

## Titel

# Angepasste Randschichtmodifikation zur Reduzierung des thermoschockbedingten Verschleißes bei Schmiedegesenken

IGF-Nr.: 19302 N

---

## Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe,  
Remscheid (IFW)

Forschungseinrichtung 2: Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,  
Hannover (IFUM)

Forschungseinrichtung 3: Institut für Schicht- und Oberflächentechnik,  
Braunschweig (IST)



---

## Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19302 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

## Ausgangssituation

Das Gesenkschmieden ist ein wirtschaftliches Verfahren zur Massenfertigung vor allem sicherheitsrelevanter Bauteile aus dem Automobilbereich, dem allgemeinen Maschinenbau oder der Medizintechnik. Die Unternehmen der deutschen Schmiedebranche sind mit einem Anteil von 84 % überwiegend klein und mittelständisch geprägt [BAC10; DÖT10]. Die formgebenden Werkzeuge unterliegen prozessbedingt einem komplexen mechanischen, thermischen, tribologischen und chemischen Belastungskollektiv. Die hohen Belastungen sind verantwortlich für die im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren geringe Standmenge von Schmiedegesenken. Die Stückkosten eines Schmiedeteils hängen von der erreichbaren Standmenge ab, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Werkzeugkosten pro Schmiedestück haben. Hinzu kommt eine weitere indirekte Kostenbelastung durch Rüst- und Einrichtzeiten beim Werkzeugwechsel sowie eine geringere Produktivität aufgrund der Stillstandszeiten [KAL11]. Hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit sind die Unternehmen bestrebt, die Fertigungskosten zu senken und Werkstücke mit zunehmender geometrischer Komplexität zu fertigen. Aufgrund der in den vergangenen Jahren bereits durch einen hohen Automatisierungsgrad gesenkten Prozesskosten, bleiben im Wesentlichen die Werkzeugkosten als das Feld mit signifikanter Auswirkung auf die Fertigungskosten. Nur durch kontinuierliche Verbesserung der Werkzeugstandmengen und permanente Kosteneinsparung bei gleichzeitiger Verbesserung der Schmiedestückerigenschaften kann das Gesenkschmieden im Wettbewerb mit anderen Fertigungsverfahren bestehen.

Das für die Standmengenbegrenzung ursächliche Belastungskollektiv beim Schmieden setzt sich zusammen aus einer Kombination von sehr hohen Prozesstemperaturen (Rohteiltemperatur bis zu 1.280 °C beim Schmieden von Stahl), einer hohen Temperaturwechselbeanspruchung sowie hohen mechanischen Kräften während der Umformung. Die daraus resultierenden Verschleißmechanismen sind vielfältig. Vorangegangene Arbeiten [BEH12] haben gezeigt, dass bei Schmiedegesenken ein sehr unterschiedliches Verschleißverhalten, abhängig von den lokal vorherrschenden Beanspruchungen, auftritt. Wie nachfolgend beschrieben, kann durch die Anwendung geeigneter Kombinationsbehandlungen aus Plasmanitrierung und Hartstoffbeschichtung in einzelnen Gesenkbereichen eine deutliche Verschleißreduzierung erzielt werden, während in anderen Bereichen oftmals nur geringe bis gegenteilige Effekte nachweisbar sind. Dies lässt sich unter anderem auf die Thermoschockbeständigkeit der angewendeten Verschleißschutzbehandlungen, sowie auf lokal gegensätzliche Anforderungen an den Verschleißschutz zurückführen. Die Thermoschockbelastungen der Gesenkgravur sind lokal unterschiedlich hoch. Vor allem vorstehende Kanten und Dorne unterliegen hohen Thermoschockbelastungen. In diesen Bereichen konnte zwar nachgewiesen werden, dass eine starke Plasmanitrierung mit einer hohen Nitrierhärte (NHT) zu einer Verbesserung der Verschleißbeständigkeit führt, da plastische Deformationen wirksam vermieden

werden können. Dies geht jedoch einher mit einer Verringerung der Thermoschockbeständigkeit und somit einer starken Rissbildung der Gesenkooberfläche. In Abbildung 1 ist die Gegenüberstellung eines vergüteten Dorns links, sowie eines stark nitrierten Dorns rechts (NHT von 500 µm) dargestellt.



Abbildung 1: Thermoschockbeständigkeit eines vergüteten Dorns (links) im Vergleich zu einem stark nitrierten Dorn (rechts) nach 1000 Schmiedezyklen

Bei ungünstiger Wahl der Behandlungsparameter kann so möglicherweise das Potenzial der Beschichtungen und Nitrierungen nicht ausgeschöpft werden [CAS07; PAS10; LAV11; HOJ13].

Aufgrund der verschleißinitiierenden Wirkung und dadurch eventuell entstehender Risse ist durch eine Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit auf eine signifikante Steigerung der Werkzeugstandmenge zu schließen [PAS10]. Ein grundlegendes Verständnis zum Einsatzverhalten unterschiedlicher Warmarbeitsstähle und Randschichtmodifikationen unter Thermoschockbelastung konnte bislang nicht erarbeitet werden, da es in einem Gesenkschmiedeprozess stets zu einer Überlagerung mehrerer Verschleißmechanismen kommt und die Bewertung einzelner Belastungskomponenten kaum möglich ist. Zur Entwicklung thermoschockbeständiger Behandlungsstrategien ist daher eine Modellumgebung notwendig gewesen, mit dessen Hilfe Proben möglichst prozessnah mit den thermomechanischen Belastungen eines Gesenkschmiedeprozesses belastet werden, ohne gleichzeitig von tribologischen Belastungen überlagert zu werden. Auf Grundlage dieser Modellumgebung war es anschließend möglich, die Wissensbasis über die Mechanismen der thermomechanischen Ermüdung zu erweitern und gezielt thermoschockbeständige Verschleißschutzbehandlungen für das Gesenkschmieden zu entwickeln.

In Deutschland existieren rund 250 Unternehmen, die im Bereich der Massivumformung tätig sind. Eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Firmen der Massivumformung kommt besonders den KMU zugute. Laut einer Studie zur RTV – IGF 19302 N

Verteilung der Kosten beim Schmieden, fallen die direkten Werkzeugkosten (Material-, Fertigungs- und Nachbearbeitungskosten) im Mittel mit 10 % ins Gewicht [IDS95; KAL11]. Hinzu kommen Folgekosten durch Werkzeugausfälle, wie z. B. Rüstkosten (4 %) und Kosten für Ausschuss und Nacharbeit (4 %).

Die Materialkosten sind i. d. R. von den Schmiedeunternehmen nur geringfügig oder sehr schwer zu beeinflussen. Daher stellt die Steigerung der Verschleißbeständigkeit der formgebenden Werkzeugkomponenten einen praktikablen und vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Warmmassivumformprozessen dar. Fortschritte in diesem Bereich sind deshalb von hoher wirtschaftlicher Bedeutung.

Die Steigerung der Werkzeugstandmengen durch geeignete Werkzeugbehandlungen führt neben einer Reduzierung der Werkzeugkosten zu einer Verringerung der Stillstandzeiten und der Rüstkosten. Bereits eine geringe Steigerung der Werkzeugstandmengen würde den KMU der Schmiedebranche aufgrund der hohen Maschinenstundensätze von bis zu 1.250,- €/h erhebliche Prozesskosten einsparen. Der Einfluss des Werkzeugverschleißes auf Produktionsunterbrechungen wurde von Brüggemann untersucht [BRU97]. Demnach lassen sich 28 % der Fertigungsunterbrechungen auf die Werkzeuge zurückführen. Die werkzeugbedingten Fertigungsunterbrechungen hängen in Summe dabei zu 46 % vom verschleißbedingten Werkzeugausfall ab. Eine Erhöhung der Standmenge von Schmiedegesenken aufgrund einer Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit würde den werkzeugbedingten Ausschuss verringern und eine fehlerfreie Produktion sichern. Dies würde die Material- und Energieeffizienz des Gesenkschmiedens steigern.

---

### **Forschungsziel**

Das mittels des Vorhabens verfolgte Ziel war die Entwicklung thermoschockbeständiger Randschichtmodifikationen zur Erhöhung der Standmenge von Schmiedegesenken. Das Nitrieren stellt zwar eine wirksame Behandlung zur Reduzierung des Werkzeugverschleißes beim Schmieden dar, dieses verschlechtert jedoch die Thermoschockbeständigkeit der Schmiedewerkzeuge. Dies führt zu einer starken Rissbildung auf der Werkzeugoberfläche und zu einem Verlust der verschleißhemmenden Wirkung der Verschleißschutzbehandlung nach einigen tausend Zyklen.

Es konnte gezeigt werden, dass es aufgrund von Überlagerungen zwischen den zyklisch auftretenden thermisch induzierten Spannungen und den durch Nitrierbehandlungen erzeugten Eigenspannungen zu einer vermehrten Rissbildung kommt. Zusätzlich wurde festgestellt, dass es in Abhängigkeit von den Nitrierparametern zur Entstehung von ungünstigen Zugeigenspannungszuständen an der Oberfläche kommen kann. Diese treten vermehrt nach sehr langen und intensiven Nitrierprozessen auf, die eigentlich benötigt werden, um thermisch hochbelastete Bereiche durch die erzielten hohen Nitrierhärte-tiefen zu stabilisieren.

Ein grundlegendes Verständnis der auftretenden Effekte und die Charakterisierung unterschiedlicher Nitrierbehandlungen in Kombination mit der darauf aufbauenden Entwicklung thermoschockbeständigerer Behandlungen bietet nun die Möglichkeit, die verschleißinitiierende Wirkung der Risse zu reduzieren und dadurch die Standmenge der Werkzeuge deutlich zu verbessern.

---

### **Vorgehensweise und Forschungsergebnisse**

Zur Erreichung des Ziels wurde in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) eine Modellumgebung mit schmiedeüblichen Aufheiz- und Abkühlraten entwickelt, die so ausgelegt wurde, dass möglichst isolierte Beanspruchungsbedingungen ohne Überlagerung anderer Beanspruchungen vorliegen. Vor allem tribologische Belastungen, die durch fortschreitenden Materialabtrag das zu detektierende Rissbild verändern, werden durch die umgesetzte Konstruktion vermieden.

Die isolierte Betrachtung ermöglicht umfangreiche Untersuchungen zu den mikrostrukturellen Vorgängen sowie zu den Veränderungen der Eigenspannungstiefenprofile in der Werkzeugrandschicht unter schmiedetypischen Belastungen. Durch eine große Versuchsmatrix mit schmiedeüblichen Werkzeugwerkstoffen und -behandlungen wurden in verschiedenen Versuchsreihen die thermomechanischen Vorgänge in der Randschicht von Werkzeugen charakterisiert und die Gründe für die Rissbildung herausgearbeitet.

Als Lösungsansätze für thermoschockbeständige Behandlungen sind angepasste Nitrierbehandlungen und vor allem nachgeschaltete Wärmebehandlungen der erzeugten Nitrierschichten eingesetzt worden, um das Eigenspannungsprofil der oberflächennahen Bereiche günstig zu beeinflussen. Durch die Wärmebehandlung kann die Diffusion in der Randschicht reaktiviert und damit das Stickstoffprofil verändert werden, um ggf. duktilere Oberflächen mit günstigeren Eigenspannungsprofilen und reduzierter Rissneigung zu erzeugen.

Beim Schmieden herrscht ein komplexes Belastungskollektiv. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Modellumgebung unter isolierter Belastung nicht zwangsläufig direkt auf einen Gesenkschmiedeprozess übertragbar. Um sowohl die Modellumgebung als auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen realen Schmiedeprozess gewährleisten zu können, wurden Validierungsversuche im Serienschmiedeprozess durchgeführt. Die umfassende Analytik dieser Versuche erlaubt die Bewertung der entwickelten Behandlungen unter realen Prozessbedingungen. Dabei wurden etwaige Wechselwirkungen der thermoschockresistenten Behandlungen mit anderen Verschleißerscheinungen herausgearbeitet und anschließend eine Handlungsrichtlinie erarbeitet, um die einfache Implementierung der Projektergebnisse in die industrielle Praxis zu ermöglichen.

Die Behandlungsrichtlinie wurde dann in 2 Firmen des projektbegleitenden Ausschusses erprobt und ausgewertet. In Abbildung 2 ist der damals im Projektantrag vorgesehene Lösungsweg zum Erreichen des Forschungszieles als Ablaufplan dargestellt.

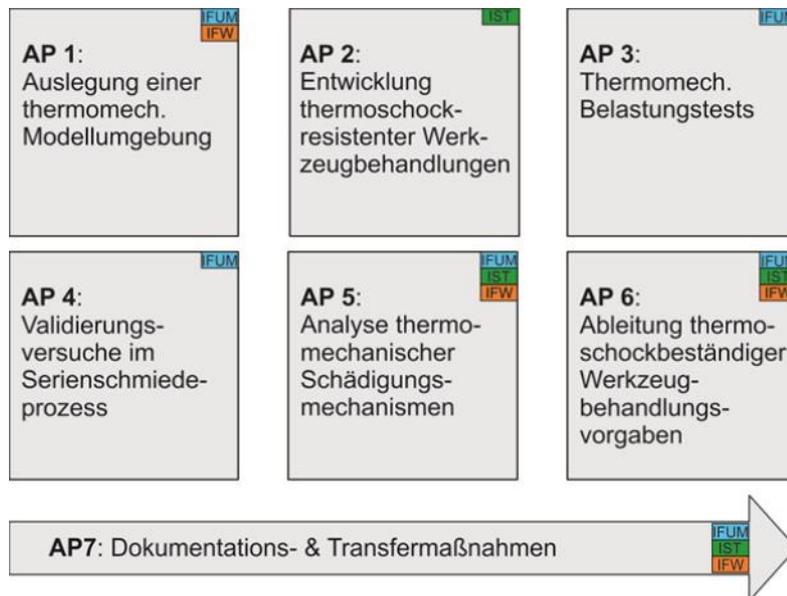


Abbildung 2: Ablaufdiagramm zum Arbeitsplan

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien und zerstörenden Verschleißanalysen der Werkzeuge nach dem Einsatz in den Serienschmiedeversuchen geben Aufschluss darüber, welche Behandlungen sich potentiell für den Einsatz in Werkzeugen mit hoher Thermoschockbeanspruchung eignen.

Anhand der zerstörungsfreien Verschleißanalyse der Werkzeuge wurden zunächst keine signifikanten Unterschiede im Verschleißverhalten erkannt. Während die Behandlungsvarianten mit Plasmanitrierung, gerade bei langer Behandlungsdauer, zu stärkerer Rissbildung in Folge der thermomechanischen Beanspruchungen neigen, weisen diese gleichzeitig nach dem Einsatz noch eine signifikant höhere Härte Randschichtfestigkeit auf. Zusätzlich ist die Einwirktiefe bei diesen Varianten höher, was die Beständigkeit gegenüber thermischer Entfestigung erhöht.

Die höchste Nitrierhärte und geringste Entfestigung wies die Langzeit-Nitrierbehandlung auf. Um dieses Verhalten bei höheren Stückzahlen und unter höheren industriellen Belastungen zu validieren, bietet es sich daher an die Langzeit-Plasmanitrierung und die Kombinationsbehandlung in Industrierversuchen einzusetzen. So kann das Zusammenspiel der Schädigungsmechanismen Rissbildung, Entfestigung und Verschleiß in der industriellen Praxis genauer untersucht werden.

Da die Werkzeuge in einigen industriellen Prozessen, gerade in Fertigformoperationen weniger thermisch und abrasiv beansprucht sind und eher zu mechanischer Rissbildung neigen, wurde zusätzlich zu den vorgesehenen industriellen Validierungsversuchen, die Plasmanitrocarburierbehandlung ausgewählt. Diese weist

eine geringere Überhöhung der Randschichthärte auf, was sich positiv auf die Beständigkeit gegen mechanische Rissbildung auswirkt.

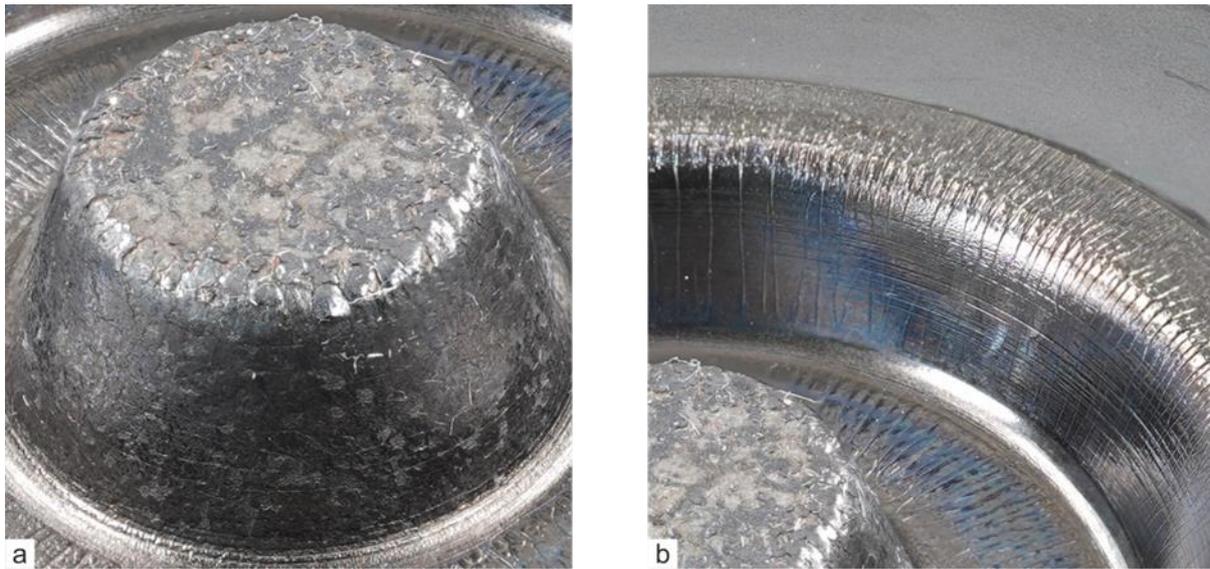


Abbildung 3: Schädigungsverhalten eines exemplarischen Versuchswerkzeugs aus dem Stahl 1.2343 mit Kombinationsbehandlung aus 8-stündiger Plasmanitrocarburierung mit anschließender 8-stündiger Plasma-nitrierung nach 2000 Zyklen: a) Dorn, b) Gravurgrund und Gratbahn

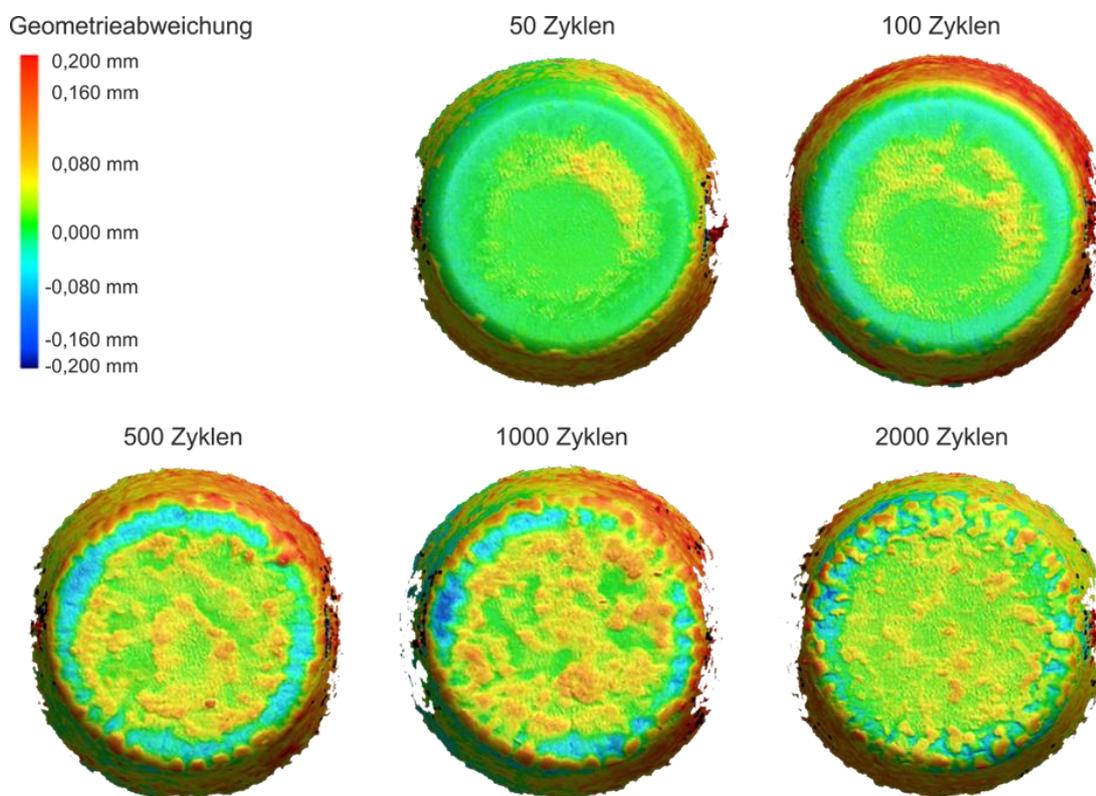


Abbildung 4: Geometrieanalyse eines exemplarischen Versuchswerkzeugs aus dem Stahl 1.2343 mit Kombinationsbehandlung aus 8-stündiger Plasmanitrocarburierung mit anschließender 8-stündiger Plasma-nitrierung über alle zerstörungsfreien Untersuchungsintervalle

---

## Zusammenfassung

Kernziel des abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die Entwicklung von Randschichtmodifikationen zur Steigerung der Standmengen von Gesenkschmiedewerkzeugen durch Verbesserung des Widerstandes gegen thermomechanische Rissbildung. Dazu wurde in zunächst eine thermomechanische Modellumgebung aufgebaut, welche die Thermoschockbeanspruchung ohne weitere überlagerte Beanspruchungsarten auf einer Probe aufbringt, die das Ergebnis beeinflussen würden.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden zahlreiche unterschiedliche Randschichtbehandlungen entwickelt und charakterisiert. Dazu wurden Plasmanitrier- und Plasmanitrocarburierprozesse in unterschiedlicher Intensität sowie Kombinationen daraus entwickelt. Um ihr Einsatzverhalten an Stelle der vorgesehenen thermomechanischen Belastungstests zu untersuchen, wurde die Versuchsmatrix der Serienschmiedeversuche von fünf auf 15 verschiedene Varianten erweitert.

Um praxistaugliche Behandlungsempfehlungen für die industrielle Anwendung abzuleiten, wurden die Behandlungen mit dem größten Potential in Industrierversuchen bei Projektpartnerfirmen eingesetzt und mit den bisher eingesetzten Referenzwerkzeugen abgeglichen. Dazu wurden eine vollständige zerstörungsfreie und zerstörende Verschleißanalyse und Charakterisierung von insgesamt 16 Werkzeugen durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Langzeit-Plasmanitrierung eine effektive Behandlung gegen Verschleiß in einer hochbelasteten Vorform darstellt. Eine Kombinationsbehandlung aus 8-stündiger Plasmanitrocarburierung mit anschließender 8-stündiger Plasmanitrierung sowie eine 16-stündige Plasmanitrocarburierung haben positive Effekte im Einsatz in einer Fertigform gezeigt. Diese Erkenntnisse beschränken sich allerdings auf den Gültigkeitsbereich unter ähnlichen Belastungsbedingungen. In höher belasteten Vorformschmiedeprozess wurde ein bislang wenig erforschtes Schädigungsverhalten identifiziert werden, bei dem die angewendeten Randschichtbehandlungsverfahren keine signifikante Wirkung haben. Die verschleißfesten Randschichten werden bei zu hoher thermischer Entfestigung ohne abrasiven Abtrag segmentweise durch plastische Deformation abgetragen. Gerade durch die hohe Entfestigungstiefe im Bereich der Gratbahn kann kein anhaltender Verschleißschutz erreicht werden.

Für solche Bedingungen mit höherer Belastung müssen auf Basis dieses Vorhabens alternative Ansätze gefunden werden, um Standmengen effektiver zu steigern. Potential bietet dazu beispielsweise die Optimierung von Kühlschmierkonzepten im Schmiedeprozess, die Auswahl oder Entwicklung anlassbeständiger Werkzeugstähle oder die Weiterentwicklung von Randschichtmodifikationen mit größerer Eindringtiefe oder thermisch isolierender Wirkung.

Im Rahmen dieses Vorhabens konnten die Potentiale unterschiedlicher entwickelter Randschichtmodifikationen aufgezeigt werden. Um diese Erkenntnisse in der industriellen Praxis zu bestätigen, wurden sie in Mitgliedsunternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses eingesetzt und validiert. Da die Industrierversuche, obwohl sie in ihrem Umfang gegenüber dem im Projektantrag vorgesehenen Aufwand deutlich erweitert worden sind, noch nicht ausreichen, um eine allgemeingültige Handlungsempfehlung abzugeben, erfolgen im Anschluss an das Vorhaben weiterführende Validierungsversuche in den beteiligten Unternehmen. Gerade die bislang nur unzureichend untersuchten Werkzeuge mit Plasmanitrocarburierung und Kombinationsbehandlung sollen erneut und in erweitertem Umfang in industriellen Schmiedeprozessen eingesetzt werden.

---

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

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

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Dominik Lenz unter 02191 5921.123.

## Literaturverzeichnis

- [BAC10] Bachmann, D.: Industrieverband Massivumformung e.V.: Gaswärme International; Volume 59; Issue 1 - 2; 2010; S. 77 – 81
- [BEH12] Behrens, B.-A.; Yilkiran, T.; Paschke, H.; Weber, M.; Dültgen, P.; Brand, H.: Untersuchung zu den Verschleißeigenschaften nitrierter und beschichteter Werkzeuge für die Warmmassivumformung. UTF Science; Issue 4; 2012
- [BRU97] Brüggemann, K.: Methoden des Qualitätsmanagements beim Gesenkschmieden. Fortschritts-Berichte VDI; Dissertation; Universität Hannover; 1997
- [CAS07] Castro, G.; Fernández-Vicente, A.; Cid, J.: Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a crankshaft forging process. Wear; Volume 263; Issue 7 – 12; 2007; S. 1375 – 1385
- [DÖT10] Döth, B.; Kurtzke, W.: Branchenreport Schmiede-Industrie 2010 - Im Sog der Weltwirtschaftskrise. Branchenreport IG Metall; Issue 03; 2010
- [HOJ13] Hoja, S.; Klümper-Westkamp, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.; Baumgartner, N.; Weidel, S.: Schmiedegerecht nitrierte Gesenke. SchmiedeJOURNAL; Issue September; 2013; S. 32 – 35
- [IDS95] Schmiedeteile - Gestaltung - Anwendung - Beispiele. Informations-stelle Schmiedestück-Verwendung; IDS; 1995
- [KAL11] Kalpakjian, S.; Schmid, S. R.; Werner, E.: Werkstofftechnik; Verlag Pearson Studium; 2011
- [LAV11] Lavtar, L.; Muhic, T.; Kugler, G.; Tercelj, M.: Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. Engineering Failure Analysis; Volume 18; Issue 4; 2011; S. 1143 – 1152
- [PAS10] Paschke, H.; Weber, M.; Kaestner, P.; Bräuer, G.: Influence of different plasma nitriding treatments on the wear and crack behavior of forging tools evaluated by Rockwell indentation and scratch tests; Surface & Coatings Technology; Volume 205; 2010; S. 1465 – 1469