

Abschlusszusammenfassung zum Forschungsprojekt IGF 21421 N
MBJ Pro

Projektdaten:

Projekttitel:	Untersuchungen zu Prozessstabilität und Bauteilauslegung für den Metal-Binder-Jetting-Prozess
Projektnummer:	IGF 21421 N
Laufzeit:	01.01.2021–31.03.2023
Berichtszeitraum:	01.01.2021–31.03.2023
Gesamtmittel Euro:	506.432 Euro
Forschungseinrichtung 1:	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM Wiener Straße 12 28359 Bremen
Leiter Forschungseinrichtung 1:	Prof. Dr. Mattias Busse
Sachbearbeiter :	Claus Aumund-Kopp 0421-2246-1226
Forschungseinrichtung 2:	RWTH Aachen University Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau Augustinerbach 4 52062 Aachen
Leiter Forschungseinrichtung 2:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann
Sachbearbeiterin:	Dr.-Ing. Simone Herzog 0241-80-96514

Inhaltsverzeichnis

1. Thema	2
2. Problemstellung	2
3. Ziele	2
4. Vorgehensweise	2
5. Ergebnisse für 17-4PH	2
6. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit	4
7. Umsetzung und Ergebnistransfer	5
8. Dokumentation	6

Unterschrift Projektleiter der Forschungseinrichtung 1

Unterschrift Projektleiterin der Forschungseinrichtung 2

Unterschrift Leiterin des PA

1. Thema

Untersuchungen zu Prozessstabilität und Bauteilauslegung für den Metal-Binder-Jetting-Prozess

2. Problemstellung

Metal-Binder-Jetting (MBJ) ist ein additives Verfahren, bei dem Binder lokal in schichtweise aufgebracht Metallpulver eingebracht wird. Die generierten Grünteile werden anschließend entbindert und gesintert. Im Gegensatz zu strahlbasierten additiven Verfahren können auch harte Werkstoffe verarbeitet und prinzipiell höhere Stückzahlen oder große, komplexe Bauteile wirtschaftlich hergestellt werden.

Die Prozesskette beim MBJ ähnelt der des Metallpulverspritzguss (MIM), einem in der Industrie etablierten Serienproduktionsverfahren für komplexe Bauteile. Für Kleinserien ist MIM aufgrund hoher Werkzeugkosten jedoch unwirtschaftlich. Die Forschungsstellen IWM und IFAM zeigten im Projekt „3DP für MIM“ (Fördernr. 19733 N), dass bei optimierten MBJ-Parametern und Wärmebehandlung des Stahls X5CrNiCuNb17-4 die MIM-Normwerte für Härte, Zugfestigkeit und Dehngrenze im Mittel erreicht werden. Eine Herausforderung für den industriellen Einsatz des MBJ-Prozesses ist allerdings die Streuung charakteristischer Eigenschaften in Abhängigkeit der Bauraumposition, des Pulverzustandes und verschiedener MBJ-Anlagen.

3. Ziele

Im nun beendeten Nachfolgeprojekt sollte daher der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Grün- bzw. Sinterteildichte evaluiert werden, um Ansätze zur Reduzierung der Streuung umzusetzen. Zielgrößen für die Qualitätssicherung wie die maximale Dichtestreue, Form- und Lagetoleranzen und die Rundheit werden erarbeitet. Gleichzeitig sollte die Vorhersagegenauigkeit der Sintersimulation erhöht werden. Umfassende Messreihen ermitteln Festigkeitsdaten für die konstruktive Auslegung schwingend belasteter Komponenten, unter Berücksichtigung der durch die schichtweise Bauteilherstellung bedingten Anisotropie der Eigenschaften.

Basierend auf diesen Ergebnissen können KMU die Wirtschaftlichkeit des MBJ-Verfahrens für Prototypen- und Kleinserienfertigung ihrer Bauteilpalette neu bewerten.

4. Vorgehensweise

Als Werkstoffe wurden die beiden im Vorgängerprojekt untersuchten Werkstoffe untersucht: der ausscheidungshärtende Edelstahl X5CrNiCuNb17-4-4 (17-4PH, 1.4548) und der Hartstoff Ferrotitanit in der Spezifikation Nikro128® (Marke der DEW). Erneut wurden die Vergleichskriterien aus der MPIF 35 genutzt, anhand derer ein Eigenschaftsvergleich von 3DP und MIM durchgeführt werden sollte.

Anhand systematischer Dichteanalysen von Würfeln, Zugproben und pulvergefüllter „cups“ in Abhängigkeit der Bauraumposition, Entpulverbarkeit, Sinterschwindung und Bauraumorientierung wurden Parameter für den additiven Druckprozess, die Entbinderung und die Sinterung ermittelt. Zudem wurden Parameter für die Simulation des anisotropen Sinterns ermittelt. Ein vorhandenes Simulationsmodell wurde erweitert, mit den Modelldaten ergänzt und validiert. Probekörper wurden baurichtungsabhängig im HIP-nachverdichteten und wärmebehandelten (HIP+WB) sowie nur wärmebehandelten Zustand geprüft (WB) zur Ermittlung der Rauheit, Härte, Festigkeit, Duktilität, temperaturabhängigen Zähigkeit sowie Dauerfestigkeit. Einen Schwerpunkt bildete dabei die Untersuchung und der Vergleich verschiedener Nachbearbeitungsverfahren, um die magelhafte Rauheit gesinteter MBJ-Teile zu kompensieren.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten führten die beiden Forschungseinrichtungen im intensiven Austausch miteinander und mit den am PA beteiligten Firmen durch. Im dritten Projekttreffen erfolgte der gemeinsame Beschluss die Arbeiten mit dem Werkstoff Nuikro128® zu beenden, da keine Lösungsansätze umsetzbar waren, um die Maßhaltigkeit von Sinterteilen zu erhöhen. Zusätzlich auftretende, unvorhergesehene Fragestellungen zum Werkstoff 17-4PH konnten dabei ebenfalls in der nötigen Tiefe behandelt werden.

5. Ergebnisse für 17-4PH

Für die industrielle Anwendbarkeit des MBJ als wirtschaftliche Ergänzung für die Kleinserienfertigung durch den Metallpulverspritzguss (MIM) wurden Einflussgrößen auf die Grün- und Sinterteildichte in einer Sensitivitätsstudie erarbeitet. Von insgesamt fünf verschiedenen für MIM geeigneten Ausgangspulvern war dabei nur ein Pulver auch für MBJ gut verarbeitbar. Das ideale Pulver sollte hohe Sphärizität, geringen Feinanteil unter 1 µm (Vermeidung Agglomeration), und eine enge Partikelgrößenverteilung ($d_{90}=20,3\mu\text{m}$ und $d_{10}=4,6\mu\text{m}$) aufweisen. Zu einem robusten Prozess ohne Schichtverschiebung oder Rissbildung aber scharfen Kanten nach Entpulverung tragen geringe Schichtdicken ($<90\mu\text{m}$), mittlere Pulverbettdichten (54-55 %) und Wabenstrukturen bei.

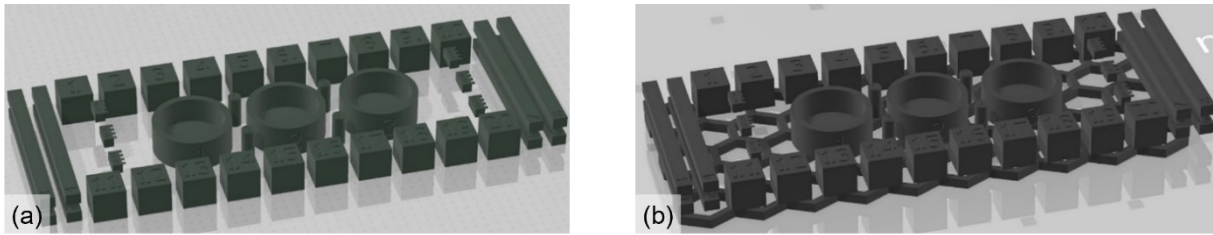


Abbildung 1: Grünkörper ohne (a) und mit (b) Basisstrukturen zur Minimierung von Schichtverschiebung

Die verwendeten wabenförmigen Basisstrukturen (Abbildung 1) verhinderten effektiv das Verschieben insbesondere der ersten, noch nicht vom Pulvervolumen gestützten, Schichten eines Baujobs. Das bedeutet, dass auch bei nicht optimal auf das Pulver angepassten Druckparametern das Prozessfenster deutlich erweitert wurde, damit das Risiko des vorzeitigen Abbruchs eines Baujobs minimiert wurde und sich dieser Ansatz positiv auf die Prozessstabilität auswirkt. Eine Verschlechterung des Fließverhaltens infolge eines Verlusts von Feinanteil nach Recycling wurden nicht beobachtet.

Vier Nachbearbeitungsverfahren (Handpolitur, Rundscheifen, Gleitscheifen und Elektropolitur) ergaben prozessübergreifend die erwünschten Rauheiten R_a unterhalb $0,3 \mu\text{m}$. Die eingebrachten axialen Druckeigenspannungen schwanken stark von -120 MPa (E-Politur) bis -590 MPa (Gleitscheifen) und bieten darüber prinzipiell eine Möglichkeit die Schwingfestigkeit von Bauteilen effektiv zu verbessern. Selten auftretende Porenbänder bedingten jedoch weiterhin einzelne negative Ausreißer in der Härte, Schlagzähigkeit, sowie Kennwerten aus dem Zug- und Schwingversuch. Mögliche Ursachen sind Rakelfehler oder verstopfte Düsen. Abbildung 2(b,c) zeigt eine auffällige Defektstruktur in der Y/Z-Ebene, die in dieser Ausprägung bei keinem anderen Schliff auftrat. Die Verdichtung mittels HIP führte laut Dichteanalysen und Schliffbildern (Abbildung 2(d-f)) zu voller Dichte. Mit hoher Vergrößerung konnten Poren bis max $3 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden. Allerdings führte die Nachverdichtung infolge anisotroper Sinterdichten zu Verlust der Rundheit, siehe Abbildung 2(d).

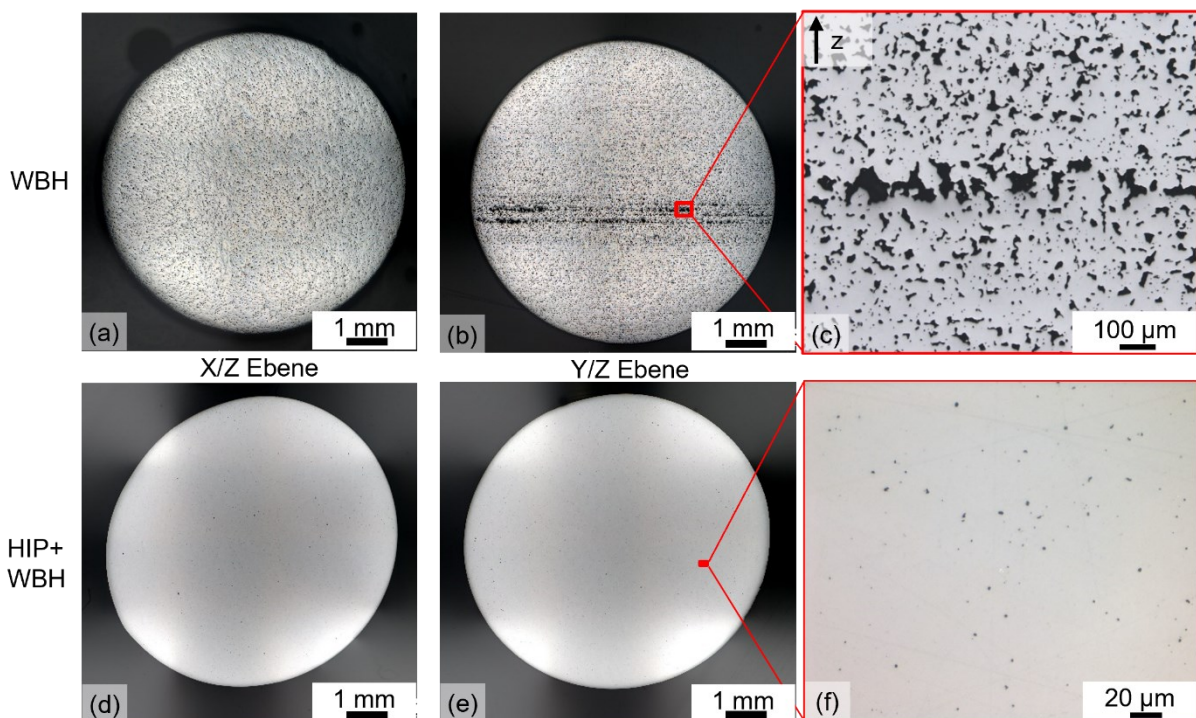


Abbildung 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen durch Schwingproben im wärmebehandelten Zustand (a-c) und nach HIP und Wärmebehandlung (d-f). Verlust der Rundheit durch HIP ist in (d) erkennbar.

Nach einer HIP-Behandlung werden prinzipiell die höchsten Dauerfestigkeiten erreicht, siehe Abbildung 3(a). Trotz großer Unterschiede in den Druckeigenspannungen bedingten die Nachbearbeitungsverfahren bis auf die Größe des Streubands keinen messbaren Einfluss auf die Dauerfestigkeit. Die Baurichtung dominiert die Dauerfestigkeit, wobei X die schwächste Richtung ist. Die in Abbildung 3(b) dargestellte exemplarische Bruchflächenaufnahme macht deutlich, warum die Oberflächengüte und

Nachbehandlung nur einen geringen Einfluss auf die Dauerfestigkeit der Proben besitzt. Der Ermüdungsriss wurde vermutlich durch eine Vielzahl an länglichen Poren induziert. Die Schwingstreifen (schwarze Pfeile) verlaufen in verschiedene Richtungen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass mehrere Risse an unterschiedlichen Defekten gleichzeitig gestartet sind.

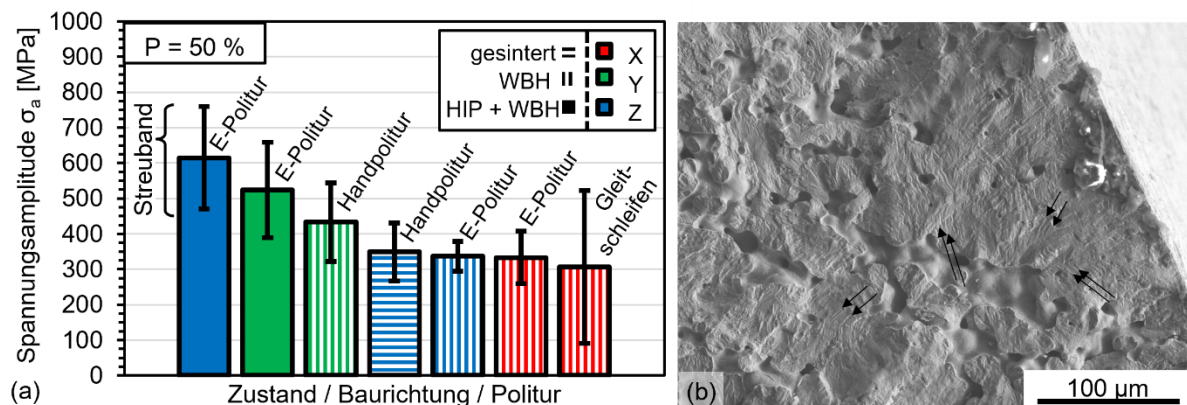


Abbildung 3: a) Dauerfestigkeit für eine Versagenswahrscheinlichkeit von $P = 50\%$ mit Angabe des Streubandes, b) Y-Z Bruchfläche einer Probe (Bezeichnung x) mit schwarz markierten Schwingstreifen

Da die Probegeometrien der Zug- und Biegeproben nur bedingt geeignet waren, um Form- und Lagetoleranzen abzubilden, wurde eine neue Prüfgeometrie entworfen und entsprechende Prüfkörper gefertigt. Der „Prüfzylinder“ mit zwei Querbohrungen ermöglichte eine umfassende Tolerierung seiner Geometrie. Die Resultate sind in den Richtlinien zur Sinterpraxis zusammengefasst. Zur Ermittlung der Verformungen bzw. der erreichten Toleranzwerte während des Sinterns wurde jeweils der gesinterte Prüfkörper gescannt und mit dem CAD-Modell überlagert, siehe Abbildung 4b. Dabei kennzeichnen die Kerben am Umfang bzw. der Stirnfläche die Ausrichtung der Probe während des Druckens im Bauraum bzw. beim Sintern. Die Sintersimulation sagte Verzug von Gewinderohr und Bodenring durch Reibung an der Sinterunterlage vorher, wie die gelben Markierungen in Abbildung 4c belegen. Durch Anpassung der Grünkörpergeometrie und Vorwegnahme des Verzugs konnte die Abweichung zwischen simuliertem Bauteil und Zielgeometrie von $\pm 0,80\text{ mm}$ auf $\pm 0,30\text{ mm}$ am Bodenring minimiert werden.

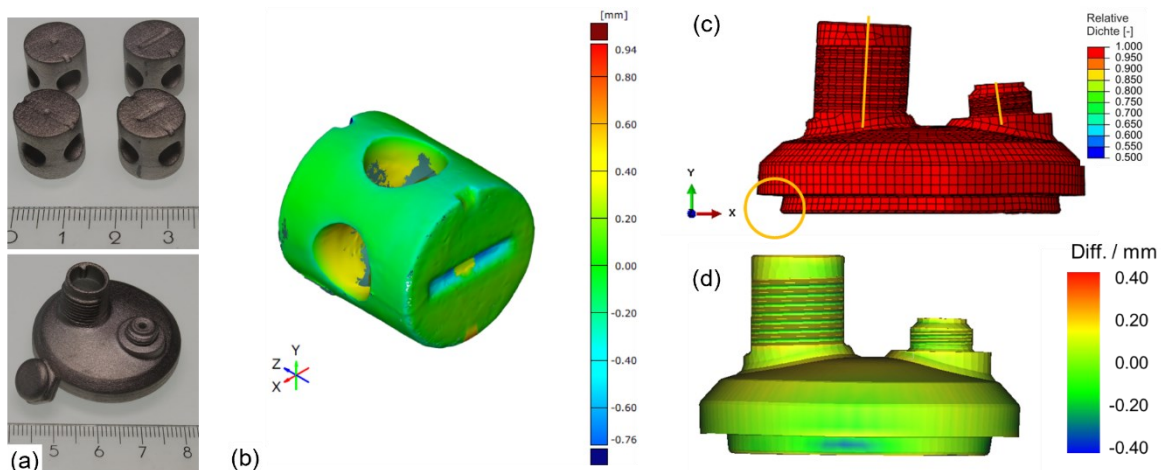


Abbildung 4: (a) Prüfzylinder bzw. Demonstrator nach Sinterung, b) Scan eines Prüfzylinders mit farblicher Darstellung der Abweichungen vom CAD-Modell in mm, c) Vorhersage des Verzugs des Demonstrators an Gewinderohr und Bodenring, d) Vergleich des geometrieroptimierten Grünkörpers nach Sintersimulation mit Zielgeometrie

6. Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Der ständige und regelmäßige Austausch der Forschungseinrichtungen mit den beteiligten Firmen stellte sicher, dass die Bearbeitung und die Zielrichtung des Projektes stets industriell und wirtschaftlich relevant für die Firmen verfolgt wurden. Im PA waren Unternehmen entlang der Prozesskette von der Metallpulvererzeugung über die -aufbereitung bis hin zur Teilefertigung vertreten. So konnten sich alle

beteiligten Firmen in ihren jeweiligen Kompetenzfeldern einbringen. Mit besonderem Interesse hinsichtlich der mittelfristigen Umsetzung verfolgten MIM-Dienstleister, die teilweise bereits in eigene 3DP-Anlagen investiert haben und über eine langjährige Erfahrung in der Sinterung verfügen, das Projekt.

Die erfolgreiche Herstellung von Demonstratorbauteilen aus 17-4PH demonstrierte das Potenzial des Verfahrens für die Kleinserienfertigung. Erzielbare Toleranzen und Empfehlungen zu Prozessparametern sind in den erarbeiteten Richtlinien zur Sinterpraxis zusammengefasst. Im Mittelwert konnten über alle Baurichtungen die angestrebten mechanischen Mindestkennwerte hinsichtlich Festigkeit, Duktilität und Zähigkeit erreicht werden. Für Anwendungen mit hohen Festigkeitsanforderungen müssen 3DP-Dienstleister leider immer noch auf das HIP-Nachverdichten zurückgreifen, damit MIM-typische Kennwerte ohne Ausreißer sicher erzielt werden können. Insgesamt spiegelte sich die erarbeitete Prozesskontrolle in erhöhten Bruchdehnungen wider. Auch die beobachtete Eigenschaftsverschlechterung von X, über Y zu Z Aufbarurichtung aus dem Vorgängerprojekt konnte nicht mehr klar erkannt werden. Das Gleitschleifen wird aufgrund des geringen Aufwands, minimaler Rauheit und hohen Druckeigenstressungen als kostengünstiges Nachbearbeitungsverfahren für MBJ-Kleinserien empfohlen.

Langfristig müssen für eine industrielle Umsetzbarkeit jedoch die Kosten pro Bauteil signifikant reduziert werden. Die HIP-Nachverdichtung und Oberflächennachbearbeitung erhöhen den Stückpreis weiter. Diese Preisentwicklung liegt weitestgehend in Hand der MBJ-Anlagenentwickler. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ein Eigenschaftsvergleich anderer sinterbasierter AM-Verfahren mit MIM könnte Gegenstand eines weiteren Forschungsantrags (derzeit in Skizzenform „SAM4MIM“) werden.

7. Umsetzung und Ergebnistransfer

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. Hierfür müssen ermittelte Prozessparameter für spezifische Anlagen und ggfs. die Pulverspezifikation nochmals angepasst werden. Zudem liegt eine Software zur Sintersimulation noch nicht als frei verfügbare Software mit Materialkennwerten vor. Für eine Übertragung auf andere Werkstoffe müssen Firmen eigene Versuchsreihen durchführen. Prinzipiell wurde jedoch der Nachweis erbracht, dass mit einer geeigneten Nachbearbeitung von Funktionsflächen, Bauteile für Kleinserien mittels 3DP gefertigt werden können und zuverlässige mechanische Eigenschaften aufweisen.

Im Projektverlauf wurden die Transfermaßnahmen der nachfolgenden Tabelle durchgeführt/ stehen noch aus. Dabei wurden die Tabellen aus dem Antrag fortgeführt und mit dem Leistungsdatum/zeitraum ergänzt, entfallene Transfermaßnahmen sind durchgestrichen und neu hinzugekommene fett markiert.

Durchgeführte Maßnahmen während der Laufzeit			
Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Information der Unternehmen des PA	- Diskussion der Ergebnisse - Klärung von Fragen und weiterem Vorgehen - Ergebnistransfer in die Wirtschaft	a) Projekttreffen b) Zwischenberichte im FSV-Forschungsreport (Anforderung über Anfrage) c) Statusupdate per Mail	a) 29.03.21, 04.10.21 22.03.22, 27.09.22, 09.03.23 b) August 2021, August 2022 c) Mai 2023
Information in Fachauschüssen	- Information der Fachöffentlichkeit - Austausch mit Industrievertretern	a) Herbstsitzung FPM in Hagen b) DGM FA Additive Fertigung c) Expertenkreise Additive Fertigung und Metallpulverherzeugung d) MIM Expertenkreis	a) 24.11.21, 23.11.22 c) 07.10.21, 22.03.23 d) 03.11.21, 05.05.22, 08.11.22, 11.05.23,
Qualifizierung von Personal	- Personaltransfer in die Industrie - Spezialisierung interessierter Studenten	a) Betreuung von Abschlussarbeiten und student. Hilfskräften a1) diverse Hilfskräfte a2) Arbeit: Simon Linnemann b) Werkstoffkundliches Kolloquium RWTH Aachen c) Integration der Ergebnisse in die Vorlesung Pulvermetallurgie Werkstoffkunde II des IWM	a1) kont. a2) Q4/22 bis Q2 23 b) ab WS 21/22 c) SS 23
Publikation der Projektergebnisse	- Kontaktaufnahme zu interessierten Unternehmen	a) Projektsteckbrief auf Homepage der Forschungsstellen	a) ab Juni 2021 b1) 18.-22.10.22 b2) 20.09.22

	- Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Erweiterung des Forschungsfeldes	b) Vorträge auf Fachkonferenzen wie World PM, MAMC, Hag-Symp. b1) EuroPM b2) IAPK-Kolloquium c) Veröffentlichung in Fach-Zeitschriften wie Mater.Sci.Eng., Powd. Met. c1) Tagungsband EuroPM c2) Werkstoffe in der Fertigung, S. 35-37 c3) Ceramic Applications, S.38-42 d) Veröffentlichung auf Fachmessen wie AM Forum -(Bauteile, Handout) d1) formnext d2) Hagener Symposium d3) World PM d4) 3. Workshop Sinter-based-AM	c1) Oktober 2021 c2) Ausgabe 1, Februar 2021 c3) Ausgabe 2, Juni 2023 d1) 15.-18.11.22, d2) 25.-26.11.21, 24.-25.11.22, d3) 09.-13.10. 2022 d4) 14.-15.09.22
Fertigung Benchmark-Bauteile	Know-How-Transfer in die Industrie	Vitrinen am Fraunhofer IFAM/ IWM	Ab Q2 2023

Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens			
Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Information der Unternehmen im PA	-Zusammenfassung der Ergebnisse für wirtschaftliche Verwertung - Anregung für neue Projekte	a) Abschlussbericht und Forschungsreport auf FSV-Homepage (Anforderung über Anfrage) b) Jahresbericht der Forschungsstellen (Homepage)	a) August 2023 b) August 2023
	-Information der Fachöffentlichkeit -Austausch mit Industrievertretern	a) Herbstsitzung FPM in Hagen b) DGM FA Additive Fertigung c) Expertenkreis AM	Unmittelbar nach Projektende
Qualifizierung von Personal	Ergebnistransfer als neuer „Stand der Technik“ an Studierende	Verwendung ausgewählter Beispiele in der Vorlesung Pulvermetallurgie (IWM)	jährlich im Wintersemester
Publikation der Projektergebnisse	- Information der Fachöffentlichkeit - Dokumentation wissenschaftlicher Ergebnisse - Austausch mit anderen Forschungsgruppen	a) Vorträge auf Fachkonferenzen (EuroPM, MAMC, Hagener Symp.) b) Veröffentlichung in Fach-Zeitschriften (Mater Sci Eng, Powder Metall) c) Inhalte der FSV-Kurzfassung open access auf RWTH publications	a) 2024 b) 2024 c) September 2023
Information auf Messen und Tagungen für Anwender	- Information der Fachöffentlichkeit und Austausch mit anderen Anwendern - Ausstellung Benchmark-Bauteile	a) Formnext, AM Forum b) Hagener Symposium	Unmittelbar nach Projektende, langfristig
Consulting	Empfehlungen und Verbreitung des MBJ	Beratung im Arbeitsalltag der Consultingfirmen	langfristig
Folgeantrag	Sinterbasierte alternative AM-Verfahren für MIM bewerten	IGF-Projektantrag „SAM4MIM“	Einreichung 2024

8. Dokumentation

Die Langfassung des Abschlussberichtes zum IGF-Vorhaben 19733 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.