestellt. Zusätzlich sorgt eine 100%-Nachkontrolle zur Absicherung der Qualitätsanforderungen. Dieser Aufwand führt zu hohen Produktpreisen, die jedoch durch die hohe Qualität als akzeptabel angesehen werden.

Als besonders relevante Eigenschaften für eine qualitätsorientierte Produktion werden die Prozessstabilität, die Pulverqualität sowie die Produktivität, die Automatisierung der Nacharbeit und die Steuerung der Prozesskette eingestuft. Die Prozessstabilität wird dabei über die Ausschussrate, die Produktivität über die Ausbringung und die Automatisierung über den Anteil der manuellen Tätigkeit gemessen.

Im angestrebten Ziel für das Jahr 2026 sollen folgende Punkte erreicht sein: Das verfügbare Pulver hat eine hohe Qualität. Die genutzten Schnittstellen der digitalen Prozesskette sind einheitlich oder alternativ über ein universelles Programm bedienbar. Außerdem wird der Prozess mit einem Ausschuss von 2% wesentlich stabiler sein als

bei heutigen Bauteilen mit hoher Qualität. Dies ermöglicht eine hoch automatisierte Nacharbeit, bei der die manuelle Arbeit zu 80% im Vergleich zu heute reduziert ist. Eine Produktivitätssteigerung um das Acht- bis Zehnfache der heutigen Ausbringung ist für dieses Szenario zu erwarten.

Zwischenziele

Als relevante Ausprägung wird sich der Ausschuss bezüglich der betrachteten Bauteile, mit hohen Qualitätsanforderungen - ausgehend von einem Wert heute von über 10% - bis 2019 zunächst auf 10% stabilisieren. Die Entwicklung in den Folgejahren muss wesentlich intensiver sein, sodass der Ausschuss auf 6% im Jahr 2022 sinkt und schließlich 2026 die angestrebten 2% erreicht werden.

Hinsichtlich der Nacharbeit soll diese 2019 50% der heute manuellen Tätigkeiten automatisiert sein – etwa gleich zu setzen mit einer zweifachen Effizienzsteigerung. 2022 wächst dieser Anteil auf 70% an und nähert sich 2026 mit 80% der Vollautomatisierung – was einer 3,5- und 5-fachen Effizienzsteigerung entspricht.

Für die Produktivität ist ein stetiges Wachstum zu erwarten: Angefangen mit einer Vervierfachung 2019, über eine Vesechsfachung im Jahr 2022 bis zu acht bzw. zehn Mal höherer Produktivität 2026.

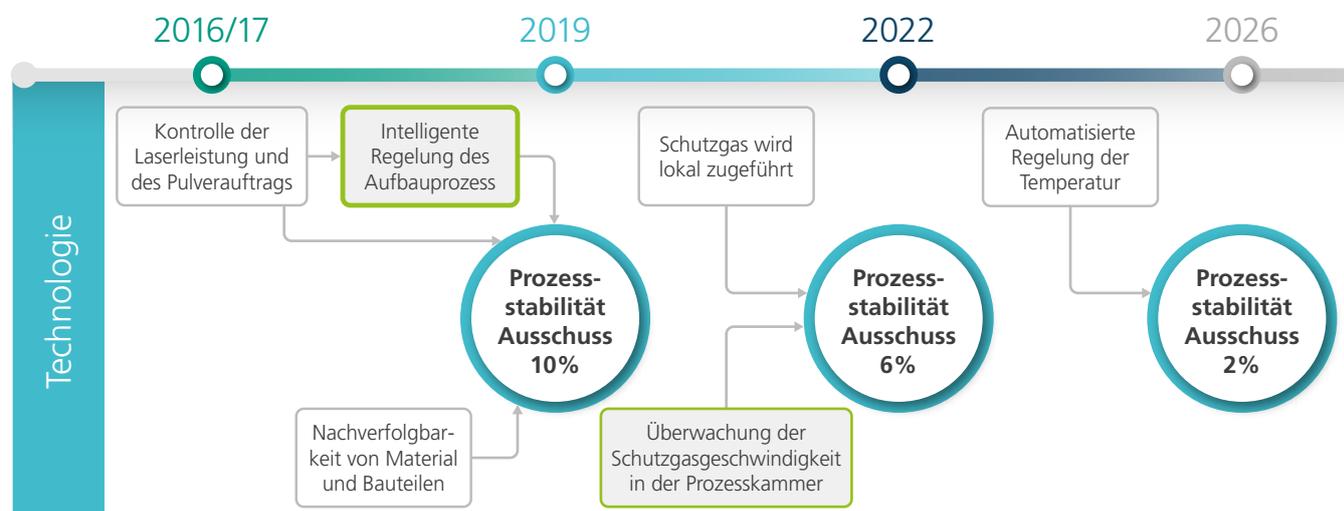


Abb. 36: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Prozessstabilität

Maßnahmen

Die verbesserte Prozessstabilität basiert – wie in *Abbildung 36* dargestellt - auf zwei mittelfristigen Entwicklungen in den nächsten drei Jahren:

Zum einen sind Entwicklungen in der Prozesskontrolle relevant. Hier werden insbesondere die Laserleistung mit einer Inline-Überwachung und das gleichmäßige Auftragen des Pulvers adressiert. Darauf aufbauend soll bis 2019 eine adaptive Prozessregelung für die Laserleistung ermöglicht werden, durch die beispielsweise der Umgang mit unterschiedlichen Schichtdicken möglich ist sowie der Eingriff in den Prozess bzw. die Korrektur von Prozessparametern ohne manuellen Eingriff.

Zum anderen ist eine Nachverfolgung des Materials bzw. Produkts gefordert. Hierdurch können die Produkte auch im Nachhinein eindeutig den Pulverchargen zugeordnet werden. So werden systematische Fehler durch mangelhafte Rohstoffe nachvollziehbar, sodass ein reaktives Handeln darauf ermöglicht wird.

Die zwei Entwicklungen können ergänzt werden durch neue Möglichkeiten der Nachkontrolle und Qualitätsplanung für Additive Fertigung innerhalb des Unternehmens.

Nach 2019 soll sich die Aufmerksamkeit hierbei stärker auf die Überwachung des Schutzgases richten. So soll die Zuführung dessen lokal geschehen und die Geschwindigkeit der Zuführung in der Prozesskammer überwacht werden können. Bis 2026 ist das Temperaturmanagement zur Vermeidung von Eigenspannungen zu verbessern.

Zur Steigerung der Produktivität sind eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Multi-Laser-Technologie und die Möglichkeit auf Halbzeugen aus konventioneller Fertigung aufzubauen erforderlich. Zunächst wird dies Unsicherheiten hinsichtlich der Stabilität mit sich bringen, später aber eine Produktivitätssteigerung ermöglichen. Das Ziel bis 2019 ist es, vier Laserstrahlen parallel zur Bearbeitung eines Produkts einsetzen zu können. Diese sollen bis 2026 auf acht bis 16 parallele Laserstrahlen erweitert werden (*siehe Abbildung 37*). Denkbar, aber kritisch hinsichtlich der Qualität, ist an dieser Stelle auch ein Belichtungskonzept mit Diodenlasern.

Die Produktivitätssteigerung wird zudem unterstützt durch die fortschreitende Automatisierung in der Nacharbeit entlang der Prozesskette (*Abbildung 38*). Hier soll zunächst die Automatisierung der Pulverentfernung und dann die Entfernung von der Bauplatte eine zuverlässige Lösung bieten. Der Prozess des chemischen Entstützens ist bis

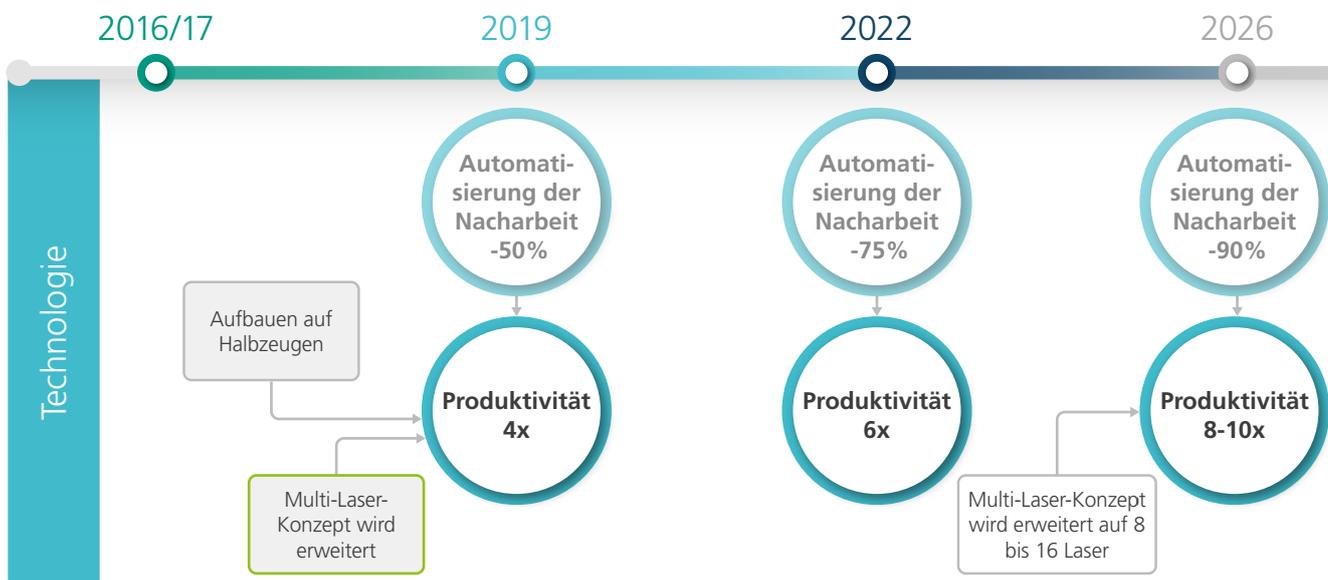


Abb. 37: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Produktivität

2019 so weit entwickelt, dass er auf dem Markt eingesetzt werden kann. Entlang der Prozesskette müssen modulare Anlagenkonzepte befähigt werden und auf dem Markt erscheinen. Bis 2022 erleichtern flexible Fertigungssysteme das Zusammenspiel von Produktion und Nacharbeit bei unterschiedlichen Produkt-Varianten. Für das Handling der Bauteile ist die Entwicklung innovativer Spann- und Greifsysteme notwendig, die bei bionische Freiformflächen eine definierte Lage der Bauteile in den Bearbeitungsschritten sicherstellen. So wird die Qualität sichergestellt und eine automatisierte Handhabung und damit eine Erhöhung der Produktivität ermöglicht.

Eine zuverlässige Basis-Simulation über die gesamte Prozesskette wird bereits mittelfristig die Planung des Bauprozesses und des Bauteils vereinfachen. So kann vorab aufgezeigt werden, an welchen Stellen Spannungen entstehen und wo Bauteile für eine spanende Nachbearbeitung stärker dimensioniert werden müssen. Unter anderem kann so die Entwicklung des mechanischen Entstützens vorangetrieben werden.

Das automatisierte mechanische Entstützen, dessen Umsetzung bis 2022 zu erwarten ist, ist dabei eine alternative Technologie zum chemischen Entstützen. Die Simulationssoftware eingebettet in eine geschlossene CAD/CAM-Kette wird die Einsteuerung der Aufträge entlang

der Prozesskette bis 2022 ermöglichen und für die Wechselwirkungen der verschiedenen Systemparameter sensibilisieren.

Im Rahmen der Pulverqualität (siehe Abbildung 39) muss sich kurzfristig die Anforderungen an die Pulverhersteller dahin verlagern, dass diese eine intensive Prüfung auf Fremdpartikel durchführen. Ein geschärftes Bewusstsein für die Qualität treibt die Festlegung von Qualitätskriterien für die Werkstoffpulver voran. Diese wiederum bilden die Grundlage, neue Legierungen für das Laser-Strahlschmelzen zu entwickeln und Verständnis über alle wichtigen Wechselwirkungen der Einflussparameter zu erlangen. Die Wechselwirkungen der Einflussparameter werden aufgrund ihrer Komplexität nicht vor 2022 beschrieben sein. Ist dieses Verständnis sichergestellt, können darauf aufbauend werkstoffspezifische Wirkmodelle aufgebaut werden.

Als übergreifend Maßnahmen ist, ein Kostenmodell zu entwickeln, das die technischen Fortschritte durch wirtschaftliche Prognose-Möglichkeiten unter Einbeziehung der Nacharbeit unterstützt. Das Kostenmodell wird dann zukünftig zu einem ganzheitlichen Life-Cycle Modell weiterentwickelt werden. Dank der kürzeren Prozesskette von LBM haben Unternehmen neue Gestaltungsfreiheiten für

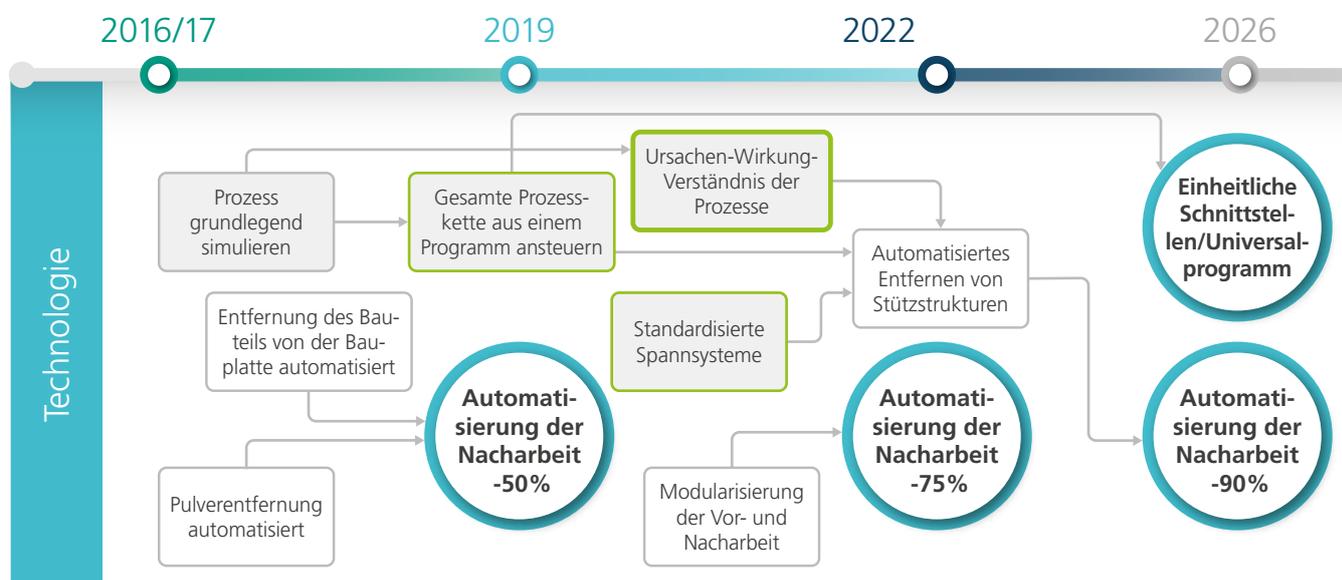


Abb. 38: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Prozesskette

ihr Produktionsnetzwerk. Hierzu kann eine neue, angepasste Produktionsstrategie sinnvoll sein. Geschäftsmodelle wie Machine Sharing sind dabei miteinzubeziehen.

Kontinuierlich muss außerdem am Austausch von Wissen im Bereich der additiven Fertigung und der Standardisierung gearbeitet werden. Der Wissensaustausch kann durch Web-basierte Foren und Partnerschaften zwischen Unternehmen und Instituten, die unterschiedliche Schritte der Prozesskette erfüllen, realisiert werden. Hinsichtlich des Wissens werden (Aufbau-) Schulungen sowie eine Ausbildung als spezialisierte additive Fertigungs-Fachkraft benötigt, sodass ein Verständnis für die Designmöglichkei-

ten und -vorteile verinnerlicht wird. So kann eine Organisationseinheit im Unternehmen entstehen, die auf additive Fertigung ausgerichtet ist. Zudem ist die Wissenspflege und -verwertung ein wichtiger Schritt – bereits erworbenes Wissen aus Projekten sollte verbreitet und genutzt werden. Sowohl für die Anlagenhersteller als auch für die Anwender sind Standards und Normen für die verschiedenen Themenbereiche wichtig – dazu zählen Richtlinien zum Design und zur Arbeitssicherheit sowie technische und rechtliche Regelungen für einen Datenaustausch, der beispielsweise als Wissenspool der Erfahrungen und Fehler dienen kann. Hinsichtlich der Innovationsförderung ist zu betrachten, dass der Fokus verstärkt auf Start-Ups gelegt wird.

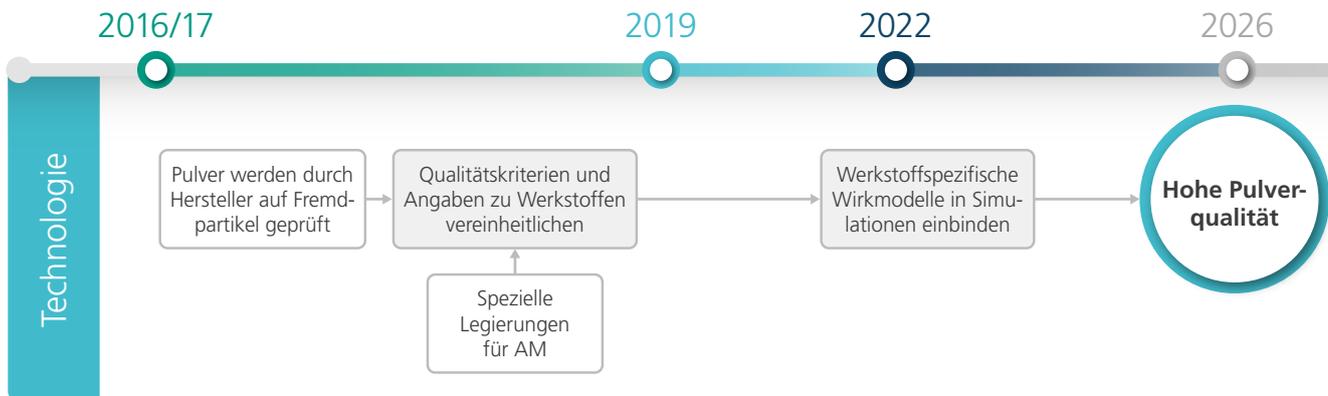


Abb. 39: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Pulverqualität

4.3 Kostengünstige Produktion hoher Stückzahlen

Zielsetzung

Bei einer kostengünstigen Produktion von Bauteilen mit hohen Stückzahlen werden kleine bis mittlere Bauteile hergestellt, welche keine versagenskritischen Einsatzorte beinhalten. Um einen niedrigen Produktpreis zu erzielen muss auch das Pulvermaterial kostengünstig zur Verfügung stehen.

Um diese Zielsetzung erreichen zu können ist eine automatisierte Prozesskette notwendig, in der Arbeitsabläufe vollautomatisiert durchgeführt werden können. Eine digitale Prozesskette unterstützt diese Abläufe und ist daher ebenfalls von großer Bedeutung. Neben der Prozesskette spielt die Anlage eine wesentliche Rolle. Die Prozessstabilität wird durch den Ausschuss gemessen, welcher besonders gering sein muss. Dem gegenüber muss die Produktivität der Anlage ansteigen.

Zwischenziele

Um die Zielsetzung erreichen zu können, muss sich der Ausschuss auf weniger als 2 % reduzieren. Gleichzeitig steigt die Produktivität an. Dabei ist nicht klar vorhersehbar in welchem Maße diese ansteigt. Es ist sowohl eine 10-mal größere Produktivität denkbar, aber auch eine 40-fache Vergrößerung ist möglich.

Durch die automatisierte Prozesskette wird ebenfalls eine Produktion mit hoher Stückzahl ermöglicht, wobei die

gesamte Prozesskette betrachtet werden muss. Somit gehen in diesen Punkt auch Themen zur Pulvervorbereitung ein. Die digitale Prozesskette unterstützt die gesamte Prozesskette durch eine universelle Software die alle Prozessschritte ansteuern kann. Dazu müssen die Schnittstellen bis 2026 vereinheitlicht werden. Des Weiteren muss eine Optimierung von Topologie, Verzug, Eigenspannungen und Stützstruktur in einer Simulation möglich sein. Dies soll bereits bis ins Jahr 2019 zu großen Teilen umgesetzt werden.

Zuletzt spielt die Qualitätssicherung der gesamten Prozesskette eine wichtige Rolle, hier müssen Qualitätsmanagementsysteme, sowohl auf organisatorischer Ebene als auch in der LBM-Anlage direkt, bis 2026 integriert werden.

Maßnahmen

Eine der wichtigsten Säulen für eine kostengünstige Produktion mit hoher Stückzahl stellt die Prozessstabilität dar, deren Entwicklung in *Abbildung 40* dargestellt ist. Dabei soll der Ausschuss kontinuierlich von 8 % 2019 auf weniger als 1 % im Jahr 2026 sinken. Um dies realisieren zu können, müssen Ursachen und Wirkungen analysiert und verstanden werden. Gleichzeitig müssen Anforderungen der Anwender an den LBM-Prozess berücksichtigt werden. Aus der Ursachen-Wirkung-Beziehung können weitere Eingangsinformationen für den Prozess abgeleitet werden. Eine angepasste Sensorik, welche auf Basis der Eingangsinformationen definiert wird, wird sich positiv auf die Aus-

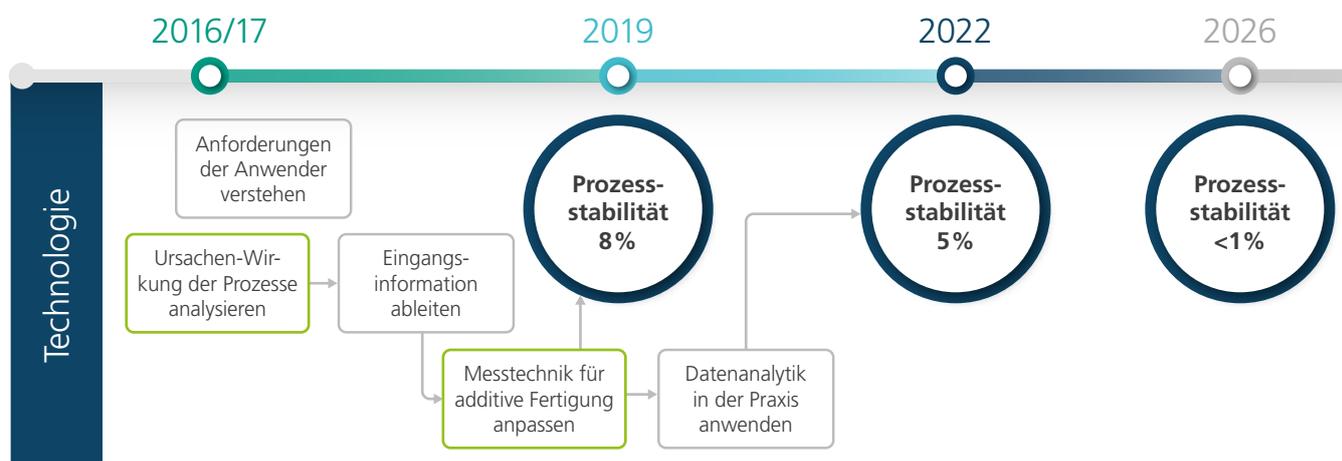


Abb. 40: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Prozessstabilität

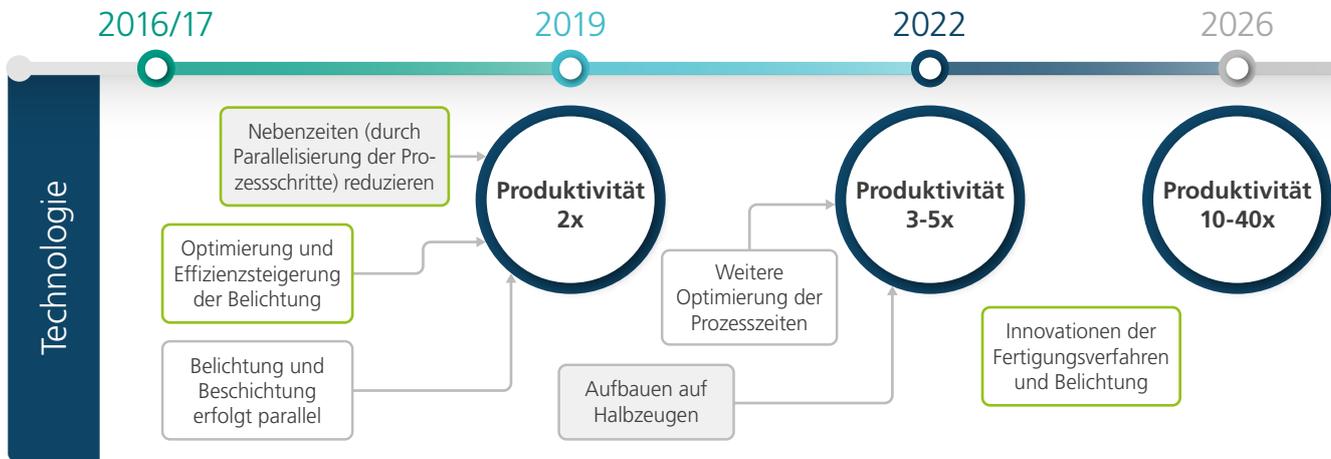


Abb. 41: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Produktivität

schussrate auswirken. Durch den sinnvollen Einsatz von Sensorik und die intelligente Auswertung der Daten ist es möglich die Ausschussrate auf 5 % im Jahr 2022 zu senken und bei konsequenter Weiterentwicklung dieser Systeme eine Ausschussrate kleiner 1 % im Jahr 2026 zu realisieren.

Neben der Prozessstabilität bildet die Produktivität, aufgezeigt in *Abbildung 41*, eine wesentliche Basis, um hohe Stückzahlen realisieren zu können. Auch hier können die Analysen von Ursachen und Wirkungen und die dafür erforderliche Sensorik zu einem positiven Effekt führen, so dass 2019 mit einer doppelten Produktivität im Vergleich zu heute gerechnet wird. Vor allem die Weiterentwicklung der Anlagen, durch Parallelisierung von Haupt- und Nebenzeiten, beispielsweise durch paralleles Beschichten und Belichten, unterstützen eine höhere Produktivität. Eine Produktivitätssteigerung kann aber auch durch den Aufbau auf bereits vorgefertigte Teile (Halbzeuge) ermöglicht werden. Damit im Jahr 2022 eine 3- bis 5-fache Produktivität erreicht werden kann, ist es notwendig, durch Softwaretools Verbesserungen herbeizuführen. Dabei gilt es eine Optimierung der Topologie, des Verzuges, der Eigenspannungen, sowie der Stützstruktur vorzunehmen. Hierdurch kann eine weitere Optimierung der Prozesszeiten erreicht werden. Um im Jahr 2026 eine noch höhere Produktivität zu erreichen sind neue Belichtungsinnovationen notwendig, allerdings gehen die Meinungen bezüglich der erreichbaren Produktivität auseinander und schwanken zwischen einer 10-fachen bis 40-fachen Produktivitätssteigerung.

2019 wird immer noch eine manuelle Nachkontrolle aller Bauteile durchzuführen sein. Durch installierte Sensorik sind Früherkennungen von Fehlern möglich, da diese Effekte durch Optimierungstools für Topologie, Verzug, Eigenspannung und Stützstruktur abgebildet werden können. In einem weiteren Schritt muss die Qualitätssicherung direkt in die Anlage gebracht werden, sowie die gesamte Prozess-

kette durch Total Quality Management (TQM) abgedeckt werden. Prozesssimulationen können weiterhin über die Geometrie und mögliche Spannungen Aufschluss geben. Um die Softwaretools ganzheitlich zu nutzen, muss auch eine Optimierung unter Beachtung der Nacharbeit möglich sein. Somit ist bereits 2022 eine Kontrolle in der Anlage mit anschließender stichprobenartiger Nachkontrolle möglich. Dies soll konsequent weiter ausgebaut werden, so dass eine inlinefähige Kontrolle, vergleichbar mit spanabtragenden Verfahren, realisiert werden kann. Um diese Kontrolle vollständig zu ermöglichen müssen die Anlagen und deren Sensorik bauteilindividuell ausgelegt werden.

Weitere Maßnahmen betreffen die Prozesskette hinsichtlich Automatisierung und Digitalisierung, dargestellt in *Abbildung 43*. Dabei wird bei der Automatisierung der Nacharbeit mit einer Effizienzsteigerung des 10-fachen im Jahr 2026 gerechnet, ausgehend von einer Verdopplung im Jahr 2019. Die LBM-Anlage wird dabei durch die Modularisierung von vor- und nachgelagerten Prozessen unterstützt sowie durch Standards für Aufnahme von Baumodulen und Zugänglichkeiten an der Anlage. Einheitliche Spannsysteme sind für die Entwicklung der Automatisierung erforderlich.

Parallel entwickelt sich hierzu die digitale Prozesskette. Bereits heute müssen Bibliotheken für Konstruktionselemente und Standardbauteile aufgebaut werden, sowie CAD-Software für die additive Fertigung weiterentwickelt werden. Durch einheitliche Schnittstellen im Jahr 2022 werden einzelne Softwarelösungen miteinander kommunizieren. Dazu müssen einheitlichen Datenformate definiert und rechtliche Fragen des Datenrechts geklärt werden, bis sich 2026 universelle Softwarelösungen zur Steuerung der Prozesskette durchsetzen werden. Werkstoffspezifische Simulationsmodelle müssen in diesen Softwarelösungen zur Verfügung stehen, um den Prozess vorab zu analysieren.

Übergreifende Themen sind etwa im Bereich der Bildung zu finden. Dort muss die additive Fertigung stärker eingebunden werden. Dabei muss das Wissen aus anderen Technologien in diesem Wissenstransfer einfließen, um eine ganzheitlich Betrachtung der Problemstellung gewährleisten zu können. Des Weiteren müssen Ausbildungsberufe geschaffen werden, welche Konstrukteure, FEM-Ingenieure und die Arbeitsvorbereitung in der addi-

tiven Fertigung ausbilden. Ein weiterer wichtiger Schritt besteht darin, Normen und Standards für die Prozesskette zu setzen. Hierzu gehören auch Vorgaben zur Emission von Pulverstäuben. Diesem müssen Anlagenhersteller durch geschlossenes System realisieren und somit die Pulveremission reduzieren. Zuletzt ist eine einheitliche Angabe von Kennzahlen und Datenblättern erforderlich, um Anlagen und Materialien miteinander vergleichen zu können.

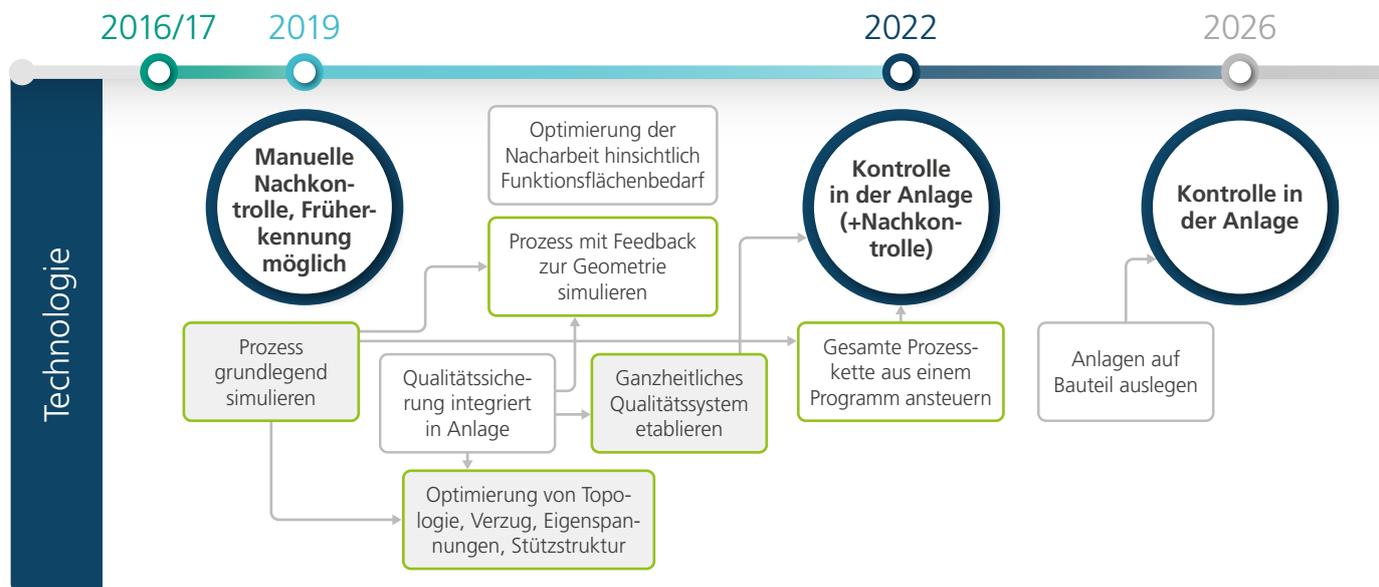


Abb. 42: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Qualitätskontrolle

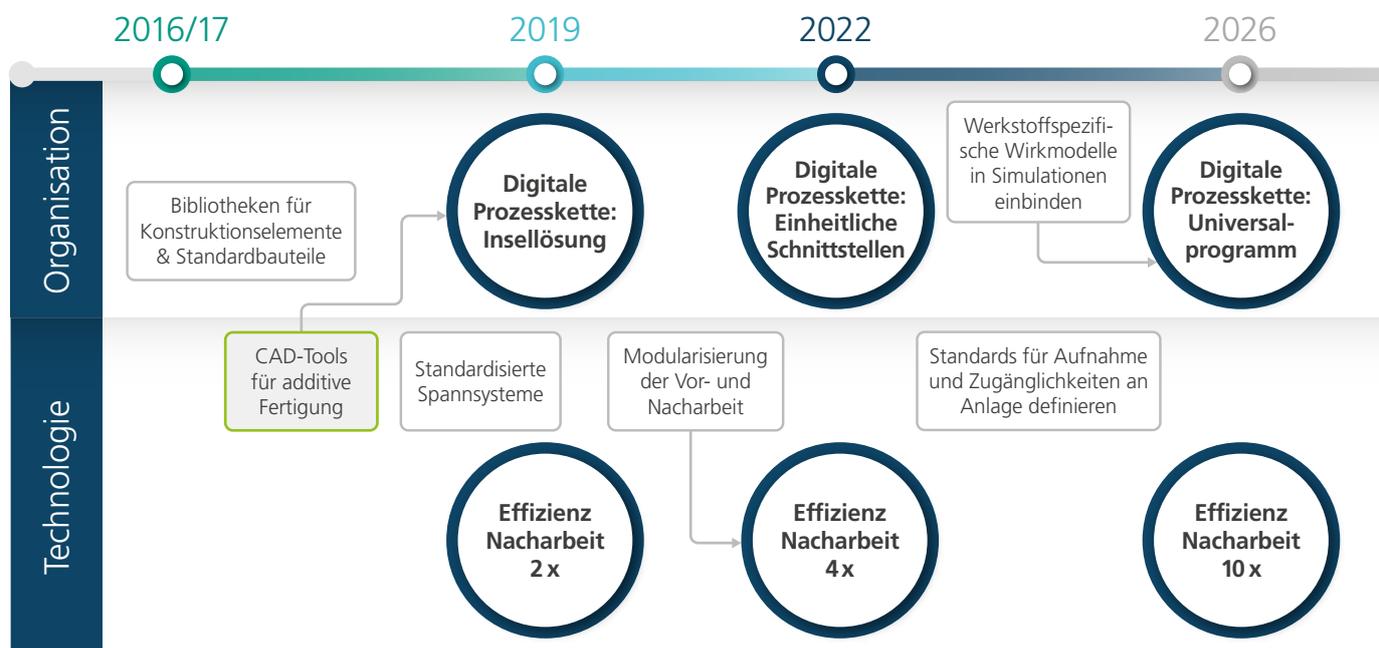
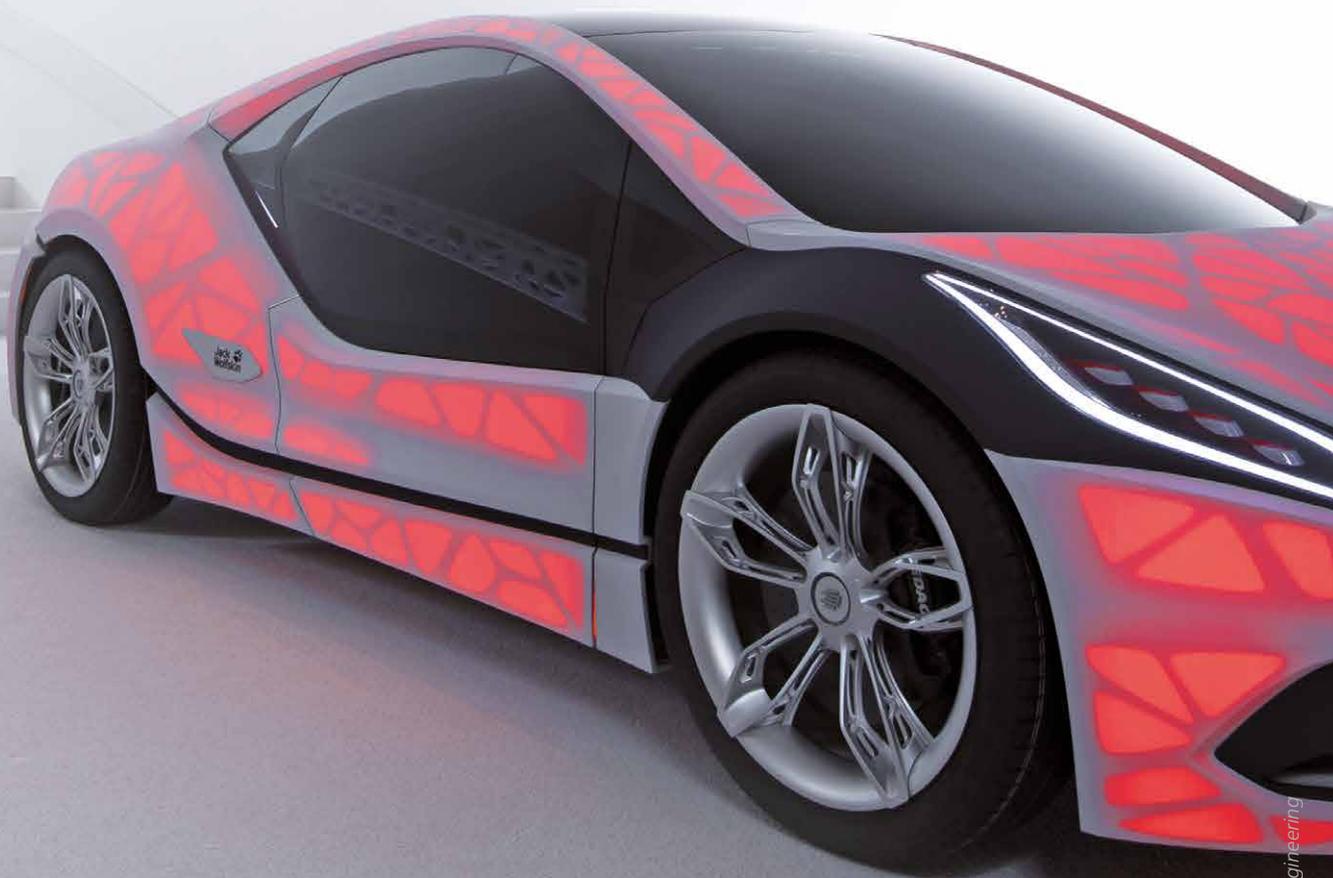


Abb. 43: Roadmap Qualitätsorientierte Produktion großer Bauteile- Ausschnitt Prozesskette

5. Handlungs- empfehlungen



Aus den Entwicklungsmaßnahmen zur Erreichung der einzelnen Zielklassen lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten. Hierbei gibt es drei verschiedene Interessensgruppen, die adressiert werden können: die Forschung und Entwicklung, die einzelnen Industrieunternehmen sowie unternehmensübergreifende Organisationen und Verbände. Die Politik muss geeignete Rahmenbedingungen schaffen, um diese Empfehlungen umzusetzen. Als relevante Handlungsempfehlungen sind jene einzustufen, die unabhängig vom Anforderungsprofil sind, d.h. in mehreren Roadmaps erwähnt werden. Darüber hinaus gibt es Entwicklungsmaßnahmen, die für eine einzelne Zielklassen von hoher Wichtigkeit zur Zielerreichung sind.

Aus der Studie ergeben sich über alle Zielklassen drei priorisierte Entwicklungsziele für 2026: die Erhöhung der Prozessstabilität, sodass der Ausschuss bei höchstens 2% liegt, die Steigerung der Produktivität um ein 5 bis mehr als das 10-fache (abhängig vom Szenario) und die Erhöhung der Effizienz in der Vor- und Nacharbeit, um das 5 bis 10-fache.

Zur Erreichung dieser Ziele sind die folgenden Maßnahmen zu erfüllen.

Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit

Neue Anlagenkonzepte um Nebenzeiten zu reduzieren, z.B. durch Parallelisierung der Prozessschritte, wie Rüsten, Aufheizen und Inertisieren. Durch Modularisierung der Anlagenkonzepte müssen Vor- und Nachbereitungstätigkeiten auf getrennte Stationen verlagert werden. Hier sind insbesondere Anlagenhersteller für LBM- und Peripherie-Anlagen gefordert.

Weiterentwicklung der Optikkonzepte wie etwa durch Erweiterung von Multi-Laser-Konzepten oder einer parallelisierten Belichtung und Beschichtung hin zu weiteren innovativen Ansätzen, bspw. Diodenlaserkonzepten müssen intensiv erforscht und durch Institute voran gebracht werden.

Durch **Kombination mit konventionellen Fertigungsverfahren** kann die Produktivität bezogen auf das Bauteil gesteigert werden. Das Aufbauen auf Halbzeugen ist dazu intensiv weiterzuentwickeln, aber auch bisher weniger beachtete Kombinationen, wie das Umgießen oder Sintern von im LBM hergestellten Halbzeugen ist zu erforschen.

Erhöhung der Prozessstabilität

Die **Erforschung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen** des LBM-Aufbauprozesses erfordert großangelegte experimentelle Untersuchungen durch Forschungseinrichtungen. Dabei sind zunächst grundlegende Prozesszusammenhänge zu modellieren. In einem weiteren Schritt müssen diese zu werkstoffspezifischen Wirkmodellen ausgebaut werden.

Simulationsmodelle für den LBM-Prozess müssen auf Basis der Wirkmodelle realisiert werden. Dies kann letztlich nur durch geförderte, intensive Zusammenarbeit von Forschungsinstituten und Softwareherstellern geschehen. Die Forschung liefert hierbei die Modelle, die durch Softwarehersteller verwertet und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Durch vorhergehende Simulation des bauteilindividuellen Prozesses kann die Stabilität erhöht und damit der Ausschuss reduziert werden.

Qualifizierung von Messtechnik und Sensorik für die Fertigung mit LBM ist erforderlich, um die Qualität entlang der Prozesskette zu überwachen. Dabei ist es notwendig die wirtschaftlich sinnvollen Einsatzorte entlang der Prozesskette zu definieren und für diese entsprechende Messtechnik durch Messtechnikhersteller zu qualifizieren.

Eine **intelligente Regelung des Aufbauprozesses und entlang der Prozesskette** kann in einem weiteren Schritt nach Qualifizierung der Messtechnik und verstandenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen realisiert werden. Alternativ können Ansätze der künstlichen Intelligenz eine Regelung ermöglichen bevor die Wirkzusammenhänge detailliert erforscht sind.

Mitarbeiterschulungen und Ausbildungsberufe müssen für die additive Fertigung von Hochschulen und Unternehmen neu erarbeitet und bestehende um diese Technologie ergänzt werden. Nur durch den erfolgreichen Transfer der Forschungsergebnisse über Bildung auf den ausführenden Mitarbeiter kann die Technologie gewinnbringend eingesetzt werden.

Qualitätsmanagementsysteme müssen durch die Anwender entlang der LBM-Prozesskette entwickelt und etabliert werden. Dazu gehören definierte Abnahmerichtlinien für Pulverwerkstoffe und Vorgaben zur Rückverfolgbarkeit von Bauteilen.

Entwicklung produktiver und intelligenter Prozessketten

Nachverfolgbarkeit von Material und Bauteilen kann nur durch passende ERP-Systeme realisiert werden. Erste Fabrikkonzepte zeigen, dass existierende Lösungen nur unzureichend auf die Eigenschaften der LBM-Fertigung angepasst sind. Lösungen die hierdurch eine durchgehende digitale Prozesskette ermöglichen, sind durch Systemanbieter zu erarbeiten.

Software zur Vorbereitung von Aufträgen von Bauteilen ist erforderlich. Diese soll ein optimales Packen der Bauteile hinsichtlich Topologie, Verzug, Eigenspannung, Stützstruktur und Bauraumausnutzung ermöglichen. Dazu sind Optimierungsalgorithmen zu entwickeln und in die digitale Prozesskette einzubetten.

Modelle zur Berechnung von Herstell- und Lebenszykluskosten müssen von der Forschung entwickelt werden, da so bereits im Vorfeld der Produktion die Wirtschaftlichkeit für einzelne Bauteile bewertet werden kann. Die Integration konventioneller Fertigungsverfahren ist erforderlich, um bspw. die Verwendung konventioneller Halbzeuge als wirtschaftliche Lösung zu identifizieren.

Das Anpassen konventioneller Fertigungsverfahren, wie Zerspanprozesse, auf mit LBM gefertigte Bauteile ist für eine produktive und prozessstabile Fertigung zwingend erforderlich. So sind heute existierende Zerspanprozesse entweder hinsichtlich des Abtrags hoher Volumen (Schrubben) oder des Glättens von ebenen Oberflächen (Schlichten) optimiert. Durch die endkonturnahe LBM-Fertigung müssen allerdings unebene Oberflächen geglättet werden. Diese und weitere konventionelle Fertigungsverfahren sind für ihren Einsatz in der LBM-Prozesskette zu adaptieren.



Abb. 44: CAD-Software für die LBM-Fertigung (Quelle: Autodesk)

Eine Entwicklung von Spannsystemen für bionische Freiformflächen ist in modularen LBM-Prozessketten erforderlich, um die Freiheit des LBM nicht durch die Nachbearbeitung oder das Handling einzuschränken. Es sind Konzepte zu erforschen, deren Schnittstellen auf der einen Seite standardisiert und deren Spannflächen in der Lage sind diese Freiformflächen aufzunehmen.

Automatisierung der Prozesskette ist, wo wirtschaftlich sinnvoll, durch spezialisierte Automatisierungstechniker voranzutreiben. Neue automatisierte Stationskonzepte für das Entfernen des Pulvers oder der Stützen sind zu entwickeln. Hier müssen auch heute nicht verwendete Fertigungstechnologien untersucht und auf ihr Einsatzpotenzial untersucht werden.

Organisationsübergreifend

Designrichtlinien und Konstruktionselemente sind weiter zu erforschen und in zentralen Bibliotheken zu erfassen, damit diese der Industrie zur Verfügung gestellt werden. Konstrukteure können sich so auf vorweggedachte (bionische) Elemente stützen und erhalten einen leichteren Einstieg in die additive Konstruktion. Bei allen Freiheitsgraden des Verfahrens sind die Grenzen in der Konstruktion immer noch unzureichend erforscht und als individuelles Wissen der Konstrukteure nicht zugänglich.

Produktionsstrukturen und Geschäftsmodelle müssen auf die additiven Technologien angepasst werden. Heutige betriebliche Strukturen lassen eine individualisierte Fertigung ohne aufwändige Freigabeprozesse einzelner Bauteile nicht zu. Prozesse müssen zudem schlanker gestaltet, und durch digitale Systeme gestützt werden, um die Komplexität die mit der additiven Fertigung einhergeht beherrschen zu können. Zudem bieten die additiven Technologien ein großes Potenzial für neue Geschäftsmodelle. Diese müssen erarbeitet und entwickelt werden. Existierende Geschäftsmodelle aus dem Maschinenbau müssen überdacht und eher an Geschäftsmodellen digitaler Branchen ausgerichtet werden.

Eine Vergleichbarkeit der Ausrüster muss geschaffen werden. Hier sind insbesondere standardisierte Erhebungen von Produktivitäts- und Qualitätskennzahlen der LBM-Anlagen zu nennen. Des Weiteren sind die Angaben zu Qualitätskriterien und Angaben zu Werkstoffen zu vereinheitlichen.



Abb. 45: Karosseriestruktur mit individuellen Verbindungselementen
(Quelle: EDAG Engineering)

Wissenstransfer über Plattformen muss durch Verbände weiter ausgebaut werden. Ziel muss es sein, diesen Austausch weiter zu stärken. Fachtagungen sind wichtige Basis für ein anforderungsgerechtes Weiterentwickeln der Technologie und ermöglichen den Transfer neuer Forschungsergebnisse.

Normative Gremien müssen ihre Arbeit weiter ausbauen und beschleunigen. Verbindliche Standards für Pulverwerkstoffe, Fabrikbetrieb und Anlagenschnittstellen sind eine essenzielle Grundlage, um Entwicklungstätigkeiten ergebnisorientiert zu gestalten.

Ausblick

Die anstehenden Aufgaben der Forschung und der Industrie sind immens, um das Laser-Strahlschmelzen als Produktionstechnologie in der Serienfertigung zu verankern. Das aktuell angestrebte Tempo ist maßgeblich, um die aktuell starke Rolle der deutschen Anlagenhersteller in den additiven Technologien zu bewahren. Andernfalls drohen andere Märkte (s. Kapitel 2.5) die deutschen Unternehmen auf diesem Gebiet zu verdrängen.

Für die Anwender stellt das Laser-Strahlschmelzen eine neue Chance dar, die es zu nutzen gilt. Weltweit wurden große Programme zur Forschungsförderung gestartet. Deutschland muss seine starke Forschungslandschaft in dem Gebiet nutzen, um im globalen Wettbewerb mithalten und seine Führungsrolle zu bewahren.

6. Literatur

- Ciupek, M. (2016), Metalldruck ergänzt Zerspanungsprozesse. METAV 2016, VDI nachrichten. <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Metalldruck-ergaenzt-Zerspanungsprozesse> [07.03.2016]
- Gebhardt, A. (2013), Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion, Hanser, München.
- Gomeringer, A. (2007), Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Dissertation. http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3306/pdf/Diss_Gomeringer_hs.pdf [03.01.2016]
- Kief, H. B.; Roschiwal, H. A. & Schwarz, K. (2015), CNC-Handbuch 2015/2016. CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis, Hanser, München.
- Lindemann, C.; Jahnke, U.; Klemp, E. & Koch, R. (2013), Additive Manufacturing als serienreifes Produktionsverfahren. Ökonomische und technologische Betrachtungen einer Zukunftstechnologie, In: Industrie Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse, 02/2013, S. 25–28.
- Mayring, P. (1983), Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. Beltz: Weinheim, Basel
- Premium Aerotec (2017), Premium AEROTEC, EOS und Daimler bereiten die nächste Generation des industriellen 3D-Drucks vor. http://www.premium-aerotec.com/Binaries/Binary8193/2017_04_19_Pressemitteilung.pdf [01.06.2017]
- VDI Nr. 3405 (2014), Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibung. Verein Deutscher Ingenieure
- Witt, G. & Marquardt, E. (2014), Statusreport Additive Fertigungsverfahren. https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/VDI_Statusreport_AM_2014_WEB.pdf [03.01.2016]



Kontakt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Campus Süd
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

Herausgeber

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
www.kit.edu

Karlsruhe © KIT 2017

