

# FAT-Schriftenreihe 358

Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven  
Fertigung für den Automobilbau



# **Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau**

## **Forschungsstelle**

Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT

## **Autoren**

M.Sc. Gefei Li, Dipl. -Ing. Philipp Kohlwes

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Motivation und Projektziel für ProKos .....	3
2.	Inhalt und Projektablauf.....	4
3.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	7
3.1.	Arbeitspaket 1: Bauteilauswahl und Anforderungsdefinition.....	7
3.1.1.	Auswahl des Demonstratorbauteils für das Projekt.....	7
3.1.2.	Anforderungsliste für die Demonstratorbauteile.....	7
3.2.	Arbeitspaket 2: Kostenaufnahme der Bauteile .....	8
3.2.1.	Fertigung des Demonstrators mit Standardparametern.....	8
3.2.2.	Ermittlung der Herstellkosten .....	10
3.3.	Arbeitspaket 3: Entwicklung von Lösungsansätzen zur Kostenreduktion.....	12
3.3.1.	Ermittlung der minimal zulässigen Dichte.....	12
3.3.1.1.	Generierung von Probenkörpern mit Zieldichte von 95 % - 99 %.....	12
3.3.1.2.	Ermittlung der minimal zulässigen Bauteildichte.....	15
3.3.2.	Entwicklung neuer Strahlprofile für den LBM-Prozess.....	20
3.3.3.	Entwicklung der Prozessführung für ein ringförmiges Laserstrahlprofil und einer Schichtstärke von 120 µm .....	23
3.3.3.1.	Einzelspur-Experimente.....	23
3.3.3.2.	Dichtewürfel Experiment .....	24
3.3.3.3.	Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften .....	25
3.3.4.	Ermittlung der Kosteneinsparpotentiale.....	29
3.4.	Arbeitspaket 5: Ermittlung des Einsparpotentials und Zusammenfassung der Projektergebnisse 33	
3.4.1.	Fertigung eines Demonstrators mit Prozessparametern des kosteneffizienteren Prozesses	33
3.4.2.	Gesamtvergleich der Kosten .....	35
4.	Zusammenfassung.....	38
	Literatur.....	39

## 1. Motivation und Projektziel für ProKos

Der Fahrzeugbau stellt einen wesentlichen Innovationsführer der deutschen Wirtschaft im globalen Wettbewerb dar. Die zukünftigen Herausforderungen für die Automobil- und Zuliefererindustrie ergeben sich zum einen durch eine zunehmende Diversifizierung der Fahrzeuge (z. B. durch unterschiedliche Antriebskonzepte und Karosseriebauformen) und der damit einhergehenden Notwendigkeit variantenreiche Fahrzeugkonzepte zu fertigen sowie zum anderen durch sich stetig verschärfende Umweltauflagen zur Entwicklung neuer, ressourcenschonender Leichtbaukonzepte. Stahlwerkstoffe werden hierbei auch zukünftig eine tragende Rolle im Fahrzeugbau einnehmen, aufgrund der folgenden Vorteile:

- Potential der Gewichtsreduktion bei gleichzeitig hoher Performance und Sicherheit durch (ultra-) hochfeste Stähle mit hoher spezifischer Festigkeit und Energieabsorption;
- niedrigere Kosten: Stahl als das wirtschaftlichste Material für Karosserien;
- breite regionale Verfügbarkeit und gute Rezyklierbarkeit (Nachhaltigkeit);
- günstige CO<sub>2</sub>-Bilanz über den Lebenszyklus verglichen mit anderen Leichtbauwerkstoffen.

Der 3D-Druck mittels selektiven Laserstrahlschmelzens (engl.: Laser Beam Melting, LBM) hat sein großes Anwendungspotential in verschiedenen Branchen, insbesondere der Medizintechnik, dem Werkzeugbau sowie der Luftfahrt bereits unter Beweis gestellt. Durch gänzlich neue Gestaltungsmöglichkeiten, ausgezeichnete Materialeigenschaften sowie eine hohe Fertigungsflexibilität konnten neue Funktionen und bisher unerreichte Leichtbaugrade erfolgreich in die Serienanwendungen überführt werden.

Auch im Automobilbau wurde die technologische Eignung sowie die zu erzielenden Verfahrensvorteile bereits belegt. Unter anderem hat das Fraunhofer IAPT im FAT-Projekt *BioLAS* erstmalig mit der Legierung HC380LA einen automobilen Stahlwerkstoff nach Automotive-Anforderungen für den LBM-Prozess qualifiziert und dabei die mechanisch-technologischen Eigenschaften, die Schweißbarkeit sowie die Anwendungspotentiale nachgewiesen.

Nichtsdestotrotz beschränkt sich die Anwendung des selektiven Laserstrahlschmelzens in der Automobilindustrie bislang auf die flexible Prototypenfertigung, den Werkzeugbau, ausgewählte Ersatzteile sowie Bauteile für sehr spezielle Kleinstserien- und Sonderfahrzeuge. Der Sprung in kleine und mittlere Serien ist bisher noch nicht gelungen. Der ausschlaggebende Grund hierfür sind die aktuell noch zu hohen Fertigungskosten, die je nach Werkstoff und Bauteil derzeit ca. 1.000 €/kg betragen. Etwa 70 % dieser Kosten resultieren aus den Maschinenkosten, d.h. konkret der eingeschränkten Produktivität des Prozesses (15 – 150 cm<sup>3</sup>/h) multipliziert mit den Maschinenstundensätzen (Anlagenkosten von 500 T€ – 1,5 Mio€). Bevor keine signifikante Produktivitätssteigerung und somit Kostenreduktion eintritt, wird ein wirtschaftlicher Serieneinsatz in der Automobilindustrie nicht möglich sein.

Das Ziel des Projektes *ProKos* besteht darin die Produktivität des LBM-Prozesses signifikant zu steigern und damit die Wirtschaftlichkeit für den Automobilbau zu erhöhen. Hierbei werden drei technologische Ansätze adressiert, die bisher noch nicht zusammen detailliert untersucht wurden:

- Durch **höhere Schichtstärken** ( $> 90 \mu\text{m}$ ) soll die Aufschmelzrate deutlich erhöht und die Anzahl notwendiger Beschichtungsvorgänge reduziert werden. Bisherige Anwendungen anderer Branchen nutzen in der Regel 30 oder 60  $\mu\text{m}$  Schichtstärke um optimale Ergebnisse zu erzielen. Viele Anwendungen des Automobilbaus erfordern jedoch keine perfekten Oberflächen, sodass hier ein bisher ungenutzter Hebel zur Kostensenkung besteht.
- Durch **neue Laserstrahlprofile** soll die Energieeinbringung in den Laserstrahlschmelzprozess optimiert werden. Bisherige LBM-Anlagen nutzen sogenannte Gaußprofile, die in der Laserstrahlmitte eine sehr hohe und im Randbereich geringe Intensität besitzen. Somit kommt es bei höheren Leistungen in der Mitte des Strahls zu ungewünschten Verdampfungseffekten, die eine Limitierung der Produktivität bedeuten. Mit neuen, homogeneren Strahlprofilen, z. B. sogenannten Top-Hat-Laserstrahlprofile soll eine erhöhte Leistungseinbringung ermöglicht werden.
- Durch **anforderungsgerechte Bauteilqualitäten** soll die Aufbaurrate optimiert werden. Bisher wurden LBM-Prozesse auf Bauteildichten von etwa 99,9 % optimiert, um maximale Bauteileigenschaften zu erzielen. Diese hohen Bauteildichten führen zu einer reduzierten Produktivität und sind im Automobilbau nicht immer erforderlich. Im Projekt sollen High-Speed-Belichtungsparameter für Bauteildichten im Bereich von 95-97 % entwickelt werden und nachgewiesen werden, dass sich auch daraus anforderungsgerechte Bauteileigenschaften bei gesteigerter Wirtschaftlichkeit ergeben.

Im Forschungsvorhaben sollen die Potentiale aller drei Entwicklungsansätze in Kombination erforscht werden, um somit das größtmögliche Kosteneinsparpotential zu ermitteln. Anhand von Proben und Bauteildemonstratoren sollen abschließend sowohl die resultierenden Bauteileigenschaften als auch die sich ergebenden Produktivitätspotentiale nachgewiesen werden.

## 2. Inhalt und Projektablauf

Das Projekt ProKos wird in einem Zeitraum vom 01.06.2020 – 31.12.2021 bearbeitet. Die wesentlichen Projekthinhalte sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese werden in die Forschungsschwerpunkte Prozessparameterentwicklung und Kostenberechnung gegliedert. Innerhalb der einzelnen Forschungsschwerpunkte sollen folgende Teilziele erreicht werden:

- (1) Forschungsschwerpunkt Prozessparameterentwicklung:
  - Erhöhung der Schichtstärke
  - Prozessentwicklung für eine ringförmige Laserintensitätsverteilung
  - Ermittlung der minimal zulässigen Bauteildichte

- Ermittlung der statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften von standardisierten Proben
- Aufbau der Demonstratoren mit Referenz- und Speedparameter

(2) Forschungsschwerpunkt Kostenberechnung:

- Ermittlung der realen Fertigungsdauer, Personalkosten, Maschinenkosten und Materialkosten
- Simulation industrieller Szenarien und Kosten der Serienfertigung



Lösungsansätze

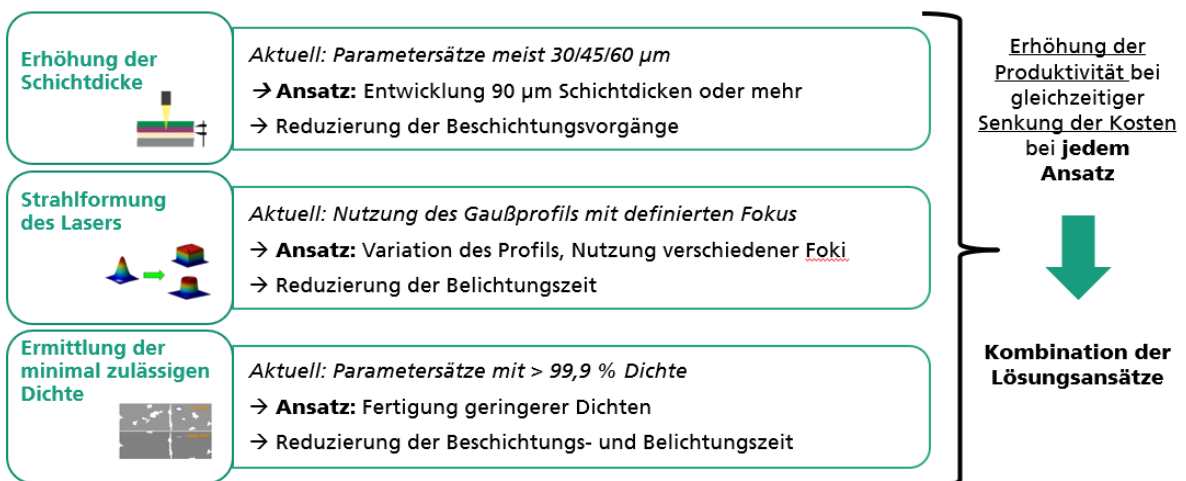


Abbildung 1: Zusammenfassung der Projektinhalte und drei Lösungsansätze für die Steigerung der Prozessproduktivität

Die aufgeführten Forschungsschwerpunkte und angestrebten Ziele werden im Rahmen des Projektes in fünf entsprechenden Arbeitspaketen bearbeitet, diese lauten:

- 1) Bauteilauswahl und Anforderungsdefinition

- 2) Kostenaufnahme der Bauteile
- 3) Entwicklung von Lösungsansätzen zur Kostenreduktion
- 4) Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften
- 5) Ermittlung des Einsparpotentials und Zusammenfassung der Projektergebnisse

Die Ausführung und die Ergebnisse der genannten Arbeitspakete werden im Rahmen dieses Berichtes vorgestellt. Die Ausarbeitung des Projekts erfolgt durch das Fraunhofer IAPT, unter Absprache mit insgesamt 11 namhaften Partnern aus der Automobilindustrie:

- Volkswagen AG
- Daimler AG
- BMW AG
- Benteler International AG
- Ford-Werke GmbH
- Kirchhoff Automotive GmbH
- Porsche AG
- Magna AG
- ZF Friedrichshafen AG
- EDAG Engineering GmbH
- MAN Truck & Bus SE

### 3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

#### 3.1. Arbeitspaket 1: Bauteilauswahl und Anforderungsdefinition

##### 3.1.1. Auswahl des Demonstratorbauteils für das Projekt

Das erste Arbeitspaket des ProKos-Projektes beschäftigt sich mit der Definition des geeigneten Demonstratorbauteils und legt somit die Grundlagen für ein industrielles Szenario im gesamten Projekt. Es wurde mit den Partnern des Betreuerkreises ein Demonstratorbauteil ausgewählt, welches in Abbildung 2 dargestellt ist. Zusätzlich wurde der Stahlwerkstoff HC380LA (1.0550) als Material festgelegt.



Abbildung 2: Motorkipphebel von MAN Truck & Bus SE als Demonstrator des Projektes

##### 3.1.2. Anforderungsliste für die Demonstratorbauteile

Für die auszuwählende Legierung gilt, dass diese im Gegensatz zu den auf den Markt erhältlichen Stahllegierungen für die additive Fertigung keine außergewöhnlichen Eigenschaften aufweisen muss, sondern möglichst kostengünstig sein soll. Der Werkstoff soll eine stabile Prozessierbarkeit besitzen und neben dem Demonstratorbauteil für andere Bauteile in der Automobilindustrie geeignet sein. Die spezifischen mechanischen Anforderungen ergeben sich auf Basis des gewählten Demonstratorbauteils zu:

- Zugfestigkeit: min. 600 MPa
- Bruchdehnung: min. 8%

Beim HC380LA (1.0550) handelt es sich um eine typischerweise in der Automobilindustrie verwendete Legierung für Blechkonstruktionen. Die mechanischen Eigenschaften werden hier größtenteils über einen Walzprozess eingestellt. Im Rahmen der Untersuchungen galt es zu untersuchen, ob durch den laseradditiven Prozess ähnliche Eigenschaften erzielt werden können. Die chemische Zusammensetzung sowie die mechanischen Kennwerte der Legierung nach DIN EN 10268 sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt.



Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von HC380LA (1.0550) nach DIN EN 10268

Massenanteil	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb
min. %	-	-	-	-	-	-	-	-
max. %	0,12	1,6	0,5	0,03	0,025	0,015	0,15	0,09

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften von HC380LA (1.0550) nach DIN EN 10268

Eigenschaft	Formelzeichen	Einheit	Kennwert
Streckgrenze	$R_{p0,2}$	MPa	380 – 480
Zugfestigkeit	$R_M$	MPa	440 – 580
Bruchdehnung	$A_{80}$	%	19

### 3.2. Arbeitspaket 2: Kostenaufnahme der Bauteile

#### 3.2.1. Fertigung des Demonstrators mit Standardparametern

Das in Arbeitspaket 1 definierte Referenzbauteil wurde aus dem festgelegten Material mittels Standardparametern auf der AconityLAB gefertigt. Die Standardparameter wurde im Vorprojekt BioLAS entwickelt, die im Rahmen dieses Projekts für die Forschungsanlage AconityLAB modifiziert wurden.

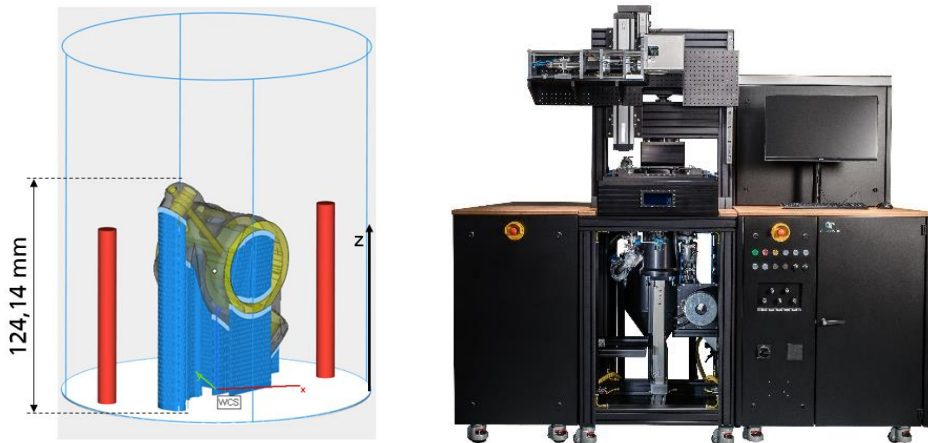


Abbildung 3: links: Bauteilplatzierung und -orientierung im Bauraum (z = Aufbauhöhe); rechts: AconityLAB

Die Geometriedaten des Demonstrators und die aufgezeichnete Fertigungsdauer sind in Tabelle 3 dargestellt. Mit einer Schichtstärke von 60  $\mu\text{m}$  ergibt sich die Schichtanzahl 2.069 für die in Abbildung 3 gewählte Orientierung zu einer finalen Bauhöhe von 124 mm.

Tabelle 3: Geometrie- und Fertigungsdaten des Demonstrators

<b>Geometriedaten</b>	
Gesamtvolumen	122.640 mm <sup>3</sup>
Supports	29.815 mm <sup>3</sup>
Bauteil	92.825 mm <sup>3</sup>
Bauhöhe	124 mm
Dichte	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Gewicht	963 g
Schichtanzahl	2.069
Durchschnittliche Dauer pro Schicht	30,68 s
Beschichtungsdauer pro Schicht	17,6 s
Fertigungsdauer	17 h 38 mins

In Tabelle 4 sind die Standardparameter für die Generierung des Demonstrators aufgelistet:

Tabelle 4: Prozessparameter für die Fertigung des Demonstrators

<b>Prozessparameter</b>	
Laserleistung $P_L$	250 W
Scangeschwindigkeit $v_s$	1.000 mm/s
Spurabstand $h_s$	0,09 mm
Schichtdicke $d_s$	0,06 mm
Fokusedurchmesser $d_f$	0,1 mm
Energiedichte $E_v = P_L / (v_s * d_s * h_s)$	46 J/mm <sup>3</sup>
theoretische Aufbaurrate $v_s * d_s * h_s$	5,4 mm <sup>3</sup> /s
	19,44 cm <sup>3</sup> /h

Im LBM-Prozess stellt die theoretische Aufbaurrate  $V_{th}$  eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Produktivität dar. Die theoretische Aufbaurrate  $V_{th}$  gibt eine Abschätzung des während der Belichtung aufgeschmolzenen Volumens pro Zeit an. Dabei setzt sie sich aus der Scangeschwindigkeit  $v$ , dem Spurabstand  $h$  sowie der Schichtdicke  $d$  zusammen und beträgt für den Referenzbaujob 5,4 mm<sup>3</sup>/s bzw. 19,44 cm<sup>3</sup>/h. Diese Berechnung basiert ausschließlich auf der Grundlage der verwendeten Prozessparameters und betrachtet einen idealen LBM-Prozess, in dem keine Unterbrechungen des Aufschmelzvorgangs erzeugt werden. Aus diesem Grund ist diese Kenngröße unabhängig von der gewählten LBM-Anlage, der Belichtungsvektorenlänge und Belichtungsreihenfolge. Da das Ziel des Projektes die Steigerung der Prozessproduktivität ist, welche durch eine optimierte Prozessführung erzielt werden soll, kann die theoretische Aufbaurrate als Vergleichsgröße herangezogen werden. Die reale Fertigungsdauer hängt jedoch zusätzlich von den Hardwareeinstellungen der jeweiligen

LBM-Systeme ab, wie zum Beispiel der Laser- und Scanner-Delays oder aber der benötigten Belichtungszeiten. Diese wurden im Rahmen des Projektes experimentell ermittelt und in den Ableitungen der industriellen Szenarien berücksichtigt.

### 3.2.2. Ermittlung der Herstellkosten

Die resultierenden Herstellkosten des Bauteils setzen sich aus Materialkosten und Fertigungskosten zusammen, wobei für die Fertigungskosten die gesamte Prozesskette berücksichtigt wird, d.h. inklusive aller vor- und nachgelagerten Prozesse.

Der formgebende Belichtungsprozess des Demonstrators wurde automatisch aufgezeichnet und die Fertigungsdauer wurde aus dem Fertigungsprotokoll ermittelt. Anschließend wurden die resultierenden Herstellkosten  $C_{\text{Herstellung}}$  berechnet. Dabei setzen sich die Fertigungskosten  $C_{\text{Fertigung}}$  zusammen aus Maschinenkosten und Personalkosten, wie es in Abbildung 4 dargestellt wird:



**Berechnung der Herstellkosten**

$$C_{\text{Herstellung}} = C_{\text{Material}} + C_{\text{Fertigung}}$$
$$C_{\text{Fertigung}} = t_{\text{Fertigung}} * c_{\text{Maschine}} + t_{\text{Personal}} * c_{\text{Personal}}$$

*mit der Fertigungsdauer  $t_{\text{Fertigung}}$ , dem Maschinenstundensatz  $c_{\text{Maschine}}$ , der Dauer des Personaleinsatzes  $t_{\text{Personal}}$  und dem Personalstundensatz  $c_{\text{Personal}}$*

Abbildung 4: Berechnung der Herstellkosten

Die berechneten Herstellkosten für ein Demonstratorbauteil auf der Versuchsanlage AconityLAB zur Erfassung der Referenzkosten sind in Abbildung 5 ausführlich aufgeschlüsselt:

Annahmen	
Anschaffungskosten	400.000 €
Abschreibungsdauer	5 a
Auslastung	5.000 h/a
Personal	48.707 €/a

Anlagenkosten	
Abschreibung	80.000 €/a      16,00 €/h
Wartung	3.000 €/a        0,60 €/h
Stromkosten	2.592 €/a        0,52 €/h
Miete	4.500 €/a        0,90 €/h

Stundensätze & Fertigungsdauer	
Maschinenstundensatz	18,02 €/h
Personalstundensatz	27,02 €/h
Fertigungsdauer	17,63 h

Bauteilnachbehandlung		
Datenvorbereitung	30 min	13,51 €
Maschinenvorbereitung	150 min	67,55 €
Auspacken	60 min	27,02 €
Wärmebehandlung	360 min	15,00 €
Drahterodieren	60 min	21,11 €
Supportentfernung	50 min	22,52 €
Sandstrahlen	6 min	2,70 €
		169,42 €

Bauteilkosten	
Materialkosten (51 €/kg)	49,10 €
Fertigungskosten	380,79 €
Vor- und Nachbereitungskosten	169,42 €
	599,31 €

Abbildung 5: Aufschlüsselung der ermittelten Fertigungskosten für das Demonstratorbauteil auf der Versuchsanlage AconityLAB zur Bestimmung der Referenzkosten

Die Fertigungsdauer  $t_{\text{Fertigung}}$  wurde aus dem Fertigungsprotokoll der Versuchsanlage AconityLAB entnommen. Der Maschinenstundensatz  $c_{\text{Maschine}}$  setzt sich zusammen aus **der Abschreibung** bei einer Abschreibungsdauer von fünf Jahre, **der Wartung**, **der Stromkosten** und **der Miete** bei einer angenommenen Auslastung von 5.000 Stunden pro Jahr (60 %) zusammen. Der Personalstundensatz  $c_{\text{Personal}}$  orientiert sich an den Personalkosten eines Industrietechnikers. Die Dauer des Personaleinsatzes  $t_{\text{Personal}}$  pro Baujob wurde für Vor- und Nachbereitungsaufgaben der gesamten Prozesskette erfasst, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Datenvorbereitung: 30 Minuten
- Maschinenvorbereitung: 150 Minuten
- Auspacken: 60 Minuten
- Wärmebehandlung: 360 Minuten
- Drahterodieren: 60 Minuten
- Supportentfernung: 50 Minuten
- Oberflächenbehandlung (Sandstrahlen): 6 Minuten

### Fertigungszeit Demonstrator AconityLAB

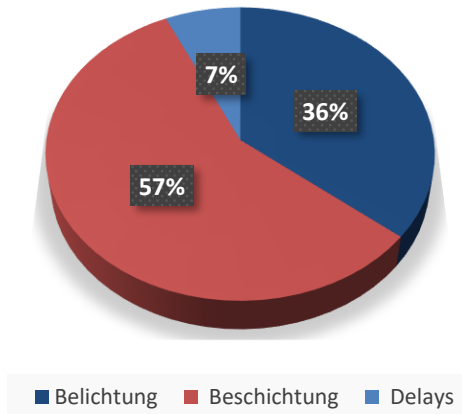


Abbildung 6: Analyse der Fertigungszeit auf AconityLAB

Eine nähere Analyse der Fertigungszeit zeigt, dass die Beschichtungszeit einen Anteil von 57 % der gesamten Fertigungszeit aufweist. Dieser Anteil lässt sich durch die Erhöhung der Schichtstärke, somit die Reduzierung der Schichtanzahl, linear reduzieren. Die Belichtungszeit wird durch die Erhöhung von Spurbstand und Belichtungsgeschwindigkeit reduziert. Die Verzögerungszeit (Delays) ist eine Konstante des Scanners, und wird im Rahmen dieses Projektes nicht optimiert.

### 3.3. Arbeitspaket 3: Entwicklung von Lösungsansätzen zur Kostenreduktion

#### 3.3.1. Ermittlung der minimal zulässigen Dichte

##### 3.3.1.1. Generierung von Probenkörpern mit Zieldichte von 95 % - 99 %

Häufig wird bei der Evaluierung von Prozessparametern für verschiedene Materialien und Legierungen eine Zieldichte von  $> 99,9\%$  angestrebt. Da die Aufbaurrate und Dichte oft gegenläufige Zielgrößen sind, bedingen hohe Zielwerte bei der Dichte jedoch auch langsamere Druckprozesse, die letztlich zu deutlich höheren Bauteilkosten führen. Diese hohen Ansprüche an die Dichte resultieren aus der Annahme, dass ein dichteres Bauteil auch immer die besseren mechanisch-technologischen Eigenschaften aufweist.

Voruntersuchungen am Fraunhofer IAPT zeigen hingegen, dass Prüfkörper aus Aluminiumlegierungen mit einer Dichte von etwa  $97\%$  vergleichbare mechanische Kennwerte im statischen Zugversuch liefern, wie Prüfkörper mit einer Dichte von etwa  $99\%$ .

Weiterführende Untersuchungen an Stahllegierungen verdeutlichen, dass die Prozessgeschwindigkeit mit Bauteilen von  $> 99,5\%$  Dichte um  $160\%$  gegenüber Prozessparametern mit einer resultierenden Dichte von  $> 99,9\%$  gesteigert werden kann (vgl. Abbildung 7).

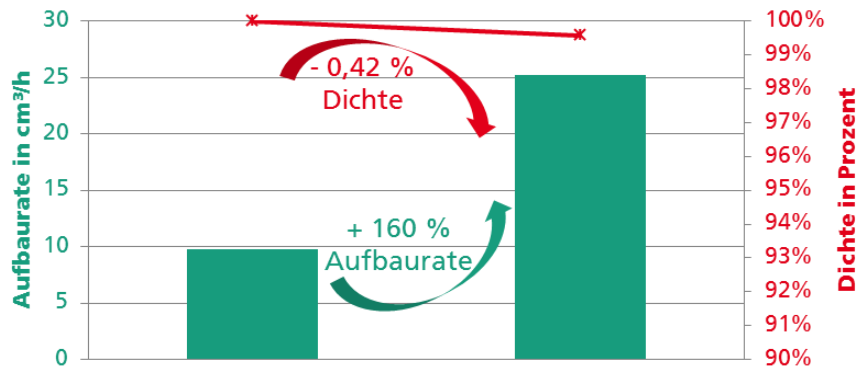


Abbildung 7: Exemplarischer Vergleich der Aufbaurichtung in Abhängigkeit von der resultierenden Bauteildichte einer Stahllegierung in einer Voruntersuchung am Fraunhofer IAPT

Sollte dennoch erforderlich sein, Bauteile mit einer Dichte von  $> 99,9\%$  herzustellen, um beispielsweise gute Ergebnisse hinsichtlich Dauerfestigkeit zu erzielen, lassen sich diese zunächst durch einen schnelleren und kostengünstigeren LBM-Prozess fertigen und anschließend durch heißisostatisches Pressen (engl.: Hot Isostatic Pressing; HIP) auf nahezu  $100\%$  Dichte einstellen. Je nach Material und Fallbeispiel bringt dieser zusätzliche Schritt zwar weitere Kosten in den Herstellungsprozess mit ein, diese sind jedoch häufig kleiner als die im LBM-Prozess bereits eingesparten Kosten, sodass letztlich auch diese Prozesskette kostengünstiger sein kann.

Um die Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und der relativen Dichte des Bauteils zu ermitteln, wurden zunächst Dichtewürfel in den ersten Experimenten generiert. Diese Würfel sind je  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  groß. Eine umgekehrte stumpfe Pyramide verbindet die untere Würfelfläche mit der Substratplatte, sodass die Würfel manuell von der Platte getrennt werden können. Die rote gestrichelte Linie stellt schematisch die Trennlinie dar, bei der die Würfel aufgetrennt werden. Die parallel zur Aufbaurichtung stehenden Querschnittsflächen werden mittels Lichtmikroskopie bei einer Vergrößerung von  $50\times$  analysiert und die relative Porosität respektive Dichte ermittelt. In Abbildung 8 ist das CAD-Modell des Würfels dargestellt.

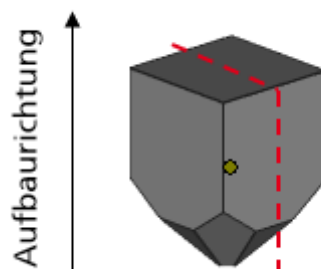


Abbildung 8: Darstellung eines Probenkörpers zur Ermittlung der Prozessparameter mit Zieldichte.

Der gesamte Versuchsraum ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Laserleistung betrug  $250 - 550 \text{ W}$  in  $50 \text{ W}$  Schritten. Für die Scangeschwindigkeit wurde eine Spanne von  $500 - 2300 \text{ mm/s}$  in  $100$

mm/s Schritten ausgewählt. Die mittels Lichtmikroskopie ermittelten relativen Dichtewerte sind in Abbildung 9 eingetragen.

		Laserleistung in W						
		250	300	350	400	450	500	550
Scangeschwindigkeit in mm/s	2.300	78,00%			83,10%	85,72%	87,49%	88,39%
	2.200				82,12%	88,24%	87,38%	89,50%
	2.100				83,30%	89,60%	87,76%	90,31%
	2.000				87,62%	88,49%	88,97%	89,16%
	1.900				86,87%	87,27%	90,46%	88,34%
	1.800				89,02%	86,49%	91,95%	89,44%
	1.700				89,20%	89,09%	93,83%	92,86%
	1.600				88,46%	92,32%	92,01%	96,06%
	1.500				91,20%	94,81%	91,21%	96,13%
	1.400				92,72%			97,99%
	1.300				94,25%			98,81%
	1.200				95,09%			98,86%
	1.100				95,25%			99,57%
	1.000				97,43%			99,95%
	900	98,25%	98,25%	99,00%	98,82%			
	800	97,41%	99,46%	99,53%	99,53%			
	700	99,38%	99,11%	99,52%	99,38%			
	600	99,43%	99,79%	99,90%	99,61%			
	500	99,46%	99,59%	99,85%	99,74%			99,99%
	400							
300								
200								
100								
0								

Abbildung 9: Versuchsraum zur Ermittlung der Prozessparameter und die daraus resultierende relative Dichte; rot markierten relativen Dichte sind für weiteres Vorgehen im Projekt ausgewählt.

In Tabelle 5 sind die ausgewählten Parameterkombinationen aufgelistet, mit diesen in anschließenden Experimenten Flachzugproben nach DIN EN ISO 6892-1 generiert.

Tabelle 5: ausgewählte Parameterkombinationen

Probe	$P_L$ in W	$v_s$ in mm	$h_s$ in mm	$d_s$ in mm	$E_V$ in J/mm <sup>3</sup>
1	550	1.000	0,09	0,06	102
2	400	1.200	0,09	0,06	62
3	400	1.300	0,09	0,06	57
4	550	1.400	0,09	0,06	73
5	550	1.500	0,09	0,06	68

Die Geometrie der Flachzugprobe ist in Abbildung 10 dargestellt.

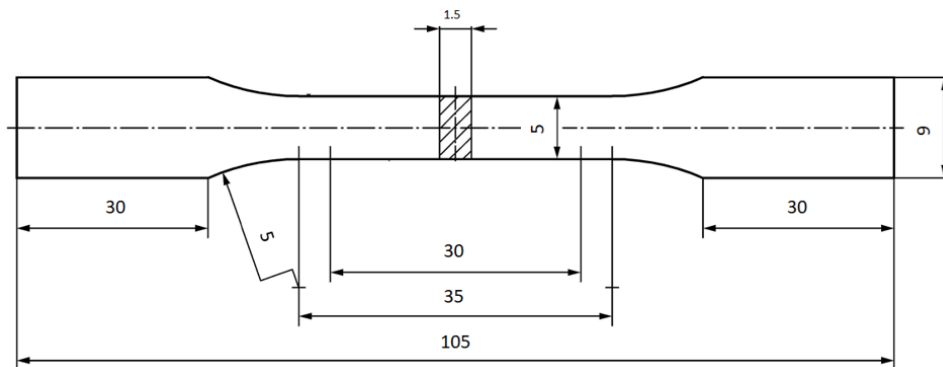


Abbildung 10: Technische Zeichnung der Flachzugprobengeometrie gemäß DIN EN ISO 6892-1

### 3.3.1.2. Ermittlung der minimal zulässigen Bauteildichte

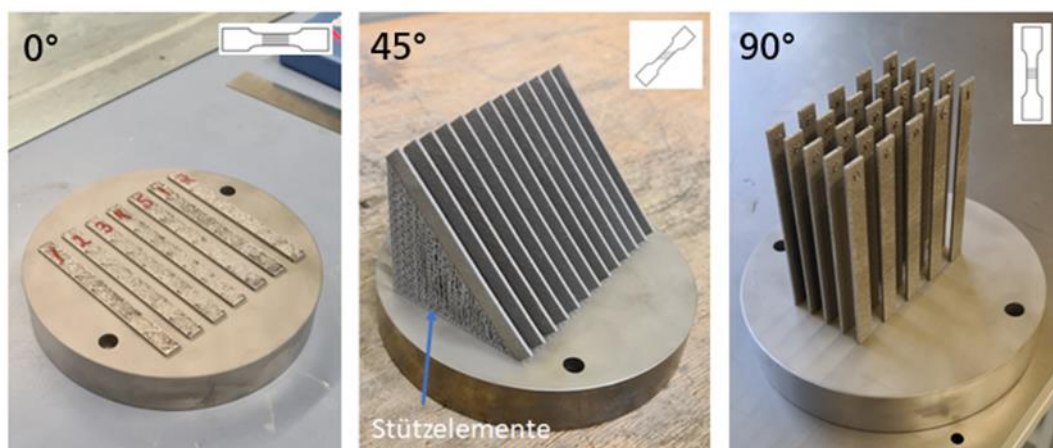


Abbildung 11: Flachzugprobenrohlinge in drei unterschiedlichen Orientierungen generiert

Um die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der relativen Bauteildichte zu untersuchen, wurden mit den fünf ausgewählten Prozessparametern jeweils fünf Flachzugproben nach DIN EN ISO 6892-1 mit einer Anfangslänge von 30 mm (A30-Proben) in Form von Quadern 105 mm x 9 mm x 1,5 mm additiv gefertigt und anschließend eine Wärmebehandlung unterzogen. Schließlich wurden sie auf die in Abbildung 10 dargestellte Geometrie gefräst. Die Wärmebehandlungen wurden innerhalb eines Nabertherm N41/H-Ofens im Begasungskasten durchgeführt. Um Verzunderungen zu vermeiden werden die Proben unter Argon in Stahlfolie eingewickelt behandelt. Für die Wärmebehandlung wurde ein Anlassprozess gewählt, wobei die Proben über eine Dauer von einer Stunde bei 600 °C, unterhalb der AC1-Temperatur, im Ofen gehalten wurden. Anschließend wurden sie an Luft abgekühlt. Es wurde ein feinkörniges Gefüge aus Ferrit und Perlit mit stark erhöhter Bruchdehnung gegenüber den as-built-Proben erwartet.



Drei Orientierungen – 0°, 45° und 90° gegenüber der Substratplatte – wurden ausgewählt; sie sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Aufbaurichtung der Proben war senkrecht zur Substratplatte. In Abbildung 12 sind 23 Ergebnisse der Zugprüfung der 0°-Proben dargestellt.

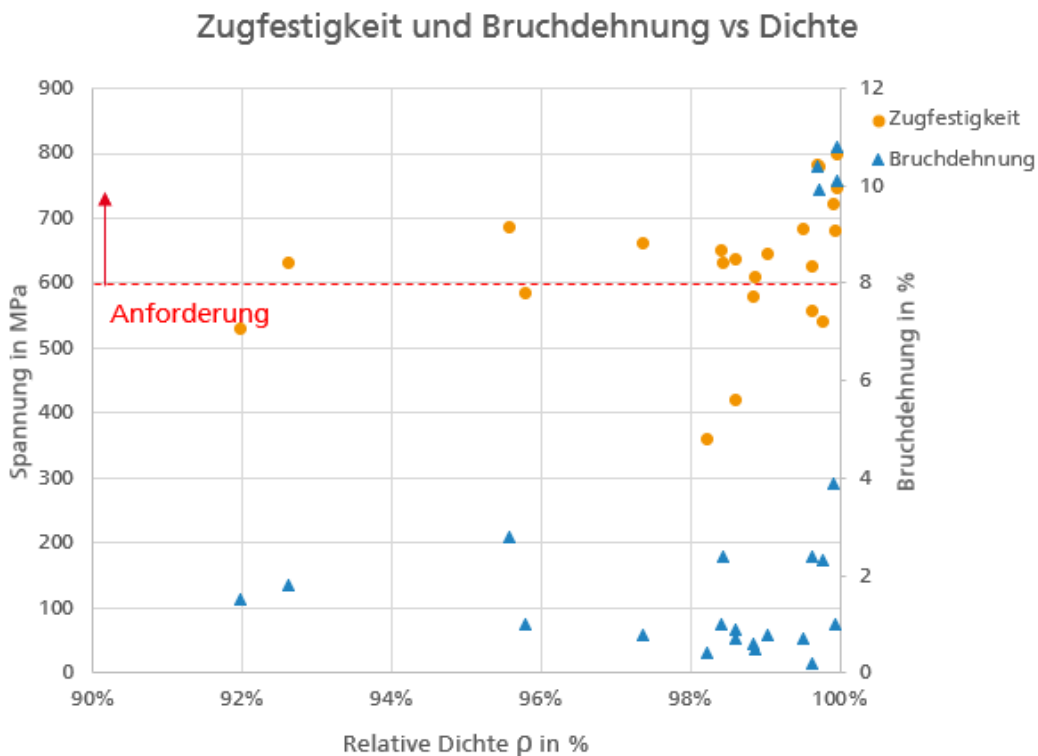


Abbildung 12: Zugfestigkeit und Bruchdehnung der 0°-Proben

Die linke y-Achse stellt die Spannung in MPa dar, wobei die rechte y-Achse die Bruchdehnung in Prozentpunkten darstellt. Auf der x-Achse ist die relative Bauteildichte  $\rho$  in Prozent aufgetragen, die nach der Zugprüfung mittels Schliffbildern der Probenreste ermittelt wurden. Die statische Anforderung an die Zugfestigkeit beträgt 600 MPa und 8 % Bruchdehnung, wobei beides mit der roten gestrichelten Linie markiert ist. Die meisten Proben erfüllen die Anforderung der Zugfestigkeit von 600 MPa selbst bei einer Dichte von lediglich 92,6 %. Zu erkennen ist zudem, dass ab einer Bauteildichte von 98,4 % die Zugfestigkeit mit zunehmender Bauteildichte steigt. Bei der maximal erzielten relativen Dichte von 99,97 % ist eine Zugfestigkeit von 798 MPa erreicht worden

Betrachtet man die Bruchdehnung, konnte keine direkte Korrelation zwischen ihr und der relativen Bauteildichte erkannt werden. Die meisten Ergebnisse liegen weit unter der Anforderung von 8% und variieren zwischen 0,5 % und 3 %. Lediglich bei vier Proben, derer Dichte über 99,7 % betragen, konnten Bruchdehnungen zwischen 9,9 % und 10,8 % erzielt werden.

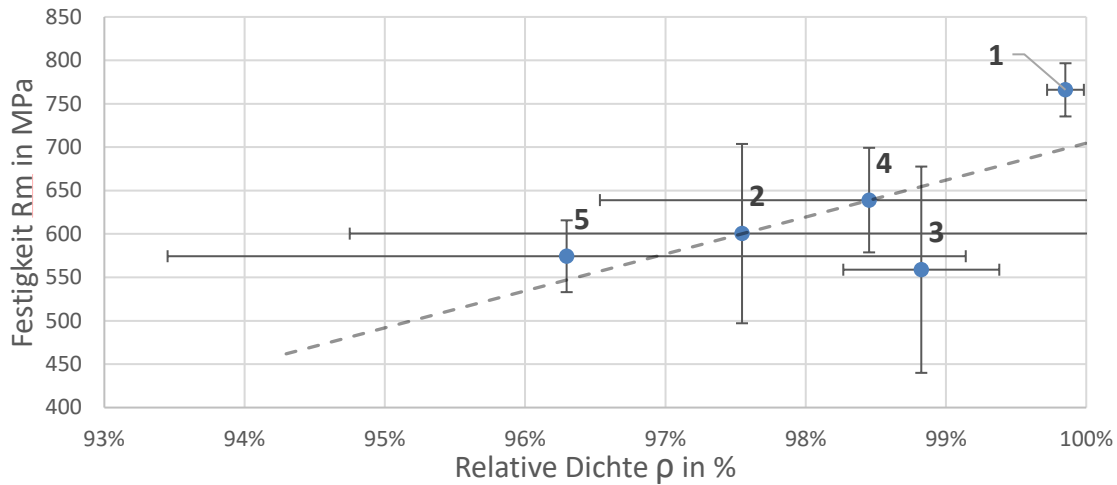


Abbildung 13: Durchschnittliche Zugfestigkeit und Bauteildichte der jeweiligen Parameterkombination bei 0° Proben

In Abbildung 13 sind die durchschnittlichen Zugfestigkeiten und Bauteildichten der jeweiligen Parameterkombination gemäß Tabelle 5 dargestellt. Es konnte keine starke Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauteildichte festgestellt werden. Zu erkennen ist jedoch, dass die Ergebnisse der Proben mit einer relativen Dichte kleiner als 99 % große Streuung sowohl hinsichtlich erzielbarer Bauteildichte als auch in der Zugfestigkeit aufweisen.

### Zugfestigkeit und Bruchdehnung vs Dichte 45°

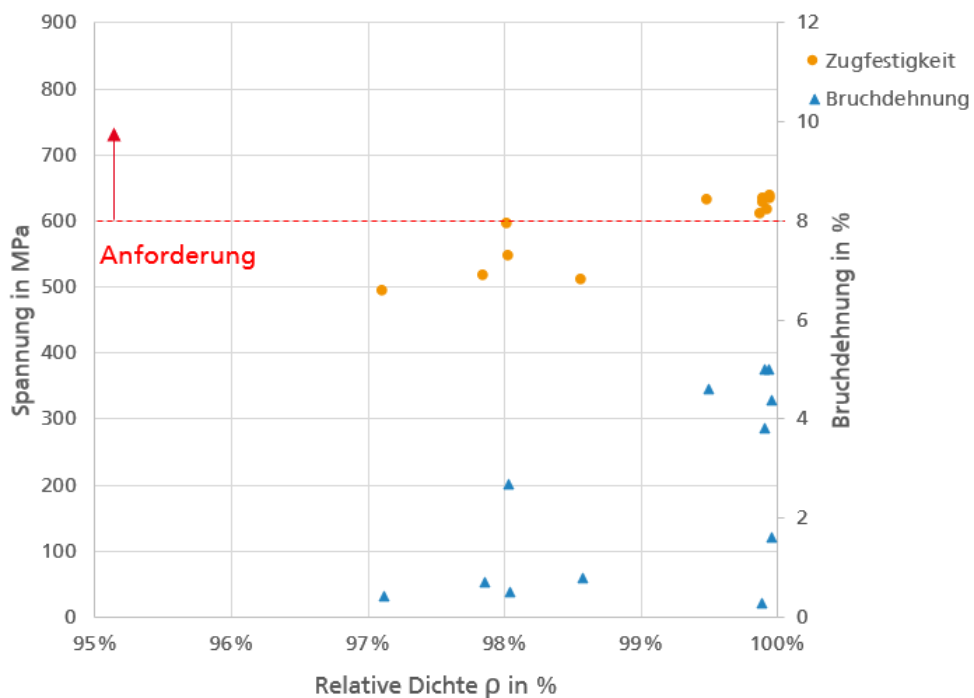


Abbildung 14: Zugfestigkeit und Bruchdehnung der 45°-Proben

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Zugprüfung der 45°-Proben dargestellt. Die Zugfestigkeiten bei vergleichbaren Bauteildichten zu den 0°-Proben sind um ungefähr 150 MPa niedriger. Proben mit einer relativen Dichte von über 99 % konnten die Anforderung erfüllen.

Die Bruchdehnungen bei Proben, die eine relative Dichte von über 99 % aufweisen, erreichen eine maximale Bruchdehnung von 5 %, wobei eine minimale Bruchdehnung von 0,3 % ermittelt wird. Abgesehen von lediglich zwei Proben, ist eine qualitative Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Bauteildichte zu erkennen. Jedoch konnte die Anforderung von 8 % nicht erfüllt werden.

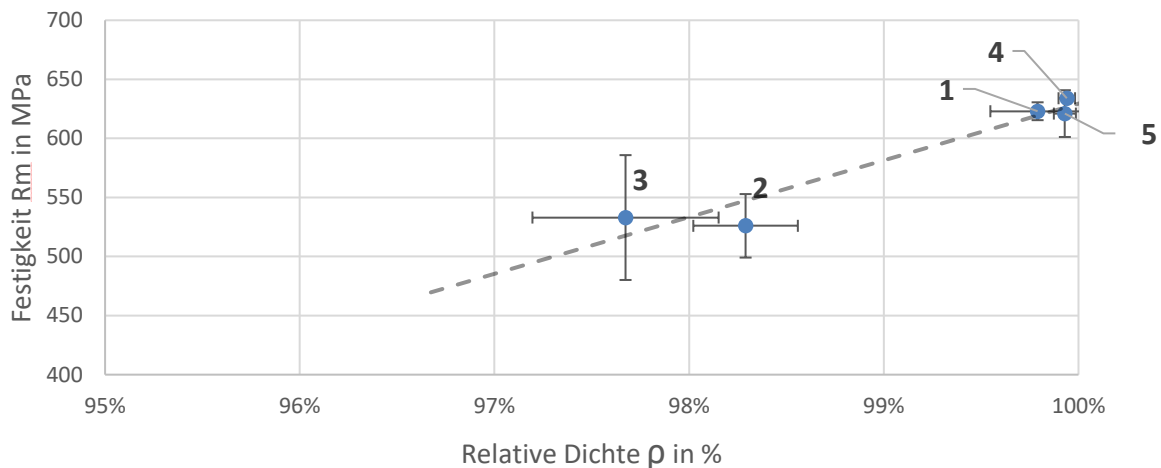


Abbildung 15: Durchschnittliche Zugfestigkeit und Bauteildichte der jeweiligen Parameterkombination bei 45° Proben

In Abbildung 15 sind die durchschnittlichen Zugfestigkeiten und Bauteildichten der jeweiligen Parameterkombination gemäß Tabelle 5 dargestellt. Die Längsachse der Proben bilden mit der Substratplatte einen Winkel von 45°. Eine qualitative Tendenz der Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauteildichte konnte festgestellt werden, da mit zunehmender Dichte die Zugfestigkeit zunimmt. Es ist anzumerken, dass die Proben mit einer relativen Dichte von über 99,5 % eine kleinere Streuung in der Zugfestigkeit aufweisen, als die Proben mit einer relativen Dichte von unter 98,5 %.

Zugfestigkeit und Bruchdehnung vs Dichte 90°

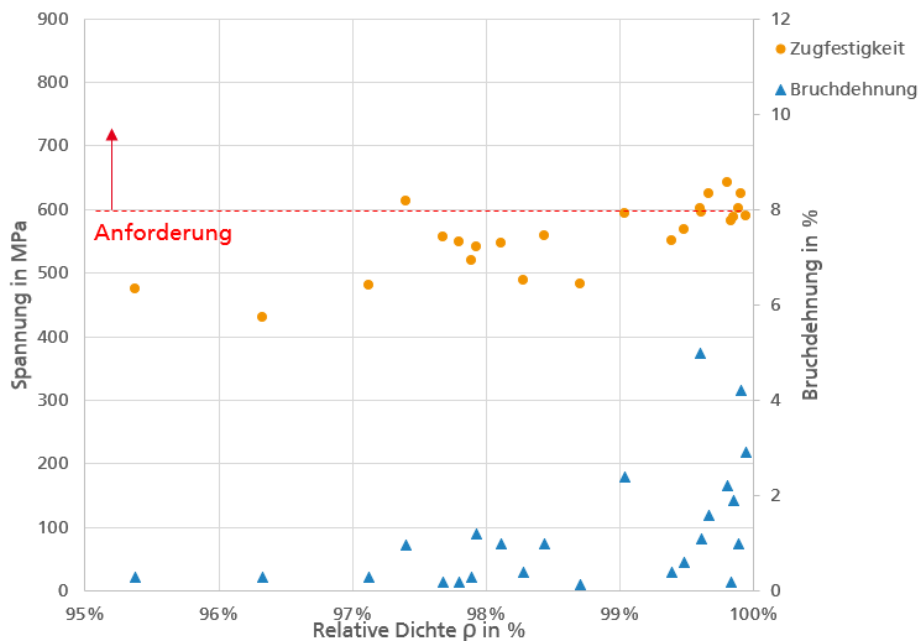


Abbildung 16: Zugfestigkeit und Bruchdehnung der 90°-Proben

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Zugprüfung der 90°-Proben dargestellt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Zugfestigkeit im Vergleich zu 0°-Proben um 150 MPa niedriger ist. Proben die eine relative Dichte von unter 99,6 % aufweisen, konnten die Anforderung der Zugfestigkeit von 600 MPa nicht erreichen. Bei der Bruchdehnung verhalten sich die 90°-Proben ähnlich wie die 45°-Proben: eine maximale Bruchdehnung von 5 % wird nicht überschritten.

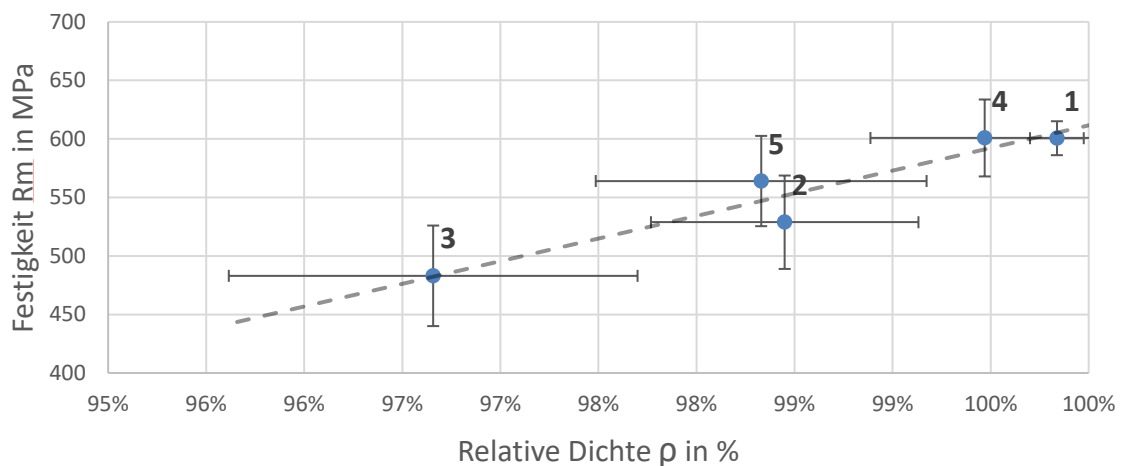


Abbildung 17: Durchschnittliche Zugfestigkeit und Bauteildichte der jeweiligen Parameterkombination

In Abbildung 17 sind die durchschnittliche Zugfestigkeit und Bauteildichte der jeweiligen Parameterkombination gemäß Tabelle 5 dargestellt. Eine qualitative Korrelation der Zugfestigkeit und der

Bauteildichte konnte festgestellt werden, da mit zunehmender Dichte die Zugfestigkeit zunimmt. Proben mit einer Dichte von über 99 % weisen eine kleinere Streuung in den Ergebnissen auf.

Der Grund für die oben beschriebenen Beobachtungen stimmt mit bisherigen Prozesserkennnissen aus Vorprojekten und den Literaturen weitestgehend überein: durch die Erhöhung der Belichtungs- geschwindigkeit und Laserleistung wird der Schmelzvorgang zunehmend instabil, was dazu führt, dass die Zieldichte teilweise nur mit großer Streuung der Ergebnisse erreicht wird. In Abbildung 18 sind die Parameterkombinationen mit den im Dichtewürfel-Experiment ermittelten relativen Dichten sowie die Ist-Dichte der Zugproben dargestellt. Bei hoher relativer Dichte ( $\rho > 99,7 \%$ ) sind die Prozesse mit einer Streuung von 0,1 % bis 0,2 % stabil. Außerhalb des üblichen Prozessfensters ( $\rho < 98 \%$ ) konnten keine direkte Steuerung der Zieldichte erreicht werden.

#	$P_L$ in W	$v_s$ in mm/s	$h_s$ in mm	$d_s$ in mm	$V_{th}$ in $cm^3/h$	0°- Probe	Zieldichte	Ist-Dichte	Standard- abweichung
1	550	1.000	0,09	0,06	19,44	1	99 %	99,85 %	0,1 %
2	400	1.200	0,09	0,06	23,33	2	95 %	97,55 %	2,8 %
3	400	1.300	0,09	0,06	25,27	3	94 %	98,82 %	0,6 %
4	550	1.400	0,09	0,06	27,22	4	98 %	98,45 %	1,9 %
5	550	1.500	0,09	0,06	29,16	5	96 %	96,30 %	2,8 %

90°- Probe	Zieldichte	Ist-Dichte	Standard- abweichung	45°- Probe	Zieldichte	Ist-Dichte	Standard- abweichung
1	99 %	99,84 %	0,1 %	1	99 %	99,79 %	0,2 %
2	95 %	98,45 %	0,7 %	2	95 %	98,29 %	0,3 %
3	94 %	96,66 %	1,0 %	3	94 %	97,67 %	0,5 %
4	98 %	99,47 %	0,6 %	4	98 %	99,94 %	0,0 %
5	96 %	98,33 %	0,8 %	5	96 %	99,93 %	0,1 %

Abbildung 18: Ausgewählte Prozessparameterkombination (links oben), Vergleich der erzielten Dichten und Zieldichten

Aufgrund der erreichbaren mechanischen Eigenschaften und der Reproduzierbarkeit wird für nachfolgenden Arbeitspaketen eine Bauteildichte von über 99,7 % angestrebt.

### 3.3.2. Entwicklung neuer Strahlprofile für den LBM-Prozess

In diesem Arbeitspaket wird das Potential eines alternativen Laserstrahlprofils zur Erhöhung der theoretischen Aufbaurates  $V_{th}$  untersucht. Als Energiequelle wird ein Singlemode Yb-Faserlaser von der Fa. Coherent mit einer Nennleistung von  $P = 1.000 \text{ W}$  und einer Wellenlänge von  $\lambda = 1.070 \text{ nm}$  verwendet. Das Laserstrahlprofil ist die Flächenverteilung der Laserintensität in der Fokusebene. Kommerzielle LBM-Anlagen verwenden üblicherweise eine gauß'sche Intensitätsverteilung, wie in Abbildung 19 dargestellt ist. Das Intensitätsmaximum im Fokussmittelpunkt nimmt in radial Richtung stark ab, was zu einer inhomogenen Wärmezufuhr in das Schmelzbad führt. Die Energieeinbringung ist daher durch das Intensitätsmaximum limitiert, um eine Verdampfung des Materials zu vermeiden. Eine Möglichkeit die maximale Laserleistung zu erhöhen ohne eine Verdampfung des Materials hervorzurufen, ist die Umgestaltung der Laserintensitätsverteilung.

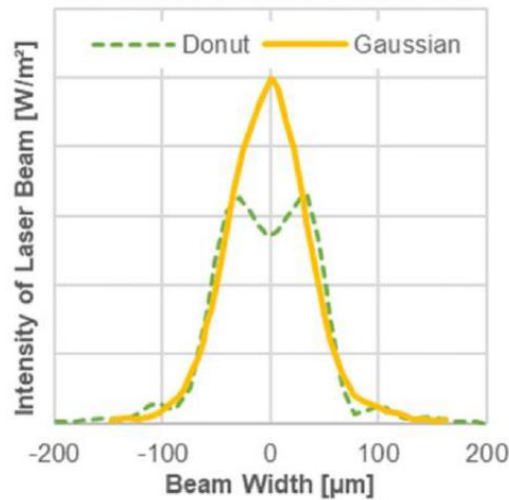


Abbildung 19: schematische Darstellung der Gauß- und Donut-Verteilung eines Laserstrahls [1]

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein lichtbeugendes Element in den Strahlengang integriert. Der Integrationsplan ist in Abbildung 20 schematisch dargestellt:

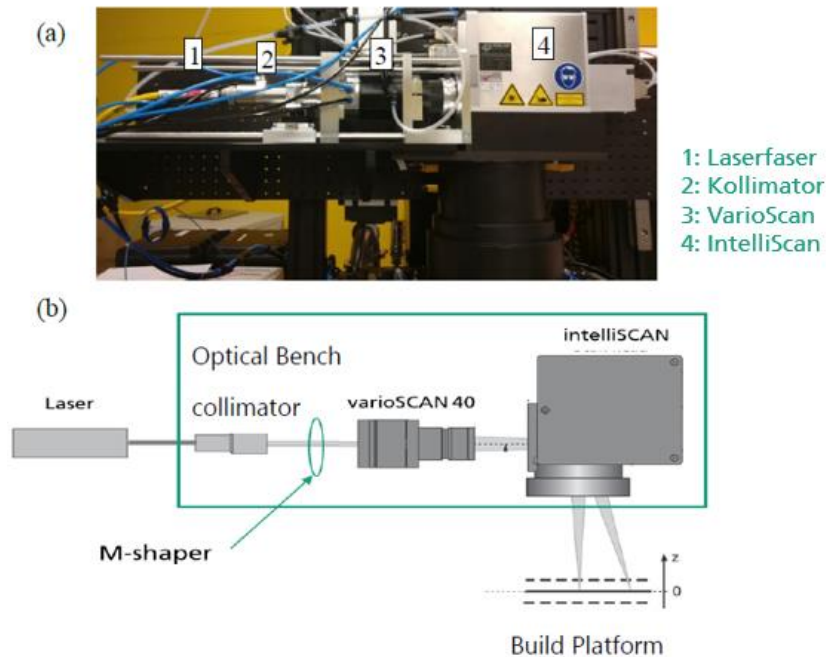


Abbildung 20: a) Versuchsaufbau zur Integration eines lichtbeugenden Elements zur Strahlformung. b). schematische Darstellung der Integration des Strahlformers

Dabei wird ein sogenannter „M-Shaper“ zwischen dem Kollimator und dem varioSCAN 40 installiert. Der M-Shaper besteht aus einem Strahl-Erweiterungsmodul und einem Spiegel, dessen Spiegelung den Eintrittsstrahl umwandelt. Das favorisierte ringförmige Strahlprofil (auch „Donut“ genannt) erstreckt sich in einem Bereich von 400 – 500  $\mu\text{m}$  und ist in Abbildung 21 schematisch dargestellt:

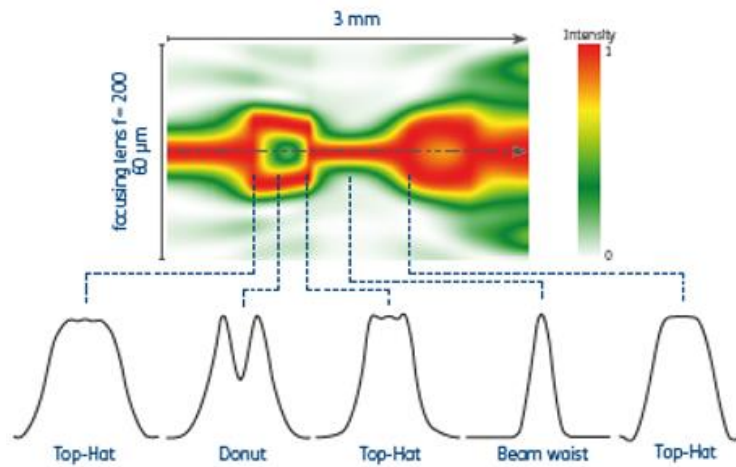


Abbildung 21: schematische Darstellung des Laserstrahls nach dem Austritt des Strahlformers

Zur Einstellung des Donut-Bereichs wird die optische Bank der AconityLAB in z-Richtung in 100  $\mu\text{m}$  Abständen bewegt, wobei nach jedem Schritt der Laser manuell auf ein Messgerät emittiert, um den Strahlquerschnitt aufzuzeichnen. Dieser Arbeitsschritt wird solange wiederholt bis die ringförmige Intensitätsverteilung ermittelt wird. Der Abstand zwischen der optischen Bank und der Arbeitsebene wird für nachfolgende Prozessentwicklungsschritte konstant gehalten. Abbildung 22 stellt die im Projekt verwendete Laserintensitätsverteilung mit einem Fokusbereich von 115  $\mu\text{m}$  dar:

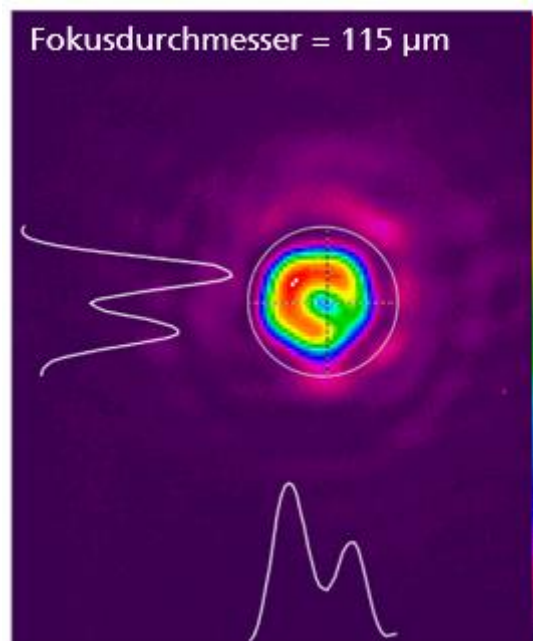


Abbildung 22: im Projekt gemessene Intensitätsverteilung, die bei allen Experimenten eingesetzt wird

### 3.3.3. Entwicklung der Prozessführung für ein ringförmiges Laserstrahlprofil und einer Schichtstärke von 120 $\mu\text{m}$

#### 3.3.3.1. Einzelspur-Experimente

In diesem Arbeitspaket werden Einzelspur-Experimente durchgeführt. Ziel dieser Versuche ist zu ermitteln, welche Korrelation zwischen den Prozessparametern und der resultierenden Schmelzbadbreite besteht. Außerdem wird die Kontinuität der Einzelspuren qualitativ bewertet. Hierzu wird einen Versuchsraum mit insgesamt 400 Laserleistungs- und Belichtungsgeschwindigkeits-Kombinationen erstellt. Eine exemplarische Auswahl der Einzelspuren ist in Abbildung 23 dargestellt.

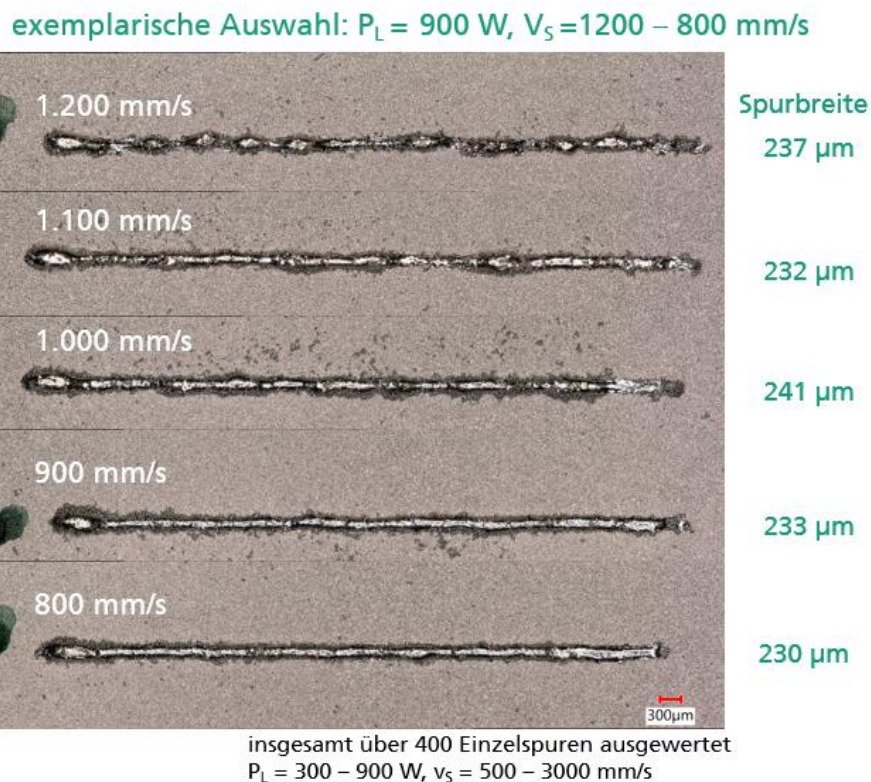


Abbildung 23: Mikroskopische Aufnahmen der Einzelspuren bei einer Laserleistung von  $P = 900 \text{ W}$  und  $v = 800 - 1200 \text{ mm/s}$

Während bei einer Laserleistung von 900 W und einer Scangeschwindigkeit von 800 mm/s eine kontinuierliche Schmelzspur generiert wird, wird bei der gleichen Laserleistung und einer Scangeschwindigkeit von 1.200 mm/s ein sogenannter Balling-Effekt festgestellt. Dieser wird hervorgerufen, wenn das Schmelzbad sich zu schnell abkühlt. Diese lokalen Verengungen in der Spur stellen im Bearbeitungsprozess potentielle Fehlerquellen dar und sollten deshalb möglichst vermieden werden. Für nachfolgende Prozessentwicklung wird deshalb die Kombination  $P_L = 900 \text{ W}$ ,  $v_s = 900 \text{ mm/s}$  und die dazugehörige Spurbreite von 233  $\mu\text{m}$  als Grundlage gewählt. Der Hatchabstand hängt maßgeblich von der resultierenden Spurbreite ab. Ein Erfahrungswert für die Überlappung zweier Scanvektoren beträgt etwa 70 % der Spurbreite, weshalb der Hatchabstand für die weiteren Experimente mittels Dichtewürfel zwischen 150  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  in 10  $\mu\text{m}$  Schritten variiert.



### 3.3.3.2. Dichtewürfel Experiment

In diesem Arbeitspaket werden Dichtewürfel generiert. Diese sind  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  groß und ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Einzelspurexperiment im vorherigen Arbeitspaket dient dazu, den Versuchsraum in diesem Arbeitspaket einzugrenzen. Basiert auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen, werden in diesem Arbeitspaket Dichtewürfel bei einer Schichtstärke von  $120 \mu\text{m}$  generiert. Die Fertigung erfolgt nach einem voll-faktoriellen Versuchsplan.

Tabelle 6: Voll-faktorieller Versuchsplan für die Dichtewürfel

Parameter	Einheit	Werte
Laserleistung $P_L$	W	950
Scangeschwindigkeit $v_s$	mm/s	1000 2000 2500
Hatchabstand $h_s$	mm	0,15 0,16 0,17 0,18 0,19 0,20

Die Proben werden in der Aufbaurichtung getrennt, warm eingebettet (Struers Cito-Press1, bei  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , 250 bar und 5,5 min) und geschliffen sowie poliert (Struers Tegramin 30). Eine anschließende mikroskopische Untersuchung gibt Aufschluss über die Dichte der Proben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt:

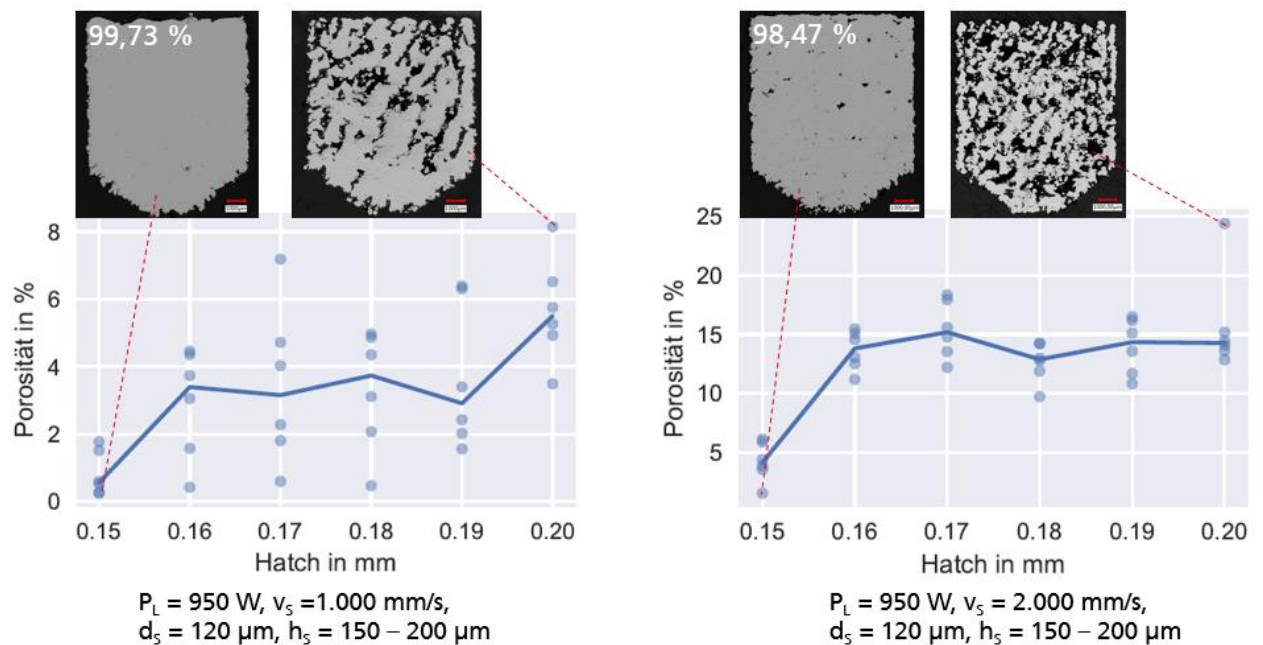


Abbildung 24: Ergebnisauszug der Dichteanalyse des beschriebenen Versuchsraums

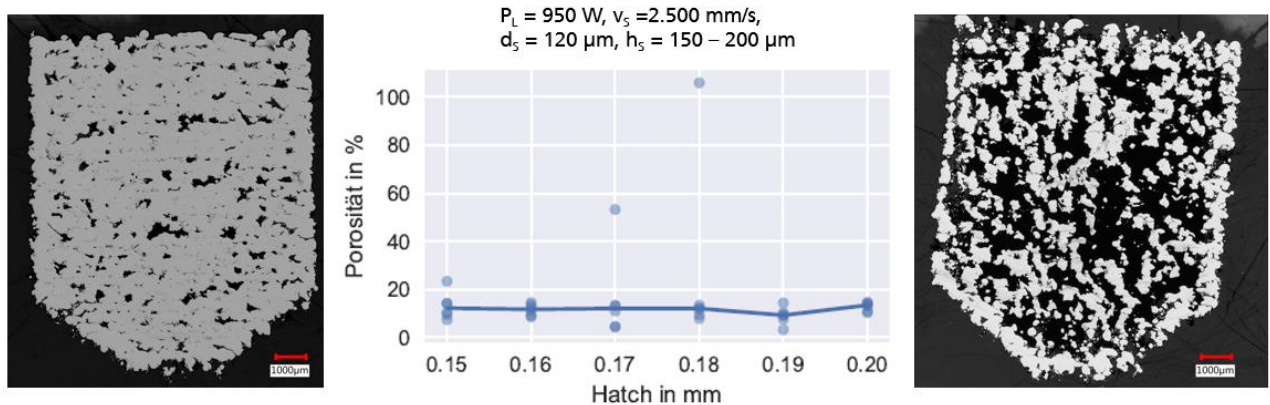


Abbildung 25: Dichteanalyse der Würfelquerschnitt. Links: Hatch-Abstand 0,15 mm. Rechts: Hatch-Abstand 0,20 mm.

Die höchste relative Dichte von 99,73 % konnte bei einer Laserleistung von  $P_L = 950 \text{ W}$ , einer Scangeschwindigkeit von  $v_s = 1.000 \text{ mm/s}$ , einem Hatch-Abstand von  $h_s = 0,15 \text{ mm}$  sowie einer Schichtstärke von  $d_s = 0,12 \text{ mm}$  erzielt werden. Daraus ergibt sich eine theoretische Aufbaurrate von  $v_{th} = 65 \text{ cm}^3/\text{h}$ .

Mit größeren Hatch-Abständen und Scangeschwindigkeit reduziert sich die relative Dichte. Der Grund dafür ist die damit einhergehende Reduzierung der Energie, die pro Volumeneinheit eingebracht wird. So reicht die Energie nicht mehr aus, um das Pulvermaterial vollständig aufzuschmelzen. Die sich ausbildenden Fehlstellen sind die sogenannte „lack of fusion“-Fehler, die üblicherweise eine irreguläre Form aufweisen.

### 3.3.3.3. Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften

Mit den aus dem AP 3.2 und 3.3 ermittelten Prozessparametern werden in diesem Arbeitspaket Flachzugproben gemäß DIN EN ISO 6892-1 mit einer Anfangslänge von 30 mm (A30-Proben) in Form von Quadern 105 mm x 9 mm x 1,5 mm additiv gefertigt und anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen. Schließlich werden sie auf die in Abbildung 10 dargestellte Geometrie gefräst. Die Wärmebehandlungen werden in einem Nabertherm N41/H-Ofen im Begasungskasten durchgeführt. Um Verzunderungen zu vermeiden werden die Proben unter Argon in Stahlfolie eingewickelt behandelt. Für die Wärmebehandlung wird ein Anlassprozess gewählt, wobei die Proben über eine Dauer von einer Stunde bei  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , unterhalb von AC1, im Ofen gehalten werden. Anschließend werden die Proben an Luft abgekühlt.

Die Probenrohlinge werden hochkant mit einem Winkel zur Substratplatte von  $0^\circ$  positioniert. Abbildung 26 verdeutlicht den Unterschied der Orientierung der Proben zwischen AP 2 und AP 3.

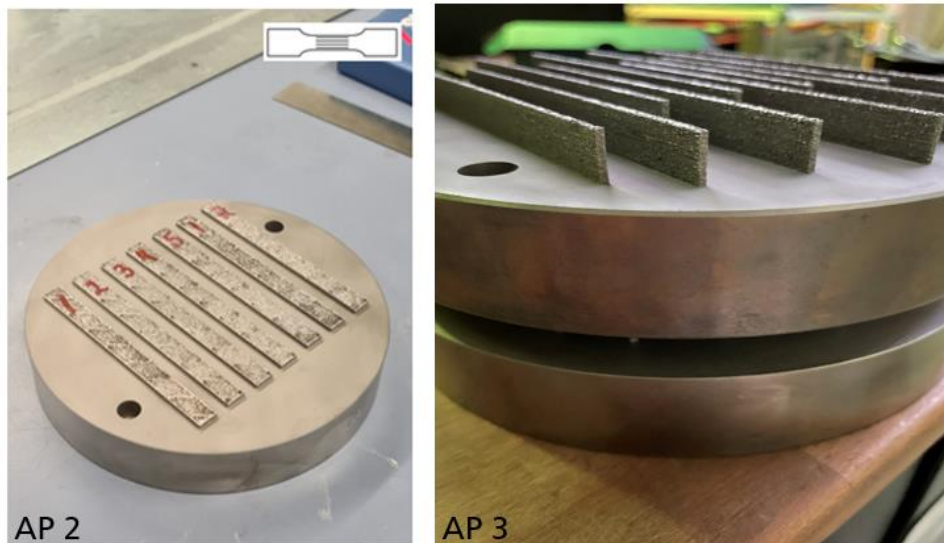


Abbildung 26: Orientierung der Flachzugproben im AP 2 (links) und im AP 3 (rechts)

Grund für die veränderte Orientierung ist die Reduzierung der aufzuschmelzenden Volume pro Schicht. Bereits im Dichtewürfelexperiment konnte festgestellt werden, dass durch den Energieeintrag mit einer Laserleistung von 950 W sehr große Mengen an Nebenprodukten entstehen. Der Abtransport dieser Nebenprodukte mittels Schutzgasströmung ist nicht ausreichend, sodass sich diese unterhalb sowie am Lasereintrittsglas selbst sammeln. Dieser Schmauch absorbiert die Laserenergie und wird teilweise sogar in das Lasereintrittsglas eingebrannt, wodurch Risse entstehen können. Um dies zu verhindern, wird die Orientierung der Proben verändert, damit sich das aufzuschmelzende Volumen pro Schicht reduziert.

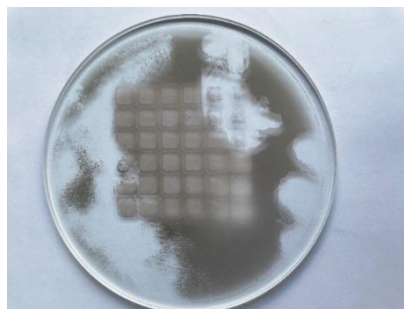


Abbildung 27: Schmauchanhaftungen und -einbrände am Lasereintrittsglas.

Insgesamt 40 Proben werden generiert, wovon je 20 im as-built- sandgestrahltem Zustand vorliegen. Sie werden anschließend auf die in Abbildung 10 dargestellte, finale Form gefräst und geprüft. Die resultierenden Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 28 dargestellt.

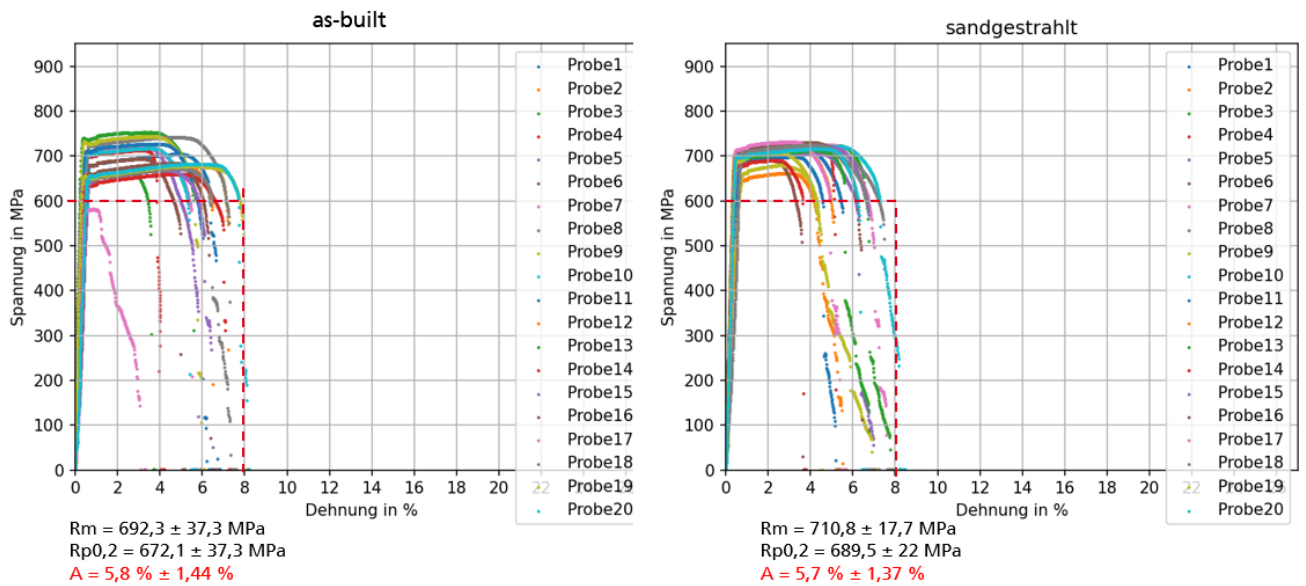


Abbildung 28: Ergebnisse der Zugprüfung der Proben, die mittels "speed" - Parameter aus AP3 gefertigt sind.

Alle Proben konnten die Anforderung an Zugfestigkeit von 600 MPa (rote gestrichelte Linie) erreichen. Die As-built-Proben erreichen eine Zugfestigkeit von 692 MPa und eine Streckgrenze von 672 MPa, bei einer Streuung von 37 MPa (5,4 % bei der Zugfestigkeit und 5,5 % bei der Streckgrenze). Die sandgestrahlten Proben erreichen eine Zugfestigkeit von 710 MPa (2,5 % Streuung) und eine Streckgrenze von 689 MPa (3,2 % Streuung).

Die Anforderung für die Bruchdehnung von 8 % (rote gestrichelte Linie) konnte nicht erreicht werden. Die durchschnittliche Bruchdehnung aus allen Proben liegt bei 5,8 % mit einer Streuung von etwa 25 %.

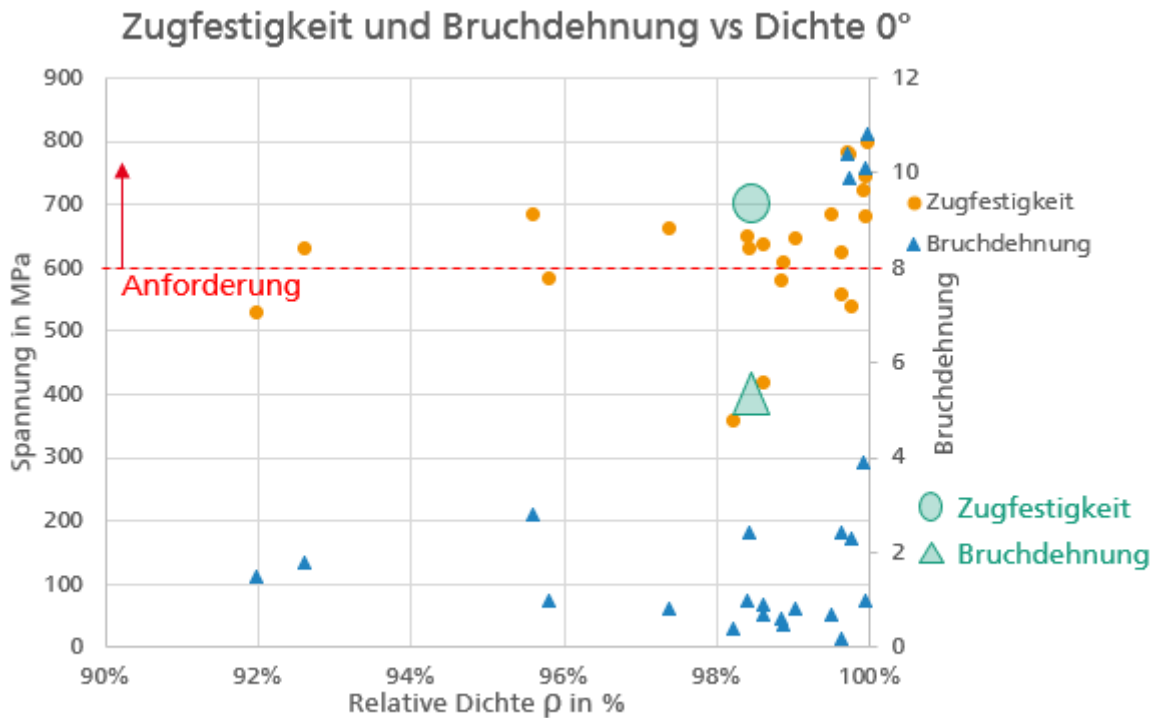


Abbildung 29: Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Proben aus AP2 und AP3

Abbildung 29 lässt den Vergleich der Proben zu, die jeweils im AP2 als Referenz mit einer Aufbau- rate von  $v_{th} = 19 \text{ cm}^3/\text{h}$  und im AP3 mit „speed“-Parametern ( $v_{th} = 65 \text{ cm}^3/\text{h}$ ) gefertigt sind. Hierfür wurden die Zugprobenreste warm eingebettet, geschliffen, poliert und anschließend hinsichtlich resultierender Dichte analysiert. Eine niedrigere relative Dichte als die Würfel, die mit identischer Parameterkombination gefertigt wurden, konnte festgestellt werden.

Bei den grünen Markierungen in Abbildung 29 handelt es sich um die Proben, die mit „speed“-Parameter gefertigt sind. Zu erkennen ist, dass die „speed“-Parameter bei ähnlicher Dichte zu besseren mechanischen Eigenschaften verglichen mit den Referenzproben geführt haben. Die mechanischen Eigenschaften sind also auch trotz einer Erhöhung der Aufbaurrate von 242 % gleichgeblieben.

#### 3.3.3.4. Dauerfestigkeitsprüfung

Neben den statischen Versuchen werden zusätzlich die dynamischen Eigenschaften des additiv gefertigten HC380LA, die mit durch den Demonstratorbau validierten Parameter hergestellt sind, ermittelt. Dazu werden 35 Umlaufbiegeproben im Perlschnurverfahren je fünf Proben pro Lastniveau getestet. Die Proben wurden senkrecht auf der Substratplatte generiert und anschließend von der Fa. Hereon spanend nachbearbeitet und getestet. Abbildung 30 stellt die daraus entstandenen Wöhlerkurve dar.

### Perlschnurverfahren für jeweils unterschiedliche Beanspruchungen

Least Square  $\Delta x$

Wöhlerexponent  $k$ : 5.182

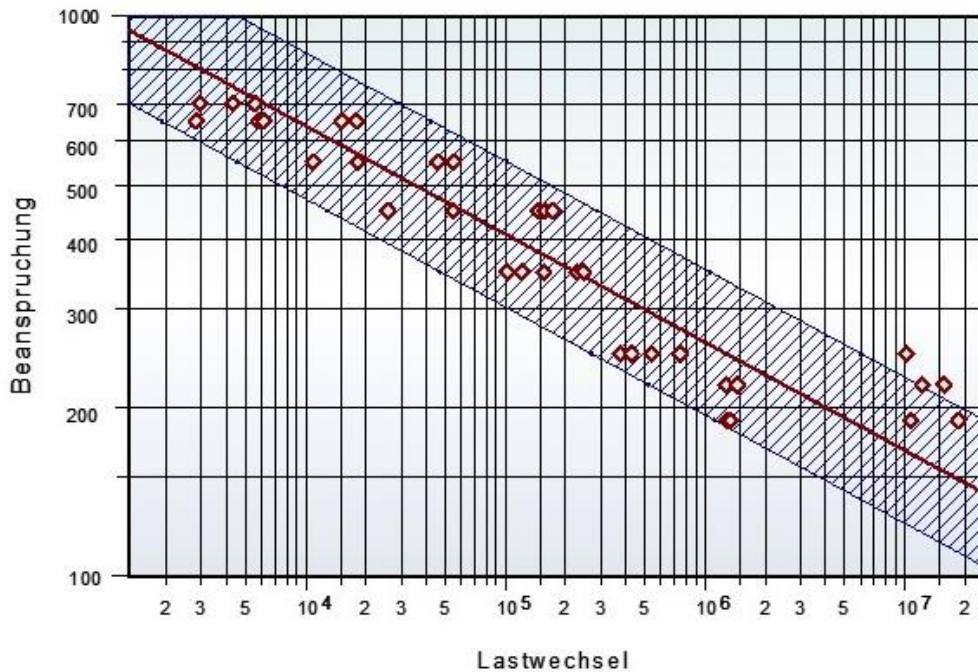


Abbildung 30: Wöhlerkurve für spanend nachbearbeiteten Proben die mit validierten Parameter bei  $P_L = 550$  W,  $v_s = 500$  mm/s,  $d_s = 120$   $\mu$ m,  $h_s = 150$   $\mu$ m hergestellt wurden.

Die Dauerfestigkeit bei  $1 \times 10^7$  Lastwechseln beträgt mindestens 190 MPa, und erreicht eine maximale Biegespannung von 250 MPa. Bei  $1,2 \times 10^7$  Lastwechseln beträgt die Dauerfestigkeit bei 220 MPa. Die Probe bei einer Biegespannung von 190 MPa erreicht einen Lastwechsel von  $1,8 \times 10^7$  ohne Bruchversagen.

#### 3.3.4. Ermittlung der Kosteneinsparpotentiale

In diesem Arbeitspaket werden die Kosteneinsparpotentiale, die durch eine höhere Prozessgeschwindigkeit zu erzielen sind, quantifiziert. Hierfür werden alle Randbedingungen, die bei der Kostenaufnahme von AP 2 konstant gehalten. Die Fertigungsdauer wird mit der im AP 3 ermittelten Aufbaurrate berechnet, und in die Kostenrechnung berücksichtigt. Die Formel für die Berechnung der Fertigungsdauer ist in Abbildung 31 dargestellt.

$$\begin{aligned}
 t_{ges} &= t_{exp} + t_{coat} + t_{delay} \\
 &= \underbrace{\frac{V}{d_s \cdot v_s \cdot h_s}}_{\text{theo. Aufbaurrate}} + \underbrace{\frac{z}{d_s} \cdot t_{scoat}}_{\text{Zeit pro Schicht (Anlagenkonstante)}} + \underbrace{\frac{z}{d_s} \cdot t_{sdelay}}_{\text{Zeit pro Schicht (Anlagenkonstante)}}
 \end{aligned}$$

↑  
Schichtanzahl

mit Bauteilhöhe  $z$ , Schichtstärke  $d_s$

Abbildung 31: Berechnung der Fertigungsdauer

Die Fertigungsdauer  $t_{ges}$  setzt sich zusammen aus der Belichtungszeit  $t_{exp}$ , der Beschichtungszeit  $t_{coat}$  und der Verzögerung  $t_{delay}$ . Die Verzögerung ist eine Konstante, die im Scanner der Anlage eingestellt ist, wobei sie experimentell ermittelt wird und bei der AconityLab 2,1 Sekunden pro Schicht beträgt. Für alle nachfolgenden Berechnungen wird sie als Konstante angenommen. Die Beschichtungszeiten werden aus den Protokollen vergangener Baujobs ermittelt und für die nachfolgenden Berechnungen der jeweiligen Anlage als Konstante angenommen.

Die Kostensimulation wird für die Forschungsanlage AconityLab, die kommerziellen Anlagen SLM 500HL und EOS M290 durchgeführt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

### AconityLab

Die Annahmen der Randbedingungen sind im Abschnitt 3.2.2 bereits beschrieben. Lediglich die Fertigungsdauer ändert sich durch die neue Art der Prozessführung. Diese setzt sich aus Beschichtungszeit und Belichtungszeit. Die Beschichtungszeit pro Beschichtung steigt von 17 Sekunden auf 27 Sekunden. Grund dafür ist die Art und Weise der Pulverzufuhr in dieser Anlage: der Beschichter wird bei jeder Beschichtung mit Pulver mittels einer Welle befüllt. Dies hat den Effekt, dass die Beschichtungsdauer mit der Pulvermenge steigt. Durch die Erhöhung der Schichtstärke von  $60 \mu\text{m}$  auf  $120 \mu\text{m}$  sind doppelte Pulvermenge zuzuführen. Dies ist allerdings nicht repräsentativ für industriell eingesetzte LBM-Anlagensysteme, sodass es sich eher um einen Spezialfall handelt. Allerdings reduziert sich die Schichtanzahl dadurch auch auf die Hälfte, von 2.070 Schichten auf 1.035 Schichten. Die Belichtungszeit reduziert sich von der Referenz 21,94 Sekunden pro Schicht auf 6,58 Sekunden.

Annahmen	
Anschaffungskosten	400.000 €
Abschreibungsdauer	5 a
Auslastung	5.000 h/a
Personal	48.707 €/a

Anlagenkosten		
Abschreibung	80.000 €/a	16,00 €/h
Wartung	3.000 €/a	0,60 €/h
Stromkosten	2.592 €/a	0,52 €/h
Miete	4.500 €/a	0,90 €/h

Stundensätze & Fertigungsdauer	
Maschinenstundensatz	18,02 €/h
Personalstundensatz	27,02 €/h
Fertigungsdauer	17,63 h → 7,56 h

Bauteilnachbehandlung		
Datenvorbereitung	30 min	13,51 €
Maschinenvorbereitung	150 min	67,55 €
Auspacken	60 min	27,02 €
Wärmebehandlung	360 min	15,00 €
Drahterodieren	60 min	21,11 €
Supportentfernung	50 min	22,52 €
Sandstrahlen	6 min	2,70 €
		169,42 €

Bauteilkosten	
Materialkosten (51 €/kg)	49,10 €
Fertigungskosten	380,79 €
	→ 199,22 €
Vor- und Nachbereitungskosten	169,42 €
	599,31 €
	→ 417,74 €

Abbildung 32: Kostenvergleich auf der AconityLAB: Referenz- vs Speed-Prozess

In Abbildung 32 ist die Aufschlüsselung der gesamten Herstellkosten dargestellt. Die Fertigungsdauer reduziert sich somit von der Referenz 17,63 h auf 7,56 h, welches zu einer Reduzierung der Fertigungskosten von 380,79 € auf 199,22 € führt. Die Herstellkosten des Bauteils reduzierten sich um 30 % von 588,31 € auf 417,74 €.

### EOS M290

Annahmen	
Anschaffungskosten	500.000 €
Abschreibungsdauer	5 a
Auslastung	5.000 h/a
Personal	48.707 €/a

Anlagenkosten		
Abschreibung	100.000 €/a	20,00 €/h
Wartung	3.000 €/a	0,60 €/h
Stromkosten	2.592 €/a	0,52 €/h
Miete	4.500 €/a	0,90 €/h

Stundensätze & Fertigungsdauer	
Maschinenstundensatz	22,02 €/h
Personalstundensatz	27,02 €/h
Fertigungsdauer (1 Bauteil)	12,59 h → 5,03 h
Fertigungsdauer (8 Bauteile)	65,21 h → 22,50 h

Bauteilnachbehandlung				
	1 Bauteil		8 Bauteile	
Datenvorbereitung	30 min	13,51 €	30 min	13,51 €
Maschinenvorbereitung	30 min	13,51 €	30 min	13,51 €
Auspacken	30 min	13,51 €	30 min	13,51 €
Wärmebehandlung	360 min	15,00 €	360 min	15,00 €
Drahterodieren	60 min	21,11 €	150 min	52,78 €
Supportentfernung	50 min	22,52 €	150 min	67,55 €
Sandstrahlen	6 min	2,70 €	48 min	21,62 €
		101,86 €		197,48 €

Bauteilkosten		
	1 Bauteil	8 Bauteile
Materialkosten (51 €/kg)	49,10 €	392,79 €
Fertigungskosten	299,23 €	1457,84 €
	→ 132,81 €	→ 517,46 €
Vor- und Nachbereitungskosten	101,86 €	197,48 €
	450,19 €	256,01 €/Stk.
	→ 283,77 €	→ 138,47 €/Stk.

Abbildung 33: Kostenvergleich auf der EOS M290: Referenz- vs Speed-Prozess



In Abbildung 33 ist das Ergebnis der Kostenanalyse dargestellt. Für die Kostensimulation der kommerziellen Anlage EOS M290 werden zwei Szenarien berücksichtigt: Einzelbauteilfertigung und Serienfertigung. Bei der Serienfertigung wird der gegenüber der Aconity größere Bauraum (250 x 250 mm<sup>2</sup>, xy-Richtung) möglichst gut ausgelastet, was in diesem Fall acht Bauteilen pro Baujob entspricht.

Die Beschichtungszeit pro Schicht bei der EOS M290 beträgt 8,68 Sekunden. In der Einzelfertigung wird die Fertigungsdauer zu 12,59 h berechnet. Außerdem wird für diese Anlage eine 30-minütige Maschinenvorbereitung angenommen. (Vergleich zu AconityLab: 150 Minuten). Durch die Verwendung der „speed“-Parameter reduziert sich die Fertigungsdauer von 12,59 h auf 5,03 h, was zu einer Kostenreduzierung um 37 % von 450,19 € auf 283,77 € führt.

Für die Serienfertigung konnte eine Kostenreduzierung um 46 % von 256,91 € pro Bauteil auf 138,47 € pro Bauteil berechnet werden.

### SLM 500HL

Analog zur Kostensimulation für EOS M290 wurde die Berechnung für die zweite kommerzielle Anlage SLM 500HL durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Anlage besitzt vier Laserquellen und einen noch größeren Bauraum (280 x 500, xy-Richtung), welche für das Anwendungsszenario eine maximale Kapazität von 12 Bauteilen aufweisen kann.

Annahmen				Bauteilnachbehandlung			
Anschaffungskosten	1.200.000 €			1 Bauteil		12 Bauteile	
Abschreibungsdauer	5 a			Datenvorbereitung	30 min 13,51 €	30 min	13,51 €
Auslastung	5.000 h/a			Maschinenvorbereitung	30 min 13,51 €	30 min	13,51 €
Personal	48.707 €/a			Auspacken	30 min 13,51 €	30 min	13,51 €
				Wärmebehandlung	360 min 15,00 €	360 min	15,00 €
				Drahterodieren	60 min 21,11 €	240 min	84,44 €
				Supportentfernung	50 min 22,52 €	360 min	162,13 €
				Sandstrahlen	6 min 2,70 €	72 min	32,43 €
					101,86 €		334,53 €
Anlagenkosten				Bauteilkosten			
Abschreibung	240.000 €/a	48,00 €/h		1 Bauteil		12 Bauteile	
Wartung	3.000 €/a	0,60 €/h		Materialkosten (51 €/kg)	49,10 €		589,19 €
Stromkosten	2.592 €/a	0,52 €/h		Fertigungskosten	639,74 €		1391,51 €
Miete	4.500 €/a	0,90 €/h			→ 281,69 €		→ 531,34 €
				Vor- und Nachbereitungskosten	101,86 €		334,53 €
					790,70 €		192,94 €/Stk.
					→ 432,65 €		→ 121,26 €/Stk.
Stundensätze & Fertigungsdauer							
Maschinenstundensatz		50,02 €/h					
Personalstundensatz		27,02 €/h					
Fertigungsdauer (1 Bauteil)		11,79 h	→ 4,63 h				
Fertigungsdauer (12 Bauteile)		26,82 h	→ 9,62 h				

Abbildung 34: Kostenvergleich auf der SLM 500HL: Referenz- vs Speed-Prozess

Die Herstellkosten in der Einzelfertigung ist aufgrund der höheren Anschaffungskosten teurer als die AconityLab und EOS M290. Diese liegen bei 790,70 € mit dem Referenzparameter. Die Verwendung der „speed“-Parameter reduziert die Herstellkosten eines Bauteils um 45 % auf

432,65 €. Bei der Serienfertigung konnten die Herstellkosten pro Bauteil um 38 % von 192,94 € auf 121,26 € reduziert werden.

### 3.4. Arbeitspaket 5: Ermittlung des Einsparpotentials und Zusammenfassung der Projektergebnisse

#### 3.4.1. Fertigung eines Demonstrators mit Prozessparametern des kosteneffizienteren Prozesses

In diesem Arbeitspaket wird der Demonstrator mittels ermittelten „speed“-Parameter gefertigt. Aufgrund der beschriebenen, hohen Schmauchentwicklung im Bauraum wurden zwei Prozesse nach ungefähr 10 Stunden abgebrochen (Abbildung 35). Das Lasereintrittsglas ist durch die Einbrände gerissen. Deshalb wurden die Prozessparameter für die Fertigung des Demonstrators erneut modifiziert. Es lässt sich aber festhalten, dass diese Herausforderungen primär mit der Forschungsanlage selbst zusammenhängen und an industriellen Anlagen weitestgehend kompensiert werden können.

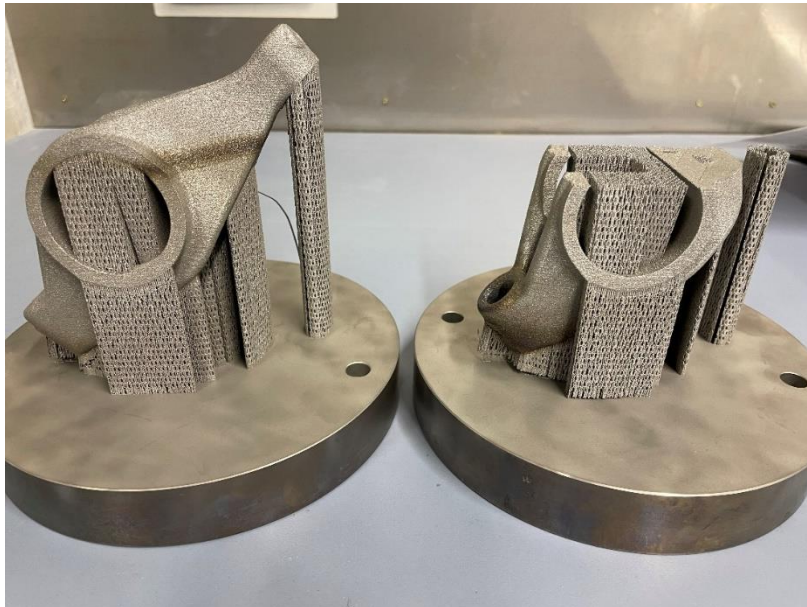


Abbildung 35: links: unterbrochener Fertigungsprozess fortgesetzt. Rechts: abgebrochener Fertigungsprozess.

Eine zusätzliche Parameterentwicklung wurde durchgeführt, um eine hohe Schmauchentwicklung während des Prozesses zu vermeiden. Die Querschliffbilder der Prozessentwicklung ist in Abbildung 36 dargestellt. Für die Fertigung des Demonstrators wurde eine Laserleistung von  $P_L = 550 \text{ W}$ , eine Scangeschwindigkeit von  $v_s = 500 \text{ mm/s}$ , einen Hatch-Abstand von  $h_s = 150 \mu\text{m}$  und eine Schichtstärke von  $d_s = 120 \mu\text{m}$  gewählt. Die resultierende theoretische Aufbaurrate beträgt  $v_{th} = 32,4 \text{ cm}^3/\text{h}$ .

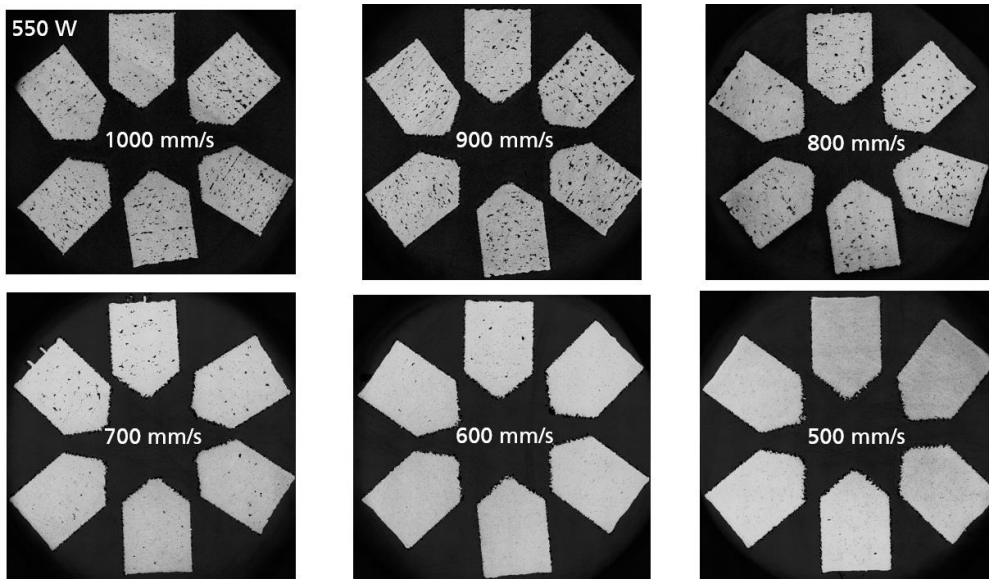


Abbildung 36: Parameterentwicklung für die Fertigung des Demonstrators

Die Fertigung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die im Fertigungsprotokoll aufgezeichnete Fertigungsdauer beträgt 12 Stunden, 14 Minuten und 39 Sekunden. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Rechenmodelle ergeben eine Fertigungsdauer von 12 Stunden, 9 Minuten und 9 Sekunden, was einer Abweichung von 0,6 % entspricht.



Abbildung 37: Demonstrator gefertigt mit modifizierten "speed"-Parameter

### 3.4.2. Gesamtvergleich der Kosten

In diesem Arbeitspaket sollen die Einsparpotentiale analysiert werden. In Abbildung 38 sind die Herstellkosten des Demonstrators in der Einzelfertigung dargestellt. Dabei werden drei Parameterkombinationen berücksichtigt, die in Tabelle 7 dargestellt sind.

Tabelle 7: Parameterkombinationen, die in der Kostensimulation berücksichtigt werden.

Parameter	Referenz	max. „speed“	validierte „speed“
Laserleistung $P_L$ [W]	250	950	550
Scangeschwindigkeit $v_s$ [mm/s]	1000	1000	500
Hatchabstand $h_s$ [mm]	0,09	0,15	0,15
Schichtstärke $d_s$ [mm]	0,06	0,12	0,12
Theoretische Aufbaurrate $v_{th}$ [cm <sup>3</sup> /h]	19,44	64,8	32,4

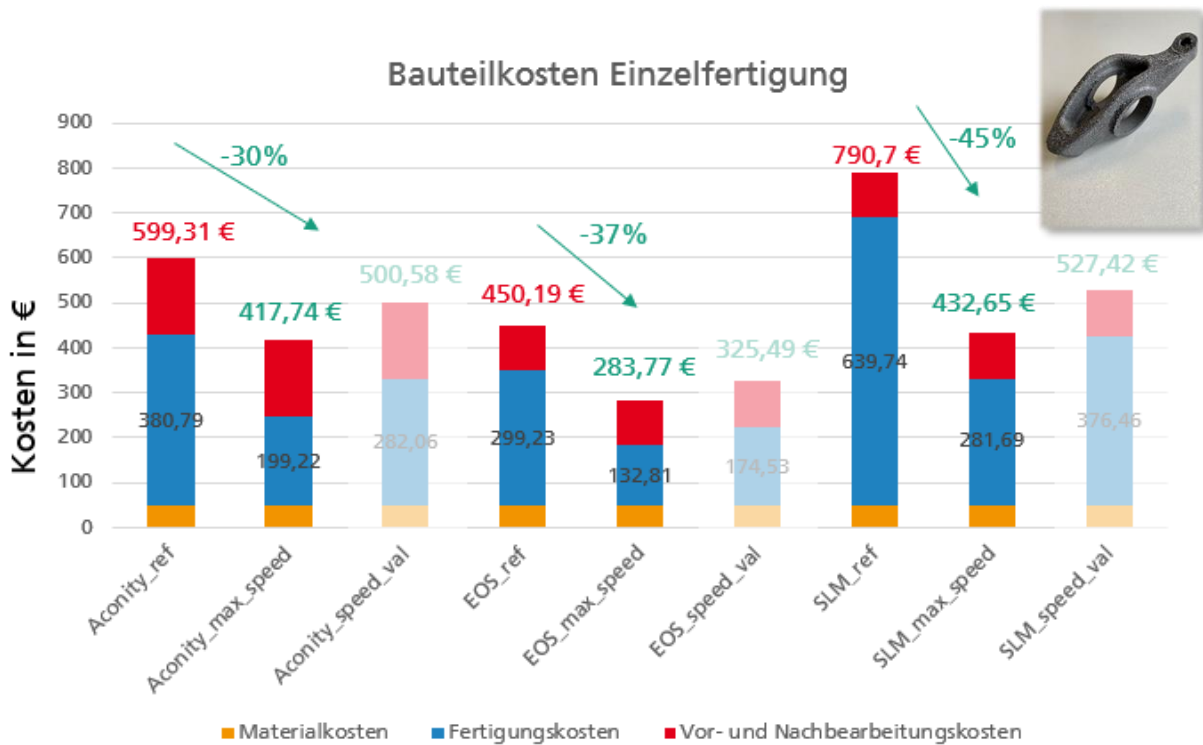


Abbildung 38: Vergleich der Herstellkosten in der Einzelfertigung auf der AconityLab, EOS M290 und SLM 500HL.

Die Herstellkosten des Bauteils, das mittels Referenzparameter gefertigt wird, werden experimentell ermittelt. Die Vor- und Nachbereitungskosten werden basierend auf tatsächlicher Dauer der Tätigkeiten bestimmt. Die Fertigungsdauer wird aus dem Fertigungsprotokoll ausgewertet. Lediglich die Annahme der Auslastung von 5.000 h/a ist vom industriellen Begleitkreis aus der Industrie vorgeschlagen, um die Nähe zur industriellen Realität zu wahren.

Da Materialkosten sowie Vor- und Nachbearbeitungskosten bei einer bestimmten Anlage konstant bleiben, lassen sich über den Vergleich der Parameterkombinationen die Einsparpotentiale bei den Herstellkosten aufzeigen: so reduzieren sich die Herstellkosten in der Einzelfertigung auf der AconityLab um 30 % von 599,31 € auf 417,74 €. Diese Reduzierung ist die kleinste in der Einzelfertigung. Der Grund dafür ist die Erhöhung der Beschichtungszeit pro Schicht bei der Erhöhung der Schichtstärke von 60 µm auf 120 µm, was – wie eingangs bereits erwähnt – einem Sonderfall entspricht. Die validierte „speed“-Parameterkombination führte zu einer erfolgreichen Fertigung in 12 Stunden und 14 Minuten, womit die Herstellkosten des Bauteils sich auf 500,58 € belaufen – eine Kostenreduzierung von 16,5 % gegenüber der Referenz.

Für die kommerziellen Anlagen EOS M290 und SLM 500HL werden die resultierenden Herstellkosten berechnet. Die Annahmen der Randbedingungen bleiben konstant. Lediglich werden die anlagenspezifischen Variablen angepasst. Diese sind beispielsweise der Maschinenstundensatz sowie die Beschichtungszeit pro Schicht. Aufgrund der konstanten Beschichtungszeit pro Schicht, wirkt sich die Schichtstärkeverdoppelung stärker auf die Reduzierung der Fertigungsdauer als auf der AconityLab aus. Es konnte eine Reduzierung der Herstellkosten auf der EOS M290 von 37 % durch die Verwendung der „max.speed“-Parameter sowie um 28 % bei den Aconity-validierten „speed“-Parameter eingesetzt werden. Aufgrund des höheren Maschinenstundensatzes wirkt sich diese „speed“-Parameter noch stärker auf die Kostenreduzierung auf der SLM 500HL: 45 % Reduzierung mit „max.speed“-Parameter und 33 % mit den Aconity-validierten „speed“-Parameter.

### **3.4.3. Vergleich der Herstellkosten in der Serienfertigung**

Die Annahme, die hier für die Serienfertigung getroffen wurde, ist, dass die maximale Kapazität des Bauraums nahezu ausgeschöpft ist. Die maximale Anzahl der Demonstratoren in einer EOS M290 beträgt acht und in eine SLM 500HL passen 12 Demonstratoren. Abbildung 39 stellt die simulierten Herstellkosten pro Bauteil dar. Alle Annahmen und Randbedingungen sind identisch wie diejenigen, die für die Einzelfertigung getroffen worden sind. Lediglich erhöht sich die Anzahl der Bearbeitungslaser in der SLM 500HL von eins auf vier.

Das Kosteneinsparpotential auf der EOS M290 durch den Einsatz von „max.speed“-Parameter gegenüber der Referenz beträgt 46 %; die Herstellkosten pro Bauteil reduziert von 256,01 € auf 138,47 €. Im Rahmen der Kostensimulation ist die kostengünstigste Variante die Fertigung von zwölf Bauteilen mit vier Laser auf der SLM 500HL. Mit Referenzparameter belaufen sich die Herstellkosten auf 192,94 € pro Bauteil. Die erhöhte Aufbaurate mit „max.speed“-Parameter reduziert die Herstellkosten pro Bauteil um 38 % auf 121,26 € pro Bauteil.

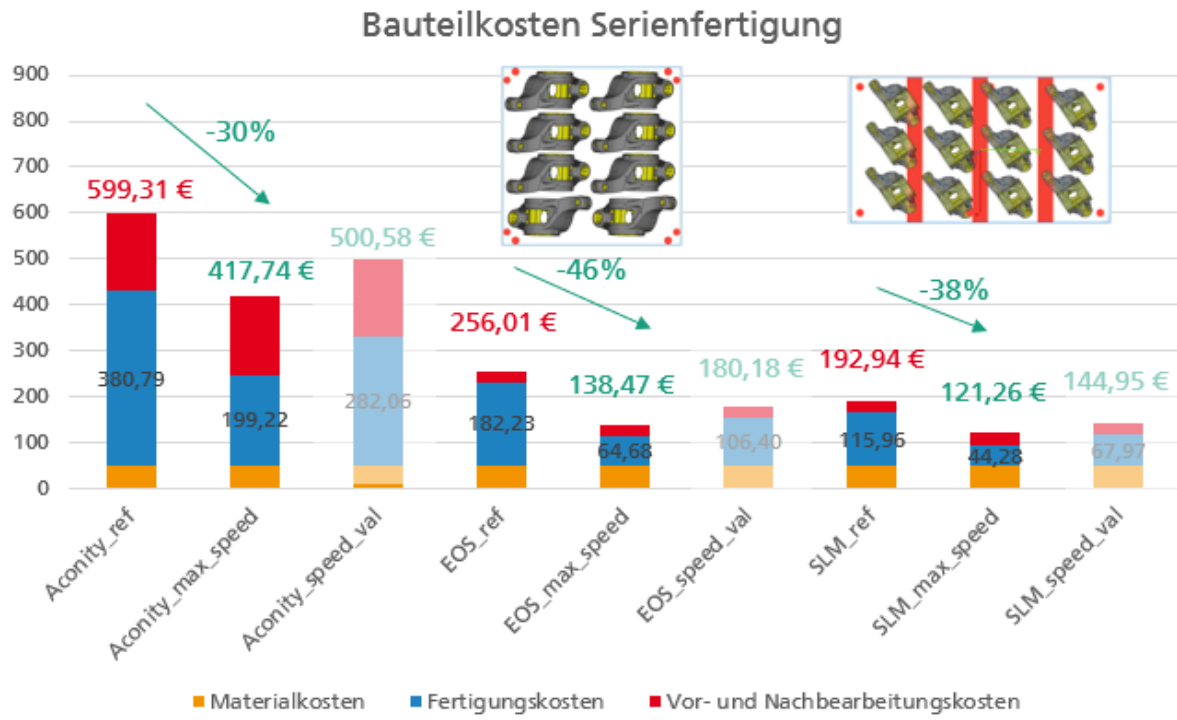


Abbildung 39: Stückpreise in der Serienfertigung mit 3 Parameterkombinationen in 3 Anlagen

## 4. Zusammenfassung

Das ProKos-Projekt (Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laseradditiven Fertigung für den Automobilbau) beschäftigte sich mit der Fragestellung, wie durch die Verwendung einer optimierten LBM-Prozessführung kosteneffiziente Fertigung im Metallbereich des Automobilbaus geschaffen werden können. Dabei wurden insbesondere Stähle im Karosseriebau fokussiert. Ziel war es die Kosteneinsparpotentiale experimentell zu identifizieren und nachzuweisen.

Dazu wurden im Rahmen des Projektes (Laufzeit: 01.06.2020 – 31.12.2021) insbesondere drei Lösungsansätze zur Optimierung der Prozessführung in Bezug auf LPBF-Prozess vom Fraunhofer IAPT in Absprache mit 11 namenhaften Projektpartner aus der Automobilindustrie betrachtet. Zu Beginn des Projektes wurde ein Demonstrator von der MAN Truck & Bus SE zur Verfügung gestellt, um anhand dieses Bauteils die Kosteneinsparpotentiale durch optimierte Prozessführung zu validieren. Als Material wurde eine typische Automobillegierung, HC380LA, ausgewählt. Die Verarbeitbarkeit des Werkstoffs durch LPBF-Prozess wurde bereits im Vorprojekt *BioLAS* nachgewiesen. Nachdem die Herstellkosten des Demonstrators in einem Referenzprozess experimentell ermittelt wurden, wurde die Entwicklung der auf Prozessgeschwindigkeit optimierten Prozessführung durchgeführt. Bei den drei Optimierungsansätzen handelt es sich um:

1. Identifizierung der minimalen Bauteildichte zur Erreichung der mechanischen Anforderung.
2. Energieeinbringung durch den Einsatz eines ringförmigen Laserstrahlprofils.
3. Erhöhung der Schichtstärke von 60  $\mu\text{m}$  auf 120  $\mu\text{m}$ .

Eine Kostensimulation soll die Einflüsse der Steigerung der Produktivität auf die Kostensenkung in industriellen Szenarien aufzeigen; sowohl in der Einzelfertigung als auch in der Serienfertigung.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse des Projekts kurz zusammengefasst.

1. Bauteildichte korreliert mit der Zugfestigkeit; unter 99 % nimmt sie stark ab.
2. Ringförmiges Laserstrahlprofil ermöglicht die Energieeinbringung über hohe Laserleistung von bis zu 950 W.
3. Bei der höheren Laserleistung konnte sowohl die Schichtstärke von 60  $\mu\text{m}$  auf 120  $\mu\text{m}$  als auch der Hatchabstand von 90  $\mu\text{m}$  auf 150  $\mu\text{m}$  gesteigert werden.
4. Die theoretische Aufbaurate ist um 242 % von 19,44  $\text{cm}^3/\text{h}$  auf 64,8  $\text{cm}^3/\text{h}$  gestiegen.
5. Die Erhöhung der theoretische Aufbaurate durch oben beschriebenen Parameter führt zu einer Kostenreduzierung pro Bauteil in der industriellen Serienfertigung bis zu 46 %.
6. Die statisch mechanischen Eigenschaften der Probenkörper, die mit der „speed“-Parameter generiert wurden, sind gleichgeblieben im Vergleich zu den der Probenkörper, die mit Referenz-Parameter generiert wurden. Die Zugfestigkeit  $R_m$  beträgt 700 MPa, die Streckgrenze liegt bei 690 MPa und die Bruchdehnung beträgt 5,8 %.

7. Die Dauerfestigkeit der Proben, die mit validierten Parameter hergestellt wurden, konnte bei  $1 \times 10^7$  Lastwechseln eine maximale Biegespannung von 250 MPa, bei  $1,2 \times 10^7$  Lastwechseln 220 MPa und bei  $1,8 \times 10^7$  Lastwechseln 190 MPa erreichen.
8. Die Simulation der Herstellkosten über die Fertigungskosten bzw. Fertigungsdauer konnte experimentell validiert werden, die Fehlerabweichung beträgt 0,6 %.

Zusammenfassend wurde im Rahmen des ProKos-Projektes mit der Legierung HC380LA eine produktivere, kostengünstigere Prozessführung durch den Einsatz eines ringförmigen Laserstrahlprofils entwickelt. Die Einsparpotentiale der optimierten Prozessführung konnte anhand der Herstellkosten des Demonstrators quantifiziert werden. Die maximale Prozessgeschwindigkeit konnte jedoch bei der Validierung nicht erreicht werden, aufgrund starker Generierung von Nebenprodukten sowie dem Einsatz einer Forschungsanlage. Deshalb soll in einem Folgeprojekt die Schmauchentwicklung in einer industriellen Anlage näher untersucht und Lösungsansätze zum effektiven Abtransport der Nebenprodukte entwickelt werden, um das im Projekt *ProKos* aufgezeigte Produktivitätspotential nutzbar zu machen.

## Literatur

- [1] T. M. Wischeropp, H. Tarhini und C. Emmelmann, „Influence of laser beam profile on the selective laser melting process of AlSi10Mg“, *Journal of Laser Applications*, Jg. 32, Nr. 2, S. 22059, 2020, doi: 10.2351/7.0000100.



## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2017)

Nr.	Titel
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
293	Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
294	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feibleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
295	Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
296	Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
297	Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
298	Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
299	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
300	Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
301	The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
302	Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
303	Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
304	Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
305	Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
306	Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feiblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
307	Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
308	Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
309	Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchtem Gewinde, 2018
310	Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
311	Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubverbindungen, 2018
312	Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
313	Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018

- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
- 336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
- 337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
- 338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020
- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021

- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
- 343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
- 344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
- 345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
- 346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2022

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
Twitter @VDA\_online

**VDA** | Verband der  
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de/fat](http://www.vda.de/fat)

**FAT** | Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik