

## Titel

# **ADDITIV GEFERTIGTE WERKZEUGAKTIVTEILE MIT INNENTEMPERIERUNG ZUR BEARBEITUNG VON HOCHLEISTUNGSSTÄHLEN**

## **AGAH**

IGF-Nr.: 01IF23013N

---

### **Forschungseinrichtungen**

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe,  
Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid (IFW)

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Gesellschaft - Institut für  
Produktionstechnologie,  
Steinbachstraße 17, 52074 Aachen (IPT)



**Fraunhofer**  
**IPT**

Ansprechpartner beim IFW:

Dr.-Ing. Robin Roj  
+49 (2191) 5921-122  
roj@fgw.de

Ansprechpartner beim IPT:

Johannes Weis, M.Sc.  
+49 (241) 8904-568  
johannes.weis@ipt.fraunhofer.de

### **Danksagungen**

Das IGF-Projekt „ADDITIV GEFERTIGTE WERKZEUGAKTIVTEILE MIT INNENTEMPERIERUNG ZUR BEARBEITUNG VON HOCHLEISTUNGSSTÄHLEN“ (01IF23013N) wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



DLR Projektträger



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

## Ausgangssituation

In der blechbearbeitenden Industrie ist ein Trend zur Verarbeitung höchstfester Stähle sowie zu höheren Qualitäts- und engeren Toleranzansprüchen zu beobachten. Als Folge dieser Entwicklung geraten konventionelle Blechbearbeitungsverfahren durch hohe Werkzeugbelastungen zunehmend an ihre wirtschaftlichen und technologischen Grenzen. Beim Scherschneiden und Umformen hochfester Blechwerkstoffe oder der hochpräzisen Bearbeitung von z. B. Bipolarplatten für Brennstoffzellen spielen thermische Schwankungen insbesondere bei der Halbwarm- oder Warmbearbeitung eine signifikante Rolle. Zur Steigerung der Umformbarkeit der Hochleistungsstähle existieren thermisch unterstützte Blechbearbeitungsverfahren, bei denen das hochfeste Stahlblech unmittelbar vor dem Bearbeitungsprozess lokal erwärmt und dadurch entfestigt wird. Die erhöhte Fließfähigkeit des Blechmaterials führt, bspw. im Vergleich zu dem konventionellen, kalten Scherschneiden, zu hohen Glattschnittanteilen bis 100 % und reduzierten Prozesskräften um bis zu 70 %; bei der Umformung von Durchzügen kann das Aufweitverhältnis um bis zu 100 % gesteigert werden. Zusätzlich können Bauteile werkzeugfallend lokal umwandlungsgehärtet werden. Aufgrund der erhöhten Bearbeitungstemperaturen treten jedoch bei der thermisch unterstützten Bearbeitung verstärkt Materialanhaftungen am Werkzeug auf, die zu einer nicht tolerierbaren Herabsetzung der Kantenqualität des Endproduktes (Riefenbildung) führen. Des Weiteren spielt die Wärmeausdehnung der Aktivteile eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Bauteiltoleranzen. Die hohe Verschleißbeanspruchung der Werkzeuge in Verbindung mit den erhöhten Prozesstemperaturen erforderte die Entwicklung optimierter Werkzeugwerkstoffe und Kühlmethoden, um die Vorteile des Verfahrens besser nutzen zu können. Zusätzlich stellten thermisch bedingte Geometrieänderungen der Werkzeuge eine wichtige Ursache von Geometrieabweichungen, insbesondere bei größeren Werkzeugdimensionen, dar.

---

## Forschungsziel

Die Grundidee des Projektes bestand darin mit additiv gefertigten Werkzeugen, die über eine konturoptimierte Innenkühlung in Form von Kühlkanälen verfügen, den genannten Problemen entgegenzuwirken. Darüber hinaus war eine Anpassung der Werkzeugwerkstoffe erforderlich, um der hohen thermischen und mechanischen Beanspruchung an der Schneidkante standzuhalten. Auch hier lag das Potenzial der additiven Fertigung darin, neue Möglichkeiten zum Einsatz innovativer Werkstoffe zu nutzen.

**Das übergeordnete Ziel des Projektes bestand darin das thermisch unterstützte Schneiden und Umformen von höchstfesten Stählen sowie das werkzeugintegrierte Härten zu optimieren, um eine wirtschaftliche Anwendung der thermisch unterstützten Blechbearbeitung zu ermöglichen.**

Zur Erfüllung dieses übergeordneten Forschungsziels galt es folgende Teilaufgaben zu lösen:

Teilziel 1: Definition von beispielhaften Fertigungsprozessen. Zur Beantwortung der Forschungsfragen und zur Realisierung im Rahmen des Projektes galt es alle technologischen, monetären und praktischen Einschränkungen zu berücksichtigen und dementsprechend die Fertigungsprozesse anhand ihrer technischen Randbedingungen auszuwählen und die Lösungsmöglichkeiten entsprechend zu konzipieren.

Teilziel 2: Ermittlung der dominierenden Verschleißmechanismen an den Werkzeugen. Im Rahmen des Einsatzes der Stempel-, Stanz- bzw. Scherschneidwerkzeuge sollten zunächst die unterschiedlichen Arten von Verschleiß identifiziert werden, so dass es im nächsten Schritt zu entscheiden galt, inwiefern diesem Verschleiß begegnet werden kann. Zu berücksichtigen waren dabei thermisch unterstützte Bearbeitungsprozesse, bei denen das Werkstück zur Warmumformung zunächst erhitzt wurde.

Teilziel 3: Werkzeugkühlkonzept zur Definition von hybriden Werkzeugen. Zur Effizienzsteigerung im gesamten Fertigungsprozess wurde im Rahmen der additiven Fertigung und dem hybriden Aufbau der Werkzeuge vorgesehen, konturoptimierte Kühlkanäle zu integrieren, um die Werkzeugerverwärmung zu reduzieren und so den Verschleiß zu minimieren sowie die Produktqualität zu verbessern.

Teilziel 4: Definition geeigneter Werkzeugwerkstoffe und Sicherstellung der Verarbeitbarkeit im LPBF. Zur Qualifizierung eines geeigneten Materials wurde die Struktur des Projektes so konzipiert, dass zunächst drei unterschiedliche Werkstoffe zu evaluieren waren und lediglich ein Werkstoff für die weitere Vorgehensweise auszuwählen war. Diesen galt es für die weiteren Tätigkeiten zur additiven Fertigung im LPBF zu verwenden.

Teilziel 5: Auslegung von Kühlkanälen zur Steigerung der Prozessqualität, Vermeidung von Adhäsion und Erhöhung der Verschleißbeständigkeit. Nach der Konzeptionierung der Werkzeuge unter Berücksichtigung der Kühlmittelführung sowie dem hybriden Aufbau galt es die Kühlkanäle entsprechend der technischen Anwendung sowie der Belastungsgrenzen auszulegen und die Einbringung dieser in die Aktivteile mittels additiver Fertigung konstruktiv zu berücksichtigen.

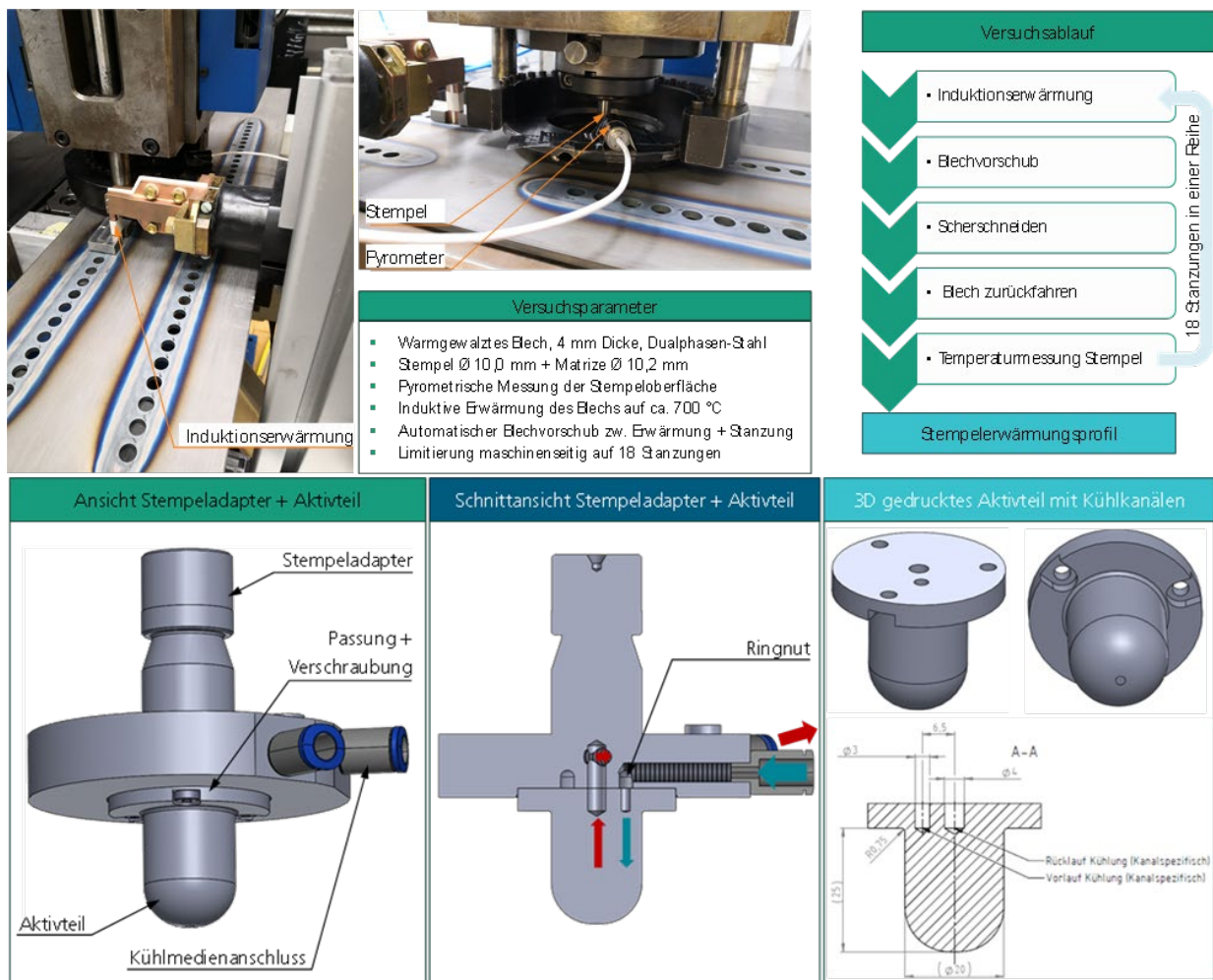
Teilziel 6: Additive Fertigung von Demonstratoren. Um den Beweis für die generelle Verarbeitbarkeit des ausgewählten Materials zu erbringen und Komponenten für den Bau hybrider Werkzeuge zu produzieren, galt es die zuvor konzipierten Werkzeuge bestehend aus additiv zu fertigenden Aktivteilen und konventionell herzustellenden Trägern mittels LPBF zu produzieren und einsatzbereit zu montieren.

Teilziel 7: Ansatz des presswerkzeugintegrierten Härtens und der Qualitätsoptimierung. Durch die Integration konturoptimierter Kühlung in die Werkzeuge wurde davon ausgegangen, dass eine Qualitätssteigerung des Werkstücks stattfindet. Mit der gesamten Vorgehensweise galt es die Maßhaltigkeit (Toleranzen) der Produkte zu verbessern und eventuelle Prozessstreuungen zu verringern, die bspw. beim Produktionsanlauf durch thermische Effekte der Werkzeuge auftreten.

Teilziel 8: Evaluation und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Um das Potenzial einer Kommerzialisierung der Forschungsergebnisse abschätzen zu können, bestand das finale Teilziel darin die Wirtschaftlichkeit der zu entwickelnden Werkzeuge zu analysieren. Zur technischen und ökonomischen Effizienzsteigerung galt es die Mehrkosten, die durch die additive Fertigung bzw. den kostenaufwändigeren hybriden Aufbau der Werkzeuge entstehen, etwa durch verbesserte Qualität, niedrigeren Verschleiß, damit einhergehende verlängerte Standzeiten oder reduzierte Wartungsaufwände mindestens zu kompensieren.

## Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

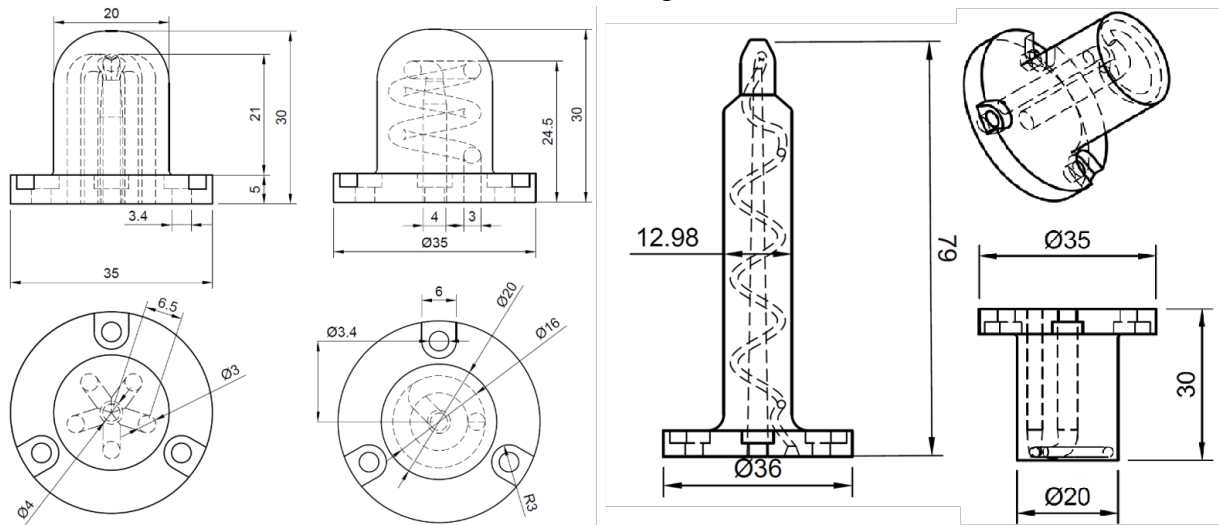
Abb. 1 zeigt einen beispielhaften Versuchsaufbau, der im Projekt zur Anwendung kam, zusammen mit dem grundlegenden Entwurf eines hybriden Beispielwerkzeuges sowie dem Kühlmittelanschlusskonzept.



**Abbildung 1: Definition der Werkzeuggeometrie und Unterteilung in konventionell gefertigten Stempeladapter sowie additiv hergestellten Aktivteil**

Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse beider Forschungseinrichtungen beweisen die Komplexität der einzelnen Problemstellungen und den zugehörigen Lösungsansätzen zur Erreichung der übergeordneten Zielstellung. Während zwar sowohl

die additive Fertigung von drei Beispielwerkzeugtypen (vgl. Abb. 2) als auch deren zerspanende Nacharbeit augenscheinlich problemlos abliefen, zeigten die Evaluationsversuche, dass teilweise dennoch Problemstellen (ggf. Mikrorisse, Poren, Lunker oder Kerben als Rissinitiatoren) in den Komponenten enthalten waren und sich diese auf die Performance während der Untersuchungen auswirkten.



*Abbildung 2: Konzeptzeichnungen der drei Beispielwerkzeuge; links: Runder Stempel mit Helix- und Fontäne-artigen Kühlkanälen; Mitte: Länglicher Stempel; rechts: Werkzeug zur Herstellung von Bipolarplatten*

Während aufgrund der größeren Kräfte (auch beim Rückhub) von dem Problem hauptsächlich die runden und länglichen Stempelvarianten betroffen waren, konnten insbesondere bei den Werkzeugen zur Fertigung von Bipolarplatten die positiven Aspekte der konturoptimierten Kühlung, der additiven Fertigung, des hybriden Aufbaus sowie der Qualitätssteigerung verdeutlicht werden. Auch die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung demonstrieren, dass der gesamte Ansatz zur Nutzung der additiven Fertigung in der Blechbearbeitung neben den technischen Gesichtspunkten auch aus ökonomischer Perspektive von Vorteil sein kann und sowohl die Herstellung als auch die Kommerzialisierung unter bestimmten Bedingungen (etwa im Sonderwerkzeugbau) mit konventionellen Werkzeugen kompetitiv ist.

Als Ausblick bleibt festzuhalten, dass sowohl die weitere Feinjustierung der Maschinenparameter zur additiven Fertigung bereits eine weitere Verbesserung der Qualität bewirken kann. Zusätzliche Optimierungsansätze belaufen sich etwa auf geringere Kerbwirkungen durch konstruktive Anpassungen (bspw. stärkere Verrundungen), den Einsatz alternativer Materialien und verschleißreduzierende Beschichtungen sowie eine Optimierung der Nacharbeitsschritte, wie z. B. Heißisostatisches Pressen und andere Techniken der Wärmebehandlung zur Feinjustierung von Härte und Zähigkeit.

Unabhängig von den kleineren technischen Problemen können die Projektergebnisse sowohl in ihrer übergeordneten Zielstellung als auch in ihren Teilzielen als erfolgreich bewertet werden. Nachfolgend werden auf die in Abschnitt 3.1 geschilderten Teilziele eingegangen und diese mit den im Projekt erreichten Ergebnissen gegenübergestellt:

**Das übergeordnete Ziel des Projektes zur Optimierung von thermisch unterstütztem Schneiden und Umformen von höchstfesten Stählen sowie dem werkzeugintegrierten Härten, um eine wirtschaftliche Anwendung der thermisch unterstützten Blechbearbeitung zu ermöglichen, wurde erreicht.**

Teilziel 1: Die Forschungsfragen konnten beantwortet werden. Zu Projektbeginn ist es gelungen drei beispielhafte Verfahren zur Blechbearbeitung zu definieren und die entsprechenden Kriterien zur technologischen Machbarkeit, zu ökonomischen Gesichtspunkten sowie zu praktischen Randbedingungen festzulegen.

Das Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 2: Die Verschleißmechanismen an den drei unterschiedlichen Werkzeugen zur Blechbearbeitung konnten identifiziert werden. Im Rahmen der Fertigung der drei Werkzeugsysteme sowie der Evaluation ihres Verhaltens im Einsatz konnten so sowohl die Verschleißmechanismen als auch die Einflüsse der thermisch unterstützten Bearbeitung sowie der Wirkung der konturoptimierten Kühlung mit den Vorhersagen der thermo-mechanischen Simulationen ins Verhältnis gesetzt werden.

Das Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 3: Im Rahmen von konstruktiven Maßnahmen ist es bei allen drei Referenzbeispielen, bestehend aus rundem Stempel mit Fontäne- und Helix-artiger Kühlung, länglichem Stempel sowie einem Werkzeug zur Fertigung von Bipolarplatten, gelungen hybride Werkzeugsysteme zu konzipieren. Diese wurden modular jeweils aus einem konventionell gefertigten Adapter mit Einspannung in die Maschine sowie einem additiv hergestellten Aktivteil mit konturoptimiertem Kühlkanalgeflecht entworfen. Alle drei Beispiele berücksichtigten die Kompatibilität mit der Blechbearbeitungsmaschine sowie die Einbringung eines Kühlmittels.

Das Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 4: Während in einem frühen Projektstadium die drei Materialien PM23, 17-4 PH und Celsit V für die additive Fertigung der Aktivteile in Betracht gezogen wurden, haben Voruntersuchungen, in denen bspw. Kerbschlagbiegeversuche, Härtemessungen oder Verschleißuntersuchungen an Prüfkomponenten aller drei Materialien durchgeführt wurden, gezeigt, dass das Material PM23 am ehesten für den Einsatz in der Blechbearbeitung geeignet ist. Im Zuge der weiteren Schritte zur additiven Fertigung der Aktivteile konnte eine qualitativ hochwertige Verarbeitung des Materials im LPBF-Verfahren demonstriert werden.

Das Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 5: Zur konturoptimierten Auslegung der Kühlkanäle aller drei Anwendungsbeispiele konnten unterschiedliche CAE-Werkzeuge erfolgreich eingesetzt werden, um die hybriden Werkzeuge zu konzeptionieren und sowohl aus additiven als auch konventionellen Verfahren zu fertigen. Sowohl die Gestaltung mit unterschiedlichen Kühl-

kanalgeflechten als auch die Fertigung mit anschließender Entpulverung verliefen problemlos (vgl. Abb. 3).

Das Teilziel wurde erreicht.

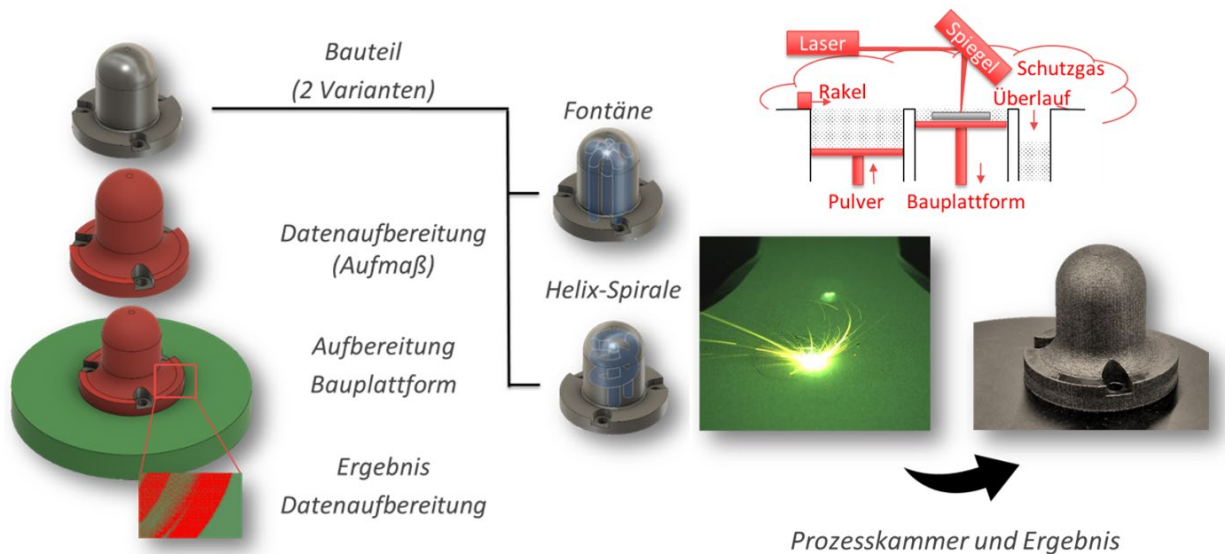


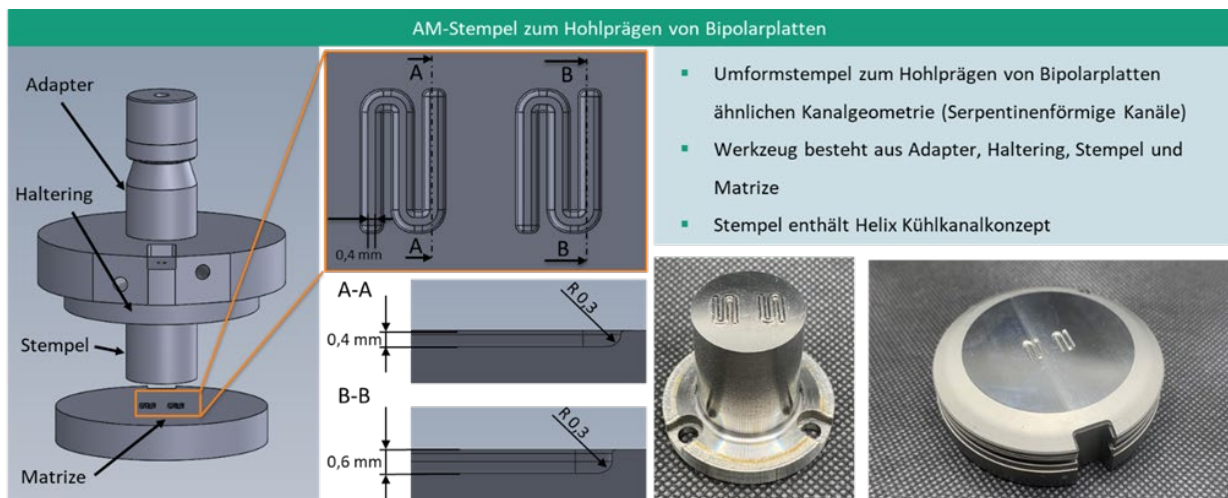
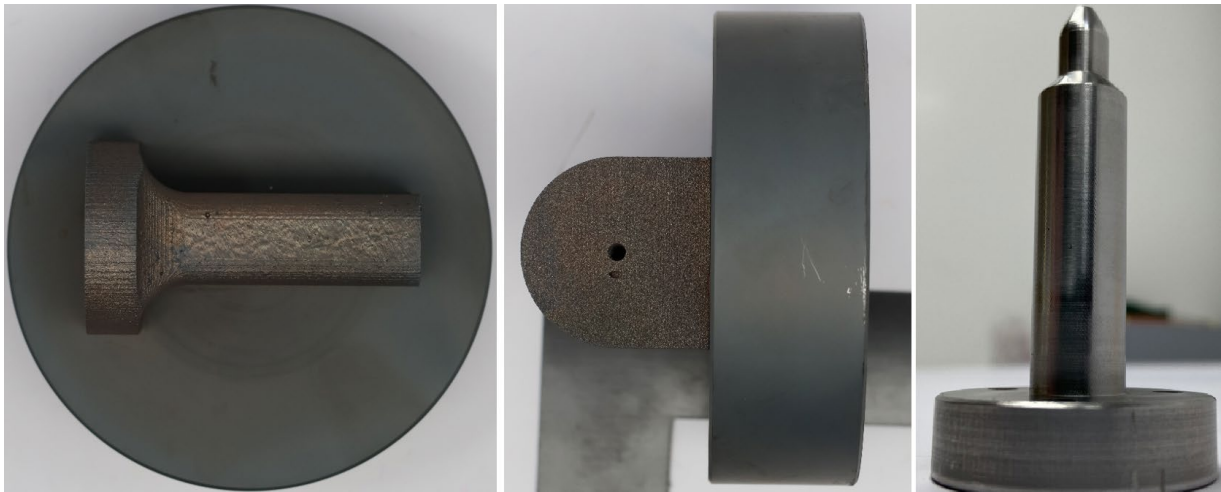
Abbildung 3: Preprocess und LPBF am Beispiel der beiden runden Stempelvarianten

Teilziel 6: Während sich die additive Verarbeitung des PM23 als anspruchsvoll herausstellte und es insbesondere im Rahmen des Preprocess immer wieder nötig war Anpassungen der Maschinenparameter sowie der Geometrien vorzunehmen, ist es letztendlich gelungen qualitativ hochwertige und rissfreie Exemplare der Aktivteile aller drei Anwendungsbeispiele im LPBF zu fertigen. Die weiteren Schritte zur Nacharbeit in Form von zerspanender Bearbeitung von Funktionsflächen sowie von gezielter Wärmebehandlung konnten ebenfalls so realisiert werden, dass eine ausreichende Anzahl hybrider Demonstratoren aller drei Anwendungsbeispiele gefertigt und erprobt werden konnten (vgl. Abb. 4).

Das Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 7: Durch die hybride Konzeptionierung der drei Werkzeugsysteme sowie die Einbringung einer konturoptimierten Kühlung konnte demonstriert werden, dass die Werkzeugtemperatur im direkten Vergleich zu konventionellen Varianten in der Serienfertigung bei allen drei Beispielprozessen niedriger gehalten werden konnte. Dies wirkte sich positiv sowohl auf das Verschleißverhalten der Werkzeuge als auch auf die Qualität der Werkstücke aus, wobei für Hochvolumenversuche lediglich die Vorkehrungen getroffen werden konnten.

Das Teilziel wurde erreicht.



*Abbildung 4: Verschiedene Stadien zur Fertigung eines länglichen Stempels; Konzeptionierung und Ergebnis des Werkzeugs zur Herstellung von Bipolarplatten*

Teilziel 8: Durch eine umfangreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einer Ermittlung der Kosten zur laborbasierten Herstellung von Demonstratoren aller drei Anwendungsbeispiele sowie der Abschätzung der Kosten nach einem Transfer auf eine serienreife industrielle Fertigung, konnte ermittelt werden, dass sich der hybride Aufbau mit additiv gefertigten Aktivteilen insbesondere für maßgefertigte Varianten rentiert. Unter Berücksichtigung des optimierten Verschleißverhaltens sowie einer Steigerung der Produktqualität konnte gezeigt werden, dass auch der direkte Vergleich mit kommerziell erwerblichen Serienwerkzeugen kompetitiv sein kann.

Das Teilziel wurde erreicht.

## Zusammenfassung

Das Projekt verfolgte das Ziel, das thermisch unterstützte Schneiden und Umformen höchstfester Stähle deutlich effizienter nutzbar zu machen und ein werkzeugintegriertes Härten einzubinden, um so den wirtschaftlichen Einsatz der thermisch unterstützten Blechbearbeitung zu ermöglichen. Darüber hinaus sollten Qualitätssteigerungen in

konventionellen Prozessen erzielt werden, in denen sehr kleine Toleranzen gefordert sind, wie etwa beim Feinschneiden. Auch Prozessstreuungen, die bspw. beim Produktionsanlauf durch thermische Effekte an den Werkzeugen entstehen, galt es zu verringern.

Um diese übergeordneten Ziele zu erreichen, war in erster Linie eine strukturelle und thermische Optimierung der Werkzeuge erforderlich. Der Lösungsweg umfasste die Definition der Anforderungen, die Ausgangscharakterisierung konventioneller Werkzeuge, die additive Fertigung von Probekörpern sowie die Weiterentwicklung der Werkzeuge. Daran schlossen sich die additive Fertigung der Aktivteile, deren Evaluation im Herstellungsprozess sowie die abschließende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit an.

Realisiert wurde erstmalig ein hybrid aufgebautes Werkzeugsystem für Folgeverbundwerkzeuge mit innengekühlten Aktivteilen. Dafür wurden beispielhaft drei unterschiedliche Anwendungen erprobt. In einen runden Stempel wurden eine Helixförmige und eine Fontänenförmige Kühlkanalstruktur integriert. Des Weiteren dienten sowohl ein länglicher Ziehstempel als auch ein Werkzeug zur Fertigung von Bipolarplatten als Anwendungsbeispiele.

Von diesen Referenzwerkzeugen wurden Verschleißverhalten und Standzeit charakterisiert sowie ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen additiv und konventionell hergestellten Werkzeugen vorgenommen. Ergänzend wurde eine Anwenderrichtlinie zur Auslegung und Fertigung additiv hergestellter Komponenten erarbeitet.

Für kleine und mittelständische Unternehmen der blechverarbeitenden Industrie, die zunehmend mit höchstfesten Werkstoffen arbeiten müssen, bieten die Projektergebnisse einen besonderen Nutzen. Gerade für diese Unternehmen ist die Verfügbarkeit wirtschaftlicher Fertigungsverfahren, die gleichzeitig hohe Bauteilqualitäten gewährleisten, entscheidend, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Additiv gefertigte bzw. hybrid aufgebaute Umformwerkzeuge können hierzu einen wertvollen Beitrag leisten, indem sie neue Prozessketten ermöglichen und eine werkzeugintegrierte Bauteilfunktionalisierung realisieren.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Dr.-Ing. Robin Roj unter +49 (2191) 5921-122.