

Abschlusszusammenfassung zum Forschungsprojekt IGF 20933 N  
LPBF-Pulverbaukasten

**Projektdaten:**

Projekttitel: LPBF-Pulverbaukasten  
zur gezielten Einstellung  
von Bauteileigenschaften

Projektnummer: IGF 20933 N

Laufzeit: 01.11.2019 – 30.04.2022

Berichtszeitraum: 01.11.2019 – 30.04.2022

Gesamtmittel Euro: 443.318,97 €

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM  
Wiener Straße 12  
28359 Bremen

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. Busse  
Sachbearbeiter: Herr Norda  
Tel. 04212246231

Forschungseinrichtung 2: RWTH Aachen University  
Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau  
Augustinerbach 4  
52062 Aachen

Leiter Forschungseinrichtung: Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann  
Sachbearbeiter 1: Frau Köhler  
Tel. (0)241 - 80 99245

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
1 Thema	1
2 Problemstellung	1
3 Ziele	1
4 Vorgehensweise	1
5 Ergebnisse	1
Praktischer	
6 Nutzen/Wirtschaftlichkeit	5
Umsetzung und	
7 Ergebnistransfer	6
8 Dokumentation	6

**Unterschrift Projektleiter Forschungseinrichtung 1:**



**Unterschrift Leiter des  
PA**



**Unterschrift Projektleiter Forschungseinrichtung 2:**



## 1. Thema

Im durchgeführten Projekt wird eine Methodik zur Realisierung von LPBF-Bauteilen mit individuell auf das spezifische Anforderungsprofil zugeschnittenen Eigenschaften durch die Verarbeitung von Pulvermischungen und die in-situ-Legierungsbildung im LPBF-Schmelzbad vorgestellt. Dieser Ansatz kombiniert die werkzeuglose, geometrisch flexible Urformung mit dem Legieren des Werkstoffs in einem einzigen Prozessschritt. Mit einer begrenzten Auswahl an Ausgangspulvern, die in großen Mengen kommerziell verfügbar sind, lassen sich nach dem Pulverblockprinzip sehr flexibel zahlreiche neue Legierungen mit einem maßgeschneiderten Eigenschaftsprofil herstellen.

## 2. Problemstellung

Traditionell hergestellte Metallbauteile haben sich im Laufe der Jahre hinsichtlich der verwendeten Materialien stark spezialisiert. Für zahlreiche Anwendungen wurden Legierungen mit besonderen Eigenschaften entwickelt. Auf dem Markt gibt es daher eine Vielzahl von Materialien, die für unterschiedliche Produktionsketten geeignet sind. Bei der additiven Fertigung, insbesondere beim laserbasierten Pulverbettsschmelzen (LPBF), das heute bereits weit verbreitet ist, bieten viele Anlagenhersteller nur eine begrenzte Auswahl an Metallpulvern an. Insbesondere bei korrosionsbeständigen hochlegierten Stählen gibt es in der konventionellen Produktion viele Legierungsvarianten, darunter austenitische, rost- und säurebeständige Stähle, preiswerte ferritische, hitze- und wärmebeständige Legierungen, Duplex- und Superduplexstähle und korrosionsbeständige martensitische Stähle.

## 3. Ziele

Im Rahmen des Forschungsprojekts soll die Machbarkeit des vorgeschlagenen Verfahrens am Beispiel der Werkstoffpalette korrosionsbeständiger Stähle nachgewiesen werden. Die Teilziele des Projekts sind wie folgt: Auswahl der Legierungszusammensetzung auf Basis des werkstoffspezifischen Anforderungsprofils, Bestimmung der Pulverzusammensetzung durch thermodynamische Berechnungsmethoden, Pulveraufbereitung durch angemessene Misch- und Homogenisierungsverfahren, Ermittlung der optimalen Laserprozessparameter, Charakterisierung des Gefüges und die Qualifizierung der mit dieser Methode hergestellten Materialien durch Prüfung ihrer mechanischen und korrosiven Eigenschaften.

## 4. Vorgehensweise

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete unterteilt (s. Abbildung ABC). Arbeitspaket (AP) 2 nimmt eine Sonderstellung ein, da diese Arbeiten immer neben den anderen APs laufen müssen. Es dient zur kontinuierlichen Anpassung und Abschätzung des Legierungsdesigns. Die Ergebnisse der metallurgischen Analyse in AP6 werden zur Bewertung von AP3-5 herangezogen, und bestimmen die weiteren Schritte aller anderen Arbeitspakete.

IFAM IWM	AP1	Festlegung der Ziel-Werkstoffeigenschaften Pulverbeschaffung	IFAM IWM PbA	AP2	Thermodynamische Auslegung der Werkstoffkonzepte	IWM
Metallurgische Analyse	AP3	Mischungsversuche im Rakelprüfstand	IFAM	AP4	Herstellung von Probekörpern (LPBF, WBH, mech. Nachbearbeitung)	IFAM IWM
	AP6	Anwendungsorientierte Bauteilprüfung	IFAM IWM	AP7	Entwicklung von Demonstratoren zur Validierung des Prozesses	IFAM IWM PbA

**Abbildung 1:** Arbeitspakete

## 5. Ergebnisse

### Festlegung der Ziel-Werkstoffeigenschaften/ Materialbeschaffung (AP1)

In Absprache mit dem Projektausschuss wurden die angestrebten Materialeigenschaften bereits in der Antragsphase festgelegt. Diese Materialauswahl musste jedoch durch eine umfassende Abstimmung aller Mitglieder bestätigt werden. Dabei fiel die Wahl auf zwei Materialgruppen: Korrosionsbeständige Werkzeugstähle und nichtrostende Super-Duplex-Stähle. Für den Vergleich der physikalischen Eigenschaften wurden die folgenden Referenzmaterialien verwendet.

- Korrosionsbeständiger Werkzeugstahl: 1.4125, X105CrMo17
- Superduplex-Edelstahl: 1.4501, X2CrNiMoCuWN25-7-4

Um die Pulvermischung herzustellen wurden folgende Pulver von den Projektpartnern bereitgestellt:

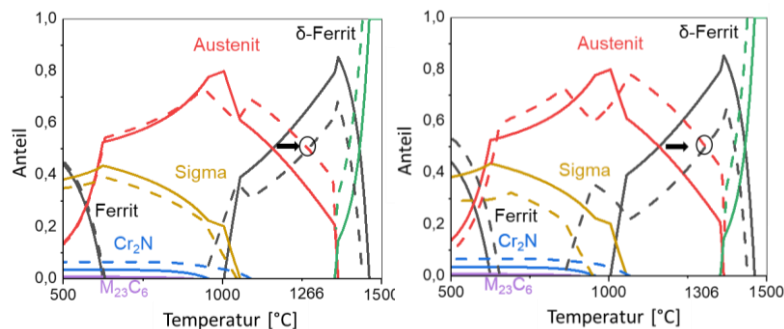
**Tabelle 1:** Zugelieferte Pulver vom PA

Pulver	Menge	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	D90 [ $\mu\text{m}$ ]
1.2344, X40CrMoV5-1, AISI H13 <b>Lieferant 1</b>	22 kg	8,56	17,22	28,53
1.2344, X40CrMoV5-1, AISI H13 <b>Lieferant 2</b>	50 kg	27,39	41,06	58,78
1.4404, X2CrNiMo17-12-2, AISI 316L	60 kg	20,71	35,84	54,32
2205, X2CrNiMoN22-5-3, 1.4462	75 kg	28,32	43,45	62,08
Cr	30 kg	19,98	37,20	54,00
Mo	3 kg	5,62	15,51	38,34
CrN	0,8 kg	21,88	59,66	99,00
FeCrC	5 kg	10,35	23,52	40,85
Cr3C2	5 kg	1,24	6,63	11,52
TiC	3 kg	10,51	28,20	52,15

## Thermodynamische Auslegung der Werkstoffkonzepte (AP2)

### Super-Duplex-Stähle

Die 60er Legierung ist aus 1.4462, 1.4404, CrN, Mo und Cr zusammengesetzt. Die theoretische Gesamtzusammensetzung des Werkstoffs ähnelt der Zusammensetzung des Referenzwerkstoffs. Lediglich der Stickstoffgehalt ist mit  $>0,5\%$  größer als im Referenzwerkstoff. Die 75er Legierung besteht aus 1.4462, 1.4404, CrN, und Cr. Im Gegensatz zur Legierung 60 wird in diesem Fall auf den Zusatz von elementarem Mo verzichtet. Der Grund dafür ist, dass der Schmelzpunkt von Molybdän bei  $2623\text{ }^\circ\text{C}$  liegt, also viel höher als die Liquidustemperatur von legierten Stählen (etwa  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Abbildung 2:** Gleichgewichtsberechnung des entwickelten 60er (links) und 75er (rechts) Super-Duplex Stahls (gestrichelt) im Vergleich zum 1.4501 Referenzwerkstoff (durchgezogen).

### Werkzeugstähle

Im Laufe des Projekts gab es eine Reihe von Iterationsschleifen bei der Entwicklung der optimalen Legierung für den Werkzeugstahl. Daher wird im Folgenden eine Tabelle mit den Zusammensetzungen dargestellt:

**Tabelle 2:** Entwickelte Mischungen für den Werkzeugstahl

Komponente	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Ti	Fe
------------	---	----	----	----	----	---	----	----	----

88er	1,23	0,8	0,4	15,4	1,1	0,8	0,0	0,0	80,2
86er	1,28	0,9	0,4	17,6	1,1	0,9	0,0	0,0	77,8
85er	1,27	0,9	0,4	18,6	1,1	0,9	0,0	0,0	76,9
80er	0,93	0,9	0,5	13,0	1,3	1,2	0,8	2,4	79,1
Referenz	1,05	<1	<1	17	0,6	0,0	0,0	0,0	81,3

### Mischungsversuche im Rakelprüfstand (AP3)

Aus dem AP lässt sich ableiten, dass die optimale Mischzeit für die in den Mischversuchen verwendete Pulvermenge und Mischparameter 15 Minuten beträgt. Die Partikelgröße hat im Vergleich zur Partikelform und -dichte den größten Einfluss auf die Mischergebnisse. Für die Dichte und die Partikelform der gemischten Komponenten wurde kein starker Einfluss festgestellt. Die Mischmethode (Dreidimensionaler Schüttelmischer) wirkt der Entmischung aufgrund der Dichte durch die dreidimensionale Bewegung entgegen. Geringere Abweichungen vom Mittelwert wurden bei niedrigeren Anteilen der gemischten Komponenten festgestellt.

Die Rakeltests haben gezeigt, dass die Partikelgröße den größten Einfluss auf die Elementverteilung hat. Der Einfluss von Dichte und Partikelform wird als gering eingeschätzt. Bei sehr feinen Mischungen trat die Entmischung in Richtung des Beschichters auf. Dort setzten sich die feineren Partikel aufgrund der höheren Adhäsionskraft weiter vorne auf der Plattform ab. Rakeltests zeigten, dass die Schichtdicke und die Geschwindigkeit der Beschichtungsanlage das Rakelverhalten beeinflussen.

### Herstellung von Probekörpern (AP4)

Für alle Pulvermischungen wurden verschiedene Parametervariationen untersucht. Die Parameterkombination in Tabelle 3 wurde für die Duplex-Demonstratoren und die Proben zu den mechanischen sowie anwendungsorientierten Korrosionsprüfungen angewendet. Sie lieferte zuverlässig hohe Bauteildichten.

**Tabelle 3:** Parameterset für die Pulvermischungen

Nr.	Leistung [W]	Geschw. [mm/s]	Hatch [mm]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte [%]	VED [J/mm <sup>3</sup> ]
2	195	800	0,05	7,69	98,59%	121,88

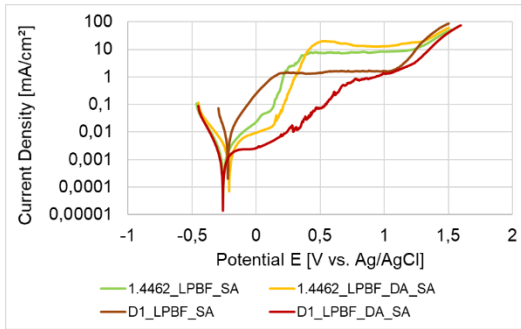
Bei der Verarbeitung der Legierung 88 kam es zu optischen Inhomogenitäten in der Pulverschicht. Die Legierungen 86 und 85 wurden zunächst an kubischen Proben bearbeitet, um die optimalen Parameter zu ermitteln. Beide Legierungen wurden dann zu Korrosions- und Verschleißproben bearbeitet; die Legierung 86 konnte sich ohne Risse auf großflächigen Verschleißproben aufbauen, während die Legierung 85 an den Kanten dieser Proben Kaltrisse entwickelte.

Bei der Bearbeitung der Legierung 80 zu kubischen Probekörpern wurden keine Risse festgestellt; die Entscheidung der EV bedeutete, dass sich das Projekt auf die Legierungen 86 und 85 konzentrieren würde. Aus diesem Grund wurden Korrosions- und Verschleißproben ausgelassen.

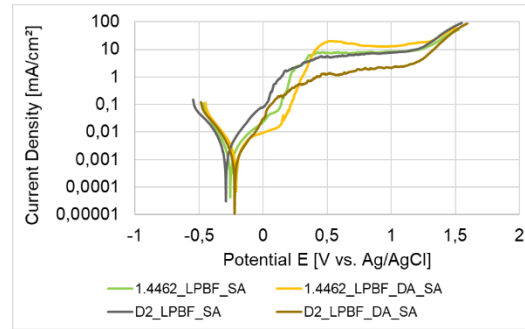
### Anwendungsorientierte Bauteilprüfung (AP5)

#### *Super-Duplex-Stähle*

Abbildung 3 vergleicht 60er und 1.4462 (sehr ähnlich zu 1.4501). Die Ergebnisse zeigen, dass das Diffusionsglühen die Korrosionsresistenz im Vergleich zu den hergestellten Probekörpern verbessert. Auch die Korrosionsbeständigkeit ist im Vergleich zur Legierung 1.4462 verbessert. Dies deutet auf eine homogenere Verteilung der korrosionsbeständigen Elemente in der Matrix der wärmebehandelten Proben hin. Abbildung 4 zeigt das Korrosionsverhalten von 75er im Vergleich zu PBF-LB 1.4462. Hier ist das Korrosionsverhalten sehr ähnlich und die hinzugefügten Elemente haben nur einen geringen positiven Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit.



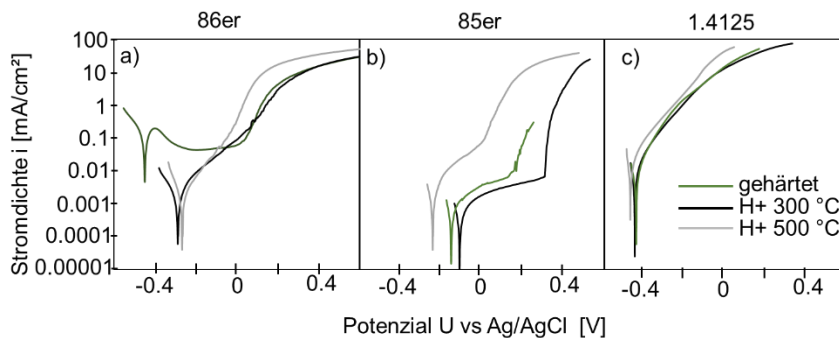
**Abbildung 3:** Korrosionsverhalten vorlegiertes Pulver vs. 60er Mischung.



**Abbildung 4:** Korrosionsverhalten vorlegiertes Pulver vs. 75er Mischung.

### Werkzeugstähle

Die Korrosionsbeständigkeit der entwickelten Werkzeugstähle wurde hinsichtlich der Neigung für interkristalline Korrosion in 0,1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sowie hinsichtlich Lochkorrosionsneigung in 3,5% NaCl charakterisiert. Die Werte sind in Abbildung 5 zu sehen.

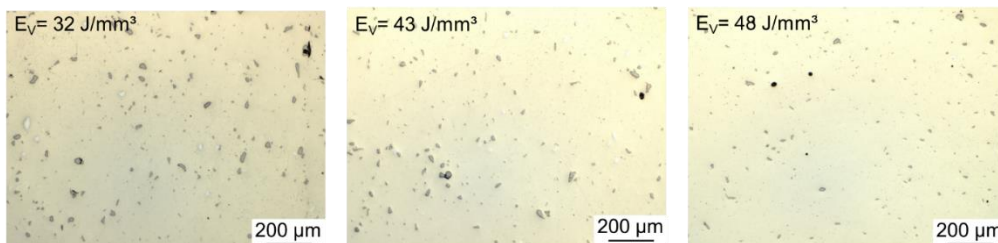


**Abbildung 5:** Stromdichte-Potenzial-Kurven der Korrosionsmessungen in 3,5% NaCl der 86er, 85er und 1.4125 Referenzlegierung im gehärteten sowie gehärtet und 300°C und 500°C angelassenen Zustand.

### Metallurgische Analyse (AP6)

#### Werkzeugstähle

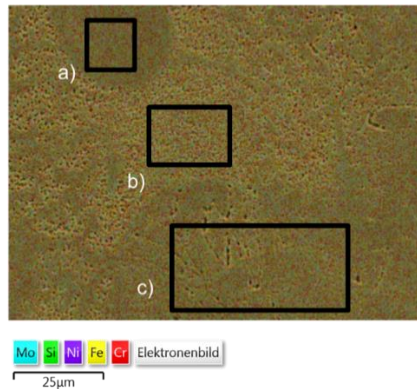
Die metallografische Analyse der 80 Legierungen bestätigt, dass das TiC gleichmäßig in der Struktur verteilt ist. Mit steigendem Energieeintrag löst sich das TiC während des Prozesses zunehmend auf und scheidet sich als sehr feines TiC wieder aus. Ein Beispiel für eine lichtmikroskopische Aufnahme der Legierung 80 ist in Abbildung 6 dargestellt. Die grauen Karbide werden kleiner und weniger, wenn der Energieeintrag steigt. Die Auswertung der Bildanalyse ergab keine lineare Korrelation zwischen den Veränderungen des Energieeintrags und den TiC-Resten. Eine systematische Analyse ist erforderlich, um die Abhängigkeiten besser zu verstehen.



**Abbildung 6:** Mikrostruktur der 80er Legierung mit unterschiedlichem Energieeintrag während des PBF-LB Prozesses und daraus resultierenden unterschiedlichen Mengen unauflöstem TiC.

## Super-Duplex-Stähle

Die Ergebnisse der EDX-Messung von Mischung 60er sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die gemessenen und berechneten Pulverzusammensetzungen sind jeweils als Referenz angegeben.



**Abbildung 7:** EDX Aufnahme der 60er Mischung

**Tabelle 4:** Mit EDX gemessene chemische Zusammensetzungen

Element	a) %	b) %	c) %	powder % (analysed)
Si	0.64	0.62	0.63	0.59
Cr	27.67	27.74	26.80	27.02
Fe	Bal	Bal	Bal	Bal
Ni	6.55	6.62	6.83	6.23
Mo	4.44	4.73	4.68	4.82

## Entwicklung von Demonstratoren zur Validierung des Prozesses (AP7)

Um die Demonstratoren möglichst anwendungsnah zu gestalten, wurden verschiedene Geometrien dem PA in den Projekttreffen vorgestellt und bewertet. Schließlich wurde sich auf eine Rotorstruktur für den Duplexstahl und eine Messerstruktur für den Werkzeugstahl geeinigt. Die Demonstratoren wurden anschließend am IFAM final gestaltet. Die Messerstruktur wurde als STL-Datei an das IWM verschickt. Beim Bau des Demonstrators am IWM gab es an den überhängenden Strukturen Probleme mit Verzug im Bauprozess. Für eine erfolgreiche Fertigung von Bauteilen müssen für den Werkzeugstahl die Supportstrukturen und die Scanstrategie hinsichtlich spannungsarmer Prozessführung optimiert werden.



**Abbildung 8:** Abbildung des gedruckten Duplex-Demonstrators (Groß: 75er Mischung; Klein: 60er Mischung)

## 6. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Unternehmen erhalten durch das gesammelte Wissen über die Möglichkeiten und Herausforderungen des LPBF-Pulverbaukastenprinzips einen Wettbewerbsvorteil auf dem Markt. Auf diese Weise können Materiallösungen kostengünstig und nach den spezifischen Einsatzbedingungen des Endanwenders realisiert werden. Der Konzeptnachweis des LPBF-Pulverbaukastens ermöglicht es Pulverherstellern, ihr Portfolio durch die Produktion der richtigen Pulver zu erweitern und ihre Produktionsmengen zu optimieren. Die erweiterte Produktpalette wird auch die Wettbewerbsfähigkeit von KMU verbessern, die den Betrieb von LPBF-Anlagen als Dienstleistung anbieten. Die Weiterentwicklung und Umsetzung des vorgeschlagenen Konzepts wird es ihnen ermöglichen, ihre Angebot zu erweitern, die Lieferzeiten zu verkürzen und Maschinen und Anlagen in erheblichem Umfang zu nutzen.

## 7. Umsetzung und Ergebnistransfer

Das Forschungsprojekt wurde von den Forschungseinrichtungen im ständigen Austausch mit den beteiligten Firmen im projektbegleitenden Ausschuss (PA) durchgeführt. Bei den halbjährlichen

Treffen des PA konnten die Arbeiten intensiv diskutiert werden. Folgende Transfermaßnahmen wurden im Projektverlauf durchgeführt bzw. stehen noch bevor.

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Information der Unternehmen im PbA	-Zusammenfassung der Ergebnisse für wirtschaftliche Verwertung	a) Abschlussbericht und Forschungsreport auf FSV-Homepage b) Jahresbericht der Forschungsstellen	Q2 in 2022
Information in Fachausschüssen	Information der Fachöffentlichkeit -Austausch mit Industrievertretern	a) FPM in Hagen b) DGM FA Additive Fertigung	Q3 in 2022
Qualifizierung von Personal	Ergebnistransfer als neuer „Stand der Technik“ an Studierende	Beispiele in Vorlesungen a) Pulvermetallurgie (IWM) b) endformnahe Fertigungstechnologien	jährlich im Wintersemester
Publikation der Projektergebnisse	- Information der Fachöffentlichkeit - Dokumentation wissenschaftl. Ergebnisse - Austausch mit anderen Forschungsgruppen	a) Vorträge auf Fachkonferenzen (EuroPM, Hagener Symposium, u.a.) b) Veröffentlichung in Fachzeitschriften (VDI Konstruktion, Pressemitteilung, Mater. Sci. Eng., Metall AM)	a) Okt bzw. Nov 2022 b) 2022/2023
Information auf Messen und Tagungen für Anwender	- Information der Fachöffentlichkeit - Austausch mit Anwendern - Ausstellung Demonstratorbauteil	a) Formnext b) Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials c) Hagener Symposium	2022/2023
Consulting	Anwendung der Methodik LPBF-Pulverbaukasten	Beratung im Arbeitsalltag der Consultingfirmen	ab 2022

## 8. Dokumentation

Die Langfassung des Abschlussberichtes zum IGF-Vorhaben 18968 kann bei der FSV angefordert werden. Im Verlauf des Projektes wurden die aktuellen Forschungsergebnisse von den Forschungseinrichtungen in folgenden wissenschaftlichen Aufsätzen **veröffentlicht**:

- Norda, M., Köhler, M..L. et al.: „Influence of Powder Properties on the Mixing Behavior of Metal Powders in LPBF“, Conference Paper, EuroPM 2021
- Norda, M., Köhler, M..L. et al.: „ Processing and Corrosion Behaviour Of Metal Powder Blends In LPBF“, Conference Paper, AWT Fachkonferenz 2022
- Köhler, M..L et al.: „Vom Pulver zum additiv hergestelltem Bauteil – Teil 2: Potenziale durch Pulvermischungen“ in der Zeitschrift „Werkstoffe“
- Köhler, M. L. et. al.: “Influence of Cr3C2 Additions o AISI H13 Tool Steel in the LPBF Process”, Steel Research International
- Köhler, M. L. et. al.: „Influence Of The Powder Particle Size Distribution On The Microstructure Of Laser Powder Bed Alloyed Cold Work Tool Steel“, EuroPM2021
- Köhler, M. L. et. al.: „Resistance Against Abrasive Wear and Corrosion of a Laser Powder Bed Alloyed High Chromium Tool Steel“, Tooling2022
- Köhler, M. L. et. Al: “Resistance Against Abrasive Wear and Corrosion of Laser Powder Bed Alloyed High Chromium Tool Steels”, Steel Research International

### Geplant:

- Köhler, M. L. et. al: “Resistance Against Abrasive Wear and Corrosion of Laser Powder Bed Alloyed High Chromium Tool Steels“, Steel Research International
- Köhler, M. L. et. al.: „Towards carbide rich tool steels in PBF-LB: TiC additivation of AISI H13“

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20933 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

