

FAT-Schriftenreihe 389

Bewertung und Erhöhung des Potentials von Binder Jetting
durch Nutzung kosteneffizienter Stahlpulver für den Einsatz in
der Automobilindustrie



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt „Bewertung und Erhöhung des Potentials von Binder Jetting durch Nutzung kosteneffizienter Stahlpulver für den Einsatz in der Automobilindustrie“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde im Rahmen des Förderprogramms „Industriellen Gemeinschaftsforschung“ (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bewertung und Erhöhung des Potentials von Binder Jetting durch Nutzung kosteneffizienter Stahlpulver für den Einsatz in der Automobilindustrie

Forschungsstelle

Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Durch große Verzögerungen bei der Bearbeitung von Arbeitspaket 3 (Identifizierung pulverspezifischer Sinterstrategien) musste eine Laufzeitverlängerung beantragt werden. Hintergrund hierfür war ein Defekt am Sinterofen des IAPT. Da die Ersatzteile hierfür aus den USA beschafft werden mussten, war eine kurzfristige Reparatur nicht möglich. In Abb. 1 ist das angepasste Gantt-Chart dargestellt.

Nr.	Arbeitspakete	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3	
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
AP 1	Demonstrator- und Pulverauswahl										
AP 1.1	Demonstratorauswahl										
AP 1.2	Pulverauswahl										
MS 1	Identifizierung einer BJT-gerechten Komponente sowie dazugehöriger Stahllegierung										
AP 2	Additive Grünteilfertigung										
AP 2.1	Pulvercharakterisierung										
AP 2.2	Optimierung der Grünteileigenschaften										
AP 2.3	Digitale Bildanalyse										
MS 2	Erreichen anforderungsgerechter Grünteileigenschaften für mindestens zwei Pulvervarianten										
AP 3	Identifizierung pulverspezifischer Sinterstrategien										
AP 3.1	Einstellen der Sintertemperatur										
AP 3.2	Vervollständigen der Sinterstrategie										
AP 3.3	Untersuchung der resultierenden Bauteilqualität										
AP 3.4	Gegenüberstellung der ermittelten Eigenschaften										
MS 3	Bauteilqualität entspricht für mindestens zwei Pulvervarianten dem Anforderungsprofil										
AP 4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung										
AP 4.1	Kostenmodell										
AP 4.2	Anpassung und Fertigung von Demonstratoren										
AP 4.3	Pulverspezifische Stückkostenanalyse und Schlussbericht										

Abb. 1: Angepasstes Gantt-Chart für das Projekt PoBStA

Arbeitspaket 1: Demonstrator- und Pulverauswahl

Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen des ersten projektbegleitenden Ausschusses des IGF-Forschungsprojekts PoBStA wurde in einem digitalen Projekttreffen am 22.09.2022 nach einer ausführlichen Vorstellung der Projekttinhalte insbesondere der Inhalt des Arbeitspakets 1 diskutiert. Hierbei ging es um die Identifikation sinnvoller Demonstratoren für die Automobilindustrie. Auf Grundlage dieser Demonstratoren sollen anschließend geeignete Legierungen und die entsprechenden Pulver ausgewählt werden.

Im Rahmen der Diskussion wurde entschieden, dass entgegen dem ursprünglichen Projektantrag eine Erweiterung des Spektrums möglicher Demonstratoren über BIW-Komponenten hinaus definitiv sinnvoll ist, um eine höhere industrielle Relevanz sowie Erfolgswahrscheinlichkeit der Verwertung zu erreichen. Es wurden außerdem bereits zwei mögliche Demonstratoren identifiziert. Hierbei handelt es sich um Karosserieknotenpunkte, die von Mitarbeitern der Volkswagen AG im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zum Thema Metal Binder Jetting entwickelt wurden (siehe Abb. 2). Die grundsätzliche Herstellbarkeit und die Eignung für das Fertigungsverfahren sind somit schon gezeigt, und es ist zu erwarten, dass die Komponenten erfolgreich gedruckt und gesintert werden können.

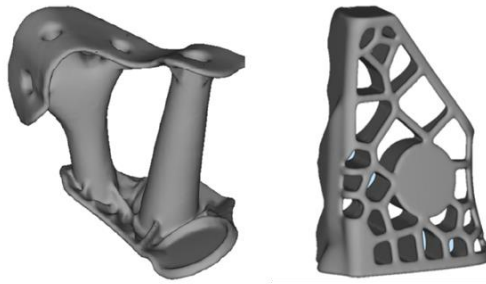


Abb. 2: Demonstrator Karosserieknotenpunkte der Volkswagen AG

Ein weiterer Diskussionspunkt war die Relevanz des Leichtbaus in der Automobilindustrie. Es wurde festgestellt, dass Leichtbau in der Regel wenig relevant ist, da höhere Kosten für Gewichtseinsparungen nur in geringem Maße akzeptiert werden. Dennoch ist es wichtig zu betonen, dass dies nicht bedeutet, dass der Leichtbau in der Automobilindustrie vollständig irrelevant ist. Stattdessen sollte er als wichtiger Faktor in Betracht gezogen werden, insbesondere bei der Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen wie Elektro- oder Hybridfahrzeugen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Diskussion war die Rolle von Betriebsmitteln in der Automobilindustrie. Dr. Alexander Rütjes von der Volkswagen AG betonte, dass Betriebsmittel ein großes Potenzial bieten, konkrete Anwendungen aber noch identifiziert werden müssen. Es wurde vereinbart, dass weitere Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um spezifische Anwendungen für Betriebsmittel in der Automobilindustrie zu identifizieren und zu entwickeln.

Abschließend lässt sich sagen, dass das erste Projekttreffen des projektbegleitenden Ausschusses im Forschungsprojekt PoBStA erfolgreich war. Die Diskussion über die Erweiterung des Spektrums möglicher Demonstratoren, die Relevanz des Leichtbaus und die Rolle von Betriebsmitteln in der Automobilindustrie waren wertvolle Beiträge zur Weiterentwicklung des Projekts.

Am 18.10.2022 wurde ein separates Projekttreffen mit Dr. Peter Scharf von MAN Truck & Bus durchgeführt, da er an dem ersten Termin verhindert war. In diesem Termin konnten noch zwei weitere Demonstratoren definiert werden. Hierbei handelt es sich um Ventilkipphebel (siehe Abb. 3). Da diese Komponenten bereits in einem IGF-Forschungsvorhaben für den L-PBF-Prozess analysiert wurden, ist zudem ein guter Vergleich zur Kostenstruktur möglich.

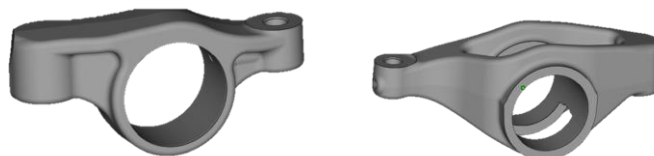


Abb. 3: Ventilhebel der MAN Truck & Bus SE

Auf Grundlage der Projekttreffen im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie interner Evaluationen wurden insgesamt drei mögliche Pulvervarianten für das Projekt ausgewählt:

1. Wasserverdüst, Legierung: 316L
2. Master-Alloy, Legierung: 17-4PH
3. Gasverdüst, Legierung: FeMnAl

Variante 1 entspricht dem Projektantrag und verfolgt die Reduzierung der Materialkosten mittels nicht-sphärischem wasserverdüstetem Metallpulver. Als Legierung wurde der Edelstahl 316L gewählt, der gute Ergebnisse hinsichtlich der Sinterbarkeit und späterer mechanischer Eigenschaften verspricht.

Variante 2 entspricht ebenfalls dem Projektantrag und verfolgt die Reduzierung der Materialkosten mittels Master-Alloy-Pulvermischungen. Hierbei werden die Legierungselemente mit Carbonyleisenpulver vermischt und legieren erst im Sinterschritt. Als Legierung wurde 17-4PH gewählt, dessen mechanische Eigenschaften sehr gut für die Anwendung als Ventilkipphebel geeignet sind.

Variante 3 wurde im Projektantrag noch nicht betrachtet, stellt aber einen vielversprechenden Ansatz dar, um das Projektziel der Materialkostenreduktion zu erreichen. Hierfür wurde eine FeMnAl-Legierung gewählt, die aufgrund der relativ günstigen Legierungselemente niedrigere Kosten aufweist als für den Binder-Jetting-Prozess typische Materialien wie 316L. Der Vorschlag, diese Variante zusätzlich aufzunehmen, wurde von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sehr positiv aufgenommen.

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse:

- ✓ Identifizierung von weiteren Randbedingungen im Hinblick auf den Ergebnistransfer
- ✓ Definition von insgesamt vier industrierelevanten Demonstratoren
- ✓ Pulverauswahl für drei Varianten

Das Arbeitspaket 1 ist damit abgeschlossen und Meilenstein 1 konnte im geplanten Zeitrahmen erreicht werden.

Arbeitspaket 2: Additive Grünteilfertigung

2.1/2.2 Pulvercharakterisierung und Optimierung der Grünteileigenschaften

Durchgeführte Arbeiten:

Entsprechend AP 2.1 wurden die drei beschafften Pulvervarianten (316L wasserverdüst, 17-4PH Master Alloy, FeMnAl) analysiert und bewertet. Während das mit Carbonyleisenpulver angemischte Master Alloy 17-4PH (mit Einschränkungen) und das FeMnAl (siehe Zwischenbericht 2022) grundsätzlich gute Fließeigenschaften zeigten, ist bei der wasserverdüsteten Variante (wie erwartet und im Projektantrag beschrieben) mit einer schwierigen Verarbeitbarkeit zu rechnen. Eine Beispielmessung ist hierzu in Abbildung 4 dargestellt.

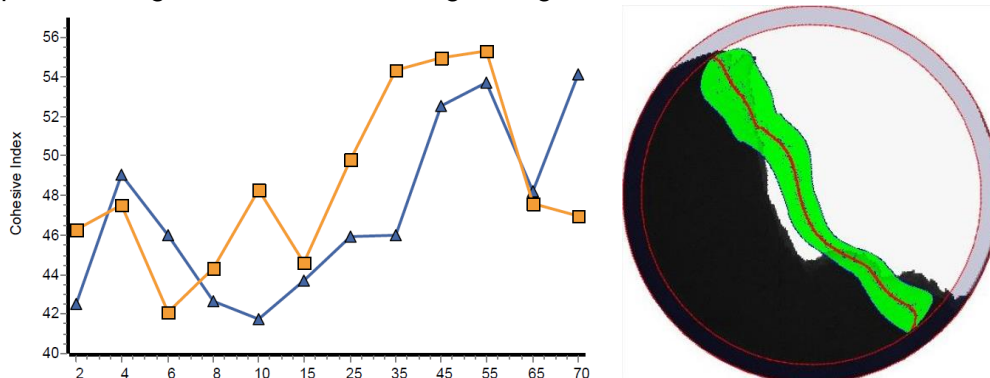


Abb. 4: Kohäsionsindex und Ansicht der Rotating Drum-Analyse des wasserverdüsteten 316L-Pulvers

Die Beobachtungen der Pulveranalysen konnten in den folgenden Versuchen zur Grünteilfertigung bestätigt werden. Während das Master Alloy-Pulver sowie das gasverdüstete FeMnAl relativ problemlos verarbeitet werden können, ist ein gleichmäßiger Beschichtungsprozess mit dem wasserverdüsterten Pulver schwierig zu realisieren. Da das Pulver auf Grund der niedrigsten Materialkosten aller Varianten jedoch eine hohe Attraktivität für den adressierten Automobilsektor bietet, wurde eine Studie zur Pulverkonditionierung durchgeführt, um die Fließfähigkeit des Pulvers zu verbessern. Diese konzentrierte sich auf die Reduzierung des Wassergehalts, um Adsorptionseffekte und Feuchtigkeitsbrücken zu minimieren und damit die Fließfähigkeit und letztlich die Verarbeitbarkeit des Pulvers zu verbessern. Für die Pulverkonditionierung wurde ein Vakuumtrockenschrank der Firma Memmert VO49 verwendet. Hierfür wurde vor der Durchführung des Experiments ein fester Vakuumzyklus festgelegt, der für alle Experimente verwendet wurde. Wie in Abbildung 5 dargestellt, beträgt das maximale Vakuum 20 mb, das innerhalb von 16 min erzeugt werden kann. Nach weiteren drei Minuten wurde der Druck auf Umgebungsdruck abgelassen, so dass der gesamte Zyklus 19 Minuten dauerte. Dieser Vorgang wurde dann entsprechend der Trocknungszeit des Tests wiederholt.

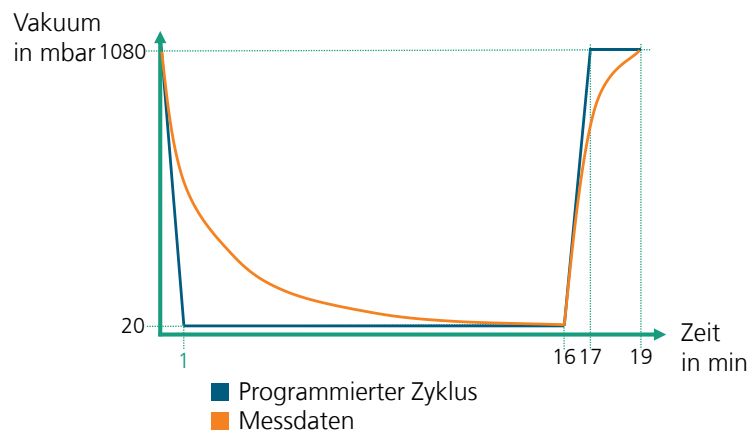


Abb. 5: Darstellung des Vakuumzyklus zur Pulvertrocknung

Mit dem so konditionierten Pulver wurden erneut Pulverauftragsversuche auf der Metal Binder Jetting Anlage DMP 2500 durchgeführt. Ein Referenzbauteil in Abbildung 6 demonstriert die sehr hohe erzielte Grünteilqualität (Fokus hier: Auflösung) der Versuche.

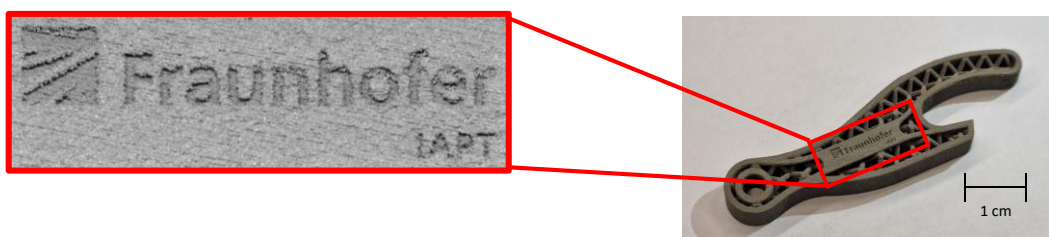


Abb. 6: Referenzbauteil Flaschenöffner aus wasserverdüstetem 316L-Pulver

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse:

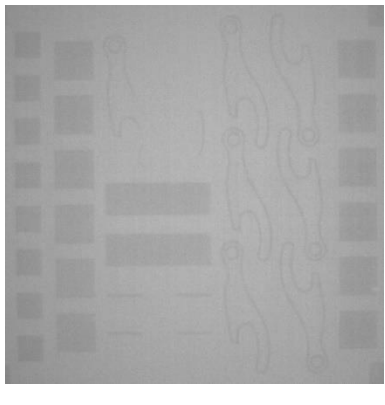
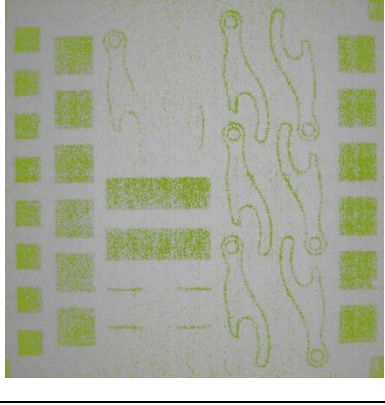
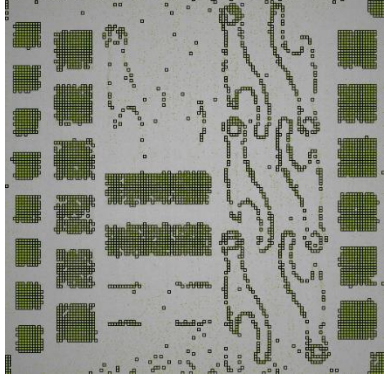
Für alle drei untersuchten Pulvervarianten konnten erfolgreich Prozessparameter entwickelt und infolgedessen eine hohe Grünteilqualität gewährleistet werden. Im Falle der wasserverdüsteten Variante wurden außerdem weitergehende Erkenntnisse zur Pulverkonditionierung gesammelt, die eine Verarbeitung gewährleisten.

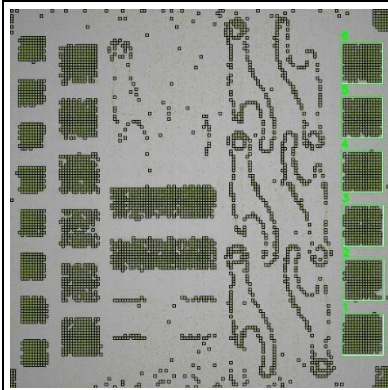
2.3 Digitale Bildanalyse

Durchgeführte Arbeiten:

Anlagenseitig besteht mit der DM P2500 die Möglichkeit, mithilfe eines integrierten Kamerasystems, schichtweise Bilder aufzunehmen. Bisher wird dieses Kamerasystem vom Hersteller nur zur stichprobenhaften Nachverfolgung von Prozessfehlern verwendet. In Arbeitspaket 2.3 wurden diese Bilder genutzt, um durch eine digitale Bildanalyse die Grünteilqualität zu bewerten. Hiermit soll eine nachträgliche manuelle und aufwändige Bestimmung der Grünteildichte ersetzt werden. So kann ein wirtschaftlicherer und gleichzeitig zuverlässigerer Fertigungsprozess erreicht werden. Zur automatischen Bildanalyse wurden mehrere Skripte entwickelt, die automatisiert die Prozessbilder analysieren. Das Vorgehen dabei ist in Tabelle 1 erläutert.

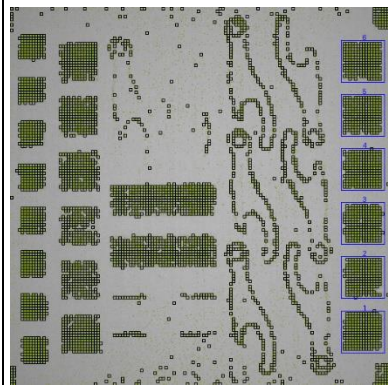
Tab. 1: Vorgehen bei der automatischen Bildanalyse

	<p>1.) Zurechtschneiden des Prozessbilds:</p> <p>Ein erstes Python-Skript schneidet das Prozessbild in 560 x 560 Pixel zurecht.</p>
	<p>2.) Einfärben des zurechtgeschnittenen Prozessbildes:</p> <p>Ein zweites Python-Skript verwendet OpenCV, um Bilder von einem Quellordner zu laden, sie in Graustufen umzuwandeln und dann mithilfe einer adaptiven Schwellenwertmethode das verklebte Pulver in definierten Quadranten (280 x 280 Pixel) zu erkennen und grün einzufärben.</p>
	<p>3.) Definition von Einheitszellen, um Schichtkontur zu approximieren:</p> <p>Ein drittes Skript lädt Bilder und unterteilt die eingefärbten Bilder in 140 x 140 Pixel-Quadranten und zeichnet schwarze Linien um die Quadranten (Einheitszelle), die mehr grüne Pixel als einen Schwellenwert enthalten (so eingestellt, dass Schicht möglichst korrekt dargestellt wird).</p>



4.) Kalibrierung:

Für den ersten Baujob muss einmal händisch für ein beliebiges Bild markiert werden, wo gezählt werden soll. Dazu werden weiße Quadrate eingezeichnet (Paint). Diese werden dann mit einem Code gesucht und die entsprechenden Koordinaten für diesen Bereich ausgegeben.



5.) Koordinaten:

Ein viertes Skript zeichnet in jedem Bild diese Bereiche auf Basis der Koordinaten ein. Die blauen Quadranten dienen dann als Marker für den nächsten Schritt.

6.) Pixel werden in jedem blauen Quadranten gezählt und in einer Excel automatisch sortiert:

Dazu wird jede Einheitszelle (EZ) betrachtet und die Anzahl an Pixel gezählt. Insgesamt gibt es 10 Zustände:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
43	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
44	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
46	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
49	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
56	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
57	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
61	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

EZ0 = 0 grünen Pixel (leer)

EZ1 = 1 grünen Pixel

...

EZ9 = 9 grüne Pixel (voll gefüllt)

Anschließend werden alle EZ gezählt (Summe) und angenommen, dass die voll gefüllt (9 Pixel) sind →
Nenner = Summe EZ*9.

Im Zähler sind die tatsächlichen EZ-Werte enthalten. Bsp.: EZ9 mit 9 Pixeln gibt es 3-mal und E1 mit 1 Pixel gibt es 20-mal →
Zähler = EZ9*9 + ... + EZ1*1 = 3*9 + ... + 20*1

Für die rel. Dichte wird dann geteilt: Zähler/Nenner

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse:

Um die entwickelte automatische Bildanalyse zu validieren wurden Messdaten realer Baujobs mit den Ergebnissen der entsprechenden Analyse verglichen. Auf dieser Basis wurde ein lineares

Regressionsmodell erstellt. Der Regressionskoeffizient dieses Modells liegt bei 0,9578 (siehe auch Abbildung 7), d.h., dass über 95 % der Messwerte mit dem Modell erklärt werden können was einer hohen Übereinstimmung und Validität des Modells entspricht.

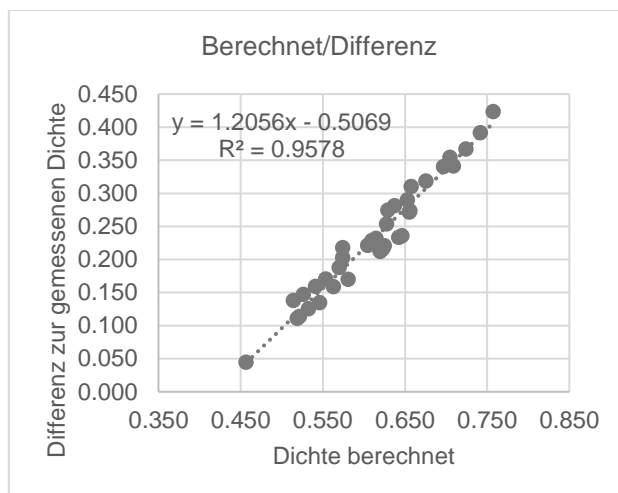


Abb. 7: Regressionsmodell der automatischen Bildanalyse

Arbeitspaket 2 wurde damit abgeschlossen. Der zweite Meilenstein „Erreichen anforderungsge-rechter Grünteileigenschaften“ konnte erreicht werden.

Arbeitspaket 3: Identifizierung pulverspezifischer Sinterstrategien

Durchgeführte Arbeiten:

Der Start von Arbeitspaket 3 hat, sich wie bereits zu Beginn des Berichts beschrieben, auf Grund anhaltender technischer Probleme und Defekten am Sinterofen des IAPT mehrfach verschoben und führte schließlich zu der Notwendigkeit das Projekt zu verlängern. Im Rahmen eines hybriden Treffens des projektbegleitenden Ausschusses am 11.04.2024 wurde nach einer ausführlichen Vorstellung der bisherigen Projektergebnisse insbesondere die Weiterführung von AP3 diskutiert. Hierbei zeigte sich, dass vor allem die Industrievertreter das größte wirtschaftliche Potential in der Pulvervariante 1 (wasserverdüst, siehe auch Ausführungen zu AP1) sehen. Auf Grund der zeitlichen Einschränkungen durch die beschriebenen Verzögerungen, wurde daher im Rahmen des pbA-Treffens entschieden, dass abweichend vom Projektantrag, nur diese Pulvervariante Gegenstand der weiteren Untersuchungen zur Sinterstrategie sein soll.

Die Entbinderung aller Probekörper wurde in einem Muffelofen der Fa. Nabertherm (Modell L24/11/BO) durchgeführt. Hierbei wurde ein bewährter Standard-Entbinderungszyklus verwendet (siehe Tabelle 2).

Tab. 2: Entbinderungszyklus

Temperatur 1 [°C]	Temperatur 2 [°C]	Haltezeit [min]	Rampe [°C/min]	Atmosphäre
20	345	-	16	Umgebung
345	345	120	-	Umgebung
345	20	Unkontrolliertes Abkühlen		Umgebung

In 3 Vorversuchen zur Ermittlung geeigneter Haltetemperaturen auf dem verwendeten Sinterofen der Fa. Desktop Metal wurde anschließend bestimmt, ab welcher Temperatur überhaupt Sinter-

diffusionsprozesse eintreten und die Metallpartikel der entbinderten Braunteile metallische Verbindungen eingehen. Hierbei wurde eine minimale Haltetemperatur von 1325°C ermittelt. Da die maximale Sintertemperatur des Ofens bei 1350°C liegt, wurden anschließend zwei mögliche Sinterstrategien abgeleitet, die anschließend auf dem Ofen getestet wurden. Diese beiden Zyklen sind in Abbildung 8 dargestellt.

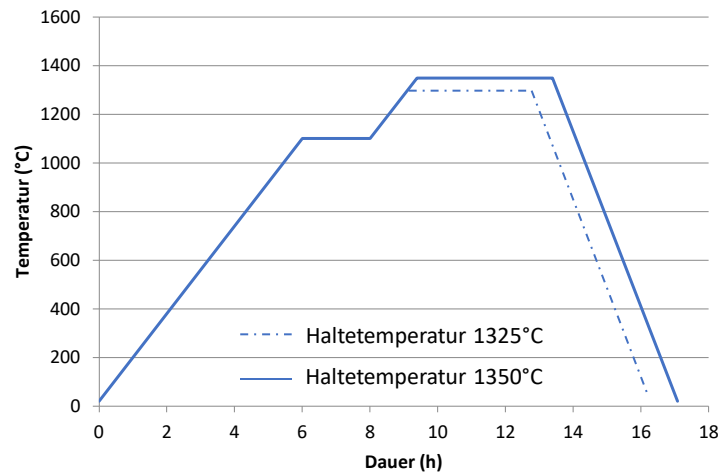


Abb. 8: Untersuchte Sinterzyklen

Da die Bindermenge beim Binder Jetting im Vergleich zum Metallpulverspritzguss ungleich geringer ausfällt, wird keine spezifische Haltestufe zur Backbone-Entbinderung angefahren, sondern etwas flacher (3°C/min) auf eine Vorsinterstufe (1100°C) geheizt. Die Backbone-Entbinderung findet dann während dieser Rampe statt. Anschließend wird die finale Sintertemperatur angefahren und für zwei Stunden gehalten. In Abbildung 9 sind Schlibfbilder von Proben dargestellt, die entsprechend der in Abbildung 9 gezeigten Zyklen gesintert wurden.

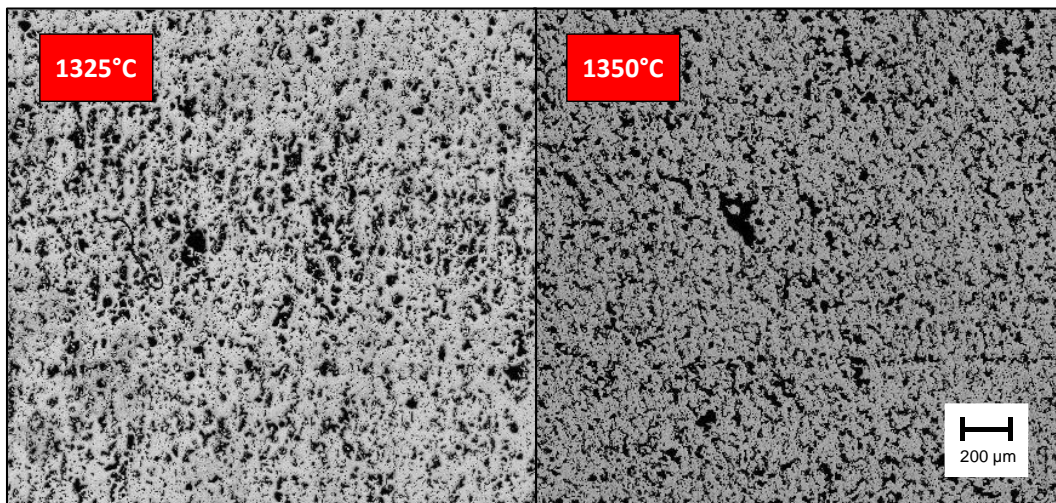


Abb. 9: Schlibfbilder von untersuchten Proben der beiden Sinterzyklen

Bei 1325°C wurden mittels Schlibfbildanalyse Dichtewerte zwischen 75% und 85% gemessen, während für 1350°C Dichten bis zu 94% gemessen werden konnten. Hierbei fällt vor allem die große Streuung der Werte auf. Eine weitere Untersuchung der Sinterstrategien wäre sinnvoll, ist aber stark eingeschränkt durch den verwendeten Sinterofen, der die benötigten Temperaturprofile nur unzureichend abbilden kann. Während längere Haltezeiten zu einer Vergrößerung des

Gefüges und hierdurch zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen würden, sind höhere Haltetemperaturen durch die bereits erreichte Maximaltemperatur nicht möglich. Zusätzlich lässt die große Streuung der gemessenen Dichtewerte einen Rückschluss auf große Temperaturgefälle im Ofenraum schließen. Eine sinnvolle Entwicklung von Parametern für den industriellen Einsatz im Industrieumfeld konnte daher nicht durchgeführt werden. Auf die Beauftragung von Dauerfestigkeitsversuchen mit Umlaufbiegeproben wurde daher verzichtet.

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse:

Im Rahmen vom AP3 konnten initiale Sinterstrategien für die gewählte Materialvariante (316L, wasserverdüst) ermittelt werden und bieten daher ein großes Potential für künftige Anwendungen, da der sehr geringe Materialpreis von unter 11 €/kg Metal Binder Jetting deutlich attraktiver werden lässt. Leider muss festgestellt werden, dass Meilenstein 3, also das Erreichen einer ausreichenden Bauteilqualität mit dem am IAPT derzeit vorhandenen Equipment nicht möglich war. Zusätzlich wurde auf Grund eines Defektes am Sinterofen eine Projektverlängerung beantragt und mit AP4 etwas früher begonnen. Am IAPT wurden hieraus Schlüsse gezogen und zur Mitte 2024 ein neuer Sinterofen der Fa. MUT beschafft. Dieser Ofen wurde im November 2024 in Betrieb genommen und wird für künftige Entwicklungsprojekte den bisherigen Sinterofen der Fa. Desktop Metal ablösen.

Arbeitspaket 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurde ein holistisches Modell der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den MBJ Prozess entwickelt, mit dem unter Einbezug aller relevanten Daten, eine sehr genaue Vorhersage der Fertigungskosten getroffen werden kann. Umgesetzt wurde das Modell in Microsoft Excel unter Zuhilfenahme von Visual Basic. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind beispielhaft einige der einfließenden Parameter für die Formgebung dargestellt.

Tab. 3: Kostenmodell-Parameter für die Formgebung

Kategorie	Parameter	Einheit
Prozess	Bauraum einer Maschine	cm ³
	Grundfläche des Bauraums	cm ²
	Packdichte im Baujob	%
	Schrumpfungsfaktor beim Sintern	%
	Anzahl der Teile pro Druckvorgang	
	Grundfläche einer Maschine	m ²
	Gesamtkosten Stellplatz (n Maschinen)	€
	Rüstzeit pro Baujob	h
	Gesamtrüstzeit in Stunden	h
	Stundensatz Techniker	€/h
	Kosten des Rüstvorgangs	€
	Anschaffungskosten einer Maschine	€
	Benetzungsrate	cm ³ /h
	Benetzungszeit pro Baujob	h
	Schichthöhe	µm
	Schichtauftragszeit für eine Schicht	s

	Anzahl der aufgetragenen Schichten	
	Schichtauftragszeit pro Baujob	h
	Gesamtzeit pro Baujob	h
	Produktivität einer Maschine	cm ³ /h
	Stundensatz einer Maschine	€/h
	Anschaffungskosten von n Maschinen	€
	Produktivität von n Maschinen	cm ³ /h
	Stundensatz von n Maschinen	€/h
	Auslastung n Anlagen in Stunden	h
	Auslastung einer Anlage in Stunden	h
	maximaler Auslastungsgrad über 24h/Tag	%
	theoretische Auslastung einer Anlage	%
	unkalierte Auslastung von n Anlagen	%
Energie	Energieverbrauch einer Maschine	W
	Energieverbrauch von n Maschine	W
	theoretische Zeit per Teil bei n Anlagen	h
	Energiekosten von n Anlagen	€/part
Material	Materialkosten(Grundwert)	€/kg
	Gesamtmaterialgewicht pro Jahr	kg/Jahr
	Skalierungsfaktor	%
	Materialkosten(skaliert)	€/kg
	Materialverlust pro Volumen	%
	Materialkosten pro Teil	€/part

Nach Anpassung veränderlicher Parameter wie z.B. den Materialkosten, Bauraumausnutzung oder dem Bauteilvolumen können mit Hilfe des Modells Bauteilpreise für verschiedene Losgrößen berechnet werden. Für größere Stückzahlen sinken hierbei die Kosten pro Bauteil, insbesondere weil Abschreibungskosten der verwendeten Anlagentechnik weniger ins Gewicht fallen. Ein beispielhaftes Berechnungsergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt.

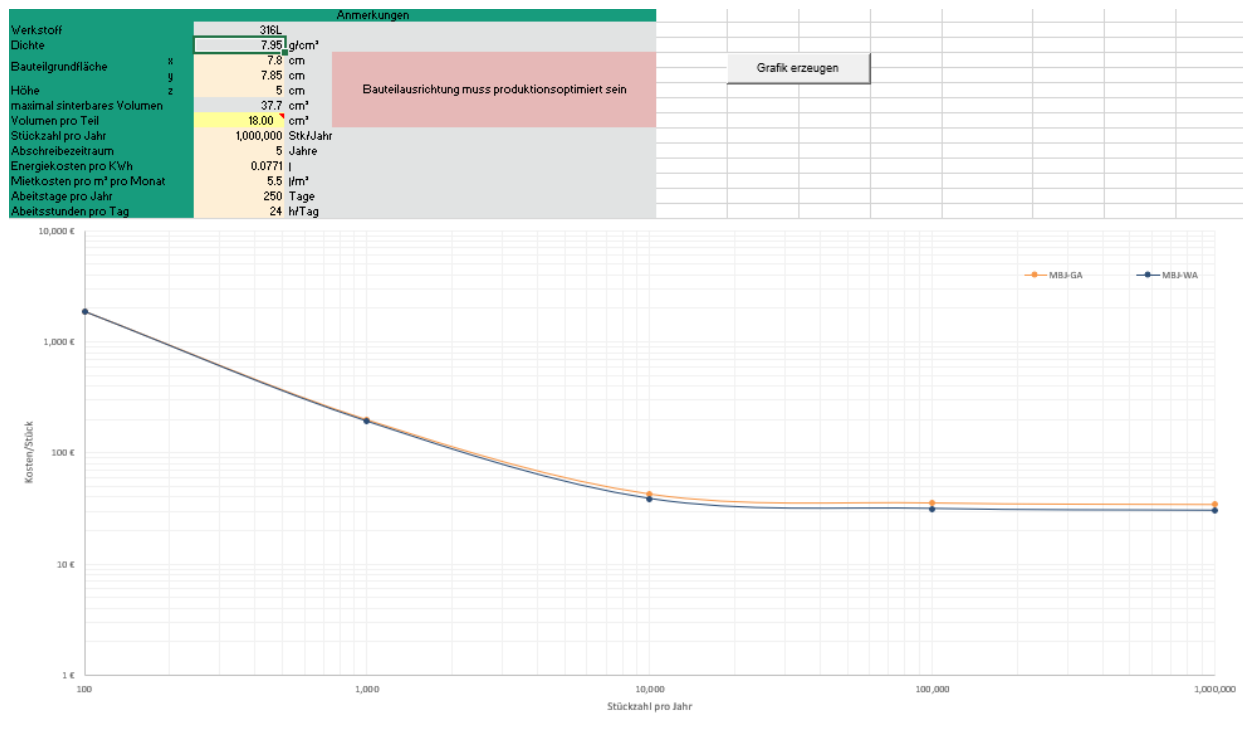


Abb. 10: Bildschirmfoto des Kostenmodells in MS Excel

Mit Hilfe des beschriebenen Kostenmodells wurden anschließend Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der unter AP1 definierten Demonstratoren durchgeführt. In Abb. 11 ist beispielhaft die Berechnung eines Volkswagen-Demonstrators gezeigt.

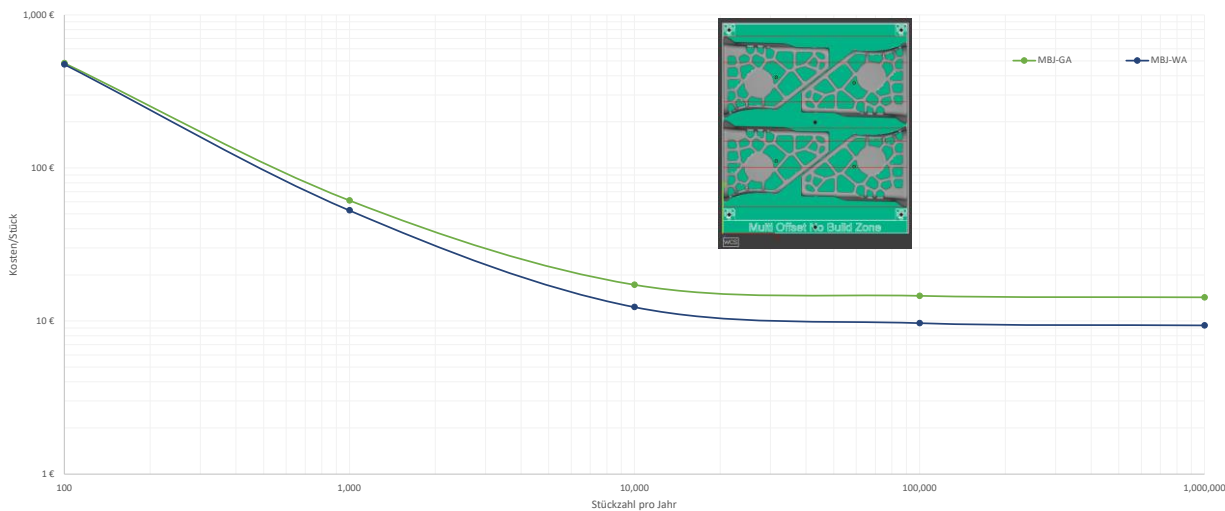


Abb. 11: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung VW-Demonstrator (gelb: 316L gasverdüst, blau: 316L wasserverdüst)

Zusätzlich wurde der Demonstrator entsprechend Projektantrag im MBJ aus der untersuchten Legierung 316L aus kosteneffektivem wasserverdüsteten Pulver gefertigt (siehe Abb. 12).

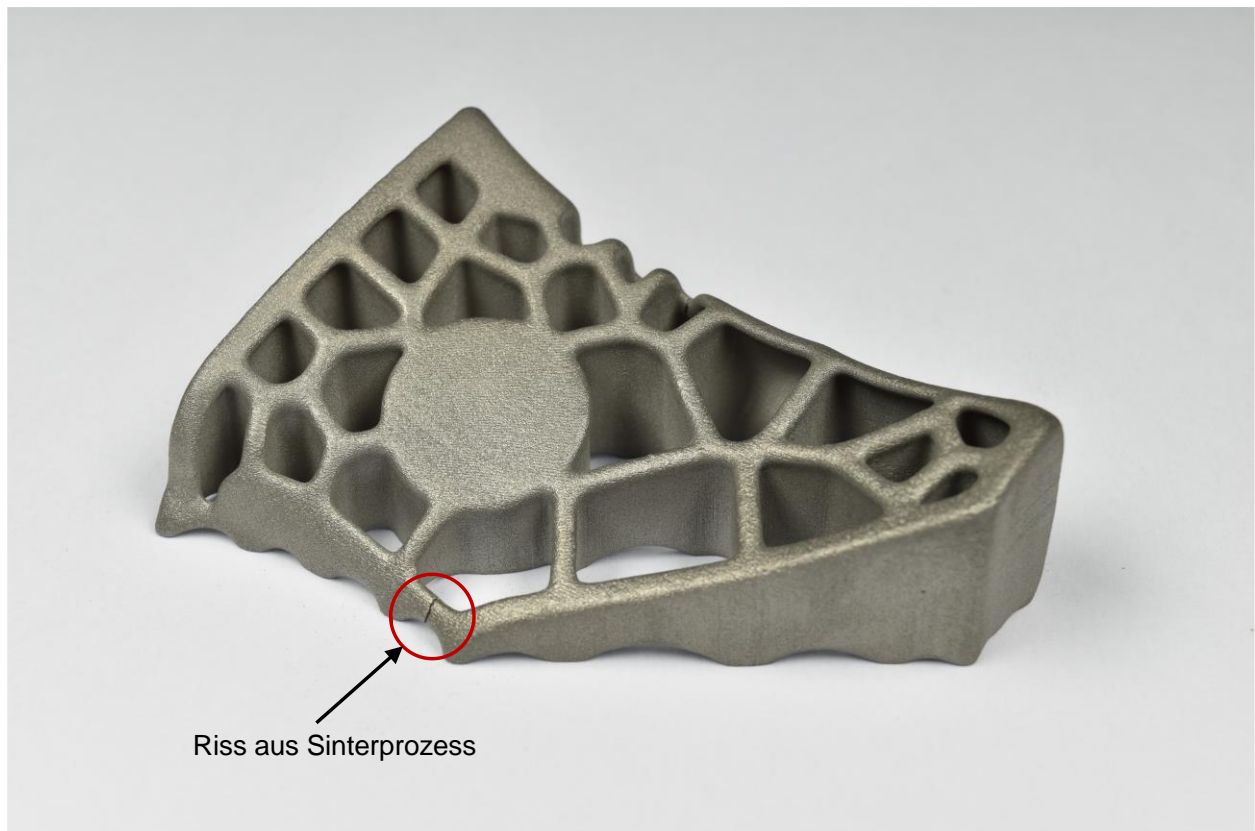


Abb. 12: Gesinterter VW-Demonstrator

Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse:

Im Rahmen vom AP4 konnte ein Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung entwickelt werden, das als gute Möglichkeit dient Business Cases für den MBJ-Prozess zu identifizieren. Für große Stückzahlen oberhalb von 10.000 Stk. / Jahr können mit dem im Projekt qualifizierten kosteneffizienten Pulver Bauteilpreise in Richtung 10 € erreicht werden.

Bei der Herstellung von Demonstratorbauteilen wurden vergleichbar zu AP3 Probleme bei der Temperaturverteilung im Sinterofen der Fa. Desktop Metal verzeichnet, die teilweise zu Spannungsrissen in den Bauteilen führten (siehe Abb. 12).

Insgesamt konnte das Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden. Das Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann bei künftigen Betrachtungen herangezogen werden, um Bauteilkosten effektiv abzuschätzen und Potentiale für MBJ in industriellen Anwendungen offenzulegen.

2. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Projektjahr	2022	2023	2024
EG13 – 1	5,6	2,7	5,7
EG13 – 2	1,4	2,2	2,6
EG13 – 3	-	0,6	-
EG13 – 4	-	1,0	-
EG13 – 5	-	1,0	-

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle in den Arbeitspaketen 1 bis 4 geleisteten Arbeiten entsprechen den Ausführungen des Projektantrags und waren notwendig zur Erreichung der Projektziele

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis heute)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Präsentation und Dokumentation des aktuellen Stands des Projektes	Ergebnisaustausch mit Industrieunternehmen, Diskussion, bedarfsgerechte Abstimmung	Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	22.09.2022, 18.10.2022, 11.04.2024
Präsentation des Projektes im Rahmen des „IAPT-Seminars“	Zugänglichkeit der Erkenntnisse für alle Mitarbeiter des IAPT	Hamburg	24.10.2022
Vorstellung des Projektzwischenstands im Rahmen der FAT-AK17-Sitzung	Verbreitung der Projekthinhalte an Fachpublikum aus der Automobilbranche	Virtuell, Berlin	07.02.2023
Vorstellung des Projektzwischenstands im Rahmen der FAT-AK17-Sitzung	Verbreitung der Projekthinhalte an Fachpublikum aus der Automobilbranche	Berlin	05.03.2024
Vorstellung der digitalen Bildanalyse	Verbreitung der wissenschaftlichen Erkenntnisse an Fachpublikum	WorldPM 2024, Yokohama	16.10.2024
Integration in Institutspräsentation und Erstellung eines Plakats im Institut	Verbreitung der Projektidee an Industriekunden, Gäste und Schulungsteilnehmer des Fraunhofer IAPT	Hamburg	ab Projektstart

- Geplante Transfermaßnahmen (auch nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektdarstellung auf der Homepage des Fraunhofer IAPT	Verbreitung der Projektidee an Fachinteressierte	Hamburg <i>Webseite Fraunhofer IAPT</i>	Geplant für 2025
Vorstellung des Projektes im Rahmen des Industrienetzwerks „IAMHH“	Verbreitung der Projektidee an Fachinteressierte	Hamburg <i>IAMHH e. V.</i>	Geplant für 2025
Vorstellung von wissenschaftlichen Ergebnissen auf Konferenzen (z. B. als Vortrag oder Plakat)	Verbreitung der wissenschaftlichen Erkenntnisse an Fachpublikum	Diverse z. B. <i>World PM, Euro PM</i>	Ab Projektende
Erstellung von Publikationen und Beiträgen für Journals und Zeitschriften	Verbreitung der wissenschaftlichen Erkenntnisse an Fachpublikum	Diverse z. B. <i>Additive Manufacturing, Materials and Design</i>	Ab Projektende

Bekanntmachung der Ergebnisse im Rahmen des Fraunhofer-Jahresberichts	Wissenstransfer an bestehende Kontakte und neue Interessierte Firmen	Hamburg	Februar 2025
Übertragung der Projekterkenntnisse in weiterführende Forschungs- und Industrieprojekte	Fortführung und Vertiefung der Forschungsinhalte mit weiteren Partnern und Branchen	Diverse z. B. <i>KMU-innovativ</i>	ab Projektende
Industrialisierung der digitalen Bildanalyse	Integration bei produzierenden KMU	Diverse	Ab Projektende
Industrialisierung der Pulverkonditionierung für kosteneffektive Stahlpulver	Integration bei produzierenden KMU	Diverse	Ab Projektende

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2020)

Nr.	Titel
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
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022
- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023

- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023
- 377 Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, 2024
- 378 Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen, 2024
- 379 Dynamische Erfassung und Beurteilung von Situationsbewusstsein im Kontext des automatisierten Fahrens, 2024
- 380 Charakterisierung zukunftssträchtiger Zellmaterialien im Hinblick auf deren Anforderungen an das Batteriepack, 2024
- 381 Fahrdynamik des Automatisierten Fahrens, 2024
- 382 Forschungsperspektiven für Mobilität in klimaneutralen Städten 2045 - Explorative Szenarioanalyse und innovationspolitische Handlungsempfehlungen, 2024
- 383 Codierung und Analyse der AO-Klassifikation für Fuß- und Sprunggelenksverletzungen zur Evaluation potentieller Langzeitfolgen, 2024
- 384 EMV-Nachweis der Störfestigkeit auf Komponenten- und Systemebene für FailOp ab Level 3 im Hinblick auf die Funktionssicherheit - Erster Projektteil, 2024
- 385 Retrospektive Berechnung des Crashpulses aus Fahrzeugdeformationen basierend auf EES-Berechnung von Fahrzeug-Voxelmodellen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes, 2024
- 386 Energieverluste infolge von Rad-/Achsfelstellungen am schweren Sattelzug bei realen Umgebungsbedingungen, 2025
- 387 Recycling von Permanentmagneten und Bewertung der Rezyklierbarkeit von Permanentmagnet-Synchronmotoren, 2025
- 388 Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von 3D-Crash-Strukturen von Personenkraftwagen, 2025
- 389 Bewertung und Erhöhung des Potentials von Binder Jetting durch Nutzung kosteneffizienter Stahlpulver für den Einsatz in der Automobilindustrie, 2025

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2025

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

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

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik