Abschlusszusammenfassung zum Forschungsprojekt IGF 21074BG Maß-HIP-3D

Projektdaten:

Projekttitel:	Maßgeschneiderte verschleißfeste Verbundbauteile durch Additive Manufacturing und heißisostatisches Pressen
Projektnummer:	IGF 21074 BG
Laufzeit:	01.04.2020 – 30.06.2022
Berichtszeitraum:	01.04.2020 – 30.06.2022
Gesamtmittel Euro:	533.507,35 Euro

Forschungseinrichtung 1:	RWTH Aachen University Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau Augustinerbach 4, 52062 Aachen
Leiter Forschungseinrichtung 1:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann
Sachbearbeiterin 1:	Markus Mirz/Simone Herzog, +49 241 80-96514
Forschungseinrichtung 2:	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Bremen IFAM-HB Wiener Straße 12, 28359 Bremen
Leiter Forschungseinrichtung 2:	Prof. Dr. Mattias Busse
Sachbearbeiter 2:	Bastian Barthel/Claus Aumund-Kopp, +49 421 2246-226
Forschungseinrichtung 3:	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden IFAM-DD Winterbergstraße 28, 01277 Dresden
Leiter Forschungseinrichtung 3:	Prof. Dr.-Ing. T. Weißgärber
Sachbearbeiterin 3:	Marie Franke-Jurisch, +49 351 2537-425

Inhaltsverzeichnis

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

1. Thema

Maßgeschneiderte verschleißfeste Verbundbauteile durch Additive Manufacturing und heißisostatisches Pressen

2. Problemstellung

Die pulvermetallurgischen Verfahren Additive Manufacturing (AM) und Heißisostatisches Pressen (HIP) können vielfältig kombiniert werden. Zwar wird HIP bereits genutzt, um mechanische Eigenschaften wie z. B. Dauerfestigkeit von AM-Bauteilen zu verbessern. Aber erst eine umfassende Prozesskette unter Hinzuziehung einer numerischen Simulation ermöglicht es, einfach und flexibel Hochleitungsbauteile zu fertigen, die konventionell nur mit sehr hohem Aufwand möglich wären.

3. Ziele

- Ermittlung von wissenschaftlich und wirtschaftlich optimalen Parametersätzen zur additiven Verarbeitung von verschleißfestem, hochkohlenstoffhaltigem Stahl durch Powder Bed Fusion - Electron Beam und Metal Binder Jetting
- Adaption bestehender FEM-Ansätze zur Geometrieoptimierung der additiv gefertigten Kapseln durch Bestimmung von Werkstoffparametern
- Entwicklung einer HIP-geeigneten Löttechnologie zum Fügen eines Pulverfüllrohrs an Kapselwerkstoffe mit geringer Schweißeignung
- Ausarbeitung einer geeigneten Wärmebehandlungsroute zur Vergütung der Verbundbauteile bestehend aus verschleißfestem und Warmarbeitsstahl
- Fertigung und Qualifizierung eines industrierelevanten Demonstrators

4. Vorgehensweise

Im IGF-Projekt 21074 BG wurde ein Weg aufgezeigt, komplex geformte, verschleißfeste Verbundbauteile endkonturnah zu fertigen. Dazu wurde eine HIP-Kapsel aus einem verschleißfesten Stahl aufgebaut, mit einem zähen Vergütungsstahlpulver gefüllt und zu voller Dichte konsolidiert. Die durch HIP hervorgerufene Verdichtung und Verformung werden vor der AM-Fertigung durch eine numerische Simulation berücksichtigt und der Kapselgeometrie aufgeschlagen. Nach dem HIP liegt das Bauteil nahezu in Endabmaßen vor und muss nur noch an Funktionsflächen nachbearbeitet werden.

Im Vorgängervorhaben wurde erfolgreich das prinzipielle Vorgehen mit einem monolithischen Bauteil aus einem rostfreien, austenitischen Stahl gezeigt. Mit dem genutzten AM-Verfahren Laserstrahlschmelzen (PBF-LB) war es allerdings nicht möglich, den hochkarbidhaltigen verschleißfesten Stahl FeCrV10 rissfrei zu verarbeiten.

Im nun abgeschlossenen Projekt wurden deshalb im ersten Schritt die beiden AM-Verfahren PBF-EB und BJT auf ihre Eignung zur Verarbeitung von hochkohlenstoffhaltigen Stählen evaluiert. Dazu wurden zwei verschiedene Werkstoffe ausgewählt: der verschließbeständige Hartstoff Ferro-Titanit in der Spezifikation Nikro128® (Marke der DEW) und der martensitische karbidreiche Kaltarbeitsstahl FeCrV10.Schließlich wird ein Verfahren ausgewählt, mit dem ein komplex geformtes, verschleißfestes Demonstratorbauteil aufgebaut und charakterisiert wird. Sämtliche Arbeiten sowie Werkstoffauswahl und die Festlegung der Demonstratorgeometrie wurden stets in enger Abstimmung mit dem PA durchgeführt.

5. Ergebnisse

Metal Binder Jetting

Beide Werkstoffe können mittels Metal Binder Jetting verarbeitet werden. Insgesamt zeigt sich, dass die erreichbaren Eigenschaften maßgeblich von den Eigenschaften des Pulvers und dessen Verarbeitbarkeit abhängen.

Der Werkstoff Nikro 128® lässt sich in der Partikelgrößenverteilung 0-20 µm mittels Metal Binder Jetting verarbeiten und bei einfachen Probengeometrien zur hohen Dichte sintern. Für einen robusten und reproduzierbaren Prozess wird jedoch ein Pulver mit höherer Fließfähigkeit benötigt, um eine höhere Grünteildichte und einen konstanteren Pulverauftrag zu erreichen. Dies erfordert jedoch tiefgehende Eingriffe in die Herstellung des vom PbA bereitgestellten Pulvermaterials.

Bei der Verarbeitung des FeCrV10 oxidiert das Pulverbett beim üblichen Curing an Luft aufgrund der nicht korrosionsbeständigen Matrix. Beim Curing unter Argon kann die Korrosion vermindert werden und die Grünteile lassen sich defektfrei entpulvern. Durch die gute Fließfähigkeit des Pulvers (Hausner-Faktor von 1,21) kann das FeCrV10 bei einer höheren Auftragsgeschwindigkeit ohne einen Abfall der

Pulverbett- und Grünteildichte verarbeitet werden. Die Abbildungsgenauigkeit und die Festigkeit der Grünteile ist hoch und lässt das Drucken und entpulvern komplexer Strukturen zu.

Beim Sinterverhalten des FeCrV10 besitzt die Atmosphäre große Auswirkungen auf die Mikrostruktur. Beim Sintern in Flüssigphase unter Stickstoff kann eine vollständige Verdichtung bei geringer Größe der Karbide erreicht werden. Zugleich wandeln sich die ursprünglichen Vanadiumkarbide des Werkstoffs in Karbonitride um und setzen dabei Kohlenstoff frei. Dieser diffundiert in die Matrix. Das Sintern unter Hochvakuum führt zur vollständigen Verdichtung des Werkstoffes. Bei den EDX-Messungen weist die Matrix eine homogene chemische Zusammensetzung auf. Gegenüber der unter Stickstoff gesinterten Probewächst die Karbidgröße aufgrund der höheren Sintertemperatur. Der Werkstoff FeCrV10 lässt sich mit diesen Parametern hervorragend mittels MBJ verarbeiten.

Powder Bed Fusion by Electron Beam

Sowohl das Nikro128 als auch das FeCr10V konnten mittels Powder Bed Fusion by Electron Beam (PBF-EB) verarbeitet werden. Dabei konnten Eigenschaften abgeleitet werden, die sogar über denen des konventionellen Materials liegen.

Der Werkstoff Nikro 128® lässt sich in der Partikelgrößenverteilung mittels PBF-EB verarbeiten. Für eine stabilen Prozess ist eine Doppelbelichtungstechnik erforderlich, bei der die einzelnen Schichten zunächst mit einem defokussierten Elektronenstrahl vorverdichtet und anschließend fokussiert und mit erhöhter Energiemenge erschmolzen werden. Das Überschusspulver ist gekennzeichnet durch den Aufbruch vereinzelter Partikel während des Rakelns bzw. unter der Einwirkung des Elektronenstrahls, wodurch sich eine geringere Fließfähigkeit einstellt. Dennoch können nahezu dichte Proben und vereinfachte Demonstratoren erzeugt werden.

Die Verarbeitbarkeit des FeCr10V-Pulvers mittels PBF-EB ist hinsichtlich einer guten Fließfähigkeit und hohen Prozessstabilität als sehr gut einzuschätzen. Ein Recycling des Überschusspulvers ist problemlos möglich. Zudem können sehr feinkörnige Gefüge mit einer homogenen Verteilung der vorwiegend submikrometergroßen Vanadiumkarbide erzeugt werden (Abbildung 1). Durch eine nachgeschaltete Wärmebehandlung kann die Härte und Zähigkeit des FeCr10V gezielt beeinflusst werden. Das Material besitzt zudem eine herausragende Verschleißbeständigkeit.

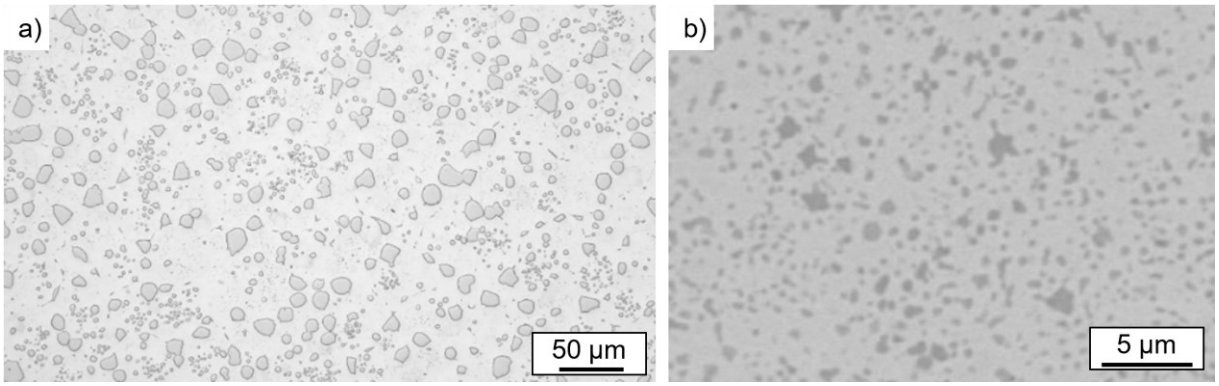


Abbildung 1: Gefüge des FeCr10V hergestellt mittels (a) MBJ, gesintert bei 1260 °C unter Hochvakuum und (b) PBF-EB nach Wärmebehandlung bei 1020 °C, 1 h und 3 x 540 °C je 1 h.

Techniken zum Verschließen der Kapseln

HIP-Kapseln erfordern zum Befüllen und Evakuieren ein Füllrohr, das in der Endbearbeitung wieder entfernt wird. Im Gegensatz zu konventionellen HIP-Kapseln aus niedriglegierten oder austenitischen Stählen mit guter Schweißeignung, neigt der Werkstoffe FeCrV10 zur Rissbildung im WIG-Schweißen. Daher wurden drei verschiedene Fügeverfahren für Füllrphre erprobt und hinsichtlich ihrer Gasdichtigkeit und Druckfestigkeit bei HIP-Temperatur sowie Bildung von Sprödphasen verglichen. Diese Fügeverfahren umfassten (1) das konventionelle WIG-Schweißen, (2) einen konventionellen Lötprozess im Vakuumofen mit dem kommerziellen Lotwerkstoff BNi-5 und (3) einen selbst entwickelten induktiven Lötprozess mit einem TLP-Lot (Transient Liquid Phase). Während die Lötung mit dem kommerziellen Lot im aufgrund der langen Prozessdauer im Vakuumofen als teuer einzustufen ist, konnte die Induktivlötung ähnlich schnell wie die TIG-Schweißung innerhalb von 30 Minuten durchgeführt werden. Die Lote wurden als Paste direkt in eine für das Lot vorgesehene Nut in der additiv gefertigten Kapsel aufgetragen, sodass das Füllrohr vor der Lötung lediglich „aufgesteckt“ werden musste. Von jeweils 5 gelöteten Kapseln waren alle Kapseln nach Ofenlötung und WIG-Schweißen gasdicht aber nur 2 Kapseln nach

Induktionslötung. Problematisch war die Überhitzung aufgrund der schwierigen Temperaturmessung mittels Pyrometer.

Alle drei Kapselvarianten konnten erfolgreich mit Pulver gefüllt, evakuiert, verschlossen und durch HIP (1150 °C, 100 MPa, 240 Min) verdichtet werden. Abbildung 2 zeigt exemplarische Schliffbilder. Dabei bildeten sich zwar im Bereich der Lötzonen intermetallische Phasen, nachteilige Eigenschaften können jedoch nicht erkannt werden. Zudem liegen beim selbst entwickelten Lotwerkstoff auch Vanadiumkarbide vor und es kann davon ausgegangen werden, dass die hohe Verschleißbeständigkeit des Grundwerkstoffs erhalten bleibt. EBSD-Untersuchungen des FeCrV10 Kapselwerkstoffes zeigten ein zwei-phasiges Gefüge aus Martensit und Vanadium-Monokarbid mit einzelnen Chromkarbiden. Die Härte des Werkstoffs aus den Schweißversuchen beträgt 705±2 HV10, während der Werkstoff aus den Lötversuchen eine höhere Härte von 804±2 HV10 aufweist. Zukünftige Untersuchungen müssen belegen, ob sich das TLP-Löten auch für HIP-Kapseln eignet, die sich z.B. aus komplexen additiv hergestellten Bereichen und einfachen konventionell hergestellten Teilen zusammensetzt.

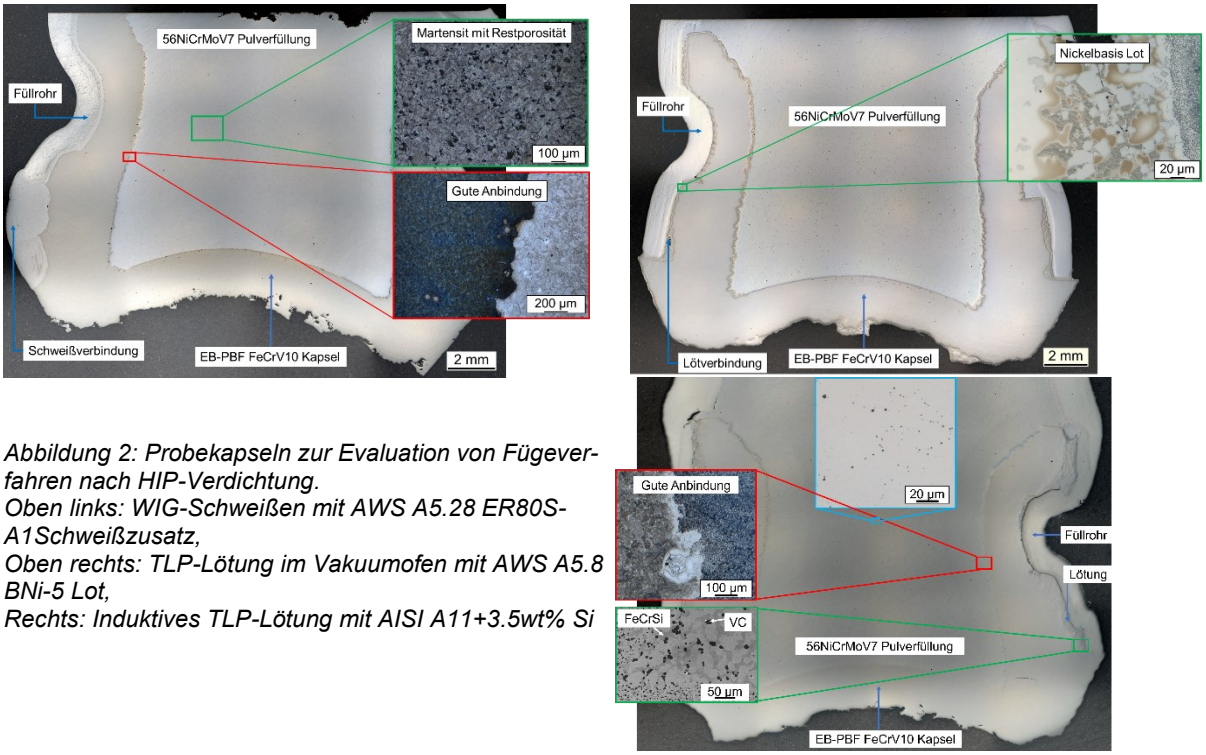


Abbildung 2: Probekapseln zur Evaluation von Fügeverfahren nach HIP-Verdichtung.
Oben links: WIG-Schweißen mit AWS A5.28 ER80S-A1Schweißzusatz,
Oben rechts: TLP-Lötung im Vakuumofen mit AWS A5.8 BNi-5 Lot,
Rechts: Induktives TLP-Lötung mit AISI A11+3.5wt% Si

Demonstratorbauteile

Aus dem FeCr10V lassen sich mittels PBF-EB Matrizen für das Pulverpressen erzeugen, wobei die Anzahl der innenliegenden Stützstrukturen und der Aufwand für die Pulverentfernung durch eine geeignete Orientierung der Matrize im Bauraum minimiert werden können (siehe Abbildung 3a).

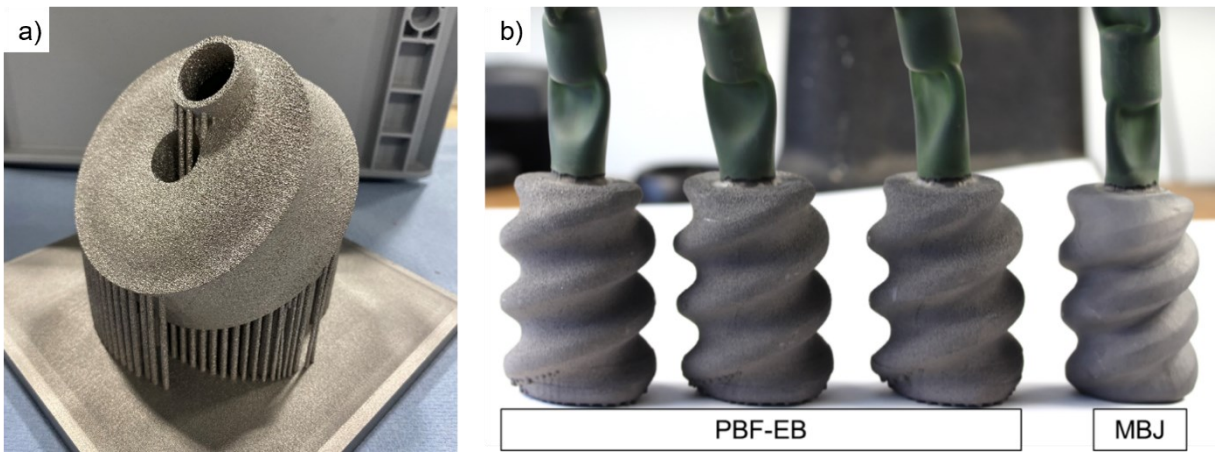


Abbildung 3: a) Matrize für das Pulverpressen gefertigt mittels PBF-EB, b) Demonstratorbauteile aus dem PBF-EB und MBJ nach der kombinierten Prozesskette aus additiver Fertigung und heißisostatisches Pressen.

Ausgehend vom PBF-EB dünnwandiger gasdichter Strukturen mit Wandstärken bis unter 500 µm lassen sich darüber hinaus erfolgreich vorausgelegte Extruderschnecken-Demonstratoren drucken (Abbildung 3b). Die 4. Kapsel in Abbildung 3 entstammt dem MBJ-Prozess, die durch das Sintern in einem keramischen Pulverbett formstabil verdichtet wird. Nach erfolgreicher Evakuierung werden die Kapseln durch Schmieden des Füllrohres gasdicht verschlossen, mit 56NiCrMoV7-Pulver gefüllt und über das heißisostatische Pressen bei 1150 °C mit anschließender Raschabschreckung zu endformahen Bauteilen verdichtet (siehe Abbildung 3b). Die Abweichung zwischen aus der HIP-Simulation prognostizierter Schwindung und realem Demonstratorbauteil beträgt nur 2 %.

6. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Sowohl für die Forschungsstellen als auch die beteiligten Firmen im projektbegleitenden Ausschuss lieferte das Projekt viele wertvolle Ergebnisse und Erkenntnisse. Die Forschungsstellen konnten mit dem Projekt ihre aktuelle Forschung sehr stark voranbringen. Auf einigen wissenschaftlichen Fachkonferenzen (s. Abschnitt 7) wurde im direkten Austausch mit der wissenschaftlichen Community das Projekt rege diskutiert. Die beteiligten Firmen wurden bei den Treffen des projektbegleitenden Ausschusses regelmäßig über den Projektfortschritt unterrichtet und konnten dabei direkte Impulse für den weiteren Fortschritt geben. Auch zwischen den Treffen des Ausschusses waren die Forschungsstellen mit den Firmen im regelmäßigen Kontakt. Insbesondere beim Abschlussprojekttreffen betonten die Firmen die gute Zusammenarbeit und zeigten sich zufrieden mit den Ergebnissen. Da im projektbegleitenden Ausschuss Firmen entlang der gesamten Prozesskette von der Pulverherstellung bis zum Bauteilfertiger vertreten waren, konnten alle Firmen für sich nutzbare Erkenntnisse aus dem Projektverlauf und dem -ergebnis ziehen.

Aus diesem Grund wurde, aufbauend auf den Ergebnissen des Projektes, aus dem projektbegleitenden Ausschuss heraus ein Anschlussprojekt angeregt. Dabei soll der Fokus auf monolithischen Bauteilen aus dem PBF-EB gelegt werden, welches unmittelbar im Prozess verschlossen wird. Im Zentrum des Bauteils verbleibt Pulver, welches durch HIP verdichtet wird. Erneut sollen FEM-Ansätze die ressourcensparende endkonturnahe Fertigung ermöglichen.

Für zukünftige F&E-Arbeiten der beteiligten Firmen konnte das Projekt gute Impulse geben, wenn auch die Ergebnisse des Projektes noch nicht unmittelbar (vor-) industriell umgesetzt und angewendet werden können. Eine unmittelbare industrielle Nutzung ist nicht möglich, da ermittelte Prozessparameter für spezifische Anlagen und ggfs. die Pulverspezifikation nochmals angepasst werden müssen. Zudem liegt eine Software zur HIP-Simulation noch nicht als frei verfügbare Software mit Materialkennwerten vor. Für eine Übertragung auf andere Werkstoffe müssen Firmen eigene Versuchsreihen durchführen. Im industriellen Umfeld ist bis dato eher das SLM-Verfahren zu finden, das aber werkstoffseitig und aus Produktivitätsgründen nur bedingt für die Serienfertigung der adressierten Anwendungen geeignet ist. Das PBF-EB bietet in beiden Bereichen einen Mehrwert, erlebt aber erst mit den jüngsten Firmengründungen durch neue Anlagenhersteller und einer damit entstehenden Wettbewerbssituation einen neuen Aufwind hinsichtlich Angebot und Nachfrage. Der Aufbau der schraubenförmigen Kapsel im Binder Jetting Verfahren aus Abbildung 3b dauerte über 30 Stunden. Für eine wirtschaftliche Nutzung der Verfahrenskombination bedarf weiteren Anlagenentwicklungen zur Verkürzung der Bauzeit. Prinzipiell wurde im Projekt der Nachweis erbracht, dass mit der erarbeiteten Prozesskette aus AM und HIP verschleißfeste Verbundbauteile hergestellt werden können.

7. Umsetzung und Ergebnistransfer

Das Forschungsprojekt wurde von den Forschungsstellen 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/ stehen noch aus:

Erfolgte Transfermaßnahmen		**Personenkreis/Ort**	**Datum/Zeitraum**
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Diskussion der Ergebnisse und Informationsaustausch	Digital, Abschlusstreffen am IFAM DD	28.5./10.11.2020 23.4./29.10.2021 15.06.2022
Fachverband Pulvermetallurgie	Berichterstattung und Diskussion von Ergebnissen	Herbstsitzung in Hagen	24.11.2021
Gem. Ausschuss Pulvermetallurgie	Information der Fachöffentlichkeit; Austausch mit	Europäische/deutschsprachige Teilnehmer	25.11.2020

Hagener Symposium (Messestand)	anderen Forschungsgruppen	aus Industrie und Forschung	24.-26.11.2021
EPMA HIP-Seminar (Vortrag)			09.02.2021 online
HIP conference 2022 (Vortrag)			11.-14.09.2022
WorldPM22 (2 Vorträge)			12.10.2022 Lyon
Werkstoffe in der Fertigung (Aufsatz)			Ausgabe 1 Februar 2021
Materials (Aufsatz)			Ausgabe 15(5) 2022
Lehre/Fortbildung	Vorstellung aktueller Forschung für Studierende: Werkstoffkundliches Kolloquium (RWTH Aachen), Endformnahe Fertigungstechnologien (Univ. Bremen), Pulvermetallurgie (TU Dresden)		Seit Wintersemester 2020/21

Geplante Transfermaßnahmen		**Personenkreis**	**Datum/Zeitraum**
Formnext 2023 Hagener Symposium	Darstellung der Bauteile im Musterkoffer	Internat. Teilnehmer Industrie/Forschung	November 2023 Jährl. November
Fachverband Pulvermetallurgie	Berichterstattung und Diskussion von Ergebnissen	Herbstsitzung in Hagen	Jährl. November
DGM Fachausschuss 105.2 Addit. Fertigung		Nicht nicht bekannt	halbjährlich
VDI Fachausschuss Addit. Manuf. - Metalle		Nicht nicht bekannt	halbjährlich
Abschlussbericht	Abschlusszusammenfassung der Ergebnisse	Anforderung über die FSV-Homepage	Ab 1. Quartal 2023
FSV Forschungsreport			3. Quartal 2022
Lehre	Ergebnistransfer an Studierende; Information der Öffentlichkeit	„Endformnahe Fertigungstechnologien“, „Pulvermetallurgie“)	Weiterführung
Folgeprojekt EBHIP+	Weiterentwicklung EBM+HIP Kombination	Forschungsstellen und int. Unternehmen	Gutachtersitzung 01/2023
Zeitschriftenartikel	Information der Fachöffentlichkeit	Powder Technology	Anfang 2023

8. Dokumentation

Die Langfassung des Abschlussberichtes zum IGF-Vorhaben 21074 BG kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen) angefordert werden. Im Verlauf des Projekts wurden die aktuellen Forschungsergebnisse von den Forschungseinrichtungen in folgenden wissenschaftlichen Aufsätzen veröffentlicht:

- S. Herzog, S. Fries, M. Mirz, A. Kaletsch, C. Broeckmann, Vom Pulver zum additiv hergestellten Bauteil, Teil 1: Perspektiven durch heiß-isostatisches Pressen, Werkstoffe 1/2021
- B. Barthel, M. Mirz, F. Petzoldt, Process Development of Grade A11 High Carbon Tool Steel for Metal Binder Jetting, In Proceedings of World PM 2022, Lyon 12. Oktober 2022.
- A Comparative Study on Different Joining Techniques For PM-HIP Evacuation Tubes. *WorldPM 2022*, Lyon 12. Oktober 2022.
- M. Franke-Jurisch, M. Mirz, T. Wenz, A. Kirchner, B. Klöden, T. Weißgärber, PBF-EB of Fe-Cr-V Alloy for Wear Applications Materials 2022, 15(5), 1679; https://doi.org/10.3390/ma15051679

Ein weiterer Aufsatz ist akzeptiert, aber noch nicht veröffentlicht. Es handelt sich um ein Special Issue zur HIP-Conference in Ohio 2022*:* M. Mirz, M. Franke-Jurisch, A. Kaletsch, S. Herzog, Y. Deng, J. Trapp, A. Kirchner, T. Weißgärber, C. Broeckmann, Manufacturing of net-shape and wear-resistant composite components via the combination of additive manufacturing and hot isostatic pressing