INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

DLR Projektträger

Projektträger für das
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Schlussbericht vom 31.10.2025

zum IGF-Vorhaben 22603 N

Thema

Verschleißverhalten borhaltiger Oberflächenmodifikationen auf Matrizen für das Strangpressen von Bunt- und Schwermetallen

Berichtszeitraum

01.10.2022 bis 30.04.2025

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.
Wallstr. 58/59
10179 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Berlin, Forschungszentrum Strangpressen
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Technische Universität Braunschweig, Institut für Oberflächentechnik
Riedenkamp 2
38108 Braunschweig

FZS Forschungszentrum STRANG PRESSEN der TU Berlin

Technische Universität Braunschweig
Institut für Oberflächentechnik

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

Arbeitshypothese und Zusammenfassung der Arbeitspakete 4

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum 6

1.1 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Ausgabenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)? 6

1.2 Arbeitspaket 1: Charakterisierung prozessrelevanter Eigenschaften der Borierzone/PACVD-Beschichtungen 6

Arbeitspaket 1.1: Borieren/Beschichten 6

Arbeitspaket 1.2: Langzeitstabilität der Diffusionszonen bei hohen Temperaturen 7

Arbeitspaket 1.3: Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß 9

Arbeitspaket 1.4: Mechanische Kennwerte der Hartstoffschicht bis 800 °C 9

Arbeitspaket 1.5: Rockwell-Hafttests zur Charakterisierung der Widerstandsfähigkeit gegen Stoßbeanspruchung 11

1.3 Arbeitspaket 2: Pressversuche und numerische Untersuchungen zur Darstellung der Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch borhaltige Oberflächenmodifikationen 12

Arbeitspaket 2.1: Borieren und Beschichten von komplexeren Geometrien zur Betrachtung der Schichtdickenverteilung und Homogenität der Oberflächenmodifikationen 12

Arbeitspaket 2.2: Pressversuche mit borierten und beschichteten Matrizen mit Schmierstoff und Wasserkühlung 16

Arbeitspaket 2.3: Pressversuche mit komplexer Profilgeometrie 19

Arbeitspaket 2.4: Analyse der bepressten Matrizen auf Beschädigungen der Oberflächenmodifikation 20

Arbeitspaket 2.5: Numerische Berechnungen zur Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch die Oberflächenmodifikationen 24

1.4 Arbeitspaket 3: Industrieversuche mit oberflächenmodifizierten Strangpresswerkzeugen 27

Arbeitspaket 3.1: Erprobung von oberflächenmodifizierten Strangpresswerkzeugen im Strangpresswerk 27

1.5 Arbeitspaket 3.2: Analyse der oberflächenbehandelten Werkzeuge nach Einsatz im Presswerk 28

1.6 Arbeitspaket 4: Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens borhaltiger Oberflächenmodifikationen auf Strangpresswerkzeugen 33

2 Verwendung der Zuwendung 33

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 34

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten 35

Wissenstransfer in die Wirtschaft 36

5 Durchgeführte Transfermaßnahmen 36

6 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit 37

7 Literaturverzeichnis 38

Arbeitshypothese und Zusammenfassung der Arbeitspakete

Ziel des angestrebten Vorhabens war es die im Vorgängerprojekt 19862 N entwickelten boridischen Matrizenoberflächen weiterzuentwickeln, vertieft hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften zu charakterisieren und in industriellen Großversuchen zu erproben. Um auch komplexere Matrizengeometrien mit Oberflächenmodifikationen versehen zu können, werden die Beschichtungsprozesse für 3D-Konturen und größere Maßstäbe optimiert. In Pressversuchen im Versuchsmaßstab wird nachgewiesen, dass sich durch Einbringung eines zusätzlichen Schmierstoffs Reibung und Verschleiß weiter mindern und gleichzeitig die Produktqualität steigern lassen. Abschließend kann durch Industrieversuche nachgewiesen werden, dass die Oberflächenmodifikationen die Einsatzbereiche der Substratwerkstoffe Warmarbeitsstahl bzw. Alloy 718 in den Bereich der deutlich teureren Co/Mo-Basislegierungen anheben können.

AP 1 Charakterisierung prozessrelevanter Eigenschaften der Borierzone/PACVD-Beschichtungen

Das Arbeitspaket untergliedert sich in fünf Teile. In AP 1.1 wurden die Beschichtungen und Borierungen durchgeführt, wie sie bereits am Vorgängerprojekt erprobt wurden. Zudem wurden komplexere Geometrien beschichtet bzw. boriert, damit Erkenntnisse für den Einsatz im Presswerk gewonnen werden können. In AP 1.2 erfolgte die Prüfung der Langzeitstabilität gegenüber thermischer Wechselbelastung, da die Werkzeuge in der industriellen Praxis teilweise über 100-mal eingesetzt werden. Somit ist von großem Interesse, ob die Beschichtungen / Borierungen trotz ihrer geringen Dicke (3 bis 25 µm) den Thermozyklen standhalten. In AP 1.3 wird die Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß ermittelt, da die modifizierten Randzonen gegenüber konventionellen Werkstoffen mit ihrer höheren Härte auch mit höherer Abrasivbeständigkeit einhergehen sollten. Im Kontrast zum Vorgängerprojekt werden in AP 1.4 nicht die mechanischen Kennwerte (Härte und E-Modul) bei Raumtemperatur ermittelt, sondern *in-situ* bei erhöhten Temperaturen. Dadurch können die FE-Modelle mit erhöhter Datenqualität simulieren. Für die Handhabung im Pressunternehmen werden die Modifikationen in AP 1.5 auf Stoßbeanspruchung belastet, da das Handling von Werkzeugen im Produktionsbereich teilweise durch die Mitarbeitenden mit wenig Vorsicht durchgeführt wird. Daraus leitet sich die Fragestellung ab, inwiefern die dünnen Randzonen grobe mechanische Krafteinwirkung ertragen. Dies wird anhand von Rockwell C Eindrücken untersucht.

AP 2 Pressversuche und numerische Untersuchungen zur Darstellung der Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch borhaltige Oberflächenmodifikationen

Die Oberflächenmodifikationen werden im ersten Schritt (AP 2.1) auf Dummykörpern mit komplexen Geometrien aufgebracht und die Schichtdickenverteilung und Homogenität untersucht. Dadurch wird sichergestellt, dass die später eingesetzten Werkzeuge in den hochbeanspruchten Bereichen wie Einlaufradius optimal beschichtet sind. Durch Strangpressversuche mit Schmierstoff und teilweiser Wasserkühlung wird die Veränderung der Profilqualität über mehrere Prozesszyklen hinweg identifiziert (AP 2.2). Die Wasserkühlung dient dabei der Unterdrückung von Zunderbildung auf den Kupfersträngen und somit auch der Beeinträchtigung der Oberflächenqualität durch Abplatzen der Zunderschicht. Die Presswerkzeuge werden hinsichtlich des Verschleißes optisch inspiziert. Weiterführende Pressungen mit einer komplexeren Profilgeometrie (U-Form) ermöglichen eine Beurteilung zur Eignung der untersuchten Hartstoffschichten bei Einsatz auf konkaven und konvexen Radien mit verschiedenen Durchmessern (AP 2.3). Im Anschluss an AP 2.2 und AP 2.3 werden die Matrizen in AP 2.4 zerstörend geprüft, damit etwaige Beschädigungen der Oberflächenmodifikationen ermittelt werden können. Zusätzlich lässt sich möglicherweise bestimmen, ob adhäsiver Verschleiß vorliegt, und dieser kann hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung untersucht werden. Am Ende des

APs sollen die vielversprechendsten Modifikationen identifiziert sein, damit eine Auswahl für den Einsatz im Industrieversuch erfolgen kann. Hinzu kommt in AP 2.5 die numerische Berechnung der Werkzeugbelastung, damit die Praxisergebnisse vom Forschungszentrum Strangpressen durch Simulationen auf die Gegebenheiten in der Industrie hochskaliert werden und die Grundlage zur Entscheidungsfindung verbessert wird.

AP 3 Industrieversuche mit oberflächenmodifizierten Strangpresswerkzeugen

Die Oberflächenmodifikationen werden im Strangpresswerk der Wieland-Werke AG eingesetzt. Dazu reisen Mitarbeitende beider Forschungseinrichtungen nach Ulm, um die Versuche wissenschaftlich zu begleiten. Die Werkzeuggeometrie wird vom projektbegleitenden Ausschuss festgelegt. Die Notwendigkeit der Versuche besteht in der Tatsache, dass am Forschungszentrum Strangpressen deutlich kleinere Pressen zum Einsatz kommen, als dies in den großen Unternehmen der Schwerindustrie der Fall ist. Konkrete Unterschiede im Hinblick auf die Werkzeugbelastung ergeben sich durch die kleineren Bolzendurchmesser, wodurch die Lauflänge eines Bolzens im Strangpresswerk mit mehreren hundert Metern um ein Vielfaches höher ist als in den Laborversuchen am FZS. Die Unterschiede in der Lauflänge wirken sich direkt auf die Verschleißerscheinungen auf den Funktionsflächen der Matrize aus und erschweren die Übertragbarkeit der Laborversuche zur industriellen Praxis. Dementsprechend sind die Pressungen bei der Wieland-Werke AG von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des Projekts und den Nutzen für die PA Mitglieder. Um die Werkzeuge nach dem Einsatz zu bewerten, erfolgt die Analyse der Funktionsflächen am IOT mittels zerstörungsfreier und zerstörender Prüfverfahren.

AP 4 Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens borhaltiger Oberflächenmodifikationen auf Strangpresswerkzeugen

Durch die Oberflächenmodifikation soll die Standzeit der Werkzeuge erhöht werden. Die Modifikation ist ein zusätzlicher Prozessschritt, der entsprechend mit zusätzlichen Kosten einhergeht. Des Weiteren werden im Presswerk unterschiedliche Werkstoffe für die Matrizen eingesetzt (Co-basis Legierungen, Hartmetalle, Warmarbeitsstähle, etc.). Bei der Beschichtung wird der Warmarbeitsstahl DIN 1.2367 genutzt. Daraus folgt, dass im Vergleich zum unbeschichtet eingesetzten DIN 1.2367 ausschließlich die zusätzlichen Kosten für die Beschichtung mit der Steigerung der Standmenge gegenübergestellt werden muss. Ziel ist die Beantwortung der Frage, ob die zusätzlichen Kosten für die Beschichtung niedriger sind als der finanzielle Nutzen durch längere Lebensdauern. Im Falle der Borierung wird die Nickelbasislegierung Alloy 718 verwendet. Neben den Kosten für die Behandlung gilt es auch den finanziellen Unterschied von Alloy 718 (Einkaufskosten, Bearbeitungskosten, etc.) mit den konventionellen Werkstoffen (Co-basis Legierung, Hartmetall, etc.) zu berücksichtigen.

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Ausgabenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?

Nachdem im Vorgängerprojekt Oberflächenmodifikationen identifiziert wurden, die potenziell den Verschleiß an Strangpressmatrizen reduzieren können, blieben dennoch zentrale Fragestellungen bestehen. Aus Sicht des projektbegleitenden Ausschusses ist die Frage der Übertragbarkeit von den Ergebnissen aus Pressversuchen am Forschungszentrum Strangpressen auf die industriellen Anlagen von Unternehmen wie der Wieland-Werke AG von hohem Interesse. Dementsprechend lag der Fokus auf der Erprobung im Presswerk und anschließender Untersuchung der Matrizen hinsichtlich des Verschleißes, damit die Frage der Einsetzbarkeit im Presswerk beantwortet werden kann. Dieses Hauptziel hat sich im Projektverlauf nicht geändert. Weitere Fragestellung wie die Behandlung von komplexen Konturen (enge Konturen, innen- und außenliegende rechte Winkel, etc.) wurden ebenfalls wie geplant untersucht. Die Planung, Durchführung und Betreuung, sowie Auswertung der Industrieversuche gestaltete sich jedoch deutlich komplexer als erwartet. Dadurch traten Verzögerungen im Projektablauf auf, die nicht mehr aufgeholt werden konnten. Die Auswertung der industriellen Pressversuche wurde zu Lasten der Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens der Oberflächenbehandlungen priorisiert.

1.2 Arbeitspaket 1: Charakterisierung prozessrelevanter Eigenschaften der Borierzone/PACVD-Beschichtungen

Arbeitspaket 1.1: Borieren/Beschichten

Wie im Projektantrag vorgesehen wurden in diesem AP die Borierung des Alloy 718 und die Beschichtung des DIN 1.2367 mit Ti-Si-B-C-N durchgeführt. Auf Grundlage des 1. PA Treffens wurde auf Wunsch des PA's auf die Ti-B-N Beschichtung verzichtet, da diese weniger temperaturbeständig ist als die Ti-Si-B-C-N Schicht und die Erhöhung der Zähigkeit durch den mehrlagigen Schichtaufbau nicht den Nachteil der geringen Temperaturbeständigkeit aufhebt. Stattdessen haben sich die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses eingebracht, indem die WEFA Inotec GmbH eine Al_2O_3-basierte Beschichtung auf dem DIN 1.2367 Stahlsubstrat applizierte und die BorTec GmbH die Werkstoffe DIN 1.2367 und Alloy 718 borierte. Dadurch wurden weitere vAW-Leistungen erbracht, die im Projektantrag nicht vorgesehen waren. Für die seitens des IOT's hergestellten Oberflächenmodifikationen wurde nachgewiesen, dass die Konturgängigkeit bei der Behandlung komplexer Geometrien gegeben ist und der kritische Einlaufradius gleichmäßig und mit guter Anhaftung behandelt wurde. Die Modifikationen der PA-Mitglieder sind bereits seit vielen Jahren für die gleichmäßige Behandlung von 3D-Werkzeugkonturen etabliert.
Die Borierung des Alloy 718 führte zu einer Aufrauhung der Oberfläche, da die Diffusionsvorgänge des Bors durch ihre Interaktion mit den Atomen des Substratmaterials zu stärkeren Verwerfungen führten, als dies bei vielen Beschichtungsverfahren der Dünnschichttechnologie der Fall ist. Aufgrund der hohen Dicke Schicht (im folgenden Beispiel 8 µm, aber insgesamt bis zu 25 µm möglich) ist es möglich die Schichten anschließend durch eine Politur einzuglätten. Dies führte zwar zur Abnahme der Schichtdicke, jedoch bleibt ausreichend Verschleißschutzzone übrig, um den tribologischen Belastungen entgegenzutreten (siehe Abbildung 1). Im

vorliegenden Fall wurde die Dicke von 8 µm auf 6 µm reduziert, wobei vor der Politur eine „ausgefranste“ Struktur zwischen Borierzone und Einbettmasse zu erkennen ist und nach der Politur eine glatte Oberfläche.

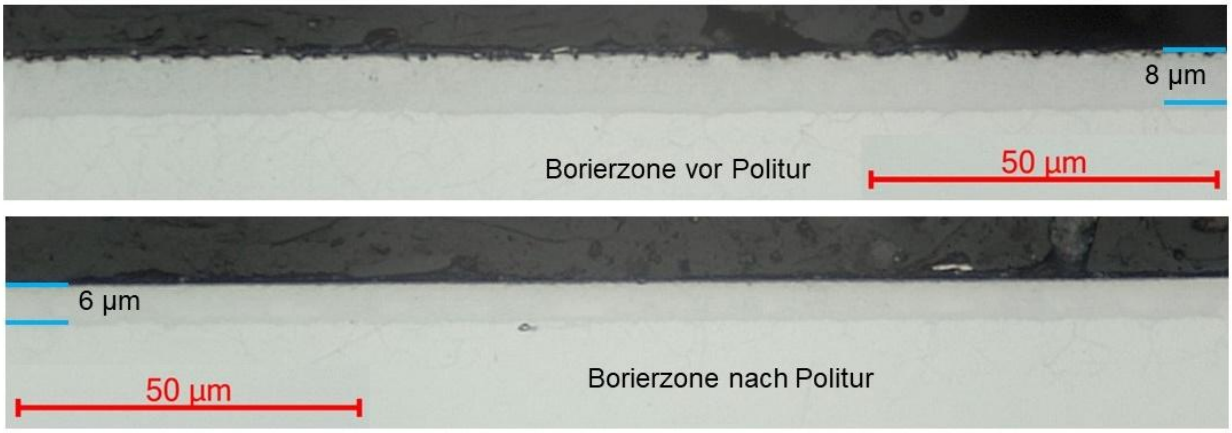


Abbildung 1: Die Borierzone vor und nach dem Polieren im Querschliff

Arbeitspaket 1.2: Langzeitstabilität der Diffusionszonen bei hohen Temperaturen

Zur Emulation der thermischen Belastung der Oberflächenmodifikationen im Strangpresseinsatz erfolgte eine thermische Wechselbelastung zwischen 450 °C bis 900 °C. Die Erwärmung der Proben auf 900 °C erfolgte in drei Minuten unter Schutzgasatmosphäre. Anschließend wurden die Proben in einen Glühofen mit 450 °C und Luftatmosphäre umgelagert. Nach sieben Minuten wurde der nächste Zyklus durch erneute Umlagerung in den heißeren Ofen initiiert. Insgesamt wurden 42 Zyklen durchgeführt, wobei jeweils eine Probe der verschiedenen Substrat-Schicht-Kombinationen nach 21 Zyklen ausgeschleust wurde, um verschiedene Zyklusanzahlen analysieren zu können. In Abbildung 2 sind die Proben nach der Beschichtung / Borierung und vor der thermischen Wechselbeanspruchung zu sehen.

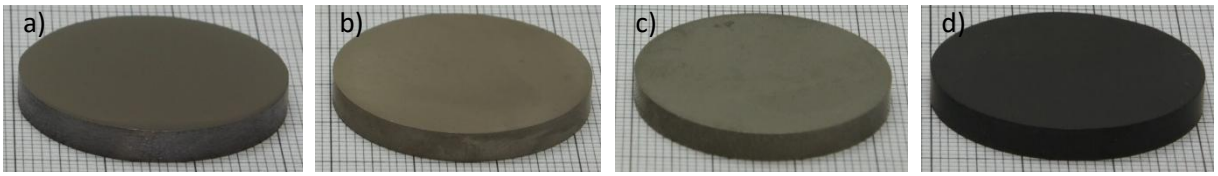


Abbildung 2: Oberflächenmodifizierte Shims für Thermozykelversuche: a) 1.2367+ Ti-Si-B-C-N, b) Alloy 718 + Borierung (IOT), c) Alloy 718 + Borierung (BorTec GmbH) und d) 1.2367 + Al_2O_3 (WEFA Inotec GmbH).

Der in Abbildung 3 dargestellte Temperaturverlauf wurde mittig auf einer Dummy-Probe gemessen und zeigt die ersten drei Zyklen. Es ist eine gute Reproduzierbarkeit der einzelnen Zyklen zu erkennen.

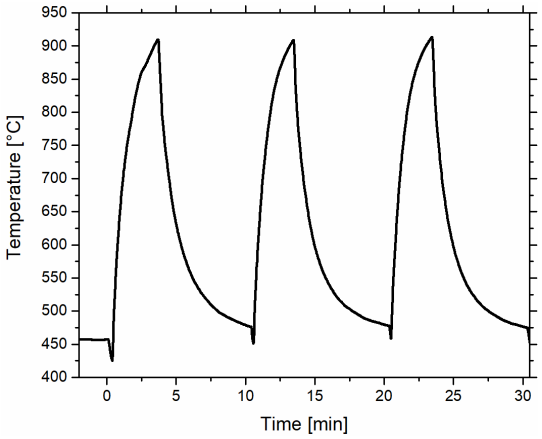


Abbildung 3: Temperaturverlauf während der ersten drei Zyklen.

Die nach 21 bzw. 42 Zyklen entnommenen Shims sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Die an der Ti-Si-B-C-N Beschichtung auf Warmarbeitsstahl 1.2367 zu beobachtenden farblichen Veränderungen (Umschlag von dunkelgrau zu hellgrau/braun, Abbildung 4,a) lassen auf Oxidationserscheinungen schließen. Zudem ist die Bildung von schollenartigen Abplatzungen zu erkennen, die auf Schichtversagen hindeutet. Die Verdopplung der Thermozyklen führt optisch zu keiner weiteren Veränderung (Abbildung 5,a). Die Borierung auf Alloy 718 (IOT) ist ebenfalls von einer farblichen Veränderung betroffen (Abbildung 4,b). Auch hier lässt der bräunliche Farbton auf Oxidbildung schließen. Eine signifikante Veränderung über die Zyklenzahl ist nicht zu erkennen (Abbildung 5,b). Die Borierung der BorTec GmbH auf Alloy 718 zeigt ein ähnliches Verhalten (Abbildung 4,c und Abbildung 5,c). Identisch sind die Entwicklung der Braunfärbung, sowie die Konstanz über die Zyklenzahl. Auffällig ist die Bildung eines mit blasen behafteten Films auf der Oberfläche. Dieser ist der BorTec GmbH bekannt und stellt keinen negativen Effekt dar. Die Al_2O_3-basierte Beschichtung der WEFA Inotec GmbH (Abbildung 4,d und Abbildung 5,d) zeigt auch nach 42 Zyklen keine optische Veränderung. Die zusätzlich aufgenommene Borierung der BorTec GmbH auf Warmarbeitsstahl 1.2367 wird in weiteren Thermozykelversuchen untersucht.

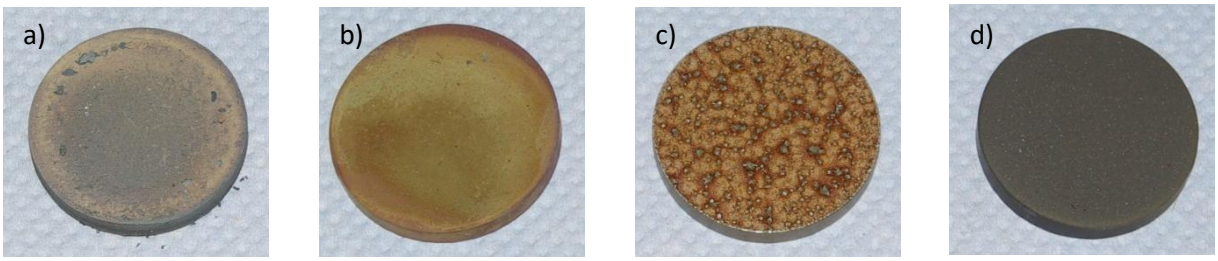


Abbildung 4: Oberflächenmodifizierte Shims nach 21 Thermozyklen: a) 1.2367+ Ti-Si-B-C-N, b) Alloy 718 + Borierung (IOT), c) Alloy 718 + Borierung (BorTec GmbH) und d) 1.2367 + Al_2O_3 (WEFA Inotec GmbH).

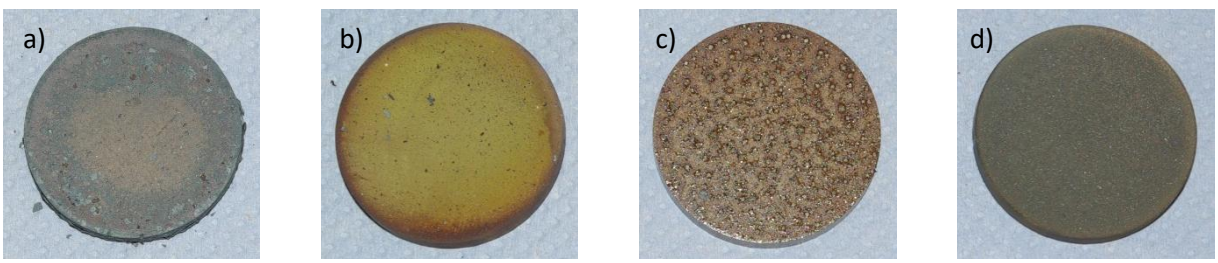


Abbildung 5: Oberflächenmodifizierte Shims nach 42 Thermozyklen: a) 1.2367+ Ti-Si-B-C-N, b) Alloy 718 + Borierung (IOT), c) Alloy 718 + Borierung (BorTec GmbH) und d) 1.2367 + Al_2O_3 (WEFA Inotec GmbH).

Arbeitspaket 1.3: Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß

Im Laufe des Projekts wurden die Kalottenschliffe wie geplant durchgeführt, um damit Kennwerte zu ermitteln. Zwei dieser Kalotten sind in Abbildung 6 für verschiedene Ti-Si-B-C-N Mehrlagenschicht zu finden. Sie unterscheiden sich unter anderem in der Anzahl an TiN Zwischenschichten (helle Ringe in der Schicht).

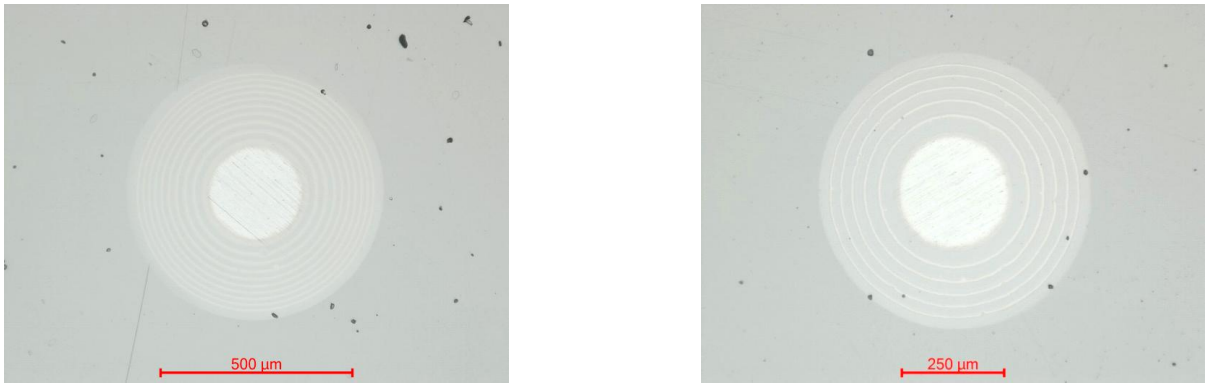


Abbildung 6: Kalottenschliff einer Ti-Si-B-C-N Mehrlagenschicht mit 10 TiN Zwischenschichten (links) und 5 TiN Zwischenschichten (rechts).

Die Kennwerte konnten trotz intensiver Bemühungen in AP 2.5 nicht nutzbar gemacht werden. Der Versuch die Verschleißbelastung im Kalottenschliff mittels FE-Modell zu simulieren konnte aufgrund der Einschränkungen des FE-Programms nicht umgesetzt werden. Nähere Ausführung zur Simulation sind in AP 2.5 zu finden. Da die Ergebnisse aus AP 1.3 im späteren Projektverlauf keinen Mehrwert generieren konnten wird auf die Darstellung der Einzelheiten der Ergebnisse aus dem AP verzichtet.

Arbeitspaket 1.4: Mechanische Kennwerte der Hartstoffschicht bis 800 °C

Eine Weiterentwicklung des Ti-Si-B-C-N Schichtsystems besteht in der Vereinfachung des Prozesses durch den Verzicht auf Bor und das Einstellen einer besonderen Nanostruktur. Im Folgenden werden lediglich die für dieses AP relevanten Aspekte von Ti-Si-C-N beleuchtet, wohingegen sich die wissenschaftlich tiefgreifenden Informationen rund um das Schichtsystem in einer Publikation in der internationalen Fachzeitschrift Advanced Materials Interfaces finden lassen [The24-1]. Nach der Grundlagenuntersuchung hinsichtlich Mikro- und Nanostruktur sowie der thermischen Beständigkeit der Ti-Si-C-N Schicht wurden die mechanischen Kennwerte (Härte und E-Modul) bei 550 °C, 650 °C und 750 °C ermittelt. Es wurde festgestellt, dass die Schicht ein Netzwerk aus Mikrorissen aufweist und die Härte der Schichten im Vergleich zum Ausgangszustand (> 40 GPa) unrealistisch niedrig (< 20 GPa) erscheint. Im weiteren Projektverlauf wurde das klassische Ti-Si-B-C-N Schichtsystem auf identische Weise getestet, damit ermittelt wird, ob dieses ebenfalls ein ausgeprägtes Rissnetzwerk aufweist. Dies war der Fall. Zudem konnte wieder gemessen werden, dass die Härtewerte unrealistisch niedrig erscheinen. So liegt die erste Temperaturstufe (550 °C) nicht weit von der Abscheidetemperatur im Beschichtungsprozess (530 °C), weshalb sich keine signifikanten Härteänderung einstellen sollte, da im Nanokomposit keine strukturellen Änderungen auf Nanoebene zu erwarten sind. Trotzdem sinken die Messwerte von 28 GPa auf 18 GPa, ohne dass es eine wissenschaftliche Erklärung für den drastischen Härteeinbruch gibt. Für den dritten getesteten Werkstoff, den Alloy 718, liegt ein vergleichbares Verhalten in noch stärkerer Ausprägung vor. Hier reduziert sich die Härte angeblich vom Ausgangszustand mit 23 GPa auf 7 GPa bei 550 °C. Aufgrund der Tatsache, dass das Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses BorTec GmbH mit dem Pasten- und Pulverborieren von Alloy 718 für temperierte Anwendungen

seit Jahrzehnten kommerziell erfolgreich ist, erscheint es ebenfalls fraglich, ob diese Werte realistisch sind. Schließlich könnte dieses Produkt dem Verschleiß nicht entgegentreten, wenn die Härte so stark sinken würde, womit borierter Alloy 718 von Industriekunden als untauglich abgelehnt werden würde. Da sämtliche Messungen (Ti-Si-C-N, Ti-Si-B-C-N und borierter Alloy 718) zu Ergebnissen führten, die kritisch zu hinterfragen sind, wurden in Absprache mit dem PA Versuche zur Verifikation beschlossen. Die Proben wurden am FZS in inerter Atmosphäre bei 700 °C bzw. 750 °C getempert. Anschließend wurden sie am IOT zur Sicherheit nochmals poliert, um ggf. eine wenige Nanometer dicke Oxidschicht zu entfernen. Danach wurden die Proben in einem klassischen Nanoindenter bei Raumtemperatur vermessen. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse für Ti-Si-B-C-N dargestellt. Es wird deutlich, dass diese Werte klar im Erwartungsbereich liegen. Möglicherweise ist bereits die Messung bei Raumtemperatur inkorrekt, da die Schichten im Ausgangszustand bis zu 40 GPa aufweisen können, wie in der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Thewes nachzulesen ist [The24-2]. Anscheinend war das ambitionierte Ziel die Härte bei erhöhten Temperaturen *in-situ* zu messen in diesem Fall durch technologische Limitierungen nicht erfolgreich.

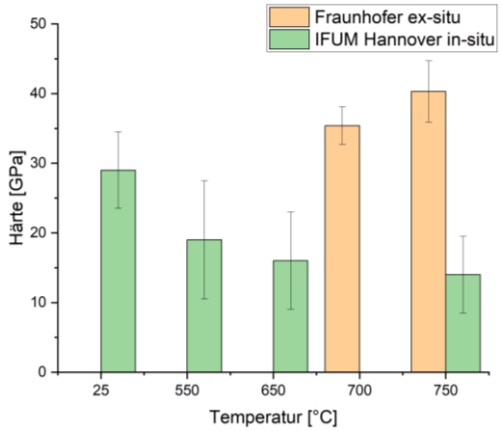


Abbildung 7: Dargestellt sind Härtewerte von Ti-Si-B-C-N bei unterschiedlichen Temperaturen. In grün sich die *in-situ* Messungen dargestellt und dem gegenüber stehen die *ex-situ* Messungen in orange am Fraunhofer IST.

In identischer Vorgehensweise wurde der borierte Alloy 718 *in-situ* und *ex-situ* vermessen. Es zeigt sich dasselbe Muster (siehe Abbildung 8). Die Borierzone ist bei 700 °C bzw: 750 °C ca. 20 GPa hart, was ein erwartbarer Härterückgang von den ursprünglichen ca. 22,5 GPa bei Raumtemperatur darstellt.

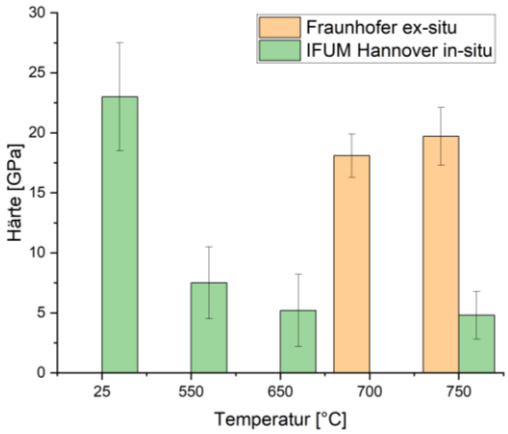


Abbildung 8: Dargestellt sind Härtewerte von boriertem Alloy 718 bei unterschiedlichen Temperaturen. In grün sich die *in-situ* Messungen dargestellt und dem gegenüber stehen die *ex-situ* Messungen in orange am Fraunhofer IST.

Die *in-situ* Härtemessungen wurden wie im Forschungsantrag vorgesehen durchgeführt werden, jedoch konnten die Ergebnisse aufgrund von Zweifeln nicht zum Einsatz kommen. Dies kann verschiedene Gründe haben. Zum einen könnten die Risse in den Beschichtungen Ti-Si-C-N und Ti-Si-B-C-N die Messungen verfälschen, zum anderen entsteht ggf. trotz Schutzgasatmosphäre eine dünne und weiche Oxidschicht, die das Messergebnis verfälscht. Eine der Lehren aus diesem Arbeitspaket besteht darin, dass thermisch induzierte Risse durch einen angepassten Schichtaufbau unterdrückt werden könnten. Eine Möglichkeit besteht in einem mehrlagigen Schichtaufbau, wodurch ein geradliniger Rissfortschritt von der Oberfläche bis zum Substrat verhindert wird, da die Risse immer wieder auf duktile Zwischenschichten treffen, die den Rissfortschritt in Richtung Substrat verhindern. Dieses Schichtdesign wurde bereits in AP 1.3 in Form zweier Kalottenschliffe vorgestellt. Insgesamt wurden vier verschiedene Schichten entwickelt, von denen sich eine in Tests hinsichtlich der Thermoschockbeständigkeit als tendenziell rissreduzierend erwies. Dieses neu entwickelte Schichtsystem wurde für die späteren Industrieversuche bei der Wieland-Werke AG verwendet. In Abbildung 9 ist der grundlegende Unterschied im Aufbau der im Vorgängerprojekt entwickelten Schicht und der Mehrlagenschicht zu erkennen.

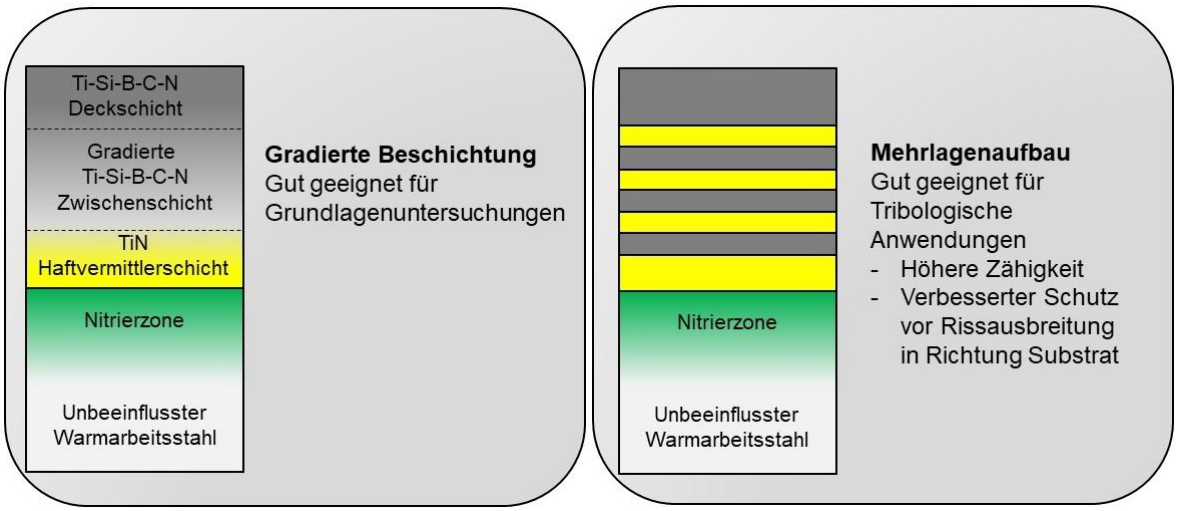
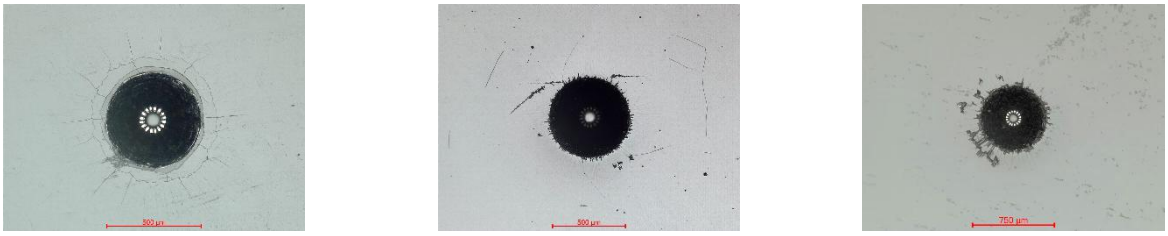


Abbildung 9: Prinzipskizzen vom Aufbau der gradierten Ti-Si-B-C-N Beschichtung (links) und der mehrlagigen Ti-Si-B-C-N Beschichtung (rechts).

Arbeitspaket 1.5: Rockwell-Hafttests zur Charakterisierung der Widerstandsfähigkeit gegen Stoßbeanspruchung

Sämtliche am IOT entwickelten Schichtsysteme wurden nach dem Rockwell C Härteprüfverfahren getestet, um die etwaige Delamination der Schicht durch punktuelle Beanspruchung zu bewerten. Diese Art der Beanspruchung kann auftreten, wenn die Matrizen im Presswerk unvorsichtig gehandhabt werden, wie es in der industriellen Praxis häufig beobachtet wird. So können kritische Flächen wie die Stirnfläche durch Stöße gegen andere metallische Gegenstände beschädigt werden. Bei unbeschichteten Oberflächen sind Kratzer auf der Oberfläche nicht ausschlaggebend für die Performance im Einsatz, aber bei Dünnschichten (meist <10 µm) perforieren makroskopische Kratzer die Schicht, wodurch eine Schwachstelle gegenüber tribologischer Belastung entsteht. Je robuster die Schichten sind, desto geringer ist die Gefahr, dass die Verschleißschutzschicht im Handling zwischen zwei Einsätzen beschädigt wird. Anbei sind Rockwell C Eindrücke von drei Oberflächenmodifikationen gezeigt (Abbildung 5). In allen drei Fällen ist der Widerstand gegenüber Delamination gegeben. Es treten bei Ti-Si-B-C-N keine Delaminationen am Rand des Kraters auf und bei den anderen beiden Oberflächenmodifikationen nur in kleineren Bereichen.



Ti-Si-C-N | Ti-Si-B-C-N | Alloy 718 boriert

Abbildung 10: HRC Eindrücke in eine Ti-Si-C-N Schicht, Ti-Si-B-C-N Schicht und den borierten Alloy 718.

1.3 Arbeitspaket 2: Pressversuche und numerische Untersuchungen zur Darstellung der Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch borhaltige Oberflächenmodifikationen

Arbeitspaket 2.1: Borieren und Beschichten von komplexeren Geometrien zur Betrachtung der Schichtdickenverteilung und Homogenität der Oberflächenmodifikationen

Es wurden Strangpressmatrizen mit einem Außendurchmesser von Ø125 mm mit Ti-Si-B-C-N beschichtet. Zu diesem frühen Zeitpunkt im Projekt wurde noch das aus dem Vorgängerprojekt stammende gradierte Schichtsystem (siehe AP 1.4, Abbildung 9 linke Seite) verwendet. Die Beschichtung ist ebenmäßig und es sind optisch auf Stirnfläche und im Einlaufradius keine Defekte erkennbar (siehe Abbildung 11 rechts). Die Beschichtung zeigt im hinteren Teil des Presskanals eine schlechte Umsetzung der Präkursoren (siehe Abbildung 11 rechts). Dieser hintere Bereich des Presskanals ist im Strangpressprozess bezüglich des Werkzeugverschleißes von untergeordneter Bedeutung. Das liegt daran, dass das Pressgut schnell auskühlt und vollflächiger Kontakt zwischen Werkzeug und Pressgut nur in den ersten Millimetern des Presskanals erfolgt. Dennoch wurde eine Anpassung der Chargierung der Bauteile im PACVD Prozess durchgeführt, damit Strangpressmatrizen möglichst homogen beschichtet werden können und die Prozesssicherheit gesteigert wird.

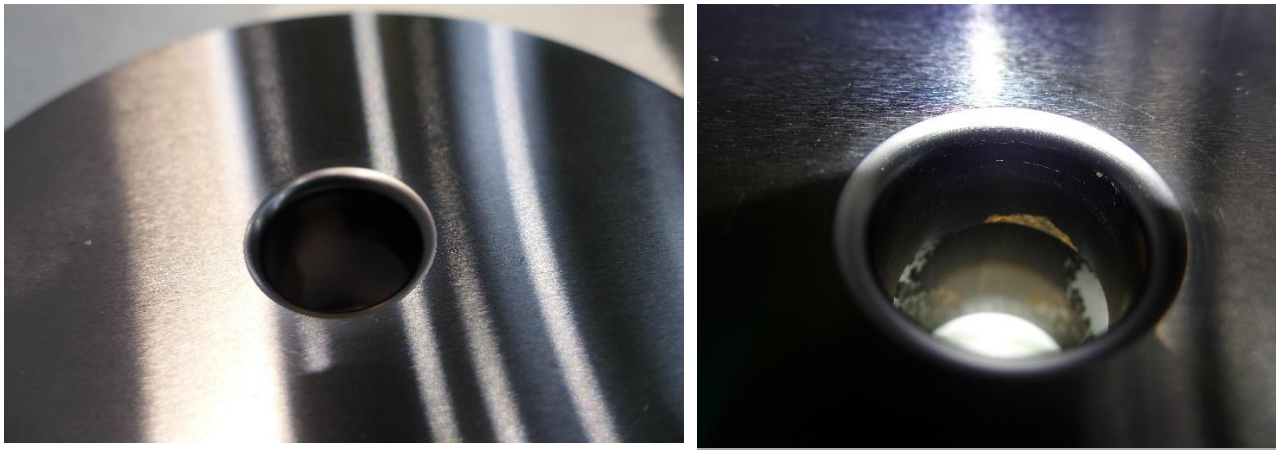


Abbildung 11: Strangpressmatrize Ø125 mm aus DIN 1.2367 Warmarbeitsstahl mit Ti-Si-B-C-N Beschichtung. Links: Beschichtung auf Stirnfläche und Einlaufradius. Rechts: Presskanal mit Mängeln im hinteren Bereich.

Bisher erfolgte die Chargierung, indem die Matrizen flach auf das Chargiergestell gelegt wurden und die Stirnseite somit nach oben zeigte (vergleiche Abbildung 12). Dadurch erfolgt auf der Rückseite keine Beschichtung und die Mantelfläche wird vollumfänglich beschichtet, obwohl dies nicht erforderlich ist, da dort kein Verschleiß auftritt. Dies ist in Abbildung 12 durch die farbliche Kennzeichnung deutlich gemacht. In den mit rot

gekennzeichneten Bereichen könnte zum einen die Fluktuation mit den Spendermedien unzureichend sein, zum anderen könnte dort die Glimmentladung im Hohlraum nicht zünden. In beiden Fällen führt die Verbesserung der Zugänglichkeit zu besseren Ergebnissen.

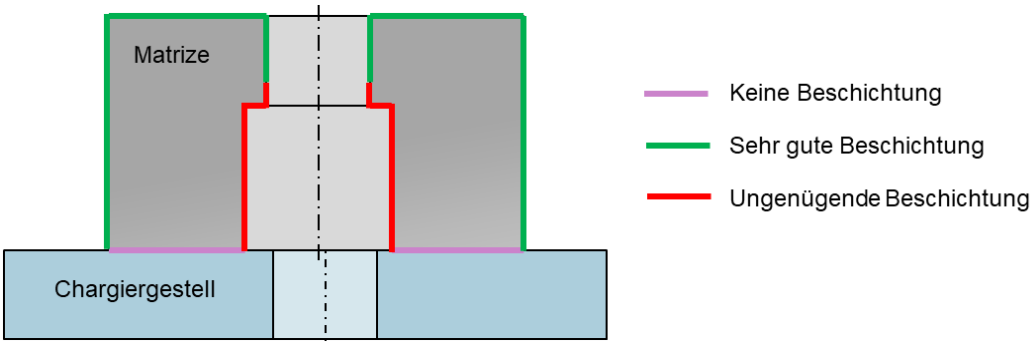


Abbildung 12: Prinzipskizze der Chargierung einer Pressmatrize, bei der der Hohlraum im Inneren deutlich zu erkennen ist. Trotz der Öffnungen oben und unten scheinen die Bedingungen für die Schichtumsetzung unzureichend zu sein.

Im Forschungsvorhaben wurde die neue Chargierung so konzipiert, dass die Pressmatrizen „stehend“ beschichtet werden, d.h. um 90° gedreht werden. Diese Lösung ist in Abbildung 13 als Prinzipskizze in Front- und Seitenansicht dargestellt.

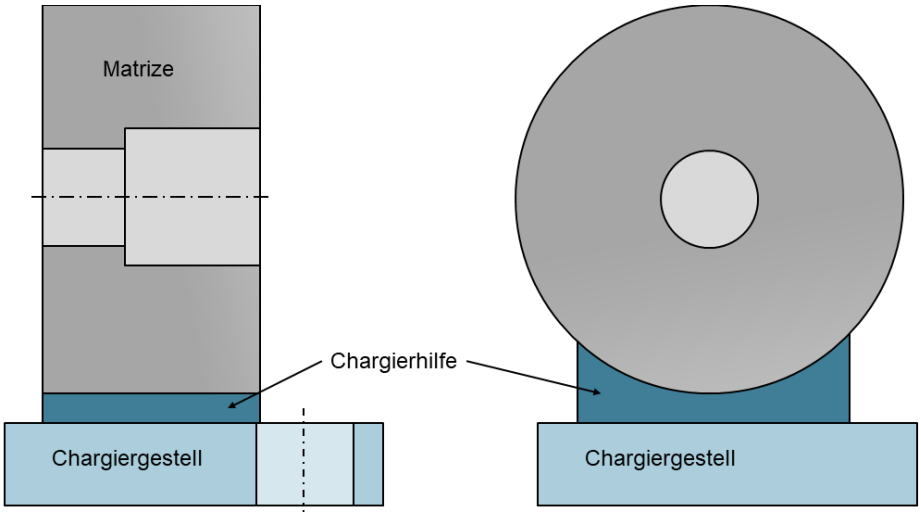


Abbildung 13: Prinzipskizze der verwendeten Chargierung in Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts).

Die Borierung der Matrize aus dem Werkstoff Alloy 718 basiert auf einem Verfahren ohne Unterstützung durch ein Plasma in Form einer Glimmentladung und ist primär von der Zugänglichkeit der Prozessgase abhängig. Die Chargierung erfolgte deshalb ähnlich wie zuvor in Abbildung 13 beschrieben und führte zu einer homogenen borierten Oberfläche. Im Anschluss an die Borierung erfolgte ein Finishen beim PA Mitglied Bor-Tec GmbH, in deren Fertigung täglich borierte Bauteile ein Finishen erhalten. Die einsatzfertigen Matrizen sind in Abbildung 14 zu sehen. Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Verfahren für die Behandlung von 3D Konturen grundsätzlich gut geeignet sind. Um die Grenzen der Verfahren zu ermitteln, wurden in Abstimmung mit dem PA U-Profile hergestellt und boriert/beschichtet.

Abbildung 14: Zwei Strangpressmatrizen Ø125 mm aus Alloy 718 mit borierter Oberfläche.

Aufbauend auf den Ergebnissen der zuvor beschriebenen rotationssymmetrischen Geometrie wurde in Absprache mit dem PA die Oberflächenmodifikation von komplexeren U-Profil Geometrien beschlossen. Diese weisen innenliegende und außenliegende 90° Konturen auf, die zum einen teilweise schwerer zu beschichten sind und zum anderen höhere tribologische Belastung im Pressprozess erfahren können.

Im Fall der PACVD Beschichtung sind zwei Aspekte für die erfolgreiche Beschichtung von übergeordneter Bedeutung. Erstens ist die Zugänglichkeit für die Prozessgase für die Umsetzung der Präkusoren und einen homogenen Schichtaufbau wichtig. Zweitens muss sich die Glimmentladung gleichmäßig über die zu beschichtende Oberfläche verteilen, damit über die gesamte Funktionsfläche die gewünschte Schichtqualität vorliegt. Die zu beschichtende Geometrie ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Zugänglichkeit der kreisförmigen und mit Ø20 mm verhältnismäßig großen Kontur aus Abbildung 13 ist deutlich besser als die rechteckigen mit 5 mm bzw. 8 mm breite.

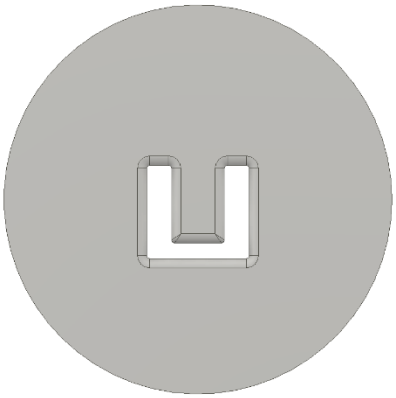


Abbildung 15: Eine Pressmatrize Ø125 mm mit U-Profil. Die seitlichen Stege sind 8 mm breit und der untere Steg ist 5 mm breit.

In Abbildung 16 ist die Pressmatrize unmittelbar nach dem Öffnen der Kammer zu sehen. Die Schicht weist keinerlei optische Mängel auf. Die Einlaufradien sind homogen beschichtet und es ist keine Delamination von Schicht zu erkennen. Dieses Bild änderte sich im Verlauf der Zeit. Dies ist durch Delamination der Schicht in den Einlaufradien und im Presskanal zu beobachten (siehe Abbildung 17). Dieses Phänomen ist relativ selten zu beobachten und kann verschiedene Ursachen haben, die im Folgenden diskutiert werden. Die Kammer wird konstant bei 50 °C gehalten, d.h. beim Ausbau verringert sich die Temperatur um ca. 30 °C auf Raumtemperatur. Dieser relativ geringe Temperaturabfall kann dennoch zu den entscheidenden Spannungen führen, die aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Schicht und Substrat entstehen und durch Schichtabplatzungen abgebaut werden. Eine weitere Erklärung liegt in den Problemen der

Glimmentladung in diesen feinen Konturen, wodurch Hohlkathoden im Presskanal entstehen können oder kein Plasma im Presskanal gezündet wird. Beides führt zu heterogenen und unübersichtlichen Plasmazuständen, die den Schichtaufbau und die Schichteigenspannungen massiv verändern. Zu guter Letzt kann die Herausforderung auch außerhalb des Beschichtungsprozesses liegen. Die Stirnfläche ist gut zugänglich und wurde poliert, weshalb die Bedingungen für eine Beschichtung sehr gut sind. Bei der Herstellung des Presskanals und der Einlaufradien kann es hingegen zu Rückständen kommen, die vor der Beschichtung durch eine Reinigung mit einem Tuch und Isopropanol sowie einer Behandlung im Ultraschallbecken nicht mehr entfernt werden. Diese Stellen werden überbeschichtet und bilden eine Schwachstelle zwischen Schicht und Substrat. Entsprechend wäre das Abplatzen ohne maßgebliche äußere Einflüsse zu erklären.

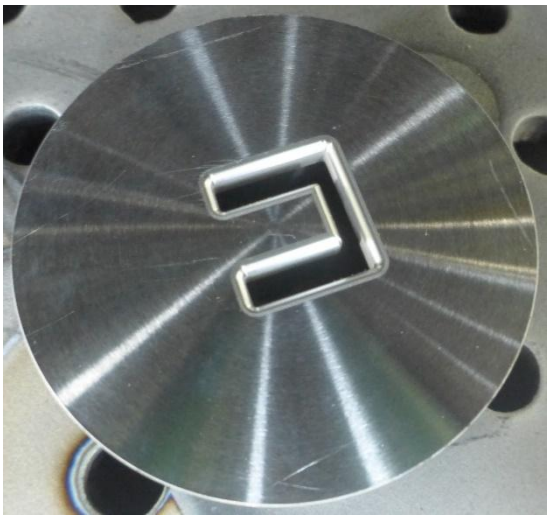


Abbildung 16: Mit PACVD beschichtete Ø125 mm Pressmatrize (U-Profil) mit dem mehrlagigen Ti-Si-B-C-N Schichtsystem unmittelbar nach dem Öffnen der Beschichtungskammer.

Abbildung 17: Ti-Si-B-C-N beschichtete Matrize einen Tag nach der Entnahme aus der Beschichtungskammer.

Innerhalb der vierten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 5.11.2024 in Dortmund wurde abgesprochen, dass die Matrize entschichtet werden soll, um anschließend die Einlaufradien und den Presskanal mechanisch nachzubearbeiten und die Beschichtung nochmals durchzuführen. Hierzu wurden Unternehmen angefragt, damit diese die Entschichtung übernehmen. Da allerdings für das neuartige Ti-Si-B-C-N Schichtsystem keine Daten vorliegen, wie eine Enschichtung technische durchgeführt werden kann, lehnten mehrere Unternehmen die Abgabe eines Angebots ab. Ein Unternehmen meldete sich und versuchte sich an der Entschichtung. Aufgrund der vielen Versuche mit unterschiedlichen Entschichtungsverfahren verstrich relativ viel Zeit, jedoch ohne Erfolg. Aufgrund der geringen Restlaufzeit des Projekts und der Planung des FZS bezüglich der Durchführung der Versuche konnten die Bauteile nicht mehr rechtzeitig neu hergestellt werden. Stattdessen hat sich das PA-Mitglied WEFA Inotec GmbH bereit erklärt die Herstellung und Beschichtung des Werkzeugs mit den hauseigenen Werkstoffen und Beschichtungen durchzuführen und dies als zusätzliche vAW Leistungen zu erbringen.

Das Borierverfahren am IOT zeichnet sich dadurch aus, dass eine gleichmäßige Borierung gegeben ist, sofern die Stellen zugänglich sind und ausreichend Fluktuation der Prozessgase vorliegt. Dementsprechend waren sämtliche Stellen, die beim PACVD Prozess herausfordernd waren, beim Borierprozess gleichmäßig behandelt worden. Durch das anschließende Finishen beim PA-Mitglied BorTec GmbH konnten die Rauheiten wie gewohnt reduziert werden und das Werkzeug war Einsatzbereit.

Arbeitspaket 2.2: Pressversuche mit borierten und beschichteten Matrizen mit Schmierstoff und Wasserkühlung

Die Pressversuche erfolgten wie auch im Vorläuferprojekt mit den Legierungen Kupfer CW024A und Messing CW724R und im direkten Strangpressverfahren. Im Gegensatz zum Vorläuferprojekt sind die Pressversuche mit oberflächenmodifizierten Matrizen auf die Untersuchung von Verschleißerscheinungen ausgelegt. Es wurden daher jeweils 5 Bolzen mit einem Werkzeug verpresst. Weiterhin wurde ein graphitbasiertes Schmiermittel auf den Matrizenstirnflächen eingesetzt, um den industrienahen Anwendungsfall abzubilden. Zur Ermöglichung einer Analyse der der Oberflächenqualität auf den gepressten Kupferstangen wurden diese direkt in eine Wasserkühlung gepresst, um Zunderbildung weitestgehend zu vermeiden. Die für die Versuche angesetzten Pressparameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Pressparameter für die Strangpressversuche.

Aufnehmerdurch-messer	Strangdurchmesser	Pressverhält-nis	Stempelgeschwindig-keit
Ø125 mm	Ø20 mm	39 : 1	15 mm/s
Bolzenmaße	Bolzentemperatur	Aufnehmer-/ Werkzeugtemperatur	
Ø120 x 300 mm	Cu 850°C / MS 700°C	500 °C	

In Abbildung 18 sind repräsentative Pressdiagramme der Versuche dargestellt. Die Versuche für Kupfer (Abbildung 18, links) zeigen eine sehr geringe Streuung bei den gemessenen Prozesskräften, was für eine gute Wiederholbarkeit und somit für eine sehr gute Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse spricht. Bei den Versuchen mit Messing (Abbildung 18, rechts) ist teilweise eine größere Streuung der Kräfte zu beobachten. Hintergrund ist die höhere Empfindlichkeit des Presswerkstoffs auf einen Abfall der Versuchstemperatur, bedingt durch die Phasenumwandlung von gut warmumformbarem β-Messing zu schlecht warmumformbaren α-Messing bei ca. 650 °C.

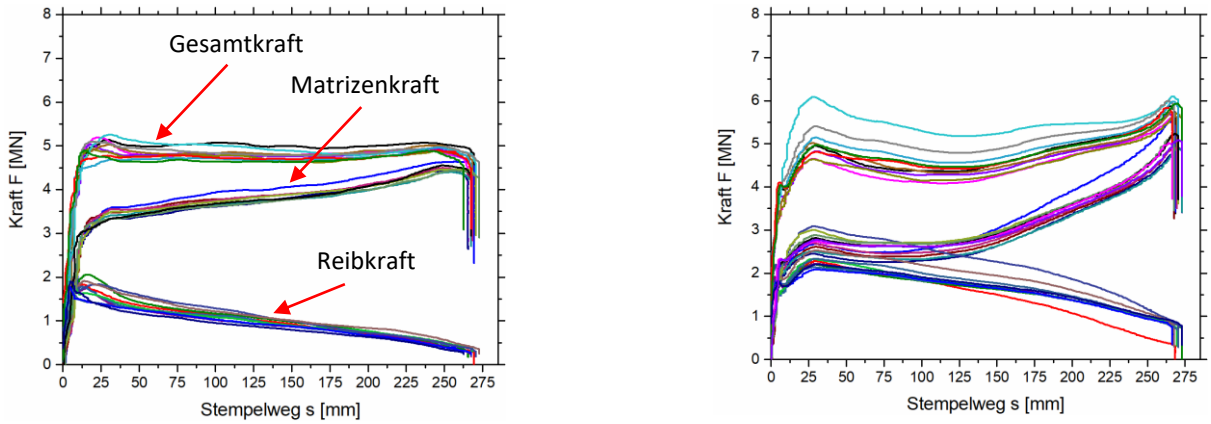


Abbildung 18: Pressdiagramme der Versuche mit den Matrizen aus unbehandeltem Warmarbeitsstahl 1.2367 und mit Ti-Si-B-C-N beschichtetem 1.2367: Presswerkstoff Kupfer CW024A (links) und Presswerkstoff Messing CW724R (rechts).

Von den gepressten Strängen wurden jeweils Proben für Rauheitsmessungen entnommen. Um eine Änderung über die Anzahl der verpressten Bolzen festzustellen, wurden jeweils Messungen an den Proben von

Stranganfang und -ende des ersten und fünften Bolzens durchgeführt. Die Rauheitsmessungen erfolgten mit einem taktilen Profilometer TKU 300 der Hommelwerke auf dem Umfang der Profile. Die Messung an den mit dem unbehandelten Referenzwerkzeug gepressten Kupfersträngen zeigt eine Zunahme des Mittenrauwerts R_a und der Rautiefe R_z vom ersten zum fünften Bolzen (vgl. Abbildung 19, a). Die Zunahme beträgt von R_a beträgt im Mittel 0,45 µm, die Zunahme von R_z beträgt im Mittel 2 µm. Für die Versuche mit Ti-Si-B-C-N-Beschichtung (vgl. Abbildung 19, b) ist kein signifikanter Einfluss auf die Rauheit zu erkennen. Bereits am Anfang des ersten Stranges wurde der höchste Wert für R_a gemessen (0,8 µm), der deutlich über den Werten der Referenzstränge liegt. Am Strangende wurde eine Rauheit von 0,2 µm gemessen, die im Bereich des Referenzstranges liegt. Die Rauheit des 5. Stranges liegt mit 0,4-0,5 µm im Bereich des Referenzstranges. Auch bei der Rautiefe wurde ein übermäßig hoher am Beginn des ersten Stranges gemessen. Für die Gasphasenborierung des Alloy718 (Abbildung 19, c) ist kein eindeutiger Einfluss auf die Rauigkeit des Messingprofils festzustellen. Für den ersten Bolzen steigen sowohl R_a als auch R_z von Beginn zu Ende des Stranges an. Die Rauheit des Stranganfangs von Bolzen 5 ist zu Beginn mit R_a = 1,6 µm bzw. R_z = 7 µm unerwartet hoch und liegt am Ende bei zu Bolzen 1 vergleichbaren Werten (R_a = 0,8 µm bzw. R_z = 3,7 µm). Die Messergebnisse der mit der von Fa. BorTec GmbH durchgeführten Pastenborierung sind vergleichbar zu der unbehandelten Referenz aus Warmarbeitsstahl 1.2367 (vgl. Abbildung 19, d). Die Rauheiten der mit pastenboriertem Warmarbeitsstahl 1.2367 verhalten sich ähnlich (Abbildung 19, e). Allerdings wurden bei Beginn des aus Bolzen 5 gepressten Stranges ungewöhnlich hohe Rauigkeiten gemessen. Mit Werten von R_a = 2,2 µm bzw. R_z = 8,3 µm handelt es sich veermutlich um einen Ausreißer, verursacht durch eine unzureichende Kühlung des Stranganfanges. Infolge der unzureichenden Kühlung war starke Zunderbildung zu beobachten, die wiederum eine raue Strangoberfläche begünstigt. Bei der durch die Fa. WEFA Inotec GmbH bereitgestellten Al_2O_3 Beschichtung ist sowohl eine Abnahme von Beginn zu Ende als auch eine geringe Zunahme von Bolzen 1 zu Bolzen 5 bei der Rauigkeit der untersuchten Stränge zu beobachten (Abbildung 19, f). Die Messwerte sind vergleichbar mit den durch die unbehandelte Referenz und der Pastenborierung der Fa. BorTec GmbH erzielten Rauigkeiten.

Bei den gepressten Messingprofilen ist unabhängig von der Oberlächenmodifikation keine nennenswerte Veränderung der Rauheitswerte vom ersten zum fünften Strang festzustellen (vgl. Abbildung 20). Es ist jedoch ersichtlich, dass sowohl Rauheit als auch Rautiefe durch die Ti-Si-B-C-N-Beschichtung, Gasphasenborierung des IOT und der Pastenborierung der Fa BorTec GmbH geringfügig reduziert wurde.

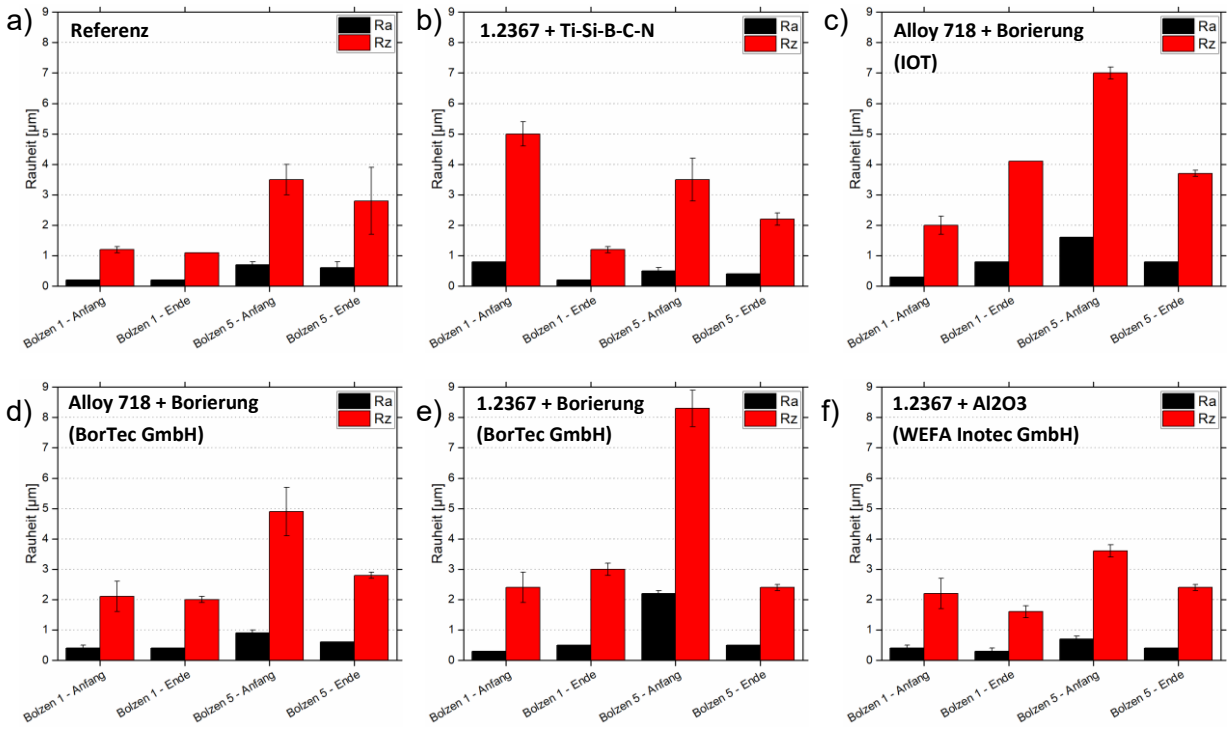


Abbildung 19: Gemessene Rauheiten der mit unterschiedlichen Matrizen gepressten Kupferprofile: a) unbehandeltem Warmarbeitsstahl 1.2367, b) 1.2367 + Ti-Si-B-C-N, c) Alloy718 + Borierung (IOT), d) Alloy718 + Borierung (BorTec GmbH), e) 1.2367 + Borierung (BorTec GmbH) und f) 1.2367 + Al2O3 (WEFA Inotec GmbH).

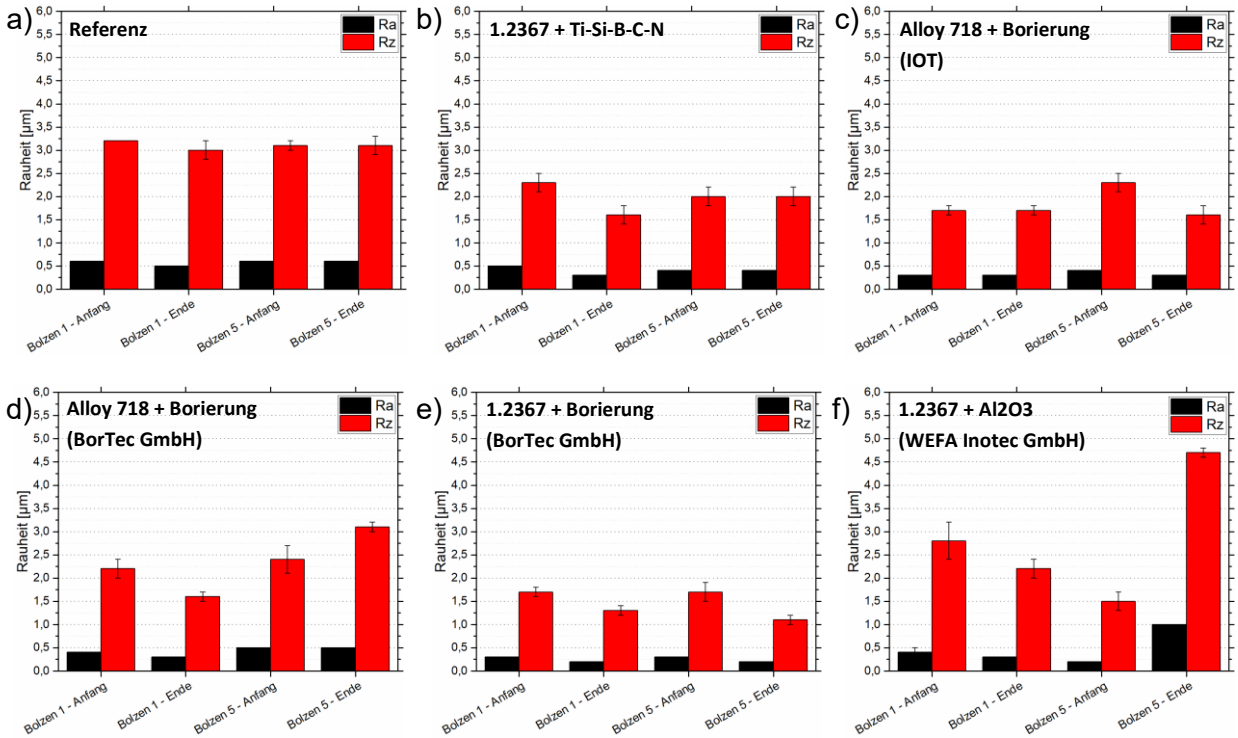


Abbildung 20: Gemessene Rauheiten der mit unterschiedlichen Matrizen gepressten Messingprofile: a) unbehandeltem Warmarbeitsstahl 1.2367, b) 1.2367 + Ti-Si-B-C-N, c) Alloy718 + Borierung (IOT), d) Alloy718 + Borierung (BorTec GmbH), e) 1.2367 + Borierung (BorTec GmbH) und f) 1.2367 + Al2O3 (WEFA Inotec GmbH).

Arbeitspaket 2.3: Pressversuche mit komplexer Profilgeometrie

Die bis zu diesem Punkt durchgeführten Pressversuche wurden mit Profilen in Form einer einfachen Rundstange durchgeführt. Im Bereich des Bunt- und Schwermetallpressens wer-den aber auch offene Hohlprofile mit deutlich komplexeren Geometrien wie L-, H- oder U-Form hergestellt. Diese Geometrien bedingen das Vorhandensein von Ecken mit kleinen Radien im Presskanal der Matrize. Die dadurch hervorgerufenen Spannungsspitzen bei der mechanischen Belastung der Matrize stellen eine besondere Belastung des Werkzeugwerk-stoffs dar, die oft zu Versagen durch Rissbildung bzw. Bruch führt. In direkter Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde ein U-Profil als Geometrie für die Versuche mit komplexer Profilgeometrie ausgewählt. Die Werkzeugkonstruktion weist folgende, für die Oberflächenmodifikationen kritische, Merkmale auf (siehe Abbildung 21):

- Konvexe und konkave Ecken und Kanten
- Unterschiedliche Profilwandstärken
- Steg mit geringer Abstützung

Mit Hilfe der im Voraus entwickelten, numerischen Modelle wurde die Geometrie des U-Profils für einen homogenen Materialfluss angepasst (siehe AP 2.5).

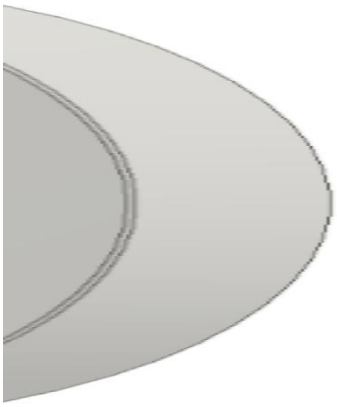


Abbildung 21: CAD-Modell der U-Profil-Matrize

Es wurden insgesamt vier Werkzeuge für die Pressversuche in AP 2.3 eingesetzt. Für die Versuche mit dem Presswerkstoff Kupfer wurde weiterhin der Werkstoff Alloy 718 als Referenzwerkzeug und Substrat für die Borierung eingesetzt. Die Matrizen für die Pressungen mit Messing wurden aus dem Warmarbeitsstahl 1.2367 gefertigt. Hinsichtlich der in Kap. 1.3 beschriebenen Herausforderungen beim Beschichtungsprozess der Innenkonturen des U-Profils wurde auf eine Matrize der WEFA Inotec GmbH zurückgegriffen. Hierbei wurde eine Al_2O_3-Beschichtung auf den Werkstoff 1.2367 aufgebracht, im Rahmen von vAW-Leistungen bereitgestellt und zusammen mit dem Referenzwerkzeug aus Warmarbeitsstahl 1.2367 bepresst. So erfolgten schließlich 20 Wertungspressungen zu je fünf Bolzen pro Werkzeug.

Mit Ausnahme des Pressverhältnisses, welches bei den U-Profilen V ≈ 21,8:1 betrug, wurden dieselben Pressparameter wie für die Pressversuche mit den Rundstangen gewählt (vgl. Tabelle 1). Die Pressdiagramme sind in Abbildung 22 dargestellt. Auch hier zeigen die gemessenen Presskraftverläufe eine sehr geringe Streuung, was für eine gute Wiederholbarkeit und somit für eine sehr gute Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse spricht.

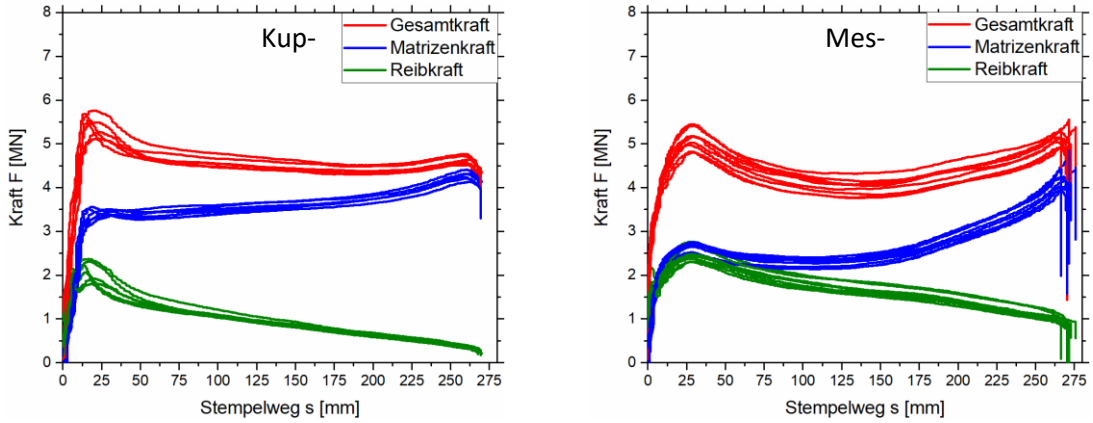


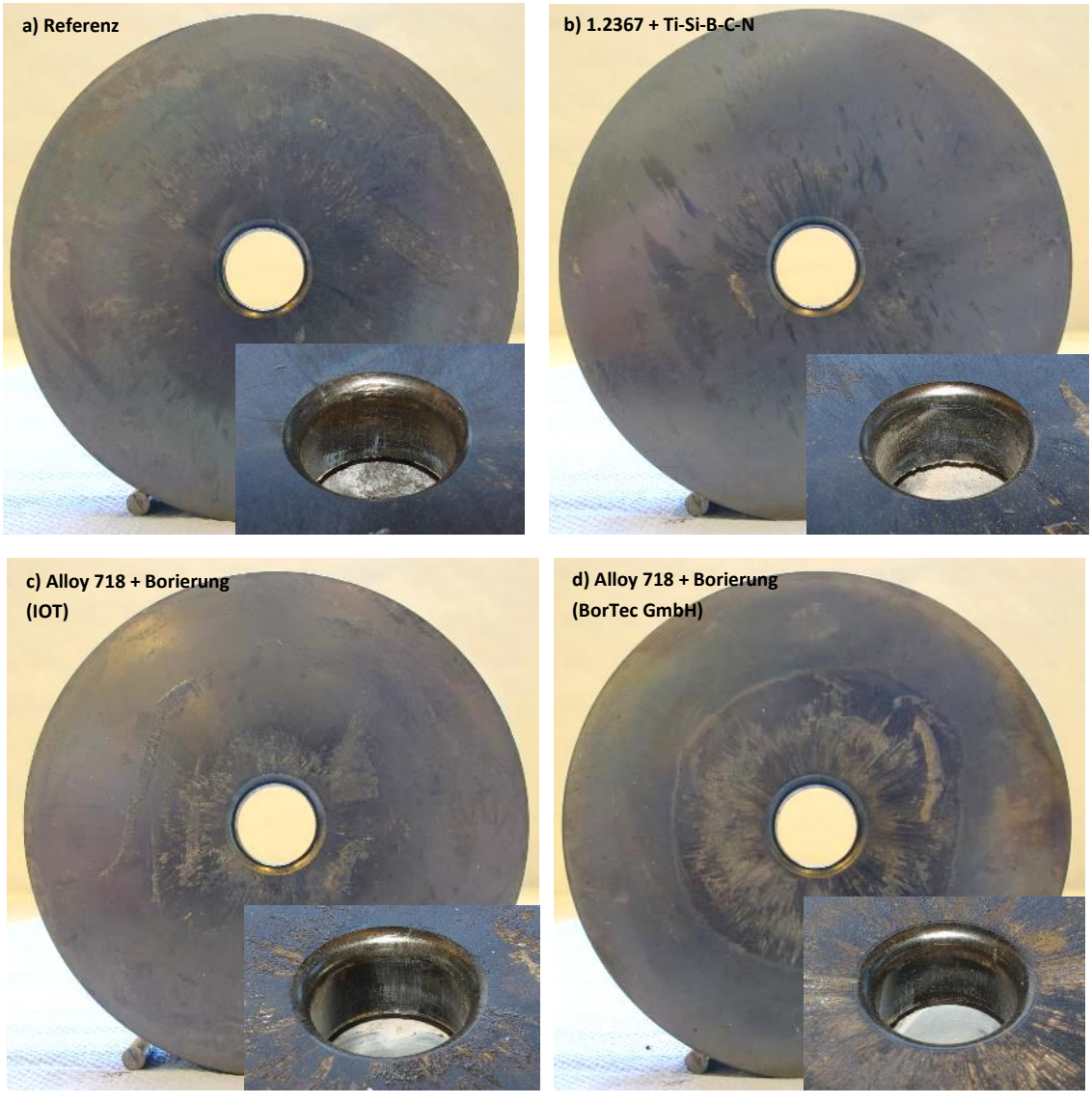
Abbildung 22: Pressdiagramme der Versuche mit den U-Matrizen: Presswerkstoff Kupfer CW024A (links) und Presswerkstoff Messing CW724R (rechts).

Arbeitspaket 2.4: Analyse der bepressten Matrizen auf Beschädigungen der Oberflächenmodifikation

In diesem Abschnitt werden zuerst die Versuche mit der einfachen Rundgeometrie beschrieben und im Anschluss die Ergebnisse aus den Pressungen mit U-Profil. Dazu wird zuerst die optische Bewertung der Oberflächen durchgeführt, bei denen Kupfer verpresst wurde. Die Oberflächen der sechs verschiedenen Varianten sind in Abbildung 23 a) bis f) zu sehen. In allen Fällen ist die Stirnfläche frontal abgebildet und in der unteren rechten Ecke eine Vergrößerung des Einlaufradius aus geneigtem Winkel. Die rötlichen Stellen auf den Oberflächen sind auf Kupferadhäsionen zurückzuführen, die nicht verzundert sind bzw. an denen die Zunderschicht aufgrund der Ausbildung von thermisch induzierten Spannungen während der Abkühlung der Werkzeuge abgeplatzt ist. Weitere Anhaftungen auf der Matrizenstirnfläche sind auf Zunder (schwarz, matt) und Reste des Wachs-Graphit-Schmierstoffs (grau, glänzend) zurückzuführen. Das unbehandelte Referenzwerkzeug (Abbildung 23, a) ist großflächig von einer ausgeprägten Schicht aus Kupfer und Zunder bedeckt. Diese Adhäsionen konnten bei den Versuchswerkzeugen durch die Hartsoffschichten großteils unterbunden werden (Abbildung 23, b-f). Lediglich vereinzelte Anhaftungen sind dort vorzufinden. Da bei dem Werkzeug der WEFA Inotec GmbH ein beschichtetes Inlay eingesetzt wurde, sind zum Teil größere Gruppierungen von Anhaftungen auf dem unbehandelten Substratwerkstoff vorzufinden (Abbildung 23, f). Im nahen Umfeld des Matrizendurchbruchs wurden bei allen Werkzeugen streifenförmige Anhaftungen mit radialer Ausrichtung ausgebildet, die den Materialfluss zum Presskanal hin abbilden. Bei den Matrizen mit Oberflächenbehandlung liegen diese jedoch in deutlich abgeschwächter Form vor. Die gräuliche Färbung der Streifen im Bereich des Einlaufradius und Presskanals lassen auf Rückstände des Schmiermittels schließen. Das Fehlen schwarzer und rötlicher Adhäsionen zeigt die Effizienz der Hartstoffschichten bei der Unterbindung von Adhäsion des Kupfers am Substratwerkstoff. Im Presskanal selbst sind teilweise wieder Anhaftungen zu erkennen. Diese liegen aber vor allem der hinteren Hälfte des Presskanals vor. Da der ausgepresste Strang bereits im Presskanal eine starke Auskühlung erfährt, dabei im Durchmesser schwindet und den Kontakt zum Presskanal verliert, tragen nur ca. 50-66% der Presskanallänge zur Umformung bei. Entsprechend sind dünne Ablagerungen, wie sie bei den Werkzeugen in Abbildung 23 d-e zu erkennen sind, unkritisch für die Oberflächenqualität des Strangpressproduktes. In Summe zeigen alle Werkzeuge, die mit Oberflächenmodifikationen versehen wurden, eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Adhäsionsproblematik beim Strangpressen von Kupfer.

Abbildung 23: Mit Kupfer bepresste Matrizen Ø125 mm aus a) DIN 1.2367 ohne Beschichtung, b) DIN 1.2367 mit Ti-Si-B-C-N Beschichtung, c) Alloy 718 am IOT boriert, d) Alloy 718 von BorTec boriert, e) DIN 1.2367 von BorTec boriert und f) 1.2367 von WEFA mit Al_2O_3 beschichtet

Analog zu der obenstehenden Grafik sind die mit Messing bepressten Werkzeuge in Abbildung 24 a) bis f) abgebildet. Der Vergleich zwischen unbehandelte Referenzwerkzeug (Abbildung 24, a) und der TI-Si-B-C-N-Beschichtung (Abbildung 24, b) zeigt eine deutliche Reduktion der Messinganhaftungen. Während beim Referenzwerkzeug die Stirnfläche vor Allem in etwas Entfernung zum Einlaufradius (> 1 cm) eine Vielzahl von Adhäsionen aufweist, sind auf dem beschichteten Werkzeug nur vereinzelte Messingrückstände festzustellen. Die borierten Werkzeuge (Abbildung 24, c-d) aus Alloy 718 hingegen sind im Nahbereich zum Einlaufradius mit deutlich größeren und dickeren Rückständen des Pressguts behaftet. Dies ist in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus dem im Vorläuferprojekt durchgeführten Reibversuchen, bei denen eine Reduktion Adhäsion von Messing nur in Kombination mit der Ti-Si-B-C-N-Beschichtung festgestellt wurde. Die Anhaftungen nahe des Presskanals sind ebenfalls bei dem borierten Werkzeug aus Warmarbeitsstahl 1.2367 zu erkennen, liegen jedoch nicht so stark ausgeprägt vor (Abbildung 24, e). Für das Werkzeug der WEFA Inotec GmbH (Abbildung 24, f) beschränken sich die Adhäsionen auf die unbehandelte Stirnfläche der Matrize. Im Bereich des beschichteten Inlays liegen keine Anhaftungen vor. Die Betrachtung der Einlaufradien und Presskanäle zeigt keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Rückstände von Messing. Dies geht mit den Untersuchungen der Profilqualität einher, da hierbei keine maßgeblichen Unterschiede der Oberflächenqualität festgestellt werden konnten.



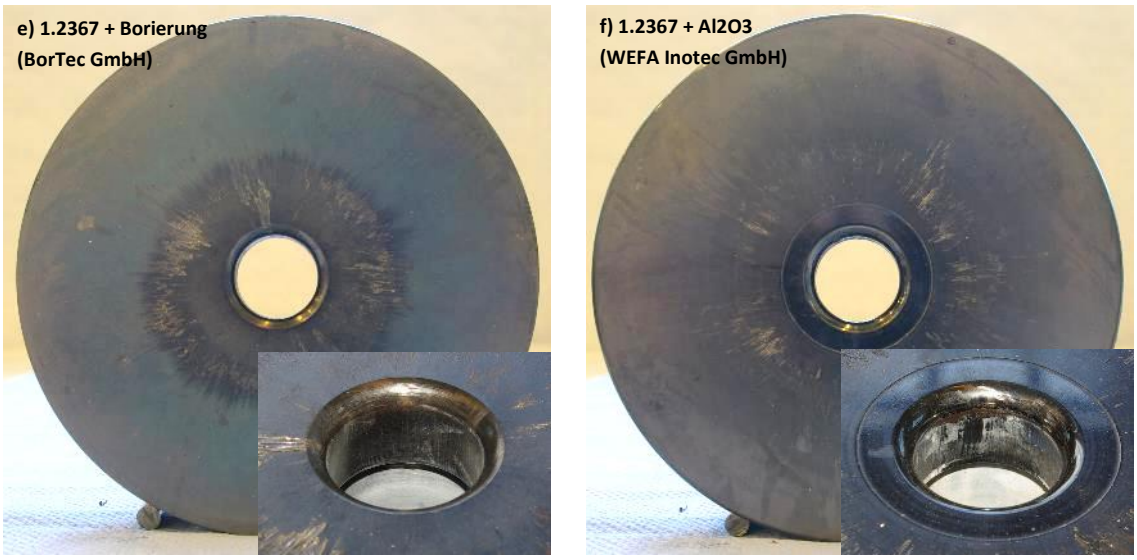


Abbildung 24: mit Messing bepresste Matrizen Ø125 mm aus a) DIN 1.2367 ohne Beschichtung, b) DIN 1.2367 mit Ti-Si-B-C-N Beschichtung, c) Alloy 718 am IOT boriert, d) Alloy 718 von BorTec boriert, e) DIN 1.2367 von BorTec boriert und f) 1.2367 von WEFA mit Al_2O_3 beschichtet

Für die Werkzeuge mit U-Profil lag der Fokus der Untersuchungen auf der komplexeren Geometrie hinsichtlich Beschichtbarkeit und Integrität der Oberflächenmodifikationen nach erfolgten Pressungen. Die Ergebnisse bezüglich der Adhäsionen unterscheiden sich nicht von den Pressversuchen mit Rundstangen. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen jeweils die zusammen gepressten Werkzeugpaare aus Referenz und oberflächenbehandeltem Werkzeug. Aufgrund der komplexeren Geometrie war ein Auslösen des weichen Kupferstranges nur unter starker, mechanischer Einwirkung möglich. Die Adhäsionen wurden daher zuvor fotografisch dokumentiert (Abbildung 25). Wie auch bei den Werkzeugen mit rundem Durchbruch ist eine drastische Reduzierung der Anhaftungen durch die Borierung festzustellen. Die mit Messing bepressten Werkzeuge zeigen ebenfalls die bekannten Adhäsionen auf der Matrizenstirnfläche, die zum Presskanal hin abnehmen (vgl. Abbildung 26).

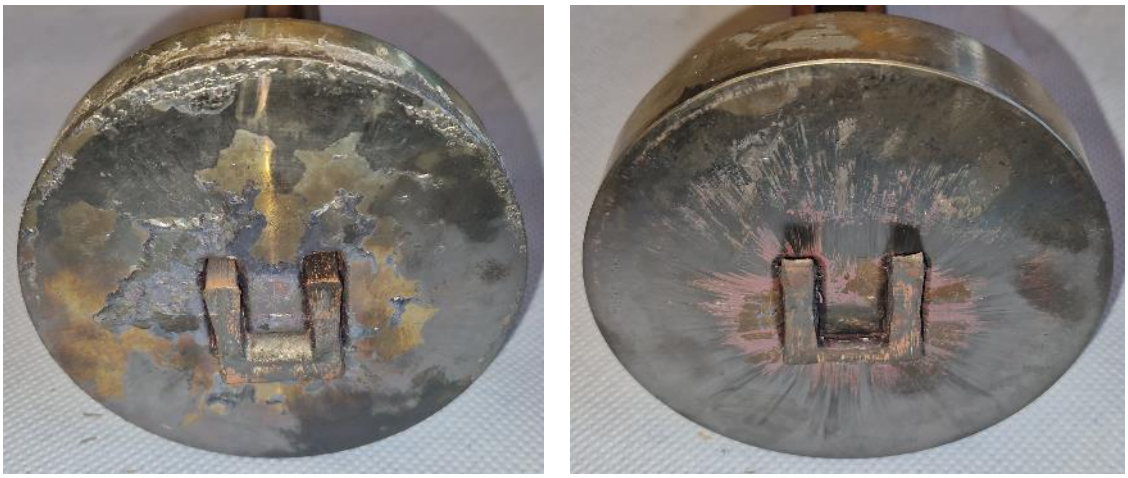


Abbildung 25: mit Kupfer bepresste U-Profil-Matrizen: Alloy 718 ohne Oberflächenbehandlung (links) und Alloy 718 am IOT boriert (rechts)

Abbildung 26: mit Messing bepresste U-Profil-Matrizen: DIN 1.2367 ohne Beschichtung (links) und 1.2367 mit Al_2O_3-Beschichtung der WEFA Inotec GmbH (rechts)

Arbeitspaket 2.5: Numerische Berechnungen zur Beeinflussung der Werkzeugbelastung durch die Oberflächenmodifikationen

Die Abbildung der Pressprozesse mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) dient zumeist der Identifikation und Optimierung relevanter Zustandsgrößen wie z.B. Temperatur- oder Spannungsverteilung im Pressprodukt oder Presswerkzeug. In diesem Vorhaben sollten die aus dem Vorläuferprojekt bestehenden 2D-Modellierungen um die untersuchten Oberflächenmodifikationen erweitert werden, sodass deren Einfluss auf die thermomechanische Belastung der Werkzeuge abgeschätzt werden kann. Hierfür wurden zunächst die vorliegenden Modelle auf den in Kapitel 1.3, AP 2.2 beschriebenen Versuchsaufbau angepasst, mit den Versuchsdaten abgeglichen und hinsichtlich der Ermittelten Presskräfte optimiert. Der geometrische Aufbau des Modells ist in Abbildung 27 dargestellt und entspricht dem realen Versuchsaufbau. Die finalen Randbedingungen für Reibung und Wärmeübergang sind in Tabelle 2 aufgelistet.

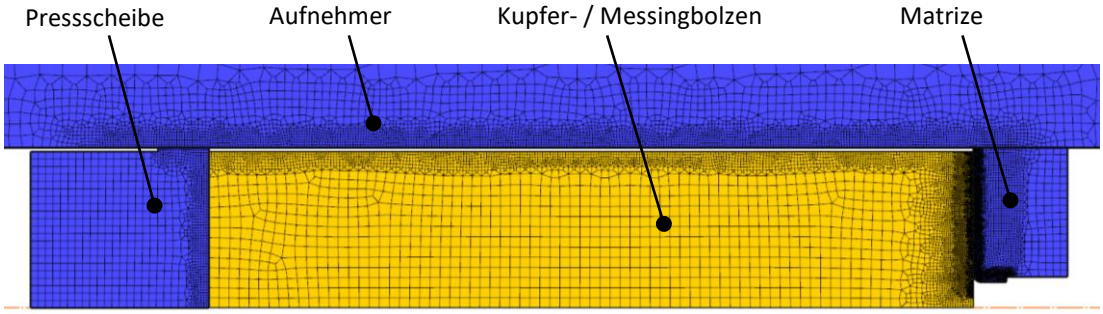


Abbildung 27: Geometrisches Modell für die FE-Analyse des direkten Strangpressens von Kupfer und Messing.

Tabelle 2: Reibkoeffizienten und Wärmeübergangskoeffizient für die FEM-Simulationen

Kontaktfläche	Reibkoeffizient m [-]	Wärmeübergangskoeffizient h $[kW/m^2K]$
Matrize/Kupfer	0,4	8
Matrize/Messing	0,8	
Pressscheibe/Kupfer	1	
Pressscheibe/Messing	1	
Aufnehmer/Kupfer	0,7	
Aufnehmer/Messing	2	
Aufnehmer/Matrize	0,1	
Aufnehmer/Pressscheibe	0,1	

Der Vergleich der gemessenen und numerisch ermittelten Presskräfte zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für Kupfer (Abbildung 28, links). Zwar wird die Reibkraft zu Beginn unterschätzt, die für die Umformung und Matrizenbelastung relevante Matrizenkraft jedoch wird überschätzt. Im für die Untersuchungen relevanten Bereich der maximalen Matrizenbelastung liegt eine sehr gute Übereinstimmung vor. Bei der Messinglegierung ist vor allem in der zweiten Hälfte des Versuchs eine starke Abweichung der Matrizenkraft zu beobachten (Abbildung 28, rechts). Der Anstieg zum Pressende hin wird nicht korrekt abgebildet. Ebenso liegt die Reibkraft deutlich unter dem gemessenen Niveau. Dies ist der Phasenumwandlung des Messings zuzuschreiben, die bei Auskühlung des Bolzens stattfindet. Bei Temperaturen über ca. 650 °C liegt überwiegend die gut warmumformbare β-Phase vor. Kühlt der Bolzen Während des Pressens aus, erfolgt eine Phasenumwandlung zu der schlecht warmumformbaren α-Phase. Diese Umwandlung kann durch das vorliegende Materialmodell nicht abgebildet werden. Entsprechend kann auch der Anstieg der Umformkraft gegen Ende des Presszyklus nicht dargestellt werden.

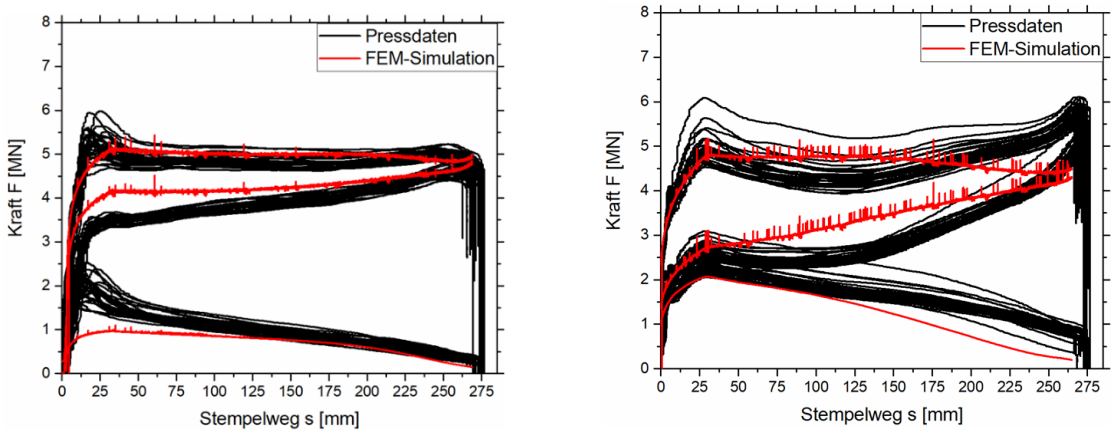


Abbildung 28: Vergleich der gemessenen und numerisch ermittelten Presskräfte für die Presswerkstoffe Kupfer (links) und Messing (rechts)

Die im 2D-Modell ermittelten und optimierten Randbedingungen wurden anschließend auf ein 3D-Modell der Versuche in AP 2.3 übertragen, um den Pressprozess des nicht rotationssymmetrischen U-Profils darstellen zu können. Mit Hilfe der des numerischen Modells wurde die Geometrie des U-Profils für einen

homogenen Materialfluss angepasst. In einem ersten Werkzeugentwurf wurde das U-Profil mit einem horizontalen Steg von 7 mm Stärke und vertikalen Stegen von 8 mm Stärke konzipiert. Die Auswertung der Modellierung zeigte jedoch im Bereich des horizontalen Steges eine Geschwindigkeitsüberhöhung von ca. 40% gegenüber der Oberkante der vertikalen Stege (Abbildung 29, links). Hinsichtlich der unterschiedlichen Austrittsgeschwindigkeiten würde das Profil unter stetiger Biegung austreten. Durch Verjüngung des horizontalen Steges von 7 mm auf 5 mm und eine Versetzung des gesamten Matrizendurchbruchs um 15mm nach unten konnte der Materialfluss homogenisiert und die projizierte Geschwindigkeitsdifferenz auf ca. 3% reduziert werden (Abbildung 29, Mitte). Die Gegenüberstellung des realen und simulierten Stranganfanges zeigt eine hervorragende Übereinstimmung der vorausgesagten Profilbiegung. Nach ca. 40 cm liegt ein gerade ausgepresster Strang vor.

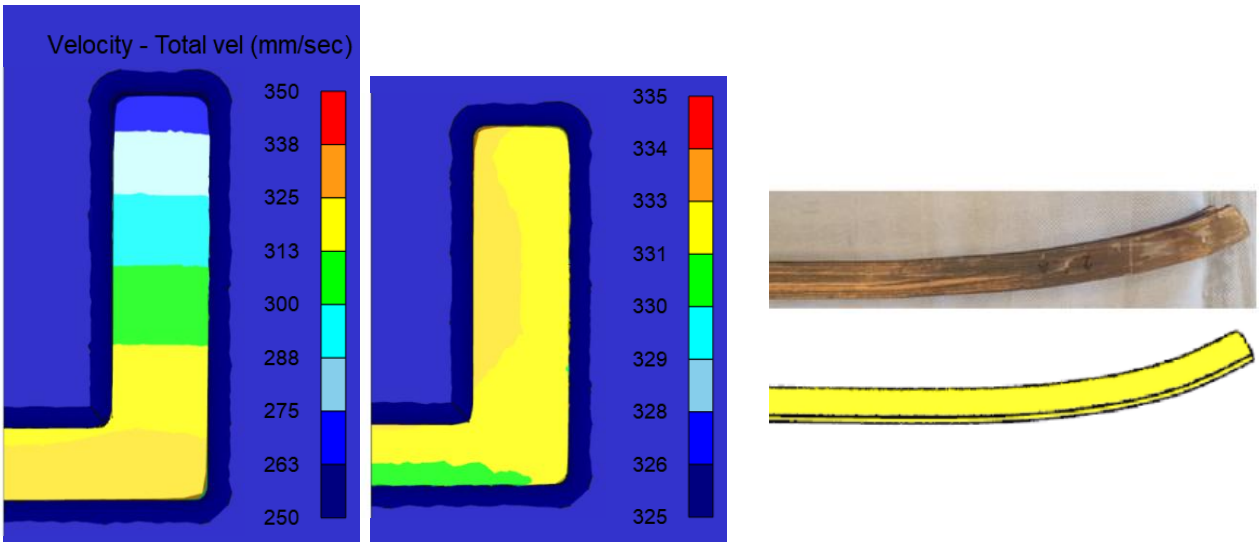


Abbildung 29: Geschwindigkeitsprofil des Stranges mit Ausgangsgeometrie (links), Geschwindigkeitsprofil des Stranges mit optimierter Matrizengeometrie (Mitte) und Gegenüberstellung des realen und simulierten Stranganfanges (rechts).

Die Erweiterung der Modellierungen um die angewendeten Oberflächenmodifikationen konnte leider nicht erfolgreich umgesetzt werden, da sich die zwingend erforderlichen Kennwerte der Oberflächenmodifikationen, die in AP 1.4 ermittelt werden sollten, sich als unzuverlässig herausstellten (vgl. Kap. 1.3). Des Weiteren erwies sich die FE-Software Deform nach intensivem und ausgiebigem Austausch mit dem User-Support als ungeeignet, die hohen Härten der Oberflächenmodifikationen für das integrierte Verschleißmodul zu berücksichtigen. Die Implementierung von Härtekennwerten erfolgt hierbei ausschließlich in Härte nach Rockwell (Makrohärte). Die für Oberflächenmodifikationen charakteristisch dünne Schichtstärke erfordert jedoch die Härtemessung mittels Nanoindenter und somit die Beschreibung der Härte im Skalenbereich der Nanohärte. Eine Umrechnung von Nanohärte (GPa) in Makrohärte (HRC) ist nicht möglich, sodass eine Abbildung der Oberflächenmodifikationen mittels numerischer Methoden im Rahmen dieses Projektes leider nicht erzielt werden konnte.

Als Alternative zur Abbildung der Oberflächenmodifikationen sollte die Einbindung des Verschleißverhaltens über das Verschleißmodell nach Archard erfolgen. Hierzu sollten die am IOT im Rahmen des AP 1.3 durchgeführten Kalottenschliffe numerisch modelliert, Verschleißkoeffizienten abgeleitet und in die Strangpressmodelle eingebunden werden. Allerdings war auch dieser Ansatz durch Limitationen der FE-Software nicht umsetzbar. Die Randbedingungen der FE-Software setzen voraus, dass das bewegte Bauteil dem Verschleiß

ausgesetzt ist. Bei Abbildung eines üblichen Kalottenschliffs würde somit die rotierende Kugel verschleißen. Es wurde daher ein Modell aufgebaut, bei dem der verschleißende Shim um eine feststehende Kugel rotiert. Trotz Tausch des aktiven Elements ist die Verschleißbelastung dabei gleichbleibend zum realen Versuch. In dieser Konfiguration war es jedoch nicht möglich, die im Kalottenschliff wirkende Gewichtskraft der Kugel abzubilden, da die FE-Software nur eine Lastvorgabe mit fester Wirkrichtung vorsieht. Durch die Rotation des Schims wäre eine variable Wirkrichtung notwendig, die immer auf den Mittelpunkt der Kugel gerichtet ist. Eine Dastellung des Verschleißverhaltens der Oberflächenmodifikationen und somit deren Einfluss auf die Werkzeugbelastung war somit weder durch Darstellung der Harstoffschichten, noch durch Implementierung eines Verschleißmodells möglich.

1.4 Arbeitspaket 3: Industrieversuche mit oberflächenmodifizierten Strangpresswerkzeugen

Arbeitspaket 3.1: Erprobung von oberflächenmodifizierten Strangpresswerkzeugen im Strangpresswerk

In den Wieland-Werken wurde der Werkstoff ECOBRASS® verpresst. Diese Messinglegierung wird als eine umweltfreundliche Legierung vermarktet, da sie kein Blei enthält (Zusammensetzung: 76% Cu, 21% Zn, 3% Si und 0,05% P). Damit wird beispielsweise die RoHS (Restriction of Hazardous Substances) Richtlinie der Europäischen Union erfüllt. Die Konformität besteht ausschließlich, wenn das Produkt u.a. weniger als 0,01% Blei enthält und dient zwei Zwecken: 1. Umweltverschmutzung und entsprechende Schäden durch Blei zu vermeiden und 2. Gesundheitsrisiken zu minimieren, die der Kontakt mit Blei mit sich bringen kann. Daraus resultieren die Fragestellungen, welchen Zweck Blei in Messinglegierungen erfüllt und wie sich der Verzicht auf Messing in der Herstellung von Messinghalbzeugen auswirkt. Blei ist vorwiegend für die Verbesserung der Zerspanbarkeit von Messing bekannt, was durch besseren Spanbruch und damit einhergehender kürzerer Späne erklärt wird. Dank des niedrigen Schmelzpunktes von 327 °C spielt Blei jedoch auch bei der Warmformgebung eine relevante Rolle im Prozess, da es beim Warmstrangpressen bei Bolzeneinsatztemperatur lokal verflüssigen kann und als Flüssigschmierstoff die Reibung im Pressprozess reduziert. Dementsprechend gibt es nicht nur die allseits bekannten Herausforderungen bei der Zerspanung von bleifreien Messinglegierungen, sondern bereits im Schritt der Halbzeugfertigung von Messing Unwägbarkeiten durch höhere abrasive Belastung und stärkere Neigung zur Adhäsion. Beide Effekte sind auf den Mangel eines flüssigen Schmierfilms aus Blei zurückzuführen, der nicht extern zugeführt werden muss, sondern bereits im Umformwerkstoff enthalten ist. Unter anderem die erhöhte Adhäsionsneigung war für die Auswahl als Werkstoff für die Pressversuche bei den Wieland-Werken ein wesentliches Kriterium, da die Vorversuche im Projekt eine starke Reduzierung der Adhäsion gegenüber Messing gezeigt haben. Zugleich wirken sämtliche Hartstoffschichten abrasivem Verschleiß entgegen, da sie eine höhere Härte aufweisen.

Die Pressversuche wurden unter industriellen Bedingungen an einer Presse mit 3.000 t Presskraft durchgeführt. Dazu wurden Bolzen mit der für die Wieland-Werke geläufigen Bolzengröße von Ø280 mm x 1.330 mm verwendet. Diese wurden auf eine Temperatur von 700 °C erwärmt, damit der Umformprozess erleichtert wird. Gründe für die Verwendung einer erhöhten Temperatur liegen in der Reduzierung der Festigkeit, dem Abbau von Spannungen zur Vermeidung von Rissen und Brüchen, der Möglichkeit die Kornstruktur zu optimieren und damit die Duktilität und Korrosionsbeständigkeit zu verbessern, sowie die Erleichterung des Pressprozesses durch geringere Presskräfte und einen einfacheren Materialfluss durch die Verengung im Bereich der Matrize. Um ein zu schnelles Auskühlen des Bolzens und einen thermischen Schock zu verhindern

sowie die Toleranzen des Halbzeugs von Beginn bis Ende des Prozesses einzuhalten wird die Matrize auf 500 °C vorgewärmt. Die Bolzen wurden zu einer Rundstange mit ca. Ø32 mm verpresst. Daraus resultiert eine Stranglänge von ca. 100 m je Bolzen. Da jedes Werkzeug für das Pressen von 8 Bolzen verwendet wurde beläuft sich die Kontaktlänge zwischen Presskanal und Umformgut auf ca. 800 m. Diese Größenverhältnisse sind mit den am FZS verfügbaren Anlagen nicht abbildbar und unterstreichen die Bedeutung der Pressversuche, die durch vAW-Leistungen der Wieland-Werke AG ermöglicht wurden.

1.5 Arbeitspaket 3.2: Analyse der oberflächenbehandelten Werkzeuge nach Einsatz im Presswerk

Im Anschluss an die Pressversuche erfolgte bei den Forschungsstellen die zweistufige Ermittlung der Ergebnisse mit anschließender Auswertung. Im ersten Schritt wurden die Matrizen zerstörungsfrei geprüft, indem sie ausführlich fotografisch dokumentiert wurden und Anlauffarben, Adhäsionen, Riefen, etc. betrachtet wurden. Im zweiten Schritt wurde die zerstörende Bauteilprüfung angewendet, indem Querschliffe angefertigt wurden. Dies diente vor allem der Beantwortung einer zentralen Fragestellung: Ist die Oberflächenmodifikation nach 8 Pressungen und einer Lauflänge von ca. 800 m noch immer vorhanden und intakt? Dazu wurden die Querschliffe eingebettet, geschliffen und poliert, um daran anknüpfend unter dem Lichtmikroskop analysiert zu werden.

Die Bilder der zerstörungsfreien Bauteilprüfung werden im Folgenden betrachtet. In Abbildung 30 sind die Aufnahmen der Werkzeuge der WEFA zu sehen, die mit einer Al_2O_3 Schicht beschichtet wurden. Es sind kleinere radiale Riefen zu erkennen, die auf einen dünnen Adhäsionsfilm auf dem Werkzeug hindeuten, der im Vergleich zur Verschleißschutzschicht einfach umformbar ist. In der Abbildung 30 (links) ist auf dem unteren rechten Quadranten eine etwas größere Fläche zu erkennen, die mit größeren Adhäsionen beaufschlagt ist. Im Presskanal in Abbildung 30 (rechts) sind im hinteren Bereich rötlich-metallische Bereiche zu erkennen, deren Farbgebung auf Kupfer im Messing zurückzuführen ist. Diese Anhaftungen werden als unkritisch bewertet. Aufgrund der hohen Temperaturdifferenz im Presskanal schwindet der Strang im Durchmesser und verliert nach ca. 2/3 der Presskanallänge den Kontakt zum Presswerkzeug. Das letzte Drittel trägt kaum zur Formgebung bei. Der wesentliche Umformbereich ist somit im Einlaufradius und dem anschließenden Beginn des Presskanals zu verorten. Hier ist (wenn überhaupt) ein dünner Adhäsionsfilm abgelagert. Es gibt keine Anzeichen für eine Schädigung des Werkzeugs, der die Intaktheit der Schicht infrage stellen würde.

Abbildung 30: Die mit Al_2O_3 beschichtete Matrize Innen-Ø 32 mm der Firma WEFA orthogonal zur Stirnfläche (links) und mit Blick auf den Presskanal (rechts).

Die zweite untersuchte Beschichtung ist die Ti-Si-B-C-N Mehrlagenbeschichtung, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Die zugehörige Abbildung 31 (links) und (rechts) zeigt Stirnfläche, Einlaufradius und Presskanal. Deutlich zu erkennen sind die streifigen Spuren des manuell aufgetragenen Schmierstoffs aus Wachs-Graphit-Gemisch. Dieser soll die Reibung und Adhäsion im Pressprozess reduzieren und wurde für sämtliche Werkzeuge verwendet. Zwischen den Spuren sind grau-gelbliche Anhaftungen zu erkennen, die auf das verpresste Messing zurückzuführen sind. Der innere Ring ist mit farblichen Veränderungen versehen. Dieser Teil ist der mit Ti-Si-B-C-N beschichtete Einsatz, der in das Presswerkzeug eingearbeitet wurde. Die Farbgebung ist auf eine wenige dutzend Nanometer dicke, vorwiegend auf TiO_2 basierende, Oxidschicht zurückzuführen. Darunter befindet sich der Rest der ca. 3 µm dicken Beschichtung, die noch intakt ist. Entsprechend wird hier schon optisch ersichtlich, dass die Beschichtung auf der Stirnfläche keine erkennbaren Schäden aufweist, ausgenommen der dünnen Oxid Haut, die voraussichtlich auf die 500 °C Vorwärmung der Matrize im Ofen zurückzuführen ist. Die äußeren Flächen der Matrize sind nicht beschichtet und weisen deshalb keine Anlauffarben auf. Die Sicht auf den Presskanal in Abbildung 31 (rechts) zeigt in der unteren Hälfte die durch den Wachs-Graphit Schmierstoff unterbrochenen Messinganhaftungen und in der oberen Hälfte die intakte Beschichtung. In derselben Abbildung ist der Einlaufradius zu erkennen, der frei von Ablagerungen ist. Dadurch, dass die Oberfläche glatt wirkt und Anlauffarben der Beschichtung in großen Teilen erkennbar sind, hat sich auf der Schicht kein Messing in Form von Adhäsionen abgelagert. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem Vorprojekt und den Vorversuchen in diesem Vorhaben. Das heißt, dass Ti-Si-B-C-N adhäsionsmindernd gegenüber Messing wirkt, wohingegen borierter Alloy 718 besser Kupferadhäsionen reduziert.

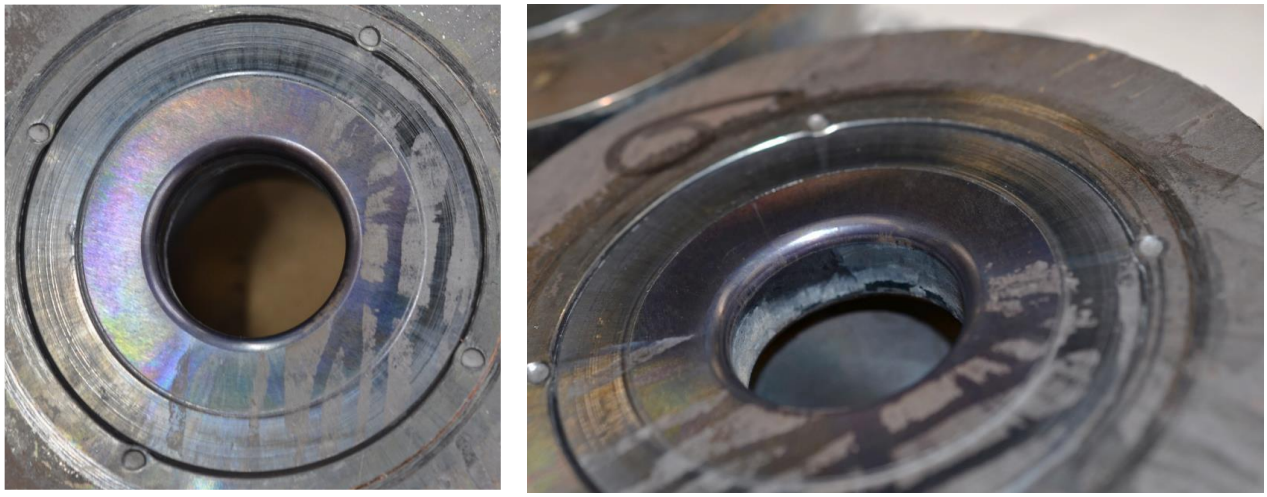


Abbildung 31: Die mit Ti-Si-B-C-N beschichtete Matrize Innen-Ø 32 mm orthogonal zur Stirnfläche (links) und mit Blick auf den Presskanal (rechts).

Neben den Beschichtungen wurden auch zwei verschiedene Diffusionsprozesse angewendet. In beiden Fällen handelt es sich um Borierungen. Hier unterscheiden sich die Prozesse im Spendermedium. Am IOT werden die Prozesse im Niederdruckverfahren mit dem gasförmigen Spendermedium BCl_3 durchgeführt, wohingegen bei BorTec Pulver, Pasten und Granulaten verwendet werden. In Abbildung 32 (links) und (rechts) ist die am IOT borierte Matrize zu sehen. Es ist zu erkennen, dass es Parallelen zu der Al_2O_3 beschichteten Matrize gibt (vgl. Abbildung 30 (links)). Auch hier treten radiale Riefen auf, einen dünnen und weichen Messing-Adhäsionsfilm aufgebaut wurden Der Einlaufradius in Abbildung 32 (rechts) erscheint gleichmäßig glatt und augenscheinlich frei von Adhäsionen. Dies ist auf die im Prozess vorliegenden Bedingungen zurückzuführen. Die Besonderheit liegt im abnehmenden Anpressdruck zum Presskanal hin. Hierdurch reduzieren sich

Reibkräfte und Adhäsionsneigung, wie in den Reibversuchen des Vorläuferprojektes gezeigt wurde. Am Ende des Presskanals sind auch hier Anhaftungen zu erkennen, die dem fehlenden Kontakt zwischen Umformgut und Matrize zuzuschreiben sind. Darauf aufbauend ist es nachvollziehbar, dass der Presskanal sich im Erscheinungsbild vom Einlaufradius unterscheidet und der hintere Teil ein anderes Bild aufweist als der vordere Teil.

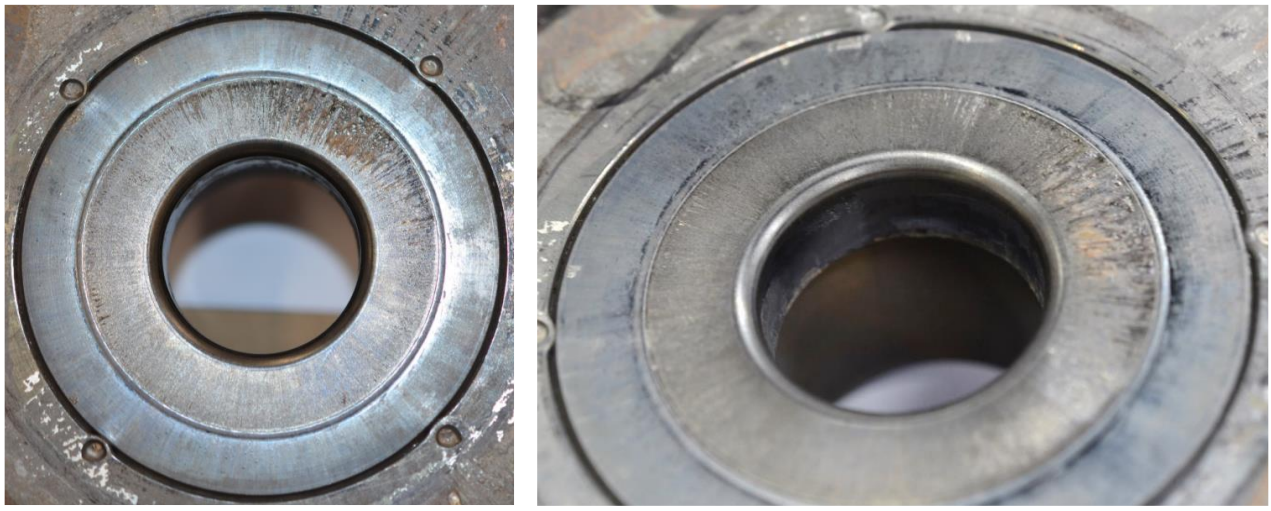


Abbildung 32: Die am IOT borierte Matrize Innen-Ø 32 mm orthogonal zur Stirnfläche (links) und mit Blick auf den Presskanal (rechts).

Für die von BorTec borierte Matrize in Abbildung 33 (links) und (rechts) ergibt sich ein vergleichbares Bild zu den gasborierten Matrizen vom IOT (siehe Abbildung 32). Trotz der verschiedenen Herstellungsverfahren scheint sich eine ähnliche Borierzone einzustellen, deren Eigenschaften hinsichtlich abrasiver und adhäsiver Schutzwirkung offenbar nah beieinander liegen.

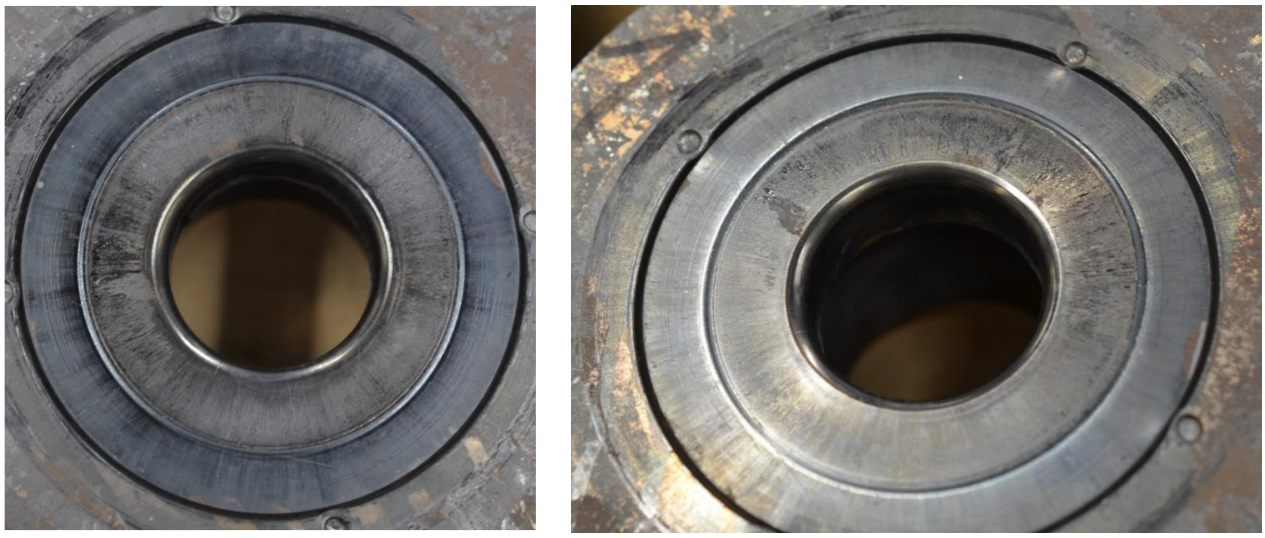


Abbildung 33: Die bei BorTec borierte Matrize Innen-Ø 32 mm orthogonal zur Stirnfläche (links) und mit Blick auf den Presskanal (rechts).

Zusammenfassend ergibt eine optische Bewertung der Oberflächen, dass es in allen vier Fällen keine Anzeichen für abrasiven Verschleiß der Matrizen gibt. Adhäsiv scheint die Reaktivität von Ti-Si-B-C-N geringer zu sein als die der anderen drei Lösungen. Aufgrund der Ablagerungen auf der Oberfläche sind die Erkenntnisse

hinsichtlich der abrasiven Beschädigung der Oberfläche nur bedingt aussagekräftig, weshalb zerstörende Werkstoffprüfung durchgeführt wurde.

Die Beschichtung wurde entlang der gesamten Oberfläche vom äußersten Bereich der Stirnfläche über den Einlaufradius bis hin zum hintersten Bereich des Presskanals betrachtet und lichtmikroskopisch untersucht. Aufgrund der Datenmenge sind in Abbildung 34 (links) und (rechts) nur zwei exemplarische Bilder aufgeführt. Auf der linken Seite ist der Bereich des Einlaufradius zu sehen, der hohen mechanischen Belastungen und der nahezu maximalen Relativgeschwindigkeit zum Umformgut ausgesetzt ist. Es zeigt sich, dass die Schicht durchgängig vorhanden und defektfrei ist. Das gleiche gilt für Abbildung 34 rechts, wo die Stirnfläche mit intakter Beschichtung zu erkennen ist. Diese beispielhaften Bilder stehen stellvertretend für die Gesamtheit der Aufnahmen, aus denen deutlich wird, dass die ca. 3 µm dicke Verschleißschutzschicht trotz des herausfordernden Belastungskollektivs auch nach dem Pressen vollständig intakt vorhanden ist. Adhäsionen konnten nirgendwo gefunden werden, was mit den optischen Untersuchungen übereinstimmt, die eine niedrige Adhäsionsneigung suggeriert haben.

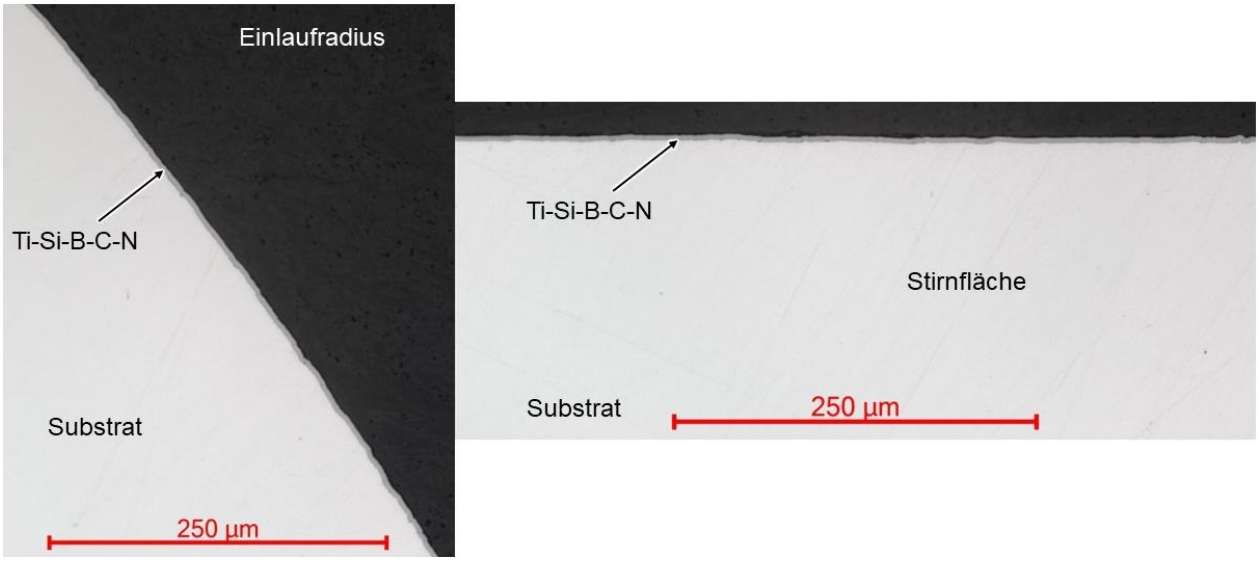


Abbildung 34: Querschliffaufnahme vom Einlaufradius (links) und der Stirnfläche (rechts) der mit Ti-Si-B-C-N beschichteten Pressmatrize.

Parallel zu den zuvor für Ti-Si-B-C-N vorgestellten Untersuchungen wurden die borierten Varianten mit selbigem Verfahren untersucht. Im Folgenden werden die Ergebnisse der am IOT borierten Variante vorgestellt. Dazu sind in Abbildung 35 (links) der Einlaufradius und (rechts) die Stirnfläche in der Querschliffansicht dargestellt. Im Einlaufradius ist eindeutig zu erkennen, dass eine dichte und dicke Borierzone ohne Fehlstellen vorliegt. Somit hält die Borierzone den großen mechanischen Belastungen stand. Dieses Bild steht exemplarisch für den gesamten Bereich des Einlaufradius, d.h. überall ist die Schicht intakt und nirgendwo sind Adhäsionspartikel zu erkennen. Das Bild von der Stirnfläche steht nicht stellvertretend für die gesamte Stirnfläche – im Gegenteil: Der größte Teil der Stirnfläche weist neben einer intakten Borierzone keinerlei Messingadhäsionen auf. Das gezeigte Bild bildet die Ausnahme und zeigt eine der wenigen Stellen, an denen sich Messing an der Oberfläche abgelagert hat. Die große Fragestellung, die vor den Versuchen aufkam, war folgende: Ist die Borierzone an den Stellen, an denen Adhäsion vorliegt noch vorhanden oder nicht? Schließlich würde eine lokal abgeplatzte Borierzone zu einer freigelegten metallischen Oberfläche aus Alloy 718 führen, die im Metall-zu-Metall Kontakt voraussichtlich eher zur Verklebung mit Messing neigen würde. Diese Fragestellung wird durch Abbildung 35 (rechts) geklärt. Die Schicht liegt vollständig intakt vor, dennoch ist

Messing auf der Oberfläche zu finden. Hier gilt die Einschränkung, dass es sich lediglich um eine 2D-Betrachtung handelt. Damit ist nicht auszuschließen, dass auf der Fläche nicht lokale Ausbrüche der Borierzone existieren, an denen sich das Messing fest verankern kann. Es würde sich eine größere Fläche mit Messing belegen, die jedoch nur an wenigen Punkten fest mit dem Untergrund verwachsen ist. Auch wenn diese Fragestellung aufgrund der Limitierungen in der Analytik nicht beantwortet werden können, kann eines gesichert festgestellt werden: Die Bereiche, an denen sich Messing ablagerte, sind nicht zwingend durch ein Ausbrechen und Versagen der Borierzone gekennzeichnet. Zudem waren Adhäsionspartikel nur in einem kleinen Bereich der Stirnfläche zu finden, sodass unter dem Strich die Neigung zum Verkleben mit Messing als gering zu bewerten ist.

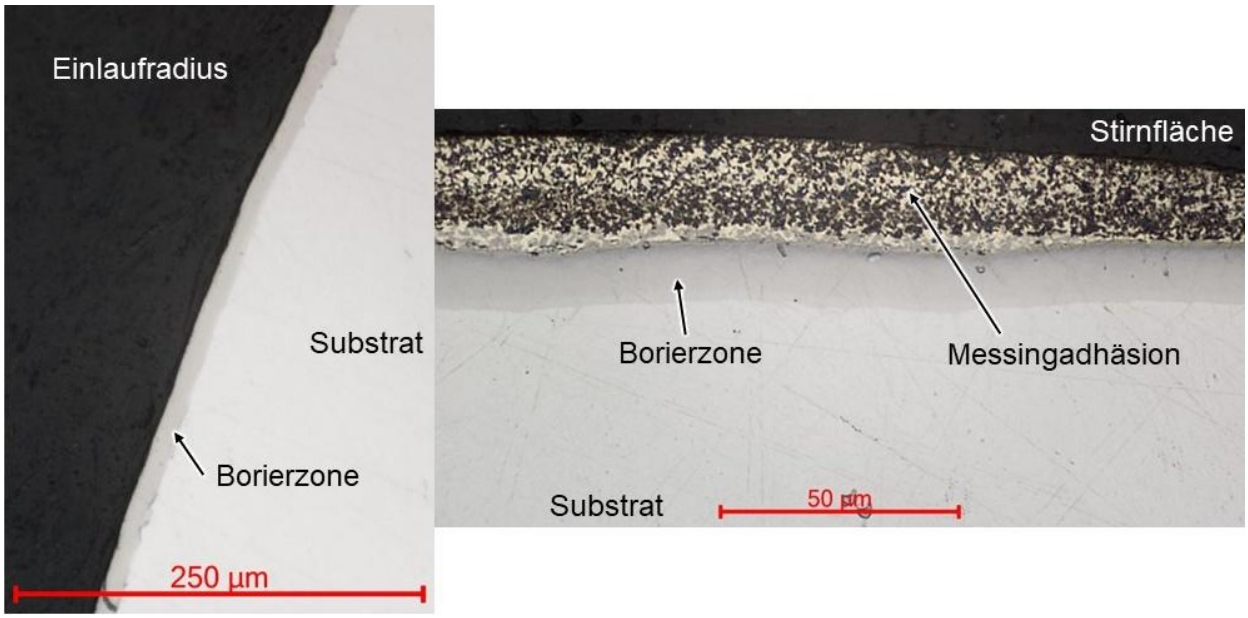


Abbildung 35: Querschliffaufnahme vom Einlaufradius (links) und der Stirnfläche (rechts) der vom IOT borierten Pressmatrize.

Für die borierten Oberlfächen des Alloy 718 durch die Firma BorTec GmbH zeichnet sich das gleiche Bild ab wie für die Borierungen des IOT. Die entsprechenden Querschliffe sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Borierzone im Einlaufradius ist vollkommen intakt (siehe Abbildung 36 (links)). Das Bild steht exemplarisch für den gesamten Einlaufradius, da nirgendwo Adhäsionen zu finden waren und keinerlei Defekte in der Borierzone erkennbar waren. Die Stirnfläche ist in großen Teilen frei von Adhäsionspartikeln. Eine der wenigen Stellen, die mit Messing versehen ist, ist in Abbildung 36 (rechts) dargestellt. Es ergibt sich ein identisches Bild zu den am IOT borierten Werkzeugen: Die Borierzone ist unterhalb der Messinganhaftungen frei von Fehlern und Defekten, d.h. es liegt kein Alloy 718 Substratmaterial frei. Der einzige deutliche Unterschied zwischen den beiden Borierzonen besteht in der Dicke der Messingadhäsionen. Ob diesem Umstand eine besondere Bedeutung beizumessen ist, ist eher fraglich. Schließlich ist für die Anwender die Fragestellung, ob die Verschleißschutzzone nach den Pressungen noch vorhanden ist, für eine etwaige Nachbearbeitung mit anschließendem neuerlichem Einsatz im Presswerk von übergeordnetem Interesse. Da sich die Adhäsionen von Messing voraussichtlich aufgrund der niedrigen Härte leicht entfernen lassen, ist deren Dicke von 10 µm oder 30 µm nicht entscheidend.

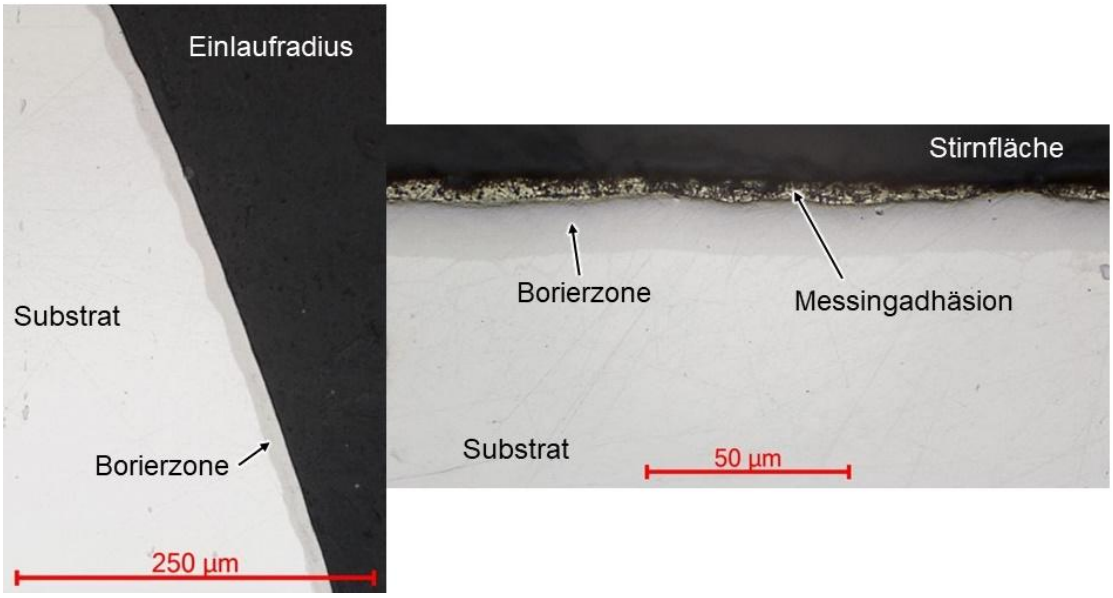


Abbildung 36: Querschliffaufnahme vom Einlaufradius (links) und der Stirnfläche (rechts) der von BorTec borierten Pressmatrize.

Schließlich ist festzuhalten, dass die Oberflächenmodifikationen in allen Fällen nach acht Pressungen noch defektfrei vorliegen, weshalb die Ergebnisse als außerordentlich positiv zu bewerten sind. Da der Prozess des Werkzeugsetzens und somit die plastische Deformation der Matrize bei den ersten Pressbolzen am stärksten ausgeprägt sind, ist davon auszugehen, dass die Hartstoffschichten auch bei deutlich höheren Standmengen vollständig intakt bleiben.

1.6 Arbeitspaket 4: Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens borhaltiger Oberflächenmodifikationen auf Strangpresswerkzeugen

Die Planung, Durchführung und Betreuung, sowie Auswertung der Industrieversuche gestaltete sich deutlich komplexer als erwartet. Dadurch traten Verzögerungen im Projektablauf auf, die nicht mehr aufgeholt werden konnten. Die Auswertung der industriellen Pressversuche wurde zu Lasten der Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens der Oberflächenbehandlungen priorisiert.

2 Verwendung der Zuwendung

Forschungseinrichtung 1, FZS TU Berlin

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) — 23 Monate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - Modularer Matrizensatz mit Komplexer Profilgeometrie — 3.796,58 €
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) — 15.600,63 €
  - Deform 3D Mietlizenz für Lehre und Forschung — 4.069,80 €
  - Untersuchung von oberflächenmodifizierten Matrizenbeschichtungen — 11.530,83 €

Forschungseinrichtung 2, IOT TU Braunschweig

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) — 23,2 Monate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) — Entfällt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) — Entfällt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden insgesamt 46,2 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt, wobei die Zuwendung wie folgt verwendet wurde:

- Forschungseinrichtung 1, FZS TU Berlin — 23 Monate
- Forschungseinrichtung 2, Fraunhofer IST — 23,2 Monate

Die zuvor in Kapitel 1 beschriebenen Arbeiten wurden größtenteils im Einklang mit dem Arbeitsplan des Projektantrags durchgeführt. Erste Ausnahme ist der Verzicht auf Ti-B-N-Schichten. Dies hängt zum einen mit der niedrigen Temperaturbeständigkeit der Schichten zusammen, die im Vergleich zum Ti-Si-B-C-N Schichtsystem deutlich geringer ist. Zum anderen haben zwei Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses (WEFA Inotec GmbH und BorTec GmbH) insgesamt drei Oberflächenmodifikationen als vAW-Leistungen in das Projekt eingebracht. Dadurch hat sich der Arbeitsaufwand für die Forschungsinstitute trotz des Wegfalls der Untersuchung der Ti-B-N Schicht insgesamt erhöht. Die zweite Ausnahme ist der Verzicht auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Oberflächenmodifikationen in AP 4. Die Planung, Durchführung und Betreuung, sowie Auswertung der Industrieversuche gestaltete sich deutlich komplexer als erwartet. Dadurch traten Verzögerungen im Projektablauf auf, die nicht mehr aufgeholt werden konnten. Die Auswertung der industriellen Pressversuche wurde zu Lasten der Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens der Oberflächenbehandlungen priorisiert.

Der Meilenstein „Die für die nachfolgenden Untersuchungen benötigten Probekörper […] wurden hergestellt und mit Oberflächenmodifikationen versehen.“ (MS AP 1.1) wurde erreicht. Die Bestimmung der „[…] Langzeitstabilität und Thermowechselbeständigkeit der verschiedenen Substrat-Schicht-Kombinationen unter Einsatzbedingungen beim Strangpressen […]“ (MS AP 1.2) und Charakterisierung des abrasiven Verschleißverhaltens (MS AP 1.3) wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Ermittlung der „[…] mechanischen Kennwerte E-Modul und Härte der Oberflächenmodifikationen“ (MS AP 1.4) wurde durchgeführt. Aufgrund von Unstimmigkeiten bei den Ergebnissen wurden Verifikationsversuche durchgeführt, die die Verlässlichkeit der in-situ Hochtemperaturmessungen widerlegten. Weiterhin wurde „die Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Oberflächenmodifikationen gegenüber punktuellen Stoßbeanspruchungen anhand von Rockwelleindrücken charakterisiert“ (MS AP 1.5). Die Bearbeitung des AP 2.1 wurde abgeschlossen und der Meilenstein „[…] Matrizen wurden behandelt / beschichtet […]“ wurde erfüllt. Die „Beurteilung des Verschleißverhaltens […] auf Grundlage des Werkzeugzustandes und der Profilqualität“ (MS AP 2.2) wurde zielführend abgeschlossen. Die Erfüllung der Meilensteine für AP 2.3 „Die Eignung der Hartstoffschichten wurde anhand von Pressversuchen mit Kupfer und Messing auch für komplexe Profilgeometrien mit kleinen Eckradien nachgewiesen“ und AP 2.4 „Die Untersuchungen an den bepressten Werkzeugen ermöglichen Rückschlüsse auf die Lebensdauer der Oberflächenmodifikationen bei der zyklischen Werkzeugbelastung im Strangpressfall“ ist ebenfalls erreicht. Der Meilenstein „Die vorliegenden FE-Modellierungen wurden um die Darstellung der Oberflächenmodifikationen und komplexer Matrizengeometrien erweitert“ aus AP 2.5 kann aufgrund der in Kapitel 1, AP 1.4

beschriebenen, fehlerhaften Hochtemperaturmessungen nicht erzielt werden. Die „[…] Pressversuche zum Verschleißverhalten der oberflächenmodifizierten Matrizen auf industriellen Strangpressen […]“ (MS AP 3.1) wurden erfolgreich durchgeführt und „[…] die Untersuchung der bepressten Werkzeuge […]“ (MS AP3.2) abgeschlossen. „Die detaillierte Gegenüberstellung der Werkzeug- und Prozesskosten […]“ konnte wie zuvor beschrieben aufgrund von Zeitmangel nicht mehr erfolgen.

Zudem ergaben sich folgende Verzögerungen hinsichtlich des geplanten Projektablaufs. Das Forschungsvorhaben begann offiziell zum 01.10.2024, jedoch wurde der Zuwendungsbescheid erst Anfang Oktober erhalten. Durch eine zügige Reaktion der Forschungsinstitute konnte die Arbeit am Projekt (und dessen Bebuchung) ab dem 01.01.2023 erfolgen. Entsprechend gibt es für die 3 Monate von 1.10.2022 bis 31.12.2023 weder Projektmittel, die Abgerufen wurden, noch wurden für das Projekt Arbeiten durchgeführt. Neben dem verzögerten Projektstart stechen zwei Punkte besonders hervor:

1. Im Zuge der Auswirkungen des Ukraine Krieges fiel die Beschaffung von der Nickelbasislegierung schwer. Da Russland als Lieferant für Nickel als Rohstoff wegfiel, waren auch ein Jahr nach Beginn des Krieges die Lieferzeiten lang und Kosten hoch. Dankenswerterweise stellte das Unternehmen VDM Metals die Legierung Alloy 718 als vAW-Leistung zur Verfügung, was einmal mehr das große Interesse aller beteiligten Industrieunternehmen an dem Forschungsvorhaben unterstreicht und signifikante, unerwartete Kosten aufgefangen hat.
2. Die Forschungsinstitute haben das Projekt ursprünglich mit 2,5 Jahren Laufzeit angesetzt. Diese Schätzung basierte sowohl auf vergleichbaren Projekten, als auch auf den Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt. Aufgrund der Anmerkungen eines Gutachters wurde die Forderung an die Forschungsinstitute gestellt, die Projektlaufzeit auf 2 Jahre zu verkürzen. Dieser Forderung sind die Forschungsinstitute nachgekommen, jedoch stellte sich im Projektverlauf heraus, dass Umfang und Komplexität des Projekts voraussichtlich auf eine Projektbearbeitung von mindestens 2,25 Jahren hinauslaufen.

Die durchgeführten Arbeiten waren damit notwendig und angemessen.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Durch die im nächsten Kapitel tabellarisch aufgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft konnten insbesondere auch KMUs gut erreicht werden. Durch die Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses wurden zudem die beteiligten Unternehmen direkt angesprochen und in die Arbeiten einbezogen. Hiermit sind KMUs in der Lage die Erkenntnisse und Ergebnisse für borhaltigen Oberflächenmodifikationen für ihre Einsatzmöglichkeiten einzuschätzen und in Zusammenarbeit mit den beteiligten Forschungsinstituten hin zu einer industriellen Anwendung weiterzuentwickeln. Aus dem vorliegenden Vorhaben heraus könnte eine solche Entwicklung für Anwender im Bereich der Produktion bzw. tribologischer Reibpaarungen lohnenswert sein.

Der wirtschaftliche Nutzen der Ergebnisse sind die Erarbeitung der geeigneter Abscheidungsparameter und -bedingungen von borhaltigen Oberflächenmodifikationen, die Erlangten Kenntnisse über deren Langzeitstabilität und Thermowechselbeständigkeit unter Einsatzbedingungen beim Strangpressen, sowie erste

Erfahrungen über die Standzeiten und mechanische Robustheit im industriellen Einsatz. Der wissenschaftlich-technische Nutzen präsentiert sich vor allem im Bereich der Adhäsionsreduktion. Die hervorragende Eignung der beiden Reibpaarungen Ti-Si-B-C-N-Beschichtung/Messing und Borierung/Kupfer konnte in den Pressversuchen bestätigt werden. Aber auch bei Anwendungen mit relevanten Verschleißaspekten zeigen die Oberflächenmodifikationen aufgrund ihrer hohen Härt großes Potential. Insbesondere im Transfer der Erkenntnisse auf andere, vergleichbare industrielle Fragestellungen ist die Verwertung der vorliegenden Resultate möglich.

Wissenstransfer in die Wirtschaft

5 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Laufzeit
Erläuterung der anstehenden Arbeiten vor dem PA	Beschreibung des Vorhabens, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	Braunschweig / 1. Sitzung des PA	15.02.2023
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Bekanntmachung des Vorhabens gegenüber Industrieunternehmen	Hettstedt / AK Schwermetall des FA Strangpressen der DGM	27.04.2023
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	13.-14.06.2023
Vortrag	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	15.06.2023
Beratung zum Thema Borieren von Stählen und Nickellegierungen	Identifikation geeigneter Oberflächen für Pressmatrizen	BorTec GmbH & Co. KG in Hürth/ Besprechung	19.06.2023
Besprechung zu Strangpressen mit komplexer Profilgeometrie	Disskussion zur Auswahl geeigneter Profilgeometrien	INGWERK GmbH in Berlin/ Besprechung	10.07.2023
Ergebnispräsentation und Beratung / Rundführung durch die Produktion der Wieland Werke AG	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	Wieland Werke AG in Vöhringen/2. Sitzung des PA	18.10.2023
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	14.-15.05.2024
Vortrag	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	16.05.2024
Erläuterung der anstehenden Arbeiten vor dem PA	Beschreibung des Vorhabens, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	Berlin/3. Sitzung des PA	16.05.2024
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Besuch eines Ingenieurs der INGWERK GmbH am FZS	29.05.2024
Publikation im Journal „Wear“	Wissenschaftliche Publikation der anwendungsnahen Forschung in einem international hoch angesehenen Journal	Publikation	15.06.2024

Austausch mit dem PA-Mitglied Ionbond	Informationsausstauch zu Dünnschichttechnologien zum Verschleißschutz auf 3D Werkzeugkonturen	Venlo, Niederlande / Besuch des Unternehmens mit Besprechung und Werksführung	24.06.2024
Ergebnispräsentation und Beratung	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	Dortmund / 4. Sitzung des PA	05.11.2024
Publikation im Journal „Advanced Material Interfaces“	Wissenschaftliche Publikation der anwendungsnahen Forschung in einem international hoch angesehenen Journal	Publikation	20.12.2024
Industrieversuche	Transfer der untersuchten Oberflächenmodifiaktionen auf den industriellen Maßstab	Vöhringen / Wieland-Werke AG	09.10.2025
Ergebnispräsentation	Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegung der Arbeitsschritte	Berlin/5. Sitzung des PA	20.03.2025
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	13.-14.05.2025
Vortrag	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V. in Berlin	15.05.2025
Vorlesung „Oberflächentechnik im Fahrzeugbau“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung an der TU Braunschweig	Halbjährlich
Vorlesung „Strangpressen metallischer Werkstoffe“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung im Rahmen des Studiengangs Werkstoffwissenschaften an der TU Berlin	jährlich

6 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Kontaktaufnahme zu interessierten Unternehmen	Wissenstransfer und Interessenabstimmung	Aktiver Dialog und gezielter Austausch mit Mitgliedern des PA und weiteren interessierten Unternehmen	Seit Beantragung
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	AK Schwermetall der DGM, Osnabrück	27.11.2024
Kontaktpflege zu den KMUs	Unterstützende Mitwirkung beim Einpflegen der Forschungsergebnisse in die Produktion	Nach Abschlussbericht fortlaufend im Rahmen des AK Schwermetall des FA Strangpressen der DGM	Halbjährlich
Ergebnispräsentation und Diskussion	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch	Jahrestagung des Fördervereins des Forschungszentrum Strangpressen e.V.	jährlich
Vorlesung „Oberflächentechnik im Fahrzeugbau“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung an der TU Braunschweig	Halbjährlich
Vorlesung „Strangpressen metallischer Werkstoffe“	Wissenstransfer in die Lehre unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse	Vorlesung im Rahmen des Studiengangs Werkstoffwissenschaften an der TU Berlin	jährlich
Vortrag	Schulung von Mitarbeitern aus Strangpressbetrieben und Zulieferindustrie	DGM Fortbildungspraktikum „Direktes und indirektes Strangpressen“ in Berlin	jährlich
Vortrag	Vorstellung der Ergebnisse	Sitzung des Forschungsbeirates des Stifterverband Metalle e.V.	einmalig

7 Literaturverzeichnis

[The24-1] Thewes et al. (2024). Formation of a Nanostructured Ti-Si-C-N Coating by Self-Organization with Reduced Amorphous Matrix. Advanced Materials Interfaces. 12. 10.1002/admi.202400644.

[The24-2] Alexander Thewes (2024). Dissertation: Untersuchungen zum Eigenschaftenprofil mehrphasiger Ti-Si-B-C-N Dünnschichten. Berichte aus der Verfahrenstechnik. Shaker Verlag, Düren. ISBN: 9783844096170