

# Untersuchung zu den Verschleißeigenschaften nitrierter und beschichteter Werkzeuge für die Warmmassivumformung

Bernd-Arno Behrens, Timur Yilkiran

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Hanno Paschke, Martin Weber

Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST)

Peter Dültgen, Helmut Brand

Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW)

Korrespondenzautor:

Dipl.-Ing. Timur Yilkiran

Abteilung Massivumformung

Tel: 0511-762 2893, Fax: 0511-762 3007

[yilkiran@ifum.uni-hannover.de](mailto:yilkiran@ifum.uni-hannover.de)

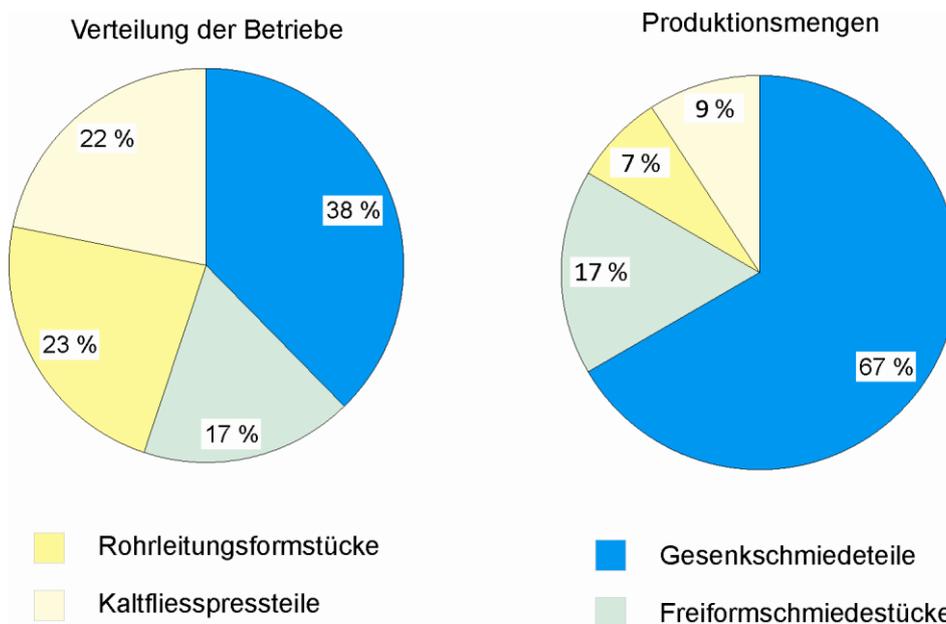
*Die deutsche Schmiedebranche sieht sich zunehmenden Herausforderungen durch eine stetig steigende Komplexität der Bauteile und einem zunehmenden internationalen Wettbewerb gegenübergestellt. Diesen Aufgaben können die Unternehmen nur durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung ihrer Prozesse zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Produktion entgegenwirken. Im Bereich der Warmmassivumformung hängen die Produktionskosten stark von den Werkzeugkosten ab, da hohe mechanische, thermische und tribologische Belastungen während der Umformung zu einer im Allgemeinen geringen Standzeit der formgebenden Werkzeugkomponenten führen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verschleißschutzmaßnahmen für die Warmmassivumformung diskutiert und Ergebnisse eines aktuellen Forschungsprojektes zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken durch verschleißmindernde chrom- und borbasierte Dünnschichtsysteme dargestellt.*

**Schlüsselwörter:** Warmmassivumformung, Gesenkverschleiß, PVD, PACVD, Verschleiß, Gesenkschmieden

## Einleitung

In Deutschland existieren rund 250 kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die im Bereich der Massivumformung tätig sind. Der zunehmende Kosten- und Zeitdruck sowie die Globalisierung zwingen die Unternehmen dazu, Produkte bei gleichbleibenden bzw. steigenden Qualitätsansprüchen zu tendenziell günstigeren Preisen anzubieten. Die Unternehmen der Massivumformung sehen sich somit vor die Aufgabe gestellt, ihre Prozesse stetig zu verbessern, um langfristig wettbewerbsfähig bleiben zu können.

Zur Branche der Massivumformung zählen Unternehmen, die im Wesentlichen Rohrleitungsformstücke, Kaltfliesspressteile, Gesenkschmiedeteile und Freiformschmiedestücke produzieren. Die Anzahl der zu diesen Produktgruppen zugehörigen Betriebe sowie die jeweiligen Produktionsvolumina sind in Abbildung 1 dargestellt.

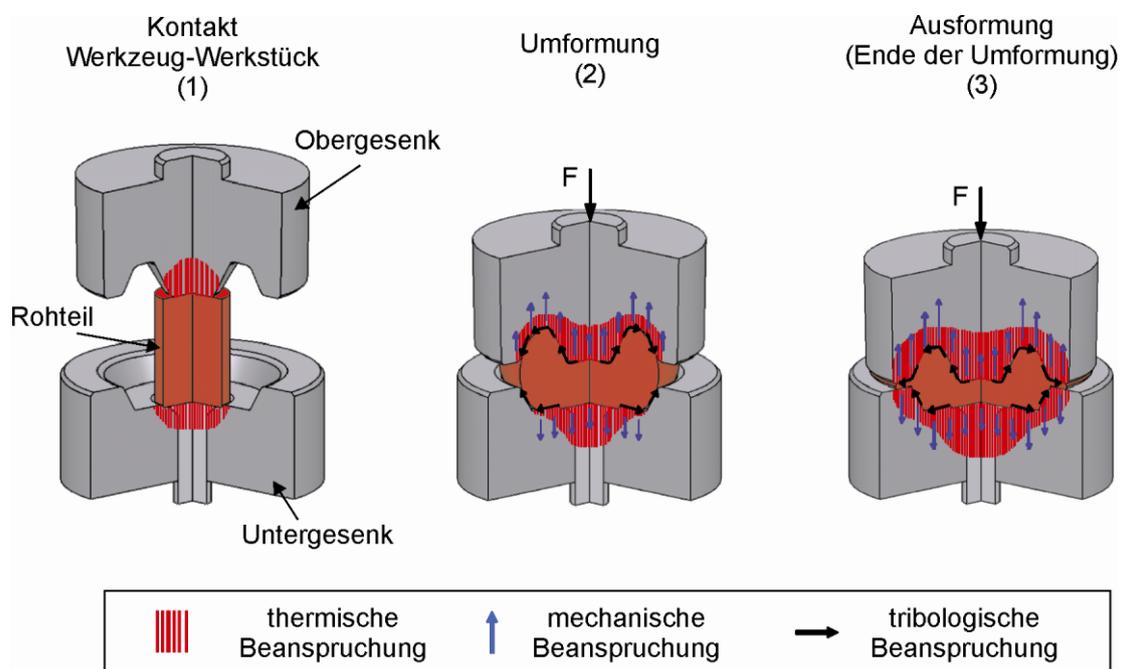


**Abbildung 1:** Betriebe in der Massivumformung und Produktionsvolumen /IMU11/

Den weitaus größten Anteil am Produktionsvolumen machen mit 67 % die Gesenkschmiedeteile aus, obwohl die Anzahl der deutschen Gesenkschmiedebetriebe nur 38 % beträgt.

## Werkzeugverschleiß bei Schmiedegesenken

Werkzeuge für das Gesenkschmieden unterliegen während des Formgebungsprozesses einem lokal stark unterschiedlichen Belastungskollektiv aus mechanischen, thermischen und tribologischen Beanspruchungen, die sich teilweise überlagern. Diese Belastungen führen in der Regel bereits nach einer im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren geringen Standmenge der Werkzeuge und somit zu hohen Kosten für die Werkzeuginstandhaltung. In der folgenden Abbildung wird schematisch ein typischer Ablauf eines Gesenkschmiedeprozesses mit Grat und den während der Umformung entstehenden Beanspruchungen dargestellt.



**Abbildung 2:** Beanspruchungen beim Gesenkschmieden /Hus05/

Beim Einlegen des bei der Stahlumformung in der Regel auf bis zu 1250 °C erwärmten Rohteils in das Untergesenk kommt es bereits vor dem eigentlichen Umformprozess zu einem Eintrag von thermischer Energie. Bei Beginn der Umformung setzt das Obergesenk auf dem Rohteil auf, verstärkt durch die Umformkraft kommt es dabei zu einer Zunahme der thermischen Belastung (1). Während der Umformung (2) wirkt eine zusätzliche mechanische Belastung durch den hohen Gesenkinnendruck und eine tribologische Belastung durch die Reibung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück. Am Ende der Umformung (3) ist die eigentliche Formgebung abgeschlossen und überschüssiges Material fließt in den

Grat. Die Gratbildung ist mit einer weiteren Zunahme der thermischen und mechanischen Belastung verbunden. Häufig schließt sich daran noch eine Sprühkühlung mit wasserhaltigen Kühlschmierstoffen an, die zu einer starken Thermoschockbelastung führt und als Ursache für die Ausbildung von Rissnetzwerken an der Werkzeugoberfläche gesehen wird /Pas11, Web10/.

Diese Belastungsfelder führen zu unterschiedlichsten Verschleißarten bei Schmiedegesenken, die werkzeugindividuell zu unterschiedlichen Ausfallursachen führen. Der Verschleiß wird mit einem Anteil von 70 % als Hauptausfallursache von Schmiedegesenken angenommen /Doe10/. Weitere Ausfallursachen sind starke Oberflächenrissnetzwerke oder plastische Deformationen. Der Anteil der verschleißbedingten Werkzeugausfälle wurde im Rahmen einer Studie zum Qualitätsmanagement von Schmiedeprozessen mit einem Wert 48 % angegeben /Brü97/. Insgesamt wurden die mit den Werkzeugen in Verbindung zu bringenden Ausfallursachen mit 28 % beziffert. Als weitere mögliche Ausfallursachen wurden Maschinenfehler, Bedienungsfehler, Fehler in der Erwärmungs- und Handhabungseinrichtung sowie organisatorische Ausfallgründe genannt.

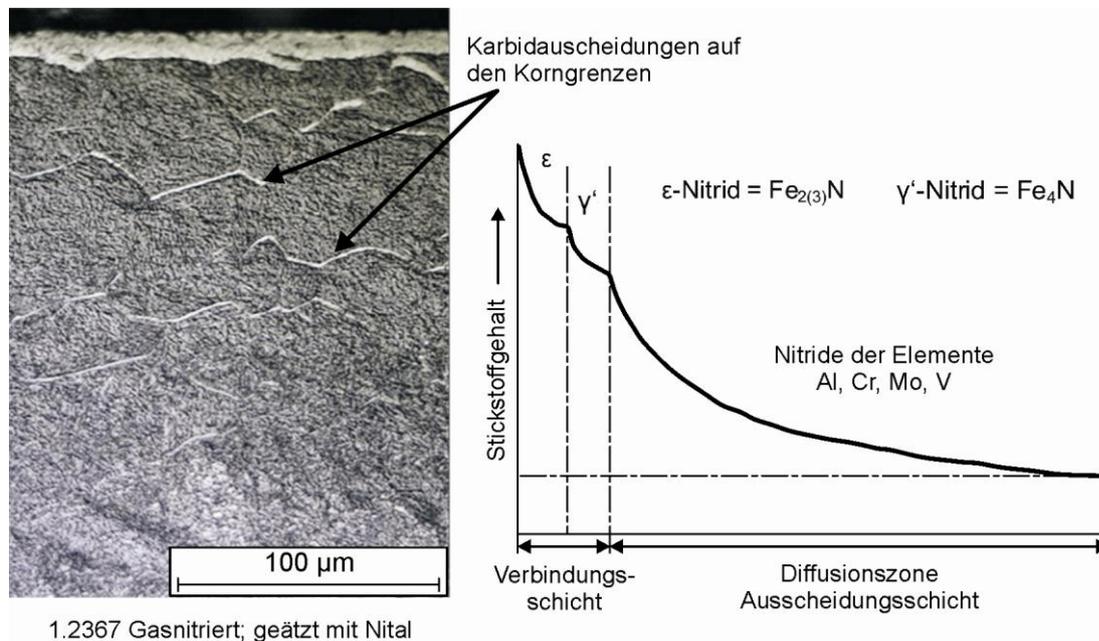
### **Verschleißschutzmaßnahmen in der Warmmassivumformung**

Aufgrund der eingangs dargestellten Verteilung der anteiligen Produktionsvolumen und der signifikanten Beeinflussung der Produktionskosten im Bereich der Warmmassivumformung durch den verschleißbedingten Ausfall der formgebenden Werkzeugkomponenten ist die Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken Gegenstand vielfältiger und aktueller Forschungsvorhaben.

Im Bereich der Warmmassivumformung hat sich neben der konventionellen Wärmebehandlung vor allem das Nitrieren als Randschichtbehandlungsverfahren zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit etabliert. Nach DIN EN 10052 wird das Nitrieren als „thermochemisches Behandeln zum Anreichern der Randschicht eines Werkstücks mit Stickstoff“ bezeichnet. Dies kann mit unterschiedlichen Verfahren realisiert werden. Wird neben dem Stickstoff noch Kohlenstoff eingelagert, wird vom Nitrocarburieren gesprochen /Lie05/.

Das Nitrieren der Werkzeuge für Schmiedeanwendungen zählt mittlerweile zum Stand der Technik und wird industriell eingesetzt. Durch das Eindiffundieren von Stickstoff kommt es zu einer Umwandlung der oberflächennahen Bereiche, die zu

einer Verbesserung der Warmfestigkeit, des Verschleißwiderstandes, der Dauerfestigkeit und der Korrosionsfestigkeit führt. In Abhängigkeit von den Nitrierparametern und dem Werkstoff kommt es zur Bildung von Verbindungs- und Ausscheidungsschichten (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Aufbau einer Nitrierschicht

Die Verbindungsschicht an der Werkstoffoberfläche ist durch einen hohen Stickstoffgehalt gekennzeichnet und besteht aus einer  $\gamma'$ - ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ),  $\epsilon$ -Phase ( $\text{Fe}_{2(3)}\text{N}$ ) oder einem entsprechenden Phasengemisch /He06/. Bei stoßartigen Belastungen des Gesenks wird angestrebt, die Ausbildung der eher spröden Verbindungsschicht durch angepasste Nitrierparameter zu unterdrücken und eine verbindungsschichtfreie Behandlung durchzuführen. Alternativ kann die Schicht auch nachträglich mechanisch entfernt werden, um ein Ausbrechen an hochbelasteten Konturen zu vermeiden. Die Ausscheidungsschicht unterhalb der Verbindungsschicht hat die gleiche Struktur wie der Grundwerkstoff, weist aber Ausscheidungen von Eisennitriden ( $\alpha''$ - und  $\gamma'$ -Phasen) und Sondernitriden (Al-, Cr-, V- und Mo-Nitride) auf. Der Gehalt an Nitridbildnern, die für die Entstehung der Sondernitride verantwortlich sind, ist für das Nitrierergebnis entscheidend und muss bei der Wahl der Nitrierparameter berücksichtigt werden. Für Schmiedewerkzeuge gebräuchliche Nitrierverfahren sind das Salzbadnitrieren (Tenifer-Verfahren), das Gasnitrieren und

in zunehmendem Maße das Plasmanitrieren. Die Nitriertemperaturen liegen in der Regel zwischen 480 °C und 580 °C bei Behandlungszeiten von 1 bis 100 Stunden.

Auch wenn das Nitrieren heute eine breite Anwendung in der Schmiedebbranche findet, existieren noch keine gesicherten Erkenntnisse zum anwendungsgerechten Einsatz des Verfahrens bei Schmiedeapplikationen. Besonders deutlich wird dies in einer Studie, in der die Standmengenschwankungen nitrierter Werkzeuge in automatisierten Pressenschmiedungen untersucht wurden /Klü09/.

Um die Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken weiter zu erhöhen, werden im Bereich der Forschung unterschiedlichste Ansätze verfolgt. Neben dem Einsatz alternativer Werkstoffe /May11/ oder Inlays aus Keramik oder Hartmetall /Beh04, Bar05/ sowie der Entwicklung neuartiger Kühl- und Schmiermittelkonzepte /Beh06, Gul06/ konzentrieren sich immer mehr Forschungsaktivitäten auf die Modifikation der Werkzeugoberflächen.

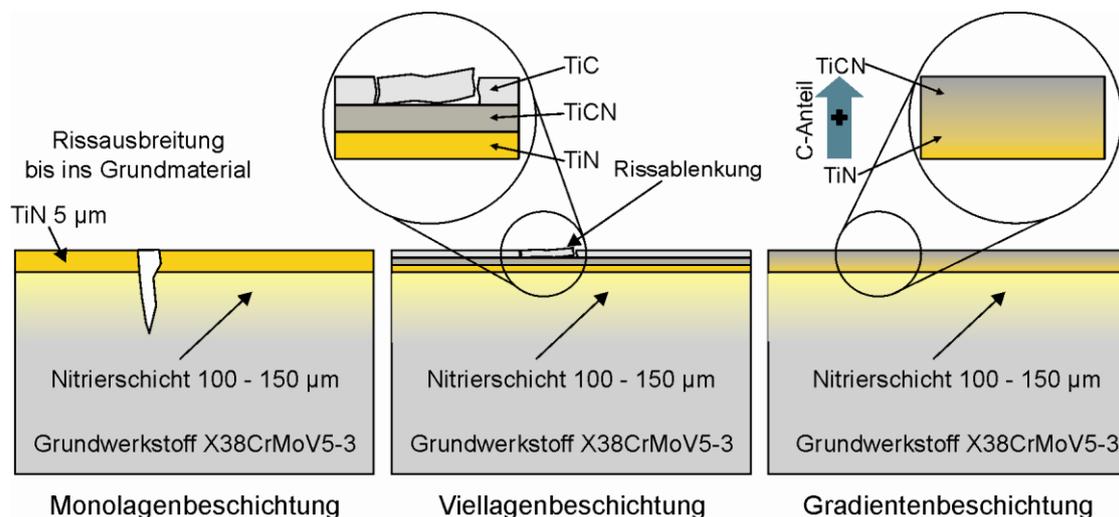
Im Bereich der Werkzeugfertigung für Schmiedeanwendungen wurde in einem EU-Kooperationsprojekt /Cur09/ und in einer von der AiF geförderten Studie /IGF08/ die Kombination von Laserlegieren und Nitrieren als Duplex-Verfahren zur Standmengenverbesserung untersucht. Das Laserlegieren dient dabei in erster Linie der Reduktion von Abrasion und das Nitrieren der Reduktion von Adhäsion. Variiert wurden neben den Nitrierverfahren und -parametern die Zusatzwerkstoffe für das Laserlegieren. Als Ergebnis beider Studien konnte im Vergleich zu unbehandelten bzw. nur nitrierten Werkzeugen ein verbessertes Verschleißverhalten der so behandelten Werkzeuge ermittelt werden. Darüber hinaus zeigte sich, dass die vorherrschende Belastungsart einen wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß ausübt und definierte Nitrierschichten und Legierungszusätze erfordert. Ein allgemeingültiger Schichtaufbau für eine maximale Standmengensteigerung kann bei dieser Duplex-Behandlung somit nicht existieren. Nur durch eine gezielte Anpassung an den jeweiligen Prozess kann eine möglichst hohe Steigerung der Verschleißbeständigkeit erzielt werden.

In vielfältigen Forschungsarbeiten wurden mittels PVD- und CVD-Verfahren applizierte Hartstoffdünnschichten als Verschleißschutzmaßnahme für Schmiedegesenke untersucht. Für die Umformung von Stahlwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen werden überwiegend titanbasierte Hartstoffschichten wie TiN, TiCN und TiAlN verwendet. Die maximale Anwendungstemperatur von TiN (bis ca. 600°C)

und TiCN (bis ca. 400°C) reicht jedoch für die Warmumformung nicht aus. TiAlN kann infolge seiner guten thermischen Stabilität bis ca. 800°C eingesetzt werden und wurde bereits vereinzelt für Schmiedeanwendungen erprobt. Versuche dazu wurden bei der Firma Hirschvogel Umformtechnik in Denklingen durchgeführt /Der06, Pan02/. Durch höhere Aluminiumanteile und die Verwendung von Chrom anstelle von Titan (AlCrN bzw. CrAlN) konnten thermisch stabilere Schichten (bis ca. 1000°C) entwickelt werden, die mittlerweile am Markt verfügbar sind.

Neben titanbasierten Beschichtungen wurden in aufbauenden Untersuchungen borbasierte Beschichtungen verwendet. Besonders eignen sich borbasierte Beschichtungen aufgrund ihrer hohen Härte und Temperaturbeständigkeit zur Verschleißreduzierung bei Schmiedegesenken. In /Les09, Beh05, Beh10/ konnte der Verschleiß durch ternäre TiBN-Beschichtungen in Labor- und Industrierversuchen deutlich reduziert werden.

Für den Erfolg der Beschichtungssysteme als Verschleißschutzmaßnahme bei Schmiedegesenken wurde in beiden Untersuchungen neben den Beschichtungselementen der Aufbau der Schichtsysteme als wesentliches Kriterium der Belastbarkeit der Beschichtungen genannt. Die prinzipiell möglichen Schichtaufbauten sind in Abbildung 4 nach /Hus05/ dargestellt.



**Abbildung 4:** Applikationsmöglichkeiten von Harstoffdünnschichten /Hus05/

Wie in Abbildung 4 dargestellt, können Beschichtungen als Monolagen-, Mehrlagen- oder Gradientenbeschichtungen aufgebaut werden. Monolagenbeschichtungen weisen den Nachteil auf, dass es bei oberflächlichen Rissen zu einer direkten

Rissausbreitung in das Grundmaterial kommt. Der Vorteil liegt in der einfachen Anwendung. Bei Mehrlagenschichtsystemen können durch Spannungs- und Härteunterschieden der unterschiedlichen Schichtbestandteile Oberflächenrisse beim Durchgang zum Substrat an den tieferen Schichten abgelenkt werden. Weitere Vorteile liegen in der Kombination unterschiedlicher Schichten. Auf diese Weise können beispielsweise als unterste Lage Schichtmaterialien mit einer guten Haftung zum Substrat und als oberste Lage harte und verschleißbeständige Schichten verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit ist ein gradierter Aufbau der Beschichtung. In Abbildung 4 (rechts) ist beispielhaft eine gradierte TiN→TiCN Beschichtung dargestellt. Der Aufbau gradierter Beschichtungen erfolgt in diesem Beispiel durch einen kontinuierlich ansteigenden Kohlenstoffanteil während des Beschichtungsprozesses. Der Vorteil dieses Beschichtungstyps liegt in der besseren Kombinierbarkeit der unterschiedlichen Materialeigenschaften durch einen annähernd stufenlosen Übergang.

Zur weiteren Verbesserung der Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken wird in einem aktuell laufenden Forschungsprojekt der drei Forschungsstellen IFW Remscheid, Fraunhofer IST Braunschweig und IFUM Hannover der Einfluss des Schichtdesigns und verschiedener Beschichtungsmaterialien in Kombination mit Plasmanitrierbehandlungen auf den Reibwert zwischen Werkzeug und Werkstück sowie auf den Werkzeugverschleiß untersucht. Erste Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

### **Aufbau der Schichtsysteme**

Als Lösungsansatz zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken wurden chrom- und borbasierte Beschichtungssysteme entwickelt.

Von borhaltigen Schichten ist bekannt, dass sie niedrige Reibwerte und aufgrund ihrer oft hohen Härte eine sehr gute Verschleißbeständigkeit aufweisen können. Vielfältige Modifikationen sind gängig. Von besonderer Bedeutung ist das Bornitrid, das sowohl in einer weichen hexagonalen (h-BN) als auch in einer sehr harten kubischen (c-BN) Modifikation existiert. Hexagonales Bornitrid wird als Antihaft- und Schmiermittel verwendet und besitzt eine hohe Temperatur- und Oxidationsbeständigkeit [Wäs89], die auf die Ausbildung einer schützenden Boroxidschicht

zurückzuführen ist /Hab95/. Aufgrund der geringen Härte wird h-BN als Schicht jedoch bei steigender Last schnell abgetragen und der Grundwerkstoff kommt in direkten Kontakt mit dem Reibpartner. Um dies zu verhindern, wird h-BN mit anderen Werkstoffen kombiniert.

Ein Verbesserungsansatz besteht darin, dem Bornitrid eine titanhaltige Komponente hinzuzufügen. Zu diesem Zweck sind im Dreistoffsystem Ti-B-N Kombinationen mit den Titanverbindungen  $TiB_2$  und TiN von besonderem Interesse.  $TiB_2$  weist im Allgemeinen eine hohe Härte und exzellente Verschleißeigenschaften auf /Pfo00/. TiN ist als zäher Schichtwerkstoff mit gutem Verschleißwiderstand als universelle Hartstoffschicht inzwischen sehr weit verbreitet. In Kombination lassen sich vielfältige nanostrukturierte Werkstoffe aus den binären Phasenmischungen von Nitriden und Boriden des Titans ableiten /Sto04/. Ein Ansatz zur Reduzierung des Reibkoeffizienten ist die Mischung der harten Ti(B, N)-Phase mit reibungsarmen Bornitridphasen unter Beibehaltung der hohen Temperaturbeständigkeit /Pas11/.

CrN-Schichten zeichnen sich durch ihre herausragende Korrosions- und sehr gute Verschleißbeständigkeit aus. Aufgrund ihrer geringen Eigenspannungen können sie in erheblich größerer Schichtdicke als andere PVD-Hartstoffschichten abgeschieden werden. Ihre gute thermische Stabilität in Kombination mit einer hohen Duktilität erlaubt vielfältige Anwendungen bei erhöhten Temperaturen, z.B. beim Aluminiumdruckguss /Sub96/. Trotz allem sind die tribologischen Eigenschaften von CrN oft nicht geeignet für die Halbwarm- bzw. Warmumformung. Problematisch ist vor allem der unzureichende Schutz vor Anhaftungen des Schmiedewerkstoffes in Kombination mit einem hohen Reibwert. Durch die Dotierung von CrN mit Aluminium (CrAlN) konnte die thermische Stabilität weiter verbessert werden. Anwendungstemperaturen bis  $1000^\circ\text{C}$  sind möglich, die tribologischen Probleme konnten bislang jedoch nicht befriedigend gelöst werden. Aus der Literatur ist bekannt, dass beispielsweise durch die Dotierung mit Vanadium die Eigenschaften von CrN weiter verbessert werden können /Usch04/. Neuere Untersuchungen am Fraunhofer IST Braunschweig haben diesen Effekt für die Dotierungselemente Vanadium, Wolfram und Titan bestätigt.

Neben einer Steigerung der Härte konnten in einigen Fällen die Reibwerte bei höheren Temperaturen und Adhäsionserscheinungen reduziert werden. Die Dotierungselemente üben ferner einen großen Einfluss auf die Schichtmorphologie

bzw. die Wachstumsstruktur der Schichten aus. Abhängig vom Dotierungselement werden glasartige oder feinstängelige Wachstumsstrukturen begünstigt. Außerdem wird die Schichthärte durch alle Dotierungen wesentlich gesteigert, dies führt jedoch häufig zu einer Abnahme der Zähigkeit. Eine Besonderheit weisen vanadiumdotierte Schichten auf, mit denen sich selbstschmierende Effekte realisieren lassen. Oberhalb von 560°C kommt es zur Bildung von Vanadiumoxid-Lamellen aus niedrig schmelzendem  $V_2O_5$  ( $T_s = 690^\circ\text{C}$ ) an der Oberfläche der Beschichtung, die als Schmierstoff den Werkzeugverschleiß reduzieren und das Gleitverhalten verbessern können. Über den Vanadiumgehalt der CrVN-Schichten lässt sich das Schichtsystem hinsichtlich Schmierwirkung oder thermischer Stabilität optimieren.

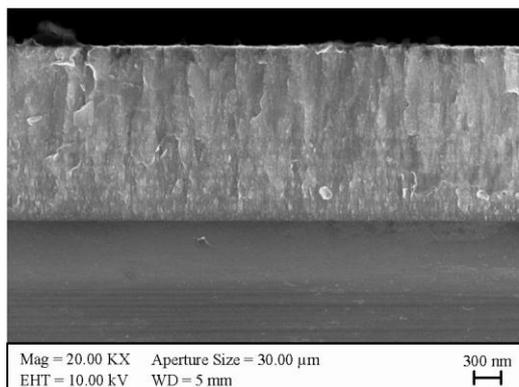
### Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Um die Eigenschaften chrom- und borhaltiger Beschichtungssysteme und speziell den Einfluss des Schichtdesigns auf das Verschleißverhalten von Schmiedegesenken zu untersuchen, wurden mehrlagige CrVN-Beschichtungen und mehrlagige TiBN-Gradientenbeschichtungen auf Modellschmiedewerkzeugen abgeschieden. Die Schichtaufbauten und die in Laborversuchen ermittelten Schichteigenschaften sind in Abbildung 5 dargestellt.

#### Borhaltige Mehrlagenbeschichtung

##### Schichteigenschaften Ti-B-N

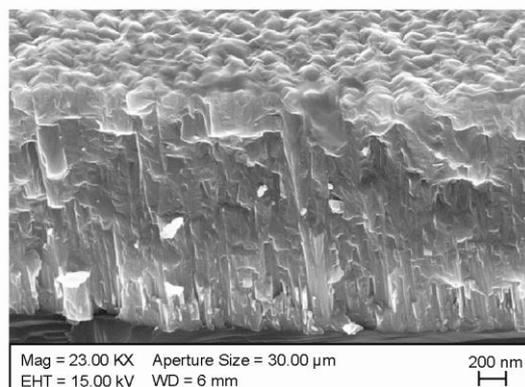
Schichtdicke	2-3 $\mu\text{m}$
Rockwellhaftklasse	HF1
Kritische Last $L_{c_2}$	20-25 N
Mikrohärte	3200-4200 $\text{HV}_{0,005}$
Verschleißrate	$3-4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{mN}$
Thermische Stabilität	500-700 $^\circ\text{C}$



#### Dotierte CrVN-Schicht

##### Schichteigenschaften CrVN

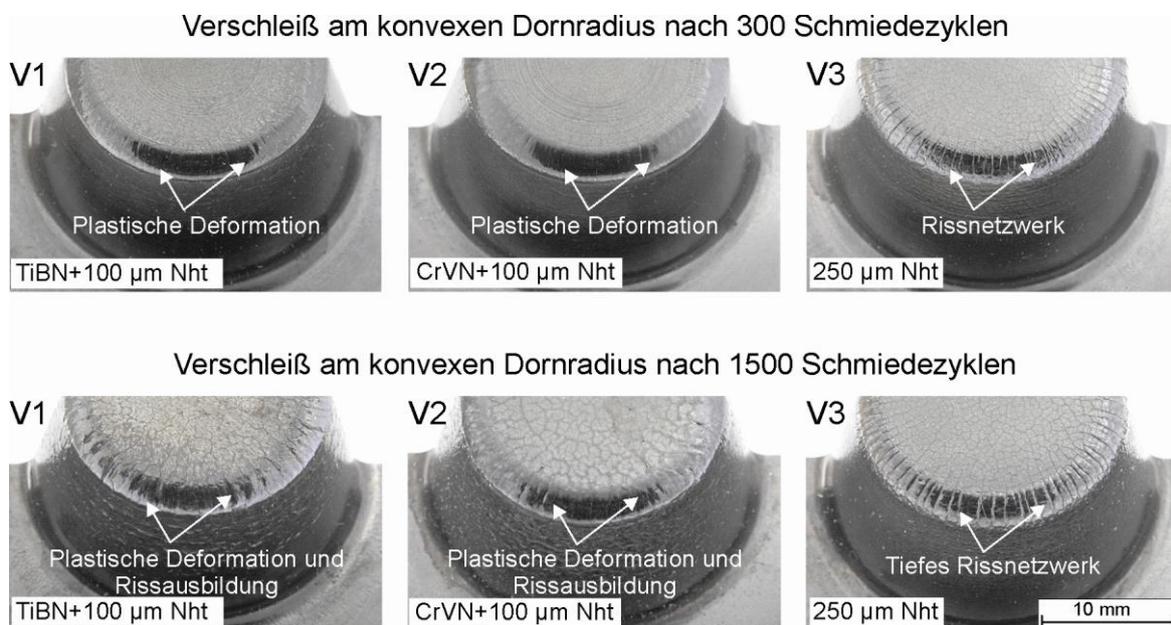
Schichtdicke	4-5 $\mu\text{m}$
Rockwellhaftklasse	HF1
Kritische Last $L_{c_2}$	40-65 N
Mikrohärte	1600-2500 $\text{HV}_{0,005}$
Verschleißrate	$5-11 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{mN}$
Thermische Stabilität	600-800 $^\circ\text{C}$



**Abbildung 5:** Schichteigenschaften CrVN und TiBN

Die Beschichtungen wurden anschließend auf Modellschmiedegesenken abgeschieden. Um eine ausreichende Stützwirkung für die im Vergleich zum Grundgefüge sehr harten Beschichtungen zu gewährleisten, wurden die Werkzeuge vor der Beschichtung nitriert. Die Nitrierhärte (Nht) betrug 100 µm. Als zusätzliche Referenz wurden nur nitrierte Werkzeuge mit einer Nht von 250 µm verwendet. Als Werkzeugwerkstoff wurde der 1.2344 (X40CrMoV5, vergütet auf 50 HRC) und als Schmiedestahl der 1.7225 (42CrMoV4) eingesetzt.

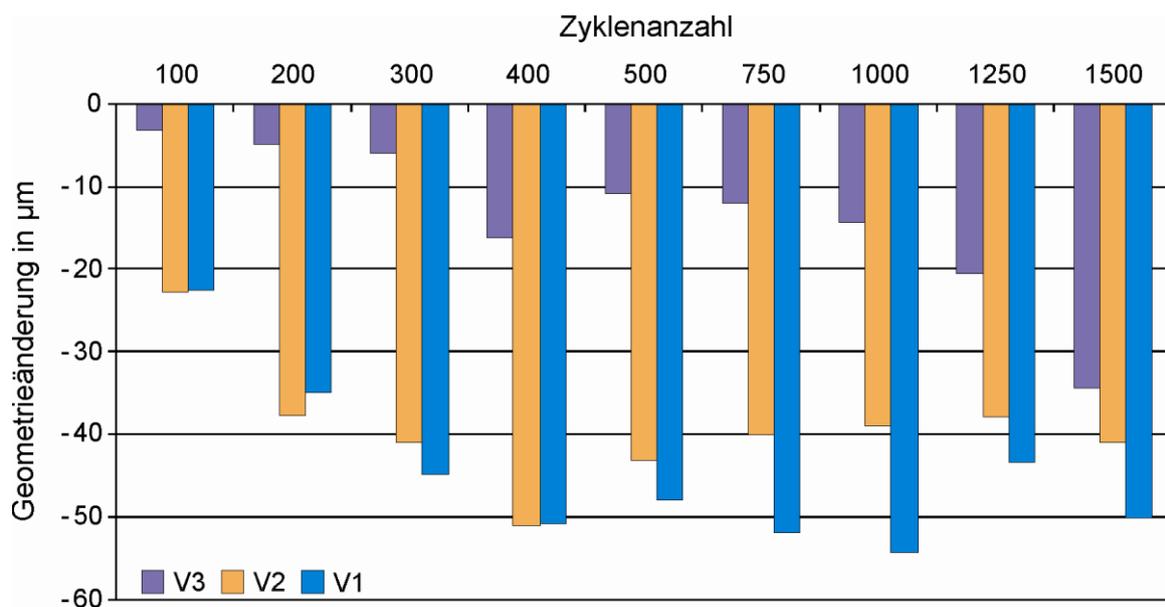
Die Werkzeuge wurden in einem industrienahen Serienschmiedeversuch eingesetzt und auf ihre Verschleißigenschaften hin untersucht. Die Versuche wurden am IFUM auf einer vollautomatisierten 3150 kN Exzenterpresse vom Typ Sp30a der Firma Eumuco durchgeführt. Die Taktzeit betrug 7 Sekunden und die Rohteile wurden auf eine Temperatur von 1200 °C erwärmt. Die Werkzeuge wurden nach definierten Messintervallen ausgebaut und hinsichtlich ihres Verschleißes untersucht. Dazu wurden eine optische Begutachtung der Werkzeuge und zusätzliche taktile Konturvermessungen durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind Fotos der verschleißkritischen konvexen Dornradien nach 300 und 1500 Schmiedezyklen dargestellt.



**Abbildung 6:** Verschleiß am konvexen Dornradius nach 300 und 1500 Schmiedezyklen

Anhand der Darstellungen kann ein in Abhängigkeit von der Werkzeugbehandlung deutlich unterschiedliches Verschleißverhalten identifiziert werden. Bereits nach 300

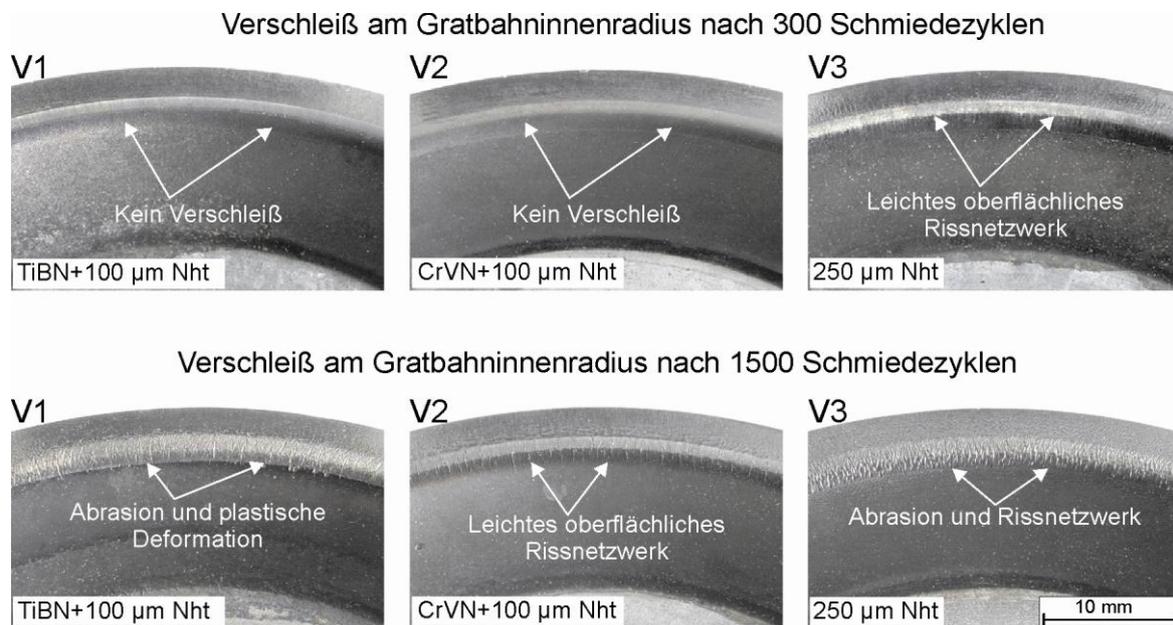
Schmiedezyklen ist bei den Varianten 1 und 2 ein stark eingeebener Dornradius zu erkennen. Die sehr glatte Oberfläche am Radius deutet auf eine plastische Deformation des Radius hin. Bei der rein nitrierten Variante 3 (Nht 250  $\mu\text{m}$ ) ist hingegen ein breites Netzwerk aus radial angeordneten Rissen vorhanden. Die Geometrie des Radius scheint im Vergleich zu den beschichteten Varianten 1 und 2 deutlich weniger verformt. Nach 1500 Schmiedezyklen wird dieses Verschleißmuster weiter verstärkt. Im Falle der borhaltigen Mehrlagenbeschichtung (V1) kommen zusätzlich Materialverschiebungen auf der Dornflanke hinzu. Oberflächliche Rissnetzwerke auf dem Dorn treten bei allen untersuchten Varianten auf, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich des Abstandes und der Tiefe der Risse. Zur quantitativen Ermittlung des Materialabtrages wurden taktile Konturvermessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung in Abhängigkeit der Schmiedezyklenzahlen dargestellt.



**Abbildung 7:** Materialabtrag am konvexen Dornradius

Die Messungen bestätigen den zuvor optisch erfassten Eindruck. Während der ersten 1000 Schmiedezyklen sind im Vergleich der Varianten weniger Materialabträge bei der intensiver nitrierten Variante (V3) mit der Nht von 250  $\mu\text{m}$  zu erkennen. Die schwächer nitrierten und beschichteten Werkzeuge V1 und V2 verschleifen bereits nach 100 Schmiedezyklen deutlich stärker. Auch die Verschleißzunahme im betrachteten Messbereich ist bei V2 und V3 deutlich

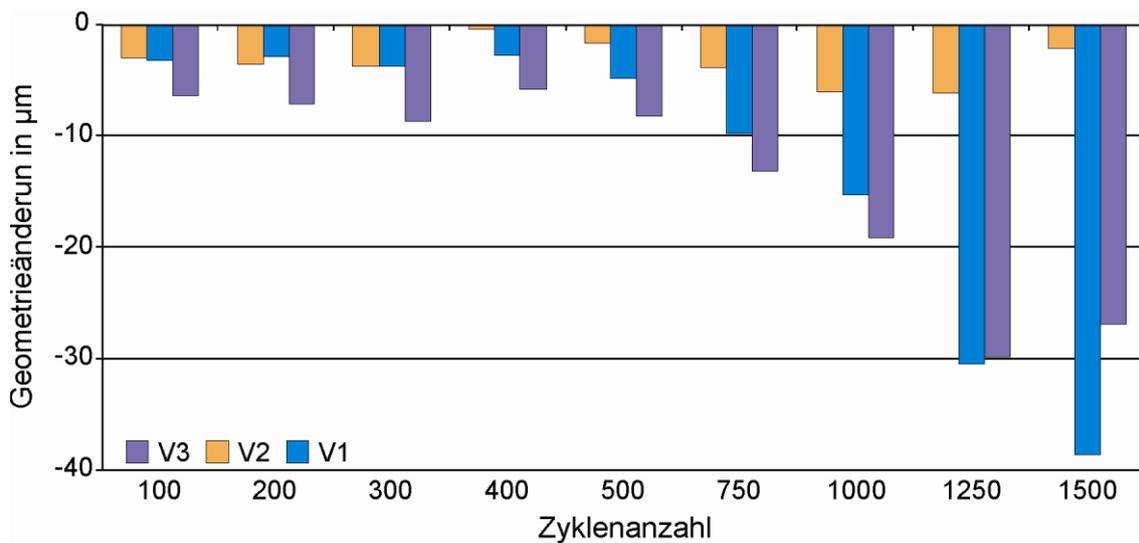
ausgeprägter. In Abbildung 8 sind Fotos und gemessene Materialabträge nach 300 und 1500 Schmiedezyklen an den Gratbahninnenradien dargestellt.



**Abbildung 8:** Verschleiß am Gratbahninnenradius nach 300 und 1500 Schmiedezyklen

Anhand der Fotos ist bereits ein deutlicher Unterschied im Vergleich zum Verschleiß am Dornradius zu erkennen. Nach 300 Schmiedezyklen ist an den Radien der beschichteten Varianten V1 und V2 kein Verschleiß vorhanden. Bei der tiefer nitrierten Variante V3 hingegen hat sich bereits ein oberflächliches Rissnetzwerk ausgebildet. Nach 1500 Zyklen ist der Gratbahninnenradius der mit TiBN beschichteten Variante deutlich durch Materialabrasion und plastische Deformation beschädigt. Bei der mit CrVN beschichteten Variante ist hingegen nur ein leichtes oberflächliches Rissnetzwerk vorhanden. Bei V3 sind ein verstärktes Rissnetzwerk und eine beginnende Materialabrasion deutlich zu erkennen.

In Abbildung 9 sind die taktil erfassten Materialabträge dargestellt. Es zeigt sich ein im Vergleich zum Verschleißzustand am konvexen Dornradius ein stark unterschiedliches Verhalten. Während der ersten 100 Schmiedezyklen verschleißt die Variante V3 mit der stärkeren Nitrierung deutlich stärker als die beschichteten Varianten. Im Vergleich der beschichteten Varianten kommt es ab ca. 750 Zyklen zu einer starken Zunahme des abrasiven Verschleißes der mit TiBN beschichteten Variante. Die Variante V2 mit der CrVN Beschichtung zeigt hingegen kaum Verschleiß, was mit der optischen Auswertung übereinstimmt.



**Abbildung 9:** Materialabtrag am Gratbahninnenradius

### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der dargestellten Ergebnisse wurden in Serienschmiedeversuchen unterschiedlich behandelte Werkzeuge auf ihr Verschleißverhalten hin untersucht. Dazu wurden optische Begutachtungen und Verschleißmessungen durchgeführt.

Es konnte ein in Abhängigkeit von der Werkzeugbehandlung und dem betrachteten Werkzeugbereich stark unterschiedliches Verschleißverhalten nachgewiesen werden. Am hoch belasteten konvexen Dornradius konnte eine deutliche Verschleißreduzierung durch eine intensive Nitrierung (Nht: 250 µm) erreicht werden. Beide untersuchte Beschichtungen haben in diesem Bereich keinen Effekt auf den Verschleiß. Im Bereich des Gratbahninnenradius konnte der Verschleiß hingegen durch die Beschichtungen deutlich reduziert werden, während bei der Variante mit der intensiven Nitrierung und hohen Nitrierhärte tiefe ein starker Verschleiß vorhanden war. Im Vergleich der Beschichtungen hat die CrVN Beschichtung dort zu deutlich besseren Ergebnissen geführt.

In weiterführenden Untersuchungen werden die Gesenke analytischen Verfahren unterzogen, um die Mechanismen zur Verschleißentstehung zu identifizieren. Weiterhin werden numerische Belastungsanalysen durchgeführt, um das lokal abweichende Verschleißverhalten der unterschiedlichen Behandlungsstrategien mit definierten Belastungen zu korrelieren.

## Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts IGF 16205N „Entwicklung chrom- und borbasierter Verschleißschutzschichten für die Warmmassivumformung – Einfluss des Schichtdesigns auf die Werkzeugstandmengen“.

## Literatur:

- /Bar05/ Barnert, L.: Verschleißminderung bei Werkzeugen der Warmmassivumformung durch Verwendung von keramischen Gesenkeinsätzen Berichte aus dem IFUM, Nr. 2005/7, PZH GmbH, Garbsen, 2005
- /Beh04/ Behrens, B.-A.; Barnert, L.; Hallfeldt, T.: Use of ceramic inserts for reduction of wear in forging tools Metal Forming 2004, 10th International Conference, 19 – 22 September 2004
- /Beh06/ Qualitätskontrolle von Gesenkschmiermitteln mit dem Benetzungstest nach Loebnitz, Schmiede Journal; Vol. 03, pp. 33-34, 2006
- /Beh05/ Behrens, B.-A.; Barnert, L.; Huskic, A.: Alternative techniques to reduce die wear – Hard coating or ceramic?; Production Engineering, Research and Development; 12-2. Pp. 131-136, 2005
- /Beh10/ Behrens, B.-A.; Bräuer, G.; Paschke, H.; Biströn, M.: Reduction of wear at hot forging dies by using coating systems containing boron, Production Engineering – Research and Development, 2008
- /Brü97/ Brüggemann, K.: Methoden des Qualitätsmanagement beim Gesenkschneiden, Dissertation, Universität Hannover, 1997
- /Cur09/ CURARE Computer aided laser surface treatment and combined nitriding of forging dies with the objective of a lifetime increase, EU-Förderprojekt 222317, 2009
- /Der06/ Derflinger, V. H., Schütze, A., Ante, M.: Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN-based hard coatings; Surface and Coating Technology; 200, S.4693-4700, 2006
- /Doe10/ Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer Verlag, 2010
- /Gul06/ Gulde, M.: Elektrostatisches Auftragen von pulverförmigen Schmierstoffen in der Warmmassivumformung und in daran angrenzenden Verfahren, Dissertation, Universität Hannover, 2006

- /Hab95/ Habig, K.-H.: Fundamentals of the tribological behaviour of diamond, diamond-like carbon and cubic boron nitride coatings. *Surface and Coatings Technology* 76-77, 540-547, 1995
- /He06/ He, Y.; Apachitei, I.; Zhou, J.; Walstock, T.; Duszczyc, J.: Effect of prior plasma nitriding applied to a hot-work tool steel on the scratch-resistant properties of PACVD TiBN and TiCN coatings; *Surface and Coatings Technology* 201 pp. 2534-2539, 2006
- /Hus05/ Huskic, A.: Verschleißreduzierung an Schmiedegesenken durch Mehrlagenbeschichtungen und keramische Einsätze; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2005
- /IGF08/ Industrielle Gemeinschaftsforschung 14553 N: Kombination von Laserlegieren und Nitrieren zur Standzeiterhöhung hoch beanspruchter Warmarbeitswerkzeuge, Fraunhofer IPT Aachen, 2008
- /IMU11/ Industrieverband Massivumformung (IMU); Amtliche Produktionsstatistik für die Massivumformung; [www.metalfarm.de](http://www.metalfarm.de), 2011
- /Klü09/ Klümper-Westkamp, H.: Optimierung der Randschichtzusammensetzung durch Nitrieren von Werkzeugen der Warmmassivumformung zur Steigerung der Lebensdauer, Industrieverband Massivumformung, 2009
- /Les09/ Leskovsek, V.; Podgornik, B.; Jenko, M.: A PACVD duplex coating for hot-forging applications, *Wear* 266, pp. 453-460, Elsevier, 2009
- /Lie05/ Liedtke, D.: Merkblatt 447: Wärmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarburieren, Stahl-Informations-Zentrum, 2005
- /May11/ Mayerhofer, J.; Zinner, S.: Innovative Stähle für Schmiedewerkzeuge – vom Anforderungsprofil zur erfolgreichen Anwendung, Workshop Schmiedewerkzeuge – Technologien, Entwicklungen, Analysen; pp. 117-133, 2011
- /Pas11/ Paschke, H.; Stüber, M.; Ziebert, C.; Bistron, M.; Mayrhofer, P.H.: *Surface and Coatings Technology* 205, S24–S28, 2011
- /Pan20/ Panjan, P.; Urankar, I.; Navinsek, B.; Tercelj, M.; Turk, R.; Cekada, M.; Leskovsek, V.: Improvement of hot forging tools with duplex treatment; *Surface and Coating Technology*; 151 –152, S.505–509, 2002
- /Pfo00/ Pfohl, C.; Bulak, A.; Rie, K.T.: Development of titanium diboride coatings deposited by PACVD; *SurfCoatTech*; 131 S.141-146, 2000
- /Sto04/ Stoiber, M.; Perlot, S.; Mitterer, C.; Beschliesser, M.; Lugmair, C. and Kullmer, R.: PACVD TiN/Ti-B-N multilayers: from micro- to nano-scale; *Surface and Coatings Technology*, 177\_178: 348-354, 2004

- /Sub96/ Subramanian, C.; Stratford, K.N.; Wilks, T.P. and Ward, L.P.: ON THE DESIGN OF COATING SYSTEMS: METALLURGICAL AND OTHER CONSIDERATIONS ; MatProcTech; 56, S.385 – 397, 1996
- /Uch04/ Uchida, M.; Nihira, N.; Mitsuo, A.; Toyoda, K.; Kubota, K.; Aizawa, T.: Friction and wear properties of CrAlN and CrVN films deposited by cathodic arc ion plating method, Surface and Coatings Technology, 177-178: 627-630, 2004
- /Wäs89/ Wäsche, R.; Habig, K.-H.: Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung BAM Forschungsbericht 158, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1989
- /Web10/ Weber, M.; Kaestner, P.; Köster, K.; Thomsen, H.; Paschke, H.: Influence of different plasma nitriding treatments and coatings on the wear behaviour of forging tools for the production of automotive diesel injection parts. In: Society of Vacuum Coaters (SVC): Society of Vacuum Coaters : Technical Conference Proceedings 1991-2010. Albuquerque : Society of Vacuum Coaters, pp. 519 – 524, 2010

## Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Nach einer leitenden Tätigkeit bei der Salzgitter AG wurde er im Oktober 2003 als Leiter des IFUM an die Leibniz Universität Hannover berufen.

Dipl.-Ing. Timur Yilkiran studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2009 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM).

Dipl.-Ing Hanno Paschke studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Braunschweig. Seit 2001 ist er für das Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik am Standort Dortmund innerhalb der Fraunhofer-Projektgruppe am DOC® tätig.

Dipl.-Ing Martin Weber studierte Maschinenbau an der TU Braunschweig und ist seit 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST in Braunschweig. Er ist dort zuständig für die Beschichtung von Umformwerkzeugen.

Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Peter Dültgen hat in Bochum Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften studiert und dort im Bereich der Produktionssysteme promoviert. Nach der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter übernahm er im Jahr 2006 die Geschäftsführung der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. in Remscheid.

Dipl.-Ing. Helmut Brand studierte Maschinenbau in Bochum und ist seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. in Remscheid.