Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
(vormals Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke FPL e.V.)

Namen der Forschungsstellen

15191 BG
AiF-Vorhaben-Nr.

01.04.2007 – 31.09.2009
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.04.2007 – 30.09.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

AiF Otto von Guericke

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren

☐ Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema:

Angepasste Werkzeugbeschichtungen und Schmiermittel für das warme Umformen fester und hochfester Aluminiumlegierungen

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

☐ ist beigefügt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

Chemnitz, den 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 1

Braunschweig, den 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 2

Stuttgart, den 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 3

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
(vormals Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke FPL e.V.)

Namen der Forschungsstellen

15191 BG
AiF-Vorhaben-Nr.

01.04.2007 – 31.09.2009
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.04.2007 – 30.09.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren

☐ Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema:

Angepasste Werkzeugbeschichtungen und Schmiermittel für das warme Umformen fester und hochfester Aluminiumlegierungen

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

☐ ist beigefügt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

Chemnitz, den 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 1

Braunschweig, 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 2

Stuttgart, 15.02.2010
Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters 3

Dünne Schichten
AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

15191 BG
AiF-Antrags-Nr:

IGF-05/09
Aktenzeichen der MV

Schlussbericht für den Zeitraum: 01.04.2007 – 30.09.2009

1 Forschungsthema

Angepasste Werkzeugbeschichtungen und Schmiermittel für das warme Umformen fester und hochfester Aluminiumlegierungen

2 Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben 15191 BG der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. wurde im Programm zur Förderung der 'Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)' vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert.

3 Problemstellung und Forschungsziele zu Projektbeginn

3.1 Ausgangssituation

Der Trend zum Leichtbau spielt eine dominierende Rolle im Fahrzeug- und Flugzeugbau, aber auch im allgemeinen Maschinenbau. In zahlreichen Publikationen wird die Notwendigkeit unterstrichen, das Gewicht von Fahrzeugen deutlich zu verringern, um den Kraftstoffverbrauch senken zu können. Ein Lösungsansatz zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts ist die Verwendung von Aluminiumwerkstoffen.

Aluminiumwerkstoffe eignen sich aufgrund des möglichen Gewichtsvorteils aber auch wegen des hervorragenden Energieaufnahmevermögens besonders für Anwendungen im Karosseriebau. Die Anwendung von Aluminiumlegierungen - speziell in Umformoperationen – stellt jedoch besondere Anforderungen an die Werkstück- und Werkzeugauslegung sowie die Prozessgestaltung. Das Umformverhalten von Aluminiumlegierungen unterscheidet sich aufgrund werkstoffspezifischer Besonderheiten erheblich von dem konventioneller Stahlwerkstoffe. Daraus resultiert eine besondere Problemstellung für die an der Prozesskette bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen beteiligten Unternehmen.

Den größten Anteil des Aluminiumeinsatzes in der Blechumformung für den Automobilbau nehmen zur Zeit Aluminiumlegierungen geringer und mittlerer Festigkeit ein, beispielsweise „naturharte“ bzw. „nicht aushärtbare“ 5xxxer Legierungen und „aushärtbare“ 6xxxer Legierungen. Sie verbinden das Potenzial des Leichtbauwerkstoffes mit guter Umformbarkeit, erreichen jedoch nicht die Festigkeiten von höherfesten Stahlwerkstoffen (vgl. Abb. 1).

Ein besonders großes Potenzial zur Realisierung von Leichtbaukonzepten bieten höher- und hochfeste Aluminiumlegierungen, z.B. 7xxxer Legierungen. Diese Legierungen weisen Zugfestigkeiten von 350 MPa bis 650 MPa (TITANAL© = AlZn7MgCuZr) auf, jedoch bei eingeschränkter Umformbarkeit. Temperierte Umformprozesse können hier Verbesserungen bringen. Für einen effektiven Einsatz der genannten Aluminiumlegierungen sind optimierte Fertigungstechnologien und die Berücksichtigung werkstoffspezifischer Eigenheiten erforderlich.

Anwendungsbereiche für hochfeste Aluminiumwerkstoffe finden sich neben dem Automobilbau vor allem im Flugzeugbau aber auch im Freizeit- und Sportgerätebau, wie z.B. beim Ski- und Skibindungsbau oder Inline-Skater-Bau sowie in der Fahrradfertigung. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit prozesssicherer wirtschaftlicher Umformtechnologien überwiegen hierbei allerdings noch die Gussanwendungen gegenüber den Blechbauteilen.

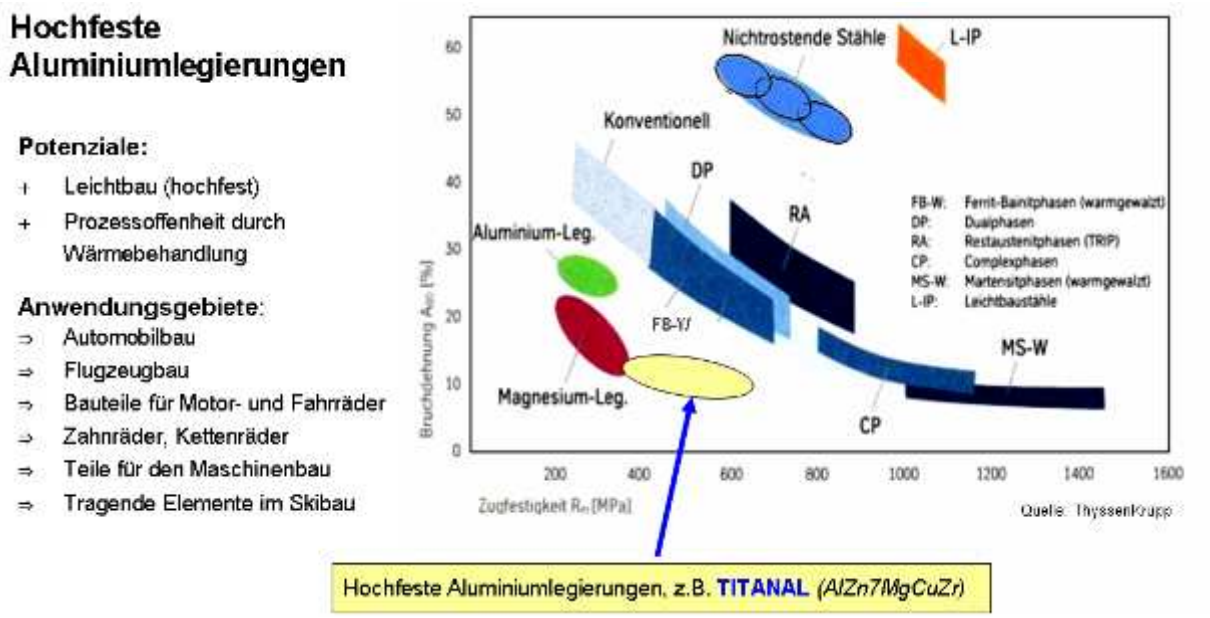


Abb. 1: Eigenschaften, Potenziale, Anwendungsgebiete hochfester Aluminiumlegierungen

3.2 Problemstellung

Die Umformung und Schneiden von Aluminiumwerkstoffen - selbst niedriger Festigkeit - ist mit besonderen Problemen behaftet. Insbesondere Adhäsionserscheinungen auf der Werkzeugoberfläche und Flitterbildung führen zu erheblichen Problemen. Häufig ist die Werkzeugoberfläche bereits nach kurzer Zeit so stark mit Aluminiumanhaftungen belegt, dass keine Umformung mehr möglich ist. Eine aufwändige Reinigung der Werkzeuge und Maschinenstillstandszeiten sind die Folge.

Bei der Verarbeitung hochfester Aluminiumlegierungen ergeben sich zusätzliche Problemstellungen. Davon betroffen sind nicht nur Unternehmen der Umformtechnik sondern auch Unternehmen der Werkzeugbeschichtungstechnik, der Schmierstoffherstellung und der Lackiertechnik.

Die wesentlichen Problembereiche sind nachfolgend zusammengefasst:

- Starke Adhäsionsneigung der Aluminiumwerkstoffe auf der Werkzeugoberfläche
- Zunehmende Flächenpressung bei der Umformung höherfester Werkstoffe
  → *verstärkte Adhäsionsneigung und zunehmender Werkzeugverschleiß*
- Das geringe Umformvermögen hochfester Aluminiumlegierungen macht häufig eine temperierte Umformung (> 200°C) erforderlich. → *verstärkte Adhäsionsneigung*
- Häufig ist der Einsatz chlorhaltiger Schmierstoffe erforderlich.
- Ungünstige tribologische Eigenschaften konventioneller Werkzeugbeschichtungen (TiN, TiCN, ...) für die Aluminiumumformung → *unzureichender Schutz vor Adhäsion*
- Geringer Kenntnisstand über die Eigenschaften von Werkzeugbeschichtungen bei höheren Temperaturen und Drücken
- Geringer Kenntnisstand über Wechselwirkungen zwischen Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffen (Benetzungsverhalten, Ausbildung von Reaktionsschichten)
- Konventionelle Schmierstoffe für die Umformtechnik sind nur im Temperaturbereich bis ca. 180°C geeignet

- Korrosionsempfindlichkeit höherfester Aluminiumlegierungen
  → *Hohe Anforderungen an die Korrosionsschutzwirkung der Schmierstoffe, besonders, wenn die Beölung bereits im Walzwerk erfolgt*
- Die Vorschädigung der Bauteiloberfläche bei der Umformung erschwert eine nachfolgende Lackierung.

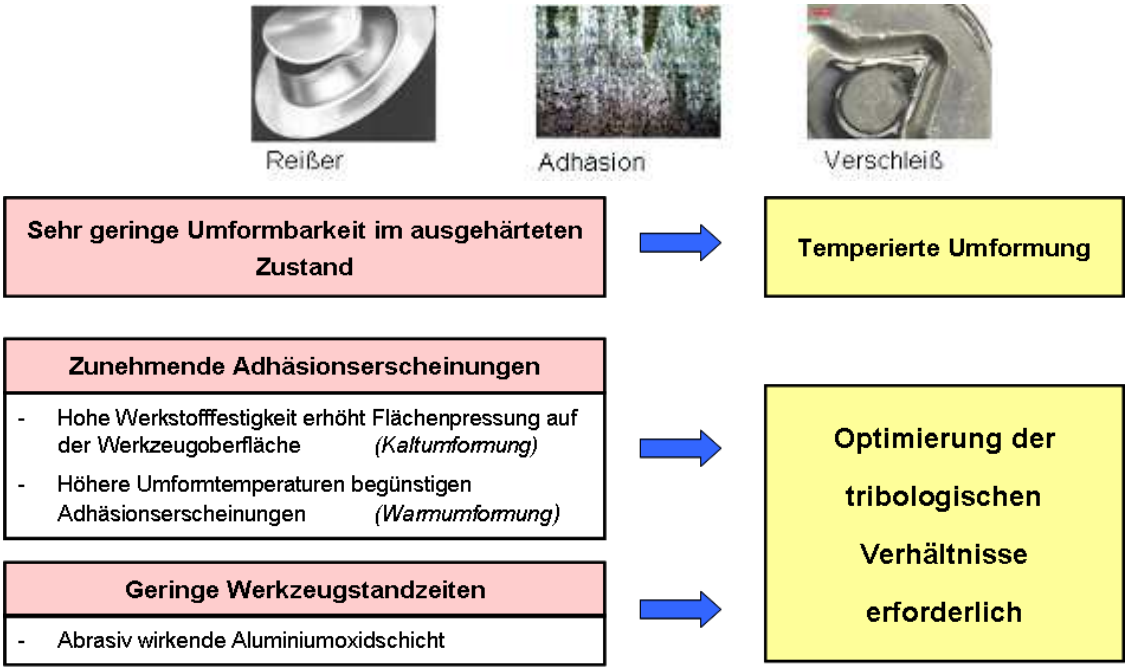


Abb. 2: Problemstellung bei der Umformung hochfester Aluminiumlegierungen.

3.3 Stand der Forschung

Es wurde schon länger versucht die bei der Umformung von Aluminiumlegierungen auftretenden Probleme durch geeignete Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffe zu lösen.

Während konventionelle titanbasierte Schichten wie TiN, TiCN und TiAlN mit Erfolg zur Vermeidung von adhäsivem und abrasivem Verschleiß bei der Stahlumformung verwendet werden, ist ihr Einsatz bei der Verarbeitung von Werkstoffen mit einer hohen Adhäsionsneigung, wie z.B. von Aluminiumlegierungen, nach wie vor unbefriedigend. Adhäsionserscheinungen und Flitterbildung können nicht ausreichend verhindert werden.

In einigen Fällen konnten Verbesserungen durch den Einsatz von CrN-Schichten erzielt werden. Bekannt sind Anwendungen zum Innenhochdruckumformen von Aluminiumlegierungen mit geringer Festigkeit. Problematisch sind aber auch in diesem Fall Adhäsionserscheinungen auf der Werkzeugoberfläche, die zur Riefenbildung auf den Bauteilen führen. Zusätzlich aufgebrachte Trockenschmierstoffschichten (z.B. MoS_2) können die tribologischen Bedingungen auf der Werkzeugoberfläche etwas verbessern.

Weitere Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass andere Schichtsysteme ein höheres Potenzial für die Umformung höherfester Aluminiumlegierungen aufweisen, besonders bei erhöhten Temperaturen. Insbesondere Kohlenstoffschichten haben sich bereits für die Verarbeitung von Aluminiumlegierungen niedriger Festigkeit bei Raumtemperatur bewährt. Daneben werden borbasierte Schichten auf Basis von B-C-N bzw. Ti-B-N-System mit Erfolg für den Aluminiumdruckguss und beim Strangpressen von Aluminium eingesetzt. Anwendungsversuche mit CrVN-Schichten beim Strangpressen von Aluminium verliefen ebenfalls erfolgreich.

Ein hohes Potenzial für die Verbesserung der tribologischen Bedingungen auf der Werkzeugoberfläche wird auch durch den Einsatz an die Werkzeugbeschichtungen angepasster

Schmierstoffe gesehen. Schmierstoffe, besonders die Schmierstoffadditive, werden hinsichtlich ihrer Wirkung in der Regel auf unbeschichtete Stahlwerkzeuge abgestimmt. Die chemischen Wirkmechanismen der oberflächenaktiven Additive auf metallischen Werkzeugoberflächen sind weitestgehend bekannt. Im Falle von Werkzeugbeschichtungen liegen chemisch betrachtet völlig andere Verhältnisse vor. Dadurch ist eine gezielte Auswahl von Schmierstoffen für bestimmte Beschichtungen bisher nicht möglich. Die Einsatzeigenschaften von Schmierstoffen können sich auf Werkzeugbeschichtungen erheblich von denen auf unbeschichteten Werkzeugstählen unterscheiden. Deshalb ist eine gemeinsame Betrachtung von Beschichtung und Schmierstoff unbedingt erforderlich.

3.4 Forschungsziele

Vorrangiges Ziel war es, eine wirtschaftliche Umformung höher- und hochfester Aluminiumlegierungen zu ermöglichen. Dazu sollten für die unter 3.2 näher erläuterten Problemstellungen Lösungen angeboten werden. Dies sollte durch die Entwicklung angepasster Werkzeugbeschichtungen und Schmiermitteln realisiert werden. Im Hinblick auf die Weiterbearbeitung der umformtechnisch hergestellten Bauteile sollte dabei auch deren spätere Lackierbarkeit berücksichtigt werden.

Wissenschaftlich-technische Ziele waren:

- eine wirtschaftliche Standmenge der Werkzeuge bei der warmen Umformung fester und hochfester Aluminiumwerkstoffe zu ermöglichen,
- die umformtechnischen Grenzen für diese Werkstoffe zu erweitern, d. h. das Spektrum der umformtechnisch herstellbaren Teile zu vergrößern,
- die Standmenge der Umformwerkzeuge im Vergleich zu konventionell beschichteten Werkzeugen um mindestens 25 % zu erhöhen,
- unzulässige Werkstoffanhaftungen auf den Werkzeugen bei der Verarbeitung von Werkstoffen mit hoher Adhäsionsneigung zu verhindern
- die Bauteilqualität zu erhöhen bzw. eine hohe Oberflächengüte und eine gute Einhaltung der Maßtoleranzen am Werkstück über einen längeren Zeitraum gewährleisten zu können,
- Korrosionserscheinungen an den Bauteilen zu vermeiden,
- den Schmierstoffeinsatz zu reduzieren und die Verwendung chlorhaltiger Schmierstoffe zu vermeiden,
- den Kenntnisstand über die tribologischen Verhältnisse und die Wechselwirkungen im System Werkzeugbeschichtung / Schmierstoff / höherfeste Aluminiumlegierungen zu erhöhen,
- Anwendungsempfehlungen für geeignete Kombinationen aus Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffen geben zu können,
- eine gute Lackierbarkeit der umformtechnisch hergestellten Bauteile zu gewährleisten.

Mit dem Erreichen der wissenschaftlich-technischen Ziele sollten folgende Effekte erzielt werden:

- Erschließung neuer Märkte für die Unternehmen der Umformtechnik, der Beschichtungs- und Schmierstofftechnik, die Hersteller von Aluminiumwerkstoffen sowie für die Unternehmen, die mit Bauteilen aus höherfesten Aluminiumlegierungen beliefert werden.
- Die angestrebten Standmengenerhöhungen und Verringerungen der Umrüst- und Einrichtaufwendungen besitzen bei Umformoperationen ein hohes Einsparpotenzial. Eine Produktivitätssteigerung von mindestens 5-10% wird erwartet.
- Die angestrebten Schmierstoffeinsparungen reduzieren den Aufwand für die Beschaffung und Entsorgung der Schmierstoffe sowie für die Reinigung der Bauteile.
- Der Know-how-Vorsprung bei der Umformung hochfester Aluminiumlegierungen trägt zur Sicherung von Arbeitsplätzen im Wirtschaftsstandort Deutschland bei.

4 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

4.1 Bearbeitete Arbeitspakete

Zur Erreichung des Forschungszieles wurden folgende Arbeitspakete (AP) bearbeitet:

- Charakterisierung des Umformprozesses und Verifikation der Untersuchungsparameter
- Charakterisierung und Vorauswahl geeigneter Beschichtungen
- Charakterisierung und Auswahl geeigneter Schmierstoffe für Al-Oberflächen
- Tribologische Modellversuche mit dem Streifenziehversuch (temperiert)
- Anpassung und Optimierung der Schichtsysteme und Schmierstoffe
- Beschichtung und Charakterisierung der Versuchswerkzeuge
- Umformtechnische Praxistests im Labormaßstab
- Untersuchung der Blechoberflächen im Hinblick auf die Lackierbarkeit
- Fertigung Weiterführende umformtechnische Praxistests

4.2 Charakterisierung des Umformprozesses und Verifikation der Untersuchungsparameter

Verantwortlich: Fraunhofer IWU

In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PbA) wurden praxisrelevante exemplarische Umformprozesse ausgewählt und einer eingehenden Charakterisierung unterzogen. Daraus wurden folgende Eckdaten für die tribologischen Modellversuche abgeleitet:

- Zu untersuchende Halbzeuge: (Bereitstellung durch Amag und Novelis)
  - Feinblech s_0= 1…2 mm: AA 2024 (unplattiert/plattiert)
AA 7020 (plattiert)
AA 7075 (unplattiert/plattiert)
AA 6016

- Zu untersuchende Werkzeugwerkstoffe:
  - 1.2379
  - sprühkompaktiertes Aluminium (Bereitstellung durch PEAK)

- Zu untersuchende Arten von Werkzeugbeschichtungen :
  - Kohlenstoffbasierte Schichten (DLC)
  - Borbasierte Schichten (TiN/TiBN, TiB_2)
  - Chrombasierte Schichten (CrN, CrVN,...)

- Zu untersuchende Schmierstoffe: (Bereitstellung durch Fa. Zeller Gmelin)
  - Drylube E1
  - Drylube E1-plus
  - Drylube C1
  - KTLN-20

- Weitere Prozessparameter
  - Werkzeugradien: 5 mm
  - Umformtemperaturen: 20, 150, 200, 250°C
  - Temperaturführung: Erwärmung / 1 min Verharrung / Umformung
  - Umformgeschwindigkeiten: konstant
  - Flächenpressung: 2 / 5 und 20 N/mm^2

Technische Informationen zu den Schmierstoffen (laut Herstellerangaben)

- Drylube E1 ist ein Coilbeschichtungsmittel auf Mineralölbasis für Stahl, verzinkten oder vorphosphatierten Stahl, Aluminium und Edelstahl. Der „halbtrockene“ (semi-dry) Film soll durch seine gute Flexibilität und Gleiteigenschaften hohe Umformgrade ermöglichen. Der Schmierstoff soll sehr gute Korrosionsschutzeigenschaften und eine hohe Alterungsbeständigkeit aufweisen. Zum Auftragen muss Drylube E1 auf 70°C vorgewärmt werden.
- Drylube E1-plus befindet sich noch in der Entwicklungsphase und ist eine Weiterentwicklung des Drylube E1
  Multidraw Drylube C1 ist ein wasserlösliches, mineralölfreies Coilbeschichtungsmittel für Aluminium und Edelstahl. Das Produkt wird in der Regel pur aufgetragen. Es hinterlässt nach dem Antrocknen einen hellen, grifffesten Film auf der Metalloberfläche. Der „halbtrockene“ (semi-dry) Film soll durch seine gute Flexibilität und Gleiteigenschaften hohe Umformgrade ermöglichen. Der Einsatz soll bei hohen Temperaturen möglich sein.
- KTLN-20 ist ein mineralölhaltiges Zieh- und Stanzöl mit phosphor- und schwefelhaltigen Additiven. Es ist für die Umformung von Aluminium, Stahl und verzinkten Blechen bei mittleren bis schweren Umformgraden ausgelegt. Eine gute Verträglichkeit mit unterschiedlichen Lackiersystemen der kathodischen Tauchlackierung soll gegeben sein. Alle gängigen Applikationsgeräte wie Walz- und Sprüheinrichtungen sollen eingesetzt werden können.

4.3 Charakterisierung und Vorauswahl geeigneter Beschichtungen

Verantwortlich: Fraunhofer IST

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, geeignete Schichtsysteme für die nachfolgenden Modellversuche zu identifizieren. Auf Basis des Standes der Technik und einer Literaturrecherche erfolgte eine Vorauswahl der zu untersuchenden Beschichtungen. Kriterium war eine erfolgreiche Anwendung bei der Kaltumformung oder beim Schneiden/Stanzen von Aluminiumblech sowie bei Warmformoperationen, wie z.B. dem Strangpressen oder dem Druckguss von Aluminium. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Eigenschaften der ausgewählten Schichtsysteme im Vergleich zu titanbasierten Schichten (TiN, TiCN, TiAlN) und CrN, den bei der Stahlumformung dominierenden Werkzeugbeschichtungen.

Tabelle 1: Eignung verschiedener Werkzeugbeschichtungen für die Aluminiumumformung

	Anwendung	Verschleiß-schutz	Adhäsions-neigung	Reibwert	Belastbarkeit
Beschichtungen					
TiN, TiCN, TiAlN	ungeeignet	+	-	-	+
CrN	Stanzen, Umformen, Druckguss	O	O	-	+
a-C:H:Me	Stanzen, Umformen	O	+	+	O / (+)**
a-C:H	Umformen	+	++	+	- / (O)**
a-C:H:Si	vereinzelt im Versuchsstadium	O	++	++	- / (O)**
TiBN, TiB_2	Druckguss, Strangpressen im Versuchstadium	O	O / +*	O	+
CrVN	Strangpressen im Versuchstadium	O	O / +*	- / (+)*	+
		* bei höheren Temperaturen		** bei Mehrschichtsystemen, Duplex-Prozessen	

Wie in Kapitel 3.3 bereits dargestellt, werden amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H, a-C:H:Me) bereits mit Erfolg bei der kalten Umformung von Aluminium geringer Festigkeit eingesetzt. Insbesondere die geringe Adhäsionsneigung und der geringe Reibwert gegenüber Aluminium zeichnen sie gegenüber anderen Werkzeugbeschichtungen aus. Weitgehend unbekannt war bisher, ob sie diese Eigenschaften auch bei Temperaturen bis 350°C beibehalten und sie eine ausreichende Belastbarkeit für die Umformung höherfester Legierungen aufweisen. Von Anwendungsversuchen bei der Umformung von Stahlwerkstoffen ist bekannt, dass Kohlenstoffschichten sehr empfindlich auf lokale Überlastungen reagieren. Bereits bei einmaliger Überlastung können Risse entstehen, die die Belastbarkeit deutlich herabsetzen. Schichtausbrüche sind die Folge. Um diesem Problem entgegenzuwirken, werden a-C:H und a-C:H:Me Schichten mit Zwischenschichten (Mehrschichtsysteme) oder einer Plasmanitrierbehandlung des Grundwerkstoffes (Duplex-Prozesse) kombiniert. Ziel ist es, die Abstützung der Beschichtung zu verbessern (Vermeidung des „Eierschaleneffektes“) und ggf. auftretende Risse aufzuhalten. Da eine hohe mechanische Belastung der Werkzeuge auch bei der temperierten Umformung hochfester Aluminiumlegierungen nicht ausgeschlossen werden kann, wurden zwei Varianten amorpher Kohlenstoffschichten mit Zwischenschichten (Bezeichnung: CrN + a-C:H und CrN + a-C:H:W) und eine Variante mit vorheriger Plasmanitrierung des Grundwerkstoffes (Bezeichnung: PN + a-C:H) für die Versuche ausgewählt. Als Referenz für den Erfolg der Maßnahmen zur Steigerung der Belastbarkeit dient eine a-C:H Beschichtung mit metallischer Haftschicht (Bezeichnung: a-C:H)

Die Schichtvarianten TiBN/TiB_2 und CrVN wurden - trotz des bei Raumtemperatur vergleichsweise hohen Reibwertes gegenüber Aluminium - ebenfalls in die weiteren Untersuchungen einbezogen. Mit ihnen konnten gute Ergebnisse beim Strangpressen von Aluminium und beim Aluminiumdruckguss erzielt werden konnten. Aus der Literatur ist bekannt, dass es bei Temperaturen von ca. 550°C zur Ausscheidung von Vanadiumoxid (V_2O_5) kommt, das zur Reibungsminderung führt. Sie stellen eine Alternative dar, falls die Kohlenstoffschichten keine ausreichende thermische Beständigkeit aufweisen oder ihre mechanische Belastbarkeit ungenügend ist. Die mit einem PACVD-Verfahren aufgebrachte borhaltige Beschichtung wurde ebenfalls mit einer vorherigen Plasmanitrierung kombiniert, um eine gute Abstützung und Haftung gewährleisten zu können.

Zunächst wurden die ausgewählten Schichtvarianten auf polierte Stahlsubstrate aus 1.3505 (100Cr6, 61 HRC), 1.2379 (60 HRC) und 1.3343 (61 HRC) aufgebracht und bei Raumtemperatur hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht.

Folgende Prüfverfahren sind dabei zur Anwendung gekommen:

- Haftfestigkeitsuntersuchungen mit dem Rockwell-Test nach VDI-Richtlinie 3198
- Ritztest (Scratch-Test) nach DIN VENV 1071 Teil 3
- Ritztests in modifizierter Form (Multi-pass Scratch-Test) zur Simulation des Verschleißverhaltens und der Überlastsicherheit
- Härtemessung nach DIN 50359-1
- Verschleißmessung mit dem Kalottenschliffverfahren
- Schichtdickenbestimmung
- Reibwertermittlung (Ball-on-disk Test)

Die Ergebnisse der Schichtcharakterisierung sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Einfluss des Grundwerkstoffes auf die Schichteigenschaften war bei den Varianten ohne Plasmanitrierung gering. Die Unterschiede lagen innerhalb der bei PACVD und PVD Prozessen üblichen Schwankungen. Bei den Varianten mit Plasmanitrierung traten Verfahrensbedingt Temperaturen bis 520°C auf. Beim Werkstoff 1.3505 liegt diese oberhalb der Anlasstemperatur, weshalb es zu einem signifikanten Härteverlust kommt. Bei diesen Schichtvarianten erfolgte die Schichtcharakterisierung deshalb nur auf den Werkstoffen 1.2379 und 1.3343. Bei einer vergleichbaren Nitrierhärtetiefe von ca. 50 µm war der Einfluss auf die Schichteigenschaften gering.

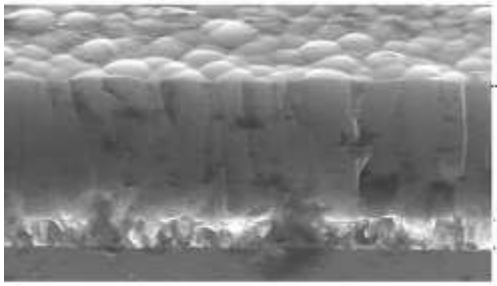
Tabelle 2: Ausgewählte Schichtsysteme, Ergebnis der Schichtcharakterisierung auf Referenzproben

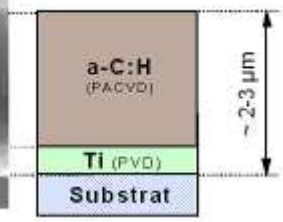
a-C:H — **Verfahren: (PVD) + PACVD**

+ Hohe Härte, niedriger Verschleiß
+ Niedriger Reibungskoeffizient
+ Sehr geringe Adhäsionsneigung gegen Al

Schichteigenschaften*		
Schichtdicke	[µm]	2-3
Rockwell Haftung	[HF]	1
Kritische Last Lc_2	[N]	24 – 28
Härte	[$HV_{0.05}$]	2600 – 2800
Verschleiß (Calotest)	[$10^{-15}m^3/mN$]	0.5 - 1
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0.15 – 0.21

* auf Flachprobe aus 100Cr6, 61 HRC



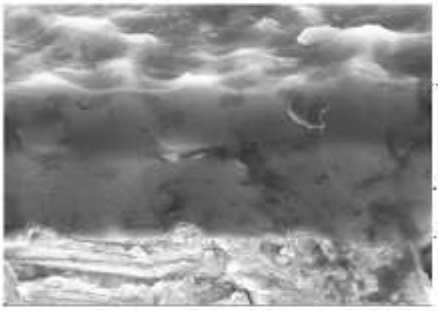


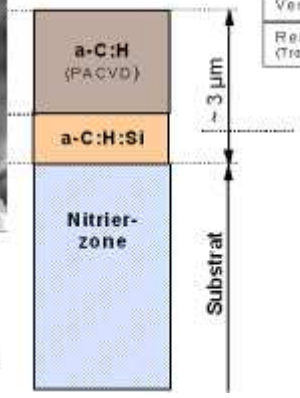
Problem:
- geringe Überlastsicherheit

PN+a-C:H — **Verfahren: Plasmanitrierung + PACVD**

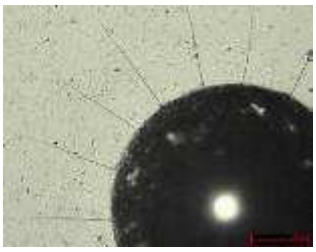
Schichteigenschaften*		
Schichtdicke	[µm]	2-3
Rockwell Haftung	[HF]	1
Kritische Last Lc_2	[N]	52 - 56
Härte	[$HV_{0.05}$]	2400 - 2600
Verschleiß (Calotest)	[$10^{-15}m^3/mN$]	0.7 - 0.9
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0.18 - 0.22

* auf Flachprobe aus 1.2379, 60 HRC





+ Wie a-C:H
+ Hohe kritische Last
– erhöhte Rauheit
(ggf. Politur nach der Plasmanitrierung erforderlich)

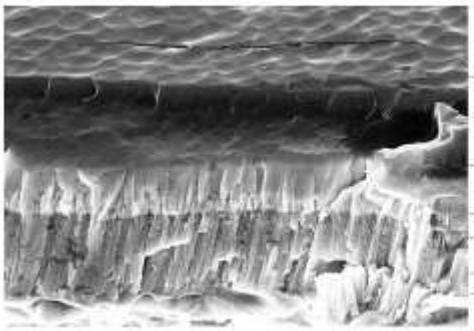


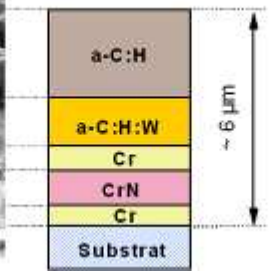
CrN+a-C:H — **Verfahren: PVD**

+ Wie a-C:H
+ Hohe kritische Last

Schichteigenschaften*		
Schichtdicke	[µm]	5-6,5
Rockwell Haftung	[HF]	1 - 2
Kritische Last Lc_2	[N]	47 – 56
Härte	[$HV_{0.05}$]	2400 - 2800
Verschleiß (Calotest)	[$10^{-15}m^3/mN$]	0.6 - 0.85
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0.14 - 0.22

* auf Flachprobe aus 100Cr6, 61 HRC





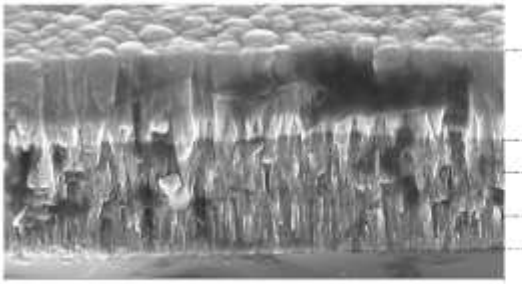
CrN+a-C:H:W

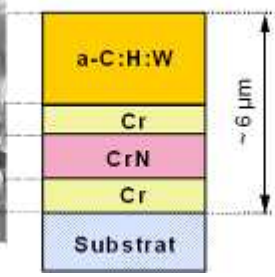
Verfahren: PVD

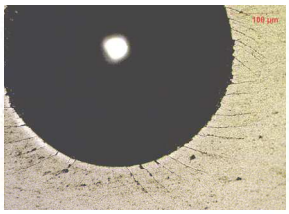
+ Sehr hohe kritische Last
- geringe Härte
- leicht erhöhter Reibungskoeffizient (im Vergleich zu a-C:H)

Schichteigenschaften*		
Schichtdicke	[µm]	5-6,5
Rockwell Haftung	[HF]	1
Kritische Last Lc_2	[N]	78 – 95
Härte	[$HV_{0,05}$]	1300 - 1500
Verschleiß (Calotest)	[$10^{-15}m^3/mN$]	2 - 5
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0.21 – 0.27

* auf Flachprobe aus 100Cr6, 61 HRC







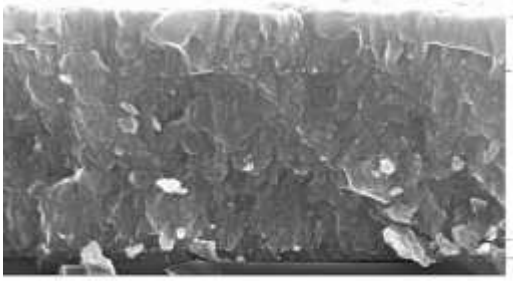
PN+TiB_2/TiBN

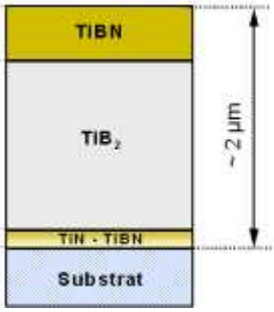
Verfahren: Plasmanitrierung + PACVD

+ Sehr hohe Härte
– hoher Reibwert bei RT
– deutliche Al-Anhaftungen bei RT

Schichteigenschaften		
Schichtdicke	[µm]	2 - 3
Rockwell Haftung	[HF]	1
Kritische Last Lc_2	[N]	25 – 54*
Härte	[$HV_{0,05}$]	3200 - 4100
Verschleiß	[$10^{-15}m^3/mN$]	5
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0,8 – 1,0

* Abhängig von Nitrierbehandlung





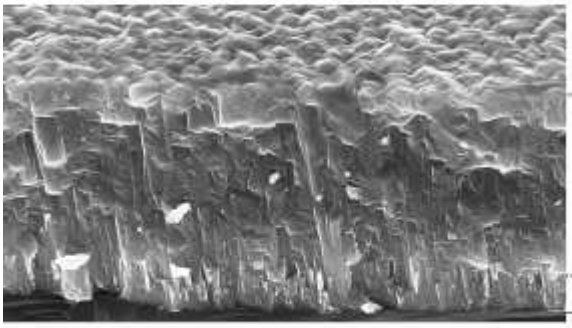
CrVN

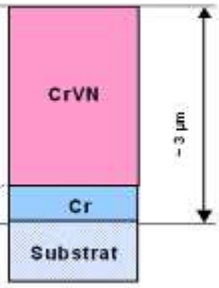
Verfahren: PVD

– hoher Reibwert bei RT
– deutliche Al-Anhaftungen bei RT

Schichteigenschaften*		
Schichtdicke	[µm]	3 - 5
Rockwell Haftung	[HF]	1
Kritische Last Lc_2	[N]	38 - 42
Härte	[$HV_{0,05}$]	2200 - 2400
Verschleiß	[$10^{-15}m^3/mN$]	5 - 7
Reibungskoeffizient (Trocken vs. Al)		0,95 – 1,1

* auf Flachprobe aus 100Cr6, 61 HRC, bei 27 at.% V





Wie die Ergebnisse zeigen, lässt sich die Belastbarkeit der Kohlenstoffschichten durch die verwendeten Zwischenschichten aus Cr und CrN deutlich steigern. Dies spiegelt sich in den signifikant erhöhten kritischen Lasten (Lc_2) wider, bei denen es zu ersten Ausbrüchen der Beschichtung kommt. Die sonstigen Schichteigenschaften bleiben dabei weitgehend erhalten. Im Fall der CrN + a-C:H Beschichtung wurde eine zusätzliche wolframdotierte a-C:H Zwischenschicht (a-C:H:W) verwendet, die für eine verbesserte Anbindung der Deckschicht sorgt. Besonders hohe kritische Lasten konnten mit a-C:H:W Deckschichten erzielt werden. Die Wolframdotierung führt zu einem stängelförmigen Schichtwachstum. Entstehende Risse scheinen sich bevorzugt entlang der Stängel auszubreiten und werden in der duktilen CrN Zwischenschicht aufgefangen. Eine Rissausbreitung parallel zur Oberfläche, die zur Schichtablösung führt, wird verhindert. Die Wolframdotierung senkt jedoch die Härte und Verschleißbeständigkeit der a-C:H Schicht und führt zu einer leichten Erhöhung des Reibwertes gegenüber Aluminium. Dieser liegt mit 0,21 – 0,27 aber immer noch deutlich unter dem der TiB_2/TiBN bzw. der CrVN Beschichtung. Zum Vergleich: Der Reibwert von TiN und CrN unter vergleichbaren Bedingungen liegt bei 0,8 – 1,0.

Ähnlich positive Auswirkungen auf die Schichthaftung konnten sowohl bei der untersuchten Kohlenstoffschicht als auch bei der borhaltigen Beschichtung durch die Verfahrenskombination aus Plasmanitrierung und PACVD Beschichtung erzielt werden. In Abhängigkeit von den verwendeten Nitrierparametern konnte die kritische Last verdoppelt werden.

Als Folge der Nitrierbehandlung kommt es zu einer leichten Aufrauung der Oberfläche. Die durchschnittliche Rauheit erhöhte sich von Ra ≅ 0,02 / Rz ≅ 0,1 auf Ra ≅ 0,04 / Rz ≅ 0,3. Sie wird von der nachfolgenden Beschichtung abgebildet und schlägt sich im Fall der a-C:H Beschichtung in einem leicht erhöhten Reibwert nieder (vergl. Tabelle 2 und Abb. Zz links).

Da reale Umformwerkzeuge selten ideal polierte Oberflächen besitzen, wurde der Einfluss verschiedene Oberflächenvorbehandlungen auf die Schichteigenschaften in die Untersuchungen einbezogen. Dazu wurden polierte und mikrogestrahlte Proben aus 1.3343 (Abb. 3) mit fünf ausgewählten Schichtsystemen versehen und hinsichtlich der Schichthaftung (Rockwell-Test, Einfach-, Fünfach Scratch-Test) und des Reibwertes charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 und Abb. 4 zusammengefasst. Die durchschnittlichen Rauheitswerte der mikrogestrahlten Proben entsprechen mit Ra = 0,26 / Rz = 1,8 ungefähr denen, die durch Schleifen mit Schleifpapier K320 erzielt werden können (quer zur Schleifrichtung).

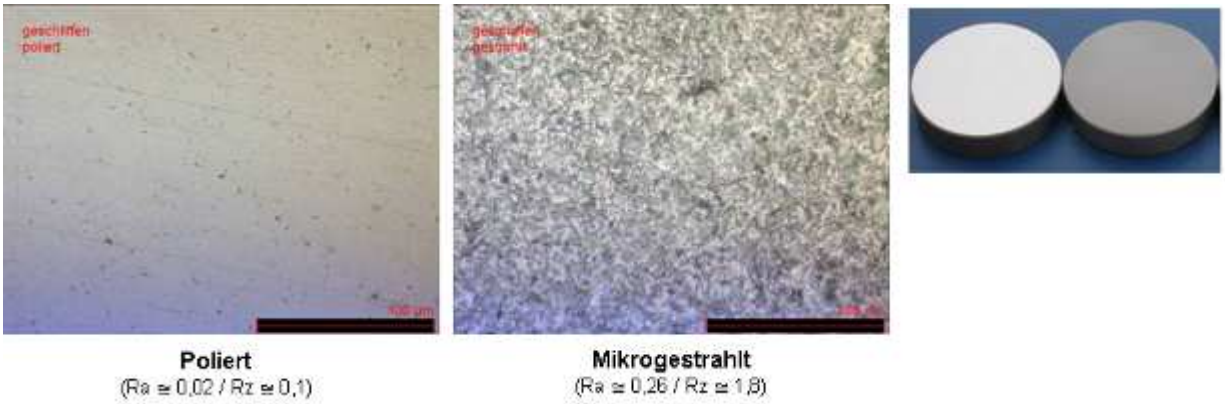


Abb. 3: Probenoberflächen vor der Beschichtung zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenvorbehandlung auf die Schichteigenschaften

Tabelle 3: Schichteigenschaften in Abhängigkeit von der Oberflächenvorbehandlung

Schicht	Oberflächen-vorbehandlung	Beschichtungs-prozess	Schicht-dicke d_s [µm]	Haft-festigkeit HF	Scratch-Test Einfach-Scratch Lc_2 [N]	Scratch-Test Fünffach-Scratch Lc_2 [N]	Volumen-verschleiß [$10^{-15}m^3/mN$]	Reibwert trocken gegen Aluminium* $\mu_{Aluminium}$
PN + a-C:H	poliert	Plasmadiffusion + PACVD	3,7	1	49-70	38-40	0,6-0,7	0,18
	mikrogestrahlt		4,6	4	30-31**	12-16	nicht messbar	0,21
a-C:H	poliert	PVD + PACVD	3,2	1-3	21-25	20	0,2-0,3	0,14
	mikrogestrahlt		3,2	2	17-21	12-18	nicht messbar	0,20
CrN + a-C:H	poliert	PVD	7,7	1-2	48-50	35	0,3-0,4	0,14
	mikrogestrahlt		7,7	1-2	48-59**	21-24**	nicht messbar	0,24
CrN+a-C:H:W	poliert	PVD	4,2	1	> 80	>40	3,8-3,9	0,27
	mikrogestrahlt		3,9	1	60-65**	>40	nicht messbar	0,23
PN+ TiB_2/TiBN	poliert	Plasmadiffusion + PACVD	1,8	1-2	30-33	30-35	2,7	1,04
	mikrogestrahlt		2,4	1-2	44-50**	>40	nicht messbar	0,80

*Rundproben gegen Al-Kugel 7,68 mm, Reibzeit 1h; Normalkraft 1N

**Ergebnis nicht eindeutig (raue Oberfläche)

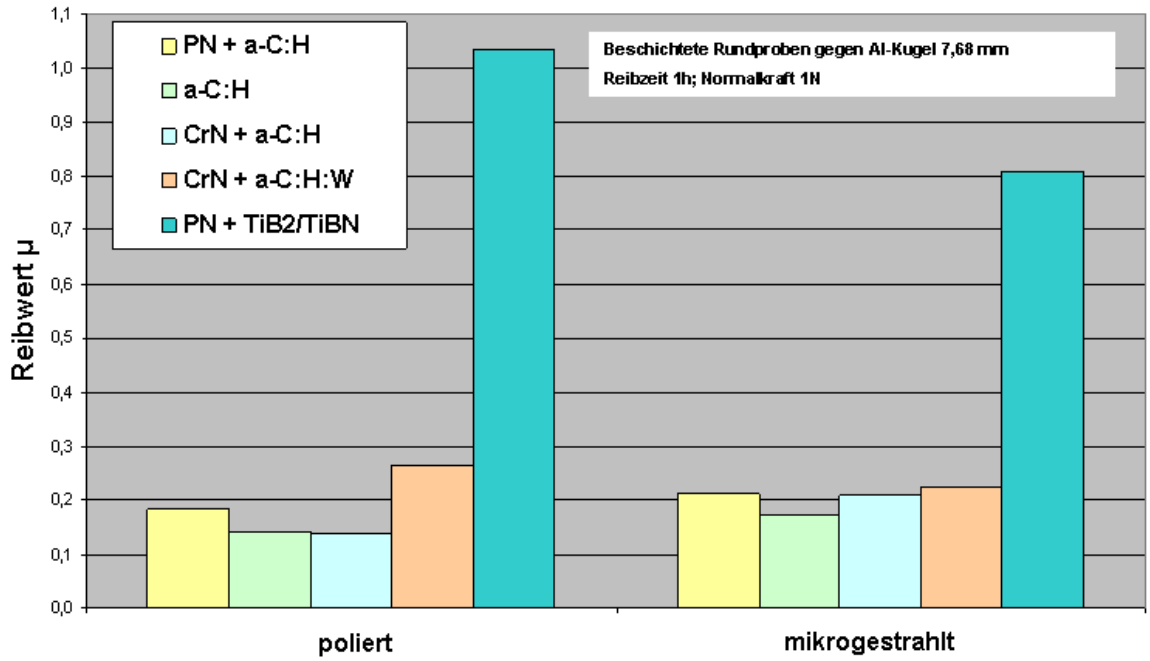


Abb. 4: Reibwert der untersuchten Schichtsysteme gegen Aluminium in Abhängigkeit von der Vorbehandlung der Substratoberflächen

Das Mikrostrahlen vor der Beschichtung schlägt sich bei den a:C:H Schichten in einem leicht erhöhten Reibwert nieder, bei den anderen Schichtvarianten kam es dagegen zu einer leichten Abnahme, am deutlichsten bei der borhaltigen Beschichtung. Eine mögliche Erklärung für die Reibwertabnahme ist die mit zunehmender Rauheit abnehmende Kontaktfläche, die sich besonders bei Reibpaarungen bemerkbar machen kann, die zum lokalen Verschweißen neigen.

Die Auswirkungen der Oberflächenvorbehandlung auf den Scratch-Test sind nicht eindeutig. Durch die erhöhte Rauheit der mikrogestrahlten Oberflächen sind Ausbrüche und Risse schwer zu erkennen und es kommt an Rauheitsspitzen zu lokalen Spannungsüberhöhungen, die zu Fehlinterpretationen führen können.

Um Änderungen der Schichteigenschaften als Folge einer thermischen Belastung abschätzen zu können, wurden Referenzproben jedes Schichtsystems einer 2-stündigen Wärmebehandlung bei Temperaturen von 300 bis 500°C unter Umgebungsluft unterzogen. Anschließend erfolgte eine lichtmikroskopische Auswertung der Schichtveränderungen und stichprobenartig eine erneute Schichtcharakterisierung mit dem Kalottenschliffverfahren. Nach einer 2-stündigen Wärmebehandlung oberhalb 400°C unter Umgebungsluft wiesen alle untersuchten Kohlenstoffschichten signifikante Veränderungen auf. Bei den metallfreien Kohlenstoffschichten (a-C:H, a-C:H:Si, a-C:H:Si:O) zeigten sich sowohl großflächige Schichtenthaftungen als auch lokale Schichtablösungen, die von Pinholes und Wachstumsstörungen in der Beschichtung auszugehen scheinen (Abb. 5). Die metallhaltigen Kohlenstoffschichten wiesen dieses Verhalten nicht auf, jedoch kam es zu einer signifikanten Abnahme der Verschleißbeständigkeit und in einigen Fällen zu einer verringerten Schichthaftung (Abb. 6). Es muss daher von einer maximalen Anwendungstemperatur der Kohlenstoffschichten von 350 – 400°C ausgegangen werden. Diese ist für die vorgesehenen Umformtemperaturen bis 350°C ausreichend. Für höhere Temperaturen muss auf borhaltige oder chrombasierte Schichtsysteme wie CrVN ausgewichen werden. Das untersuchte Schichtsystem auf Basis von TiBN und TiB_2 zeigte sich bis etwa 500°C stabil, CrVN, je nach Vanadiumgehalt, bis etwa 700°C.

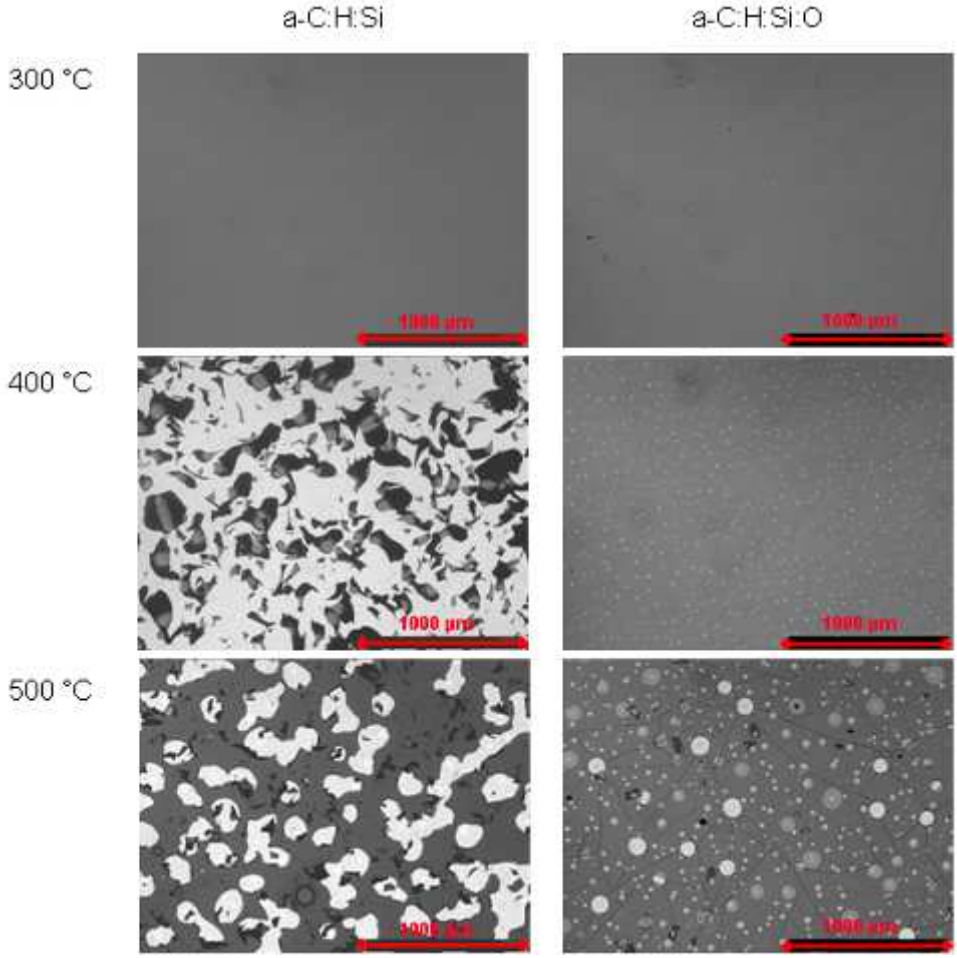


Abb. 5: Schichtdefekte in a-C:H:Si und a-C:H:Si:O nach einer 2-stündigen Wärmebehandlung in Umgebungsluft

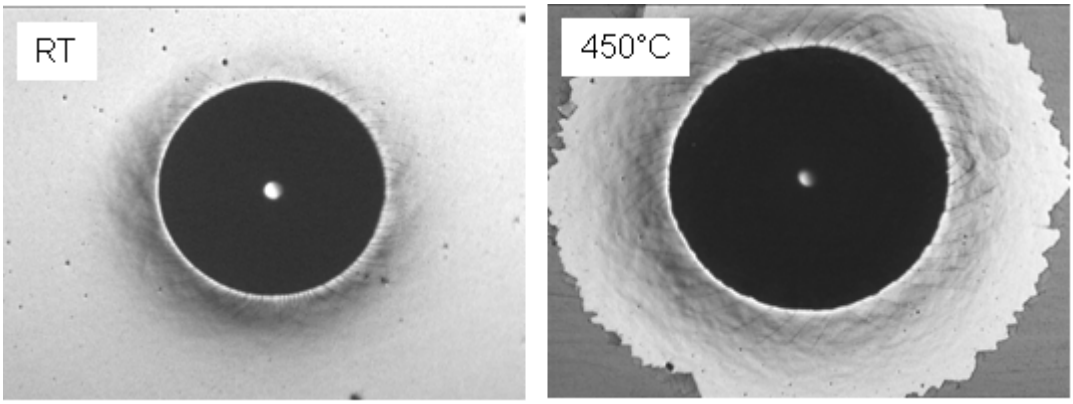


Abb. 6: Verringerte Schichthaftung beim Rockwell-Test nach Wärmebehandlung bei 450℃ bei einer CrN + a-C:H:W Schicht, Delamination am Übergang zwischen Deckschicht und Zwischenschicht.

Neben Stahl wurde sprühkompaktiertes Aluminium als Werkzeugwerkstoff im Rahmen des Projektes untersucht. Bisher lagen keine Erkenntnisse über die Eignung von sprühkompaktiertem Aluminium als Trägerwerkstoff für PVD und PACVD Beschichtungen vor. Deshalb wurden Beschichtungsversuche mit den Werkstoffen Dispal S232 und Dispal S225 von PEAK durchgeführt. Nach einer Vorbeschichtung mit chemisch Nickel, um evtl. noch vorhandene Poren zu schließen und eine gute Stützwirkung für die folgende PVD Beschichtung zu gewährleisten, wurde eine CrN + a-C:H:W Schicht aufgebracht (Abb. 7). Kalottenschliffe (Abb. 8) zeigten eine geschlossene Beschichtung mit guter Schichtanbindung auf der Nickelschicht, deren unregelmäßige Wachstumsstruktur von der PVD Beschichtung abgebildet wird. Für glattere Oberflächen ist eine mechanische Nachbearbeitung der Nickelbeschichtung (Polieren) erforderlich. Haftfestigkeitsuntersuchungen mit dem Rockwell-Test bestätigten die gute Schichtanbindung. Schichtabplatzungen oder Ausbrüche waren nicht erkennbar (Abb. 9). Das Ergebnis ist jedoch nur eingeschränkt mit den Haftungstests an den anderen Beschichtungen vergleichbar, da die Härte des Grundwerkstoffes deutlich geringer (< 55 HRC) und die Gesamtschichtdicke (20 bis 50 µm) viel größer war.

Abb. 7: Testsubstrate für Beschichtungsversuche auf sprühkompaktiertem Aluminium

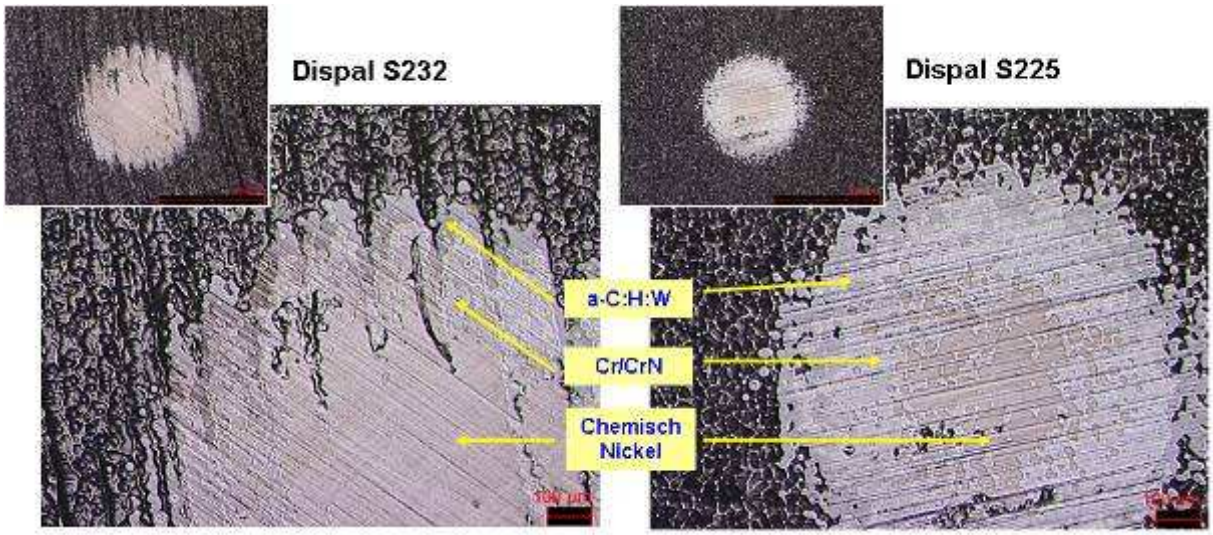


Abb. 8: Kalottenschliffe durch CrN + a-C:H:W Beschichtung auf sprühkompaktiertem Aluminium mit Zwischenschicht aus chemisch Nickel

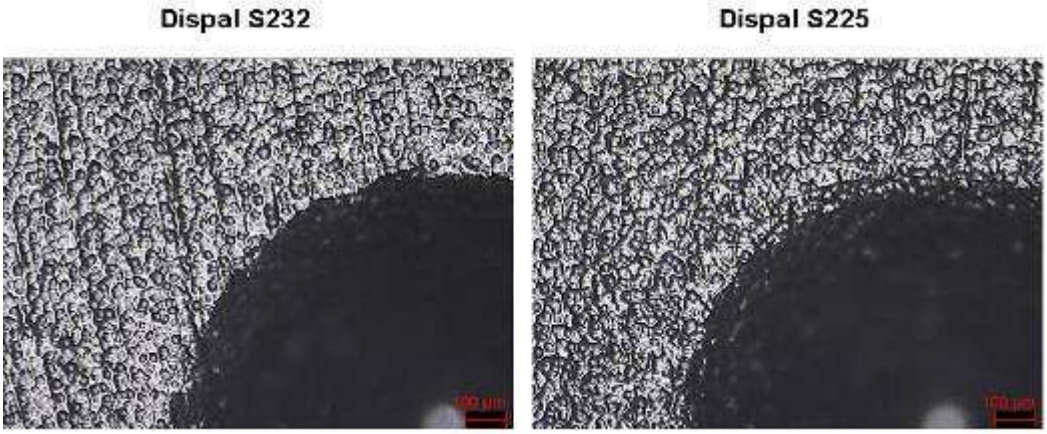


Abb. 9: Ergebnis der Haftfestigkeitsuntersuchung mit dem Rockwell-Test an sprühkompaktiertem Aluminium beschichtet mit CrN + a-C:H:W mit Zwischenschicht aus chemisch Nickel

4.4 Charakterisierung und Auswahl geeigneter Schmierstoffe für Al-Oberflächen

Verantwortlich: Fraunhofer IPA (FPL)

Wichtige Kriterien bei der Auswahl von Schmierstoffen sind das Benetzungsverhalten von Werkstoffoberflächen, die Temperaturstabilität bei den Einsatztemperaturen und die Entfernbarkeit von den umgeformten Metalloberflächen. Das Verhalten der Schmierstoffe bei verschiedenen Temperaturbelastungen bzw. bei der temperierten Umformung ist von essentieller Bedeutung. Ob und wie sich die Schmierstoffe bei diesem Vorgang physisch und chemisch verändern, wurde anhand von IR-spektroskopischen (Multiscope FT-IR, Fa. Perkin Elmer) und TGA-Untersuchungen (Pyris 1 TGA, Perkin Elmer) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden als ein Kriterium bei der engeren Produktauswahl genutzt.

Nach der Auswahl der Schmierstoffe (Hotmelts) Drylube E1, Drylube E1-Plus und Drylube C1, von der Fa. Zeller & Gmelin empfohlen und zur Verfügung gestellt, sowie nach Wahl der verschiedenen Aluminiumwerkstoffe (AA 2024 pl./unpl., AA 6016 std., AA 7075 pl./unpl.) wurden Proben für die spektroskopischen Untersuchungen hergestellt.

Um das Verhalten der Schmierstoffe bei verschiedenen Temperaturbelastungen bzw. bei der temperierten Umformung nachzustellen, wurden die Hotmelts auf allen Al-Blechtypen entsprechend den Herstellerangaben mit den vorgeschriebenen Schichtdicken aufgetragen und jeweils für 1 Minute in einem Muffelofen bei 210°C, 250°C und 310°C bela stet.

Die IR-spektroskopischen Untersuchungen fanden für die folgenden Proben statt:

- Hotmelts (Drylube E1, Drylube E1-Plus und Drylube C1) und Reinigungsmittel nach VDA 230-202 (siehe Abb. 10)
- Al-Bleche mit Hotmelts beschichtet vor und nach den Temperaturbelastungen
- Al-Bleche vor und nach Abreinigen der Hotmelts Beschichtung

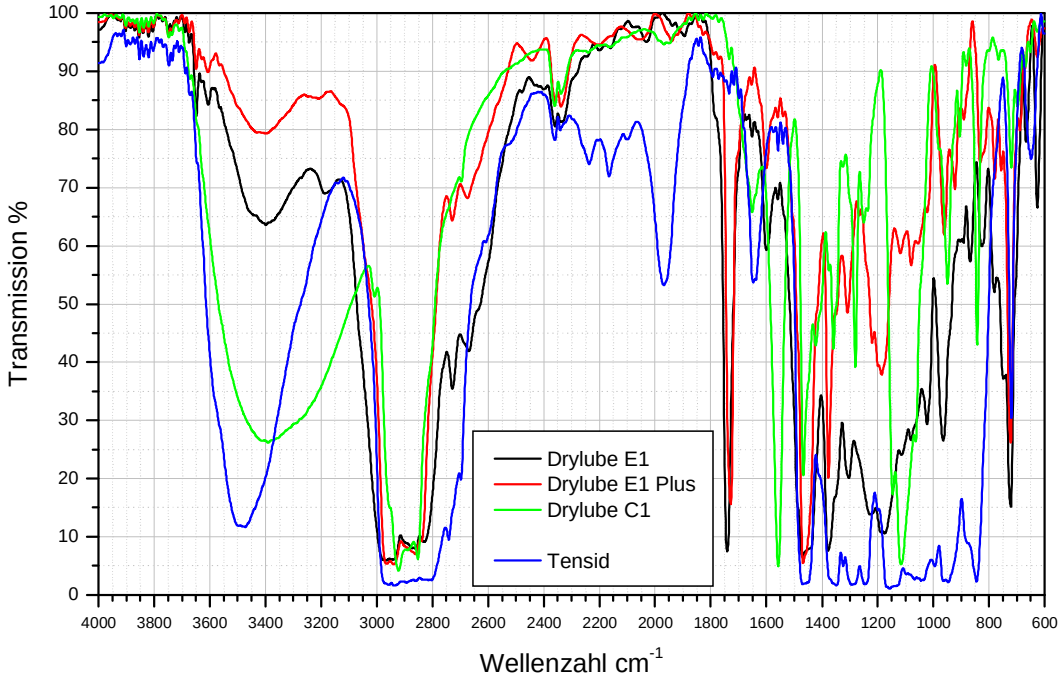


Abb. 10: IR-Transmissionsspektren der Schmierstoffe und des Reinigungsmittel entsprechend der VDA-Norm 230-202:2004

IR-spektroskopische Untersuchungen ergaben, dass sich die Al-Bleche im Lieferzustand (mit Petrolether entfettet) nicht grundsätzlich von den mit Hotmelts beschichteten und nach VDA-Norm 230-202 gereinigten Al-Blechen unterscheiden. Auch die Durchführung von Umformungen mit nachträglicher Reinigung beeinflusste die Spektren nicht. Insofern konnten keine Rückstände von Hotmelts, Reinigungsmitteln wie auch Werkzeugabrieb spektroskopisch nachgewiesen werden. Die Al-Oberflächen können demzufolge nach einer normgerechten Reinigung als chemisch sauber betrachtet werden.

Die IR-Spektren des wasserhaltigen Drylube C1 zeigten bis zur Temperatur von 310°C nur eine Intensitätsminderung der Wasser-Absorptionsbande, jedoch keine nachweisbaren stofflichen Veränderungen. Für die Hotmelts Drylube E1 und Drylube E1-Plus hingegen wurde eine leichte chemische Veränderung infolge der Temperaturbelastung bei 310°C festgestellt, welche vermutlich auf eine Oxidation der Schmierstoffe zurückzuführen ist. Für Belastungen der Proben bei Temperaturen ≤ 250°C lässt sich hingegen bei keinem der untersuch ten Schmiermittel eine thermisch bedingte, chemische Veränderung feststellen.

Bei Durchführung der Schmierstoff-Temperaturbelastung wurde parallel auch der Massenverlust der beschichteten Al-Bleche bestimmt. Ferner wurden zusätzliche thermischgravimetrische Analysen (TGA) (siehe Abb. 11 bis 13) von allen drei Hotmelts durchgeführt.

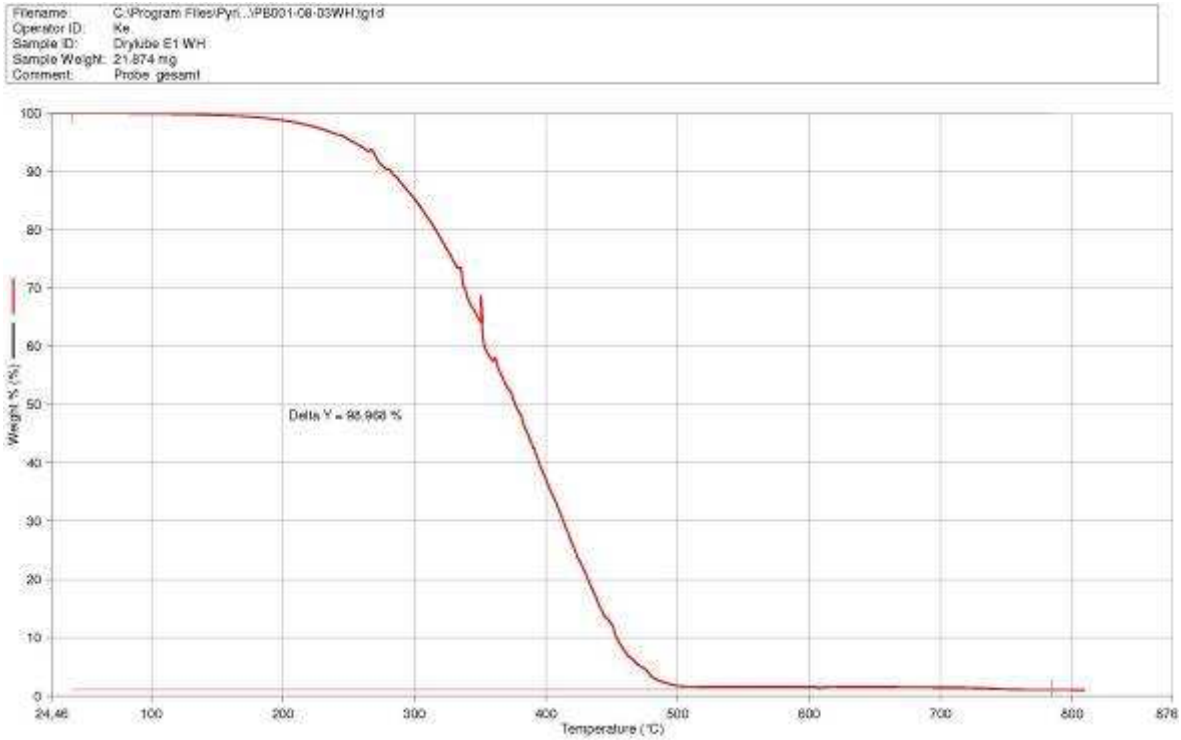


Abb. 11: TG Analyse des Schmiermittels Drylube E1

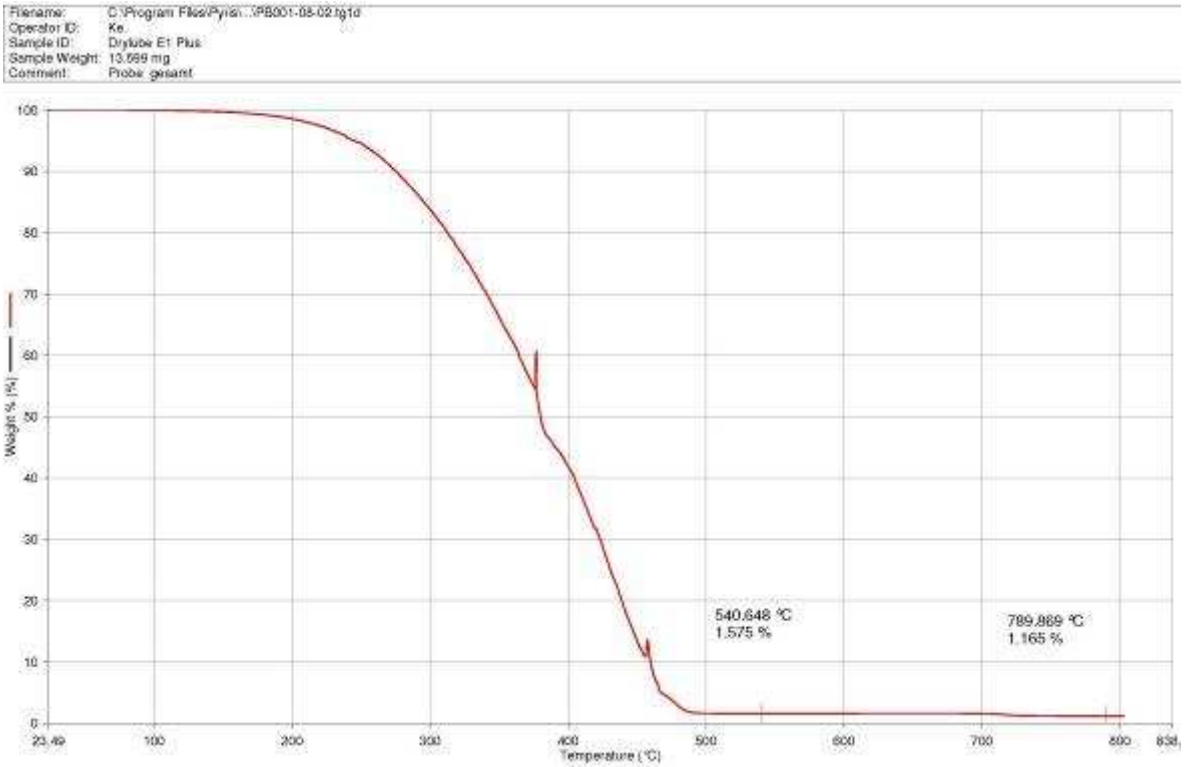


Abb. 12: TG Analyse des Schmiermittels Drylube E1 Plus

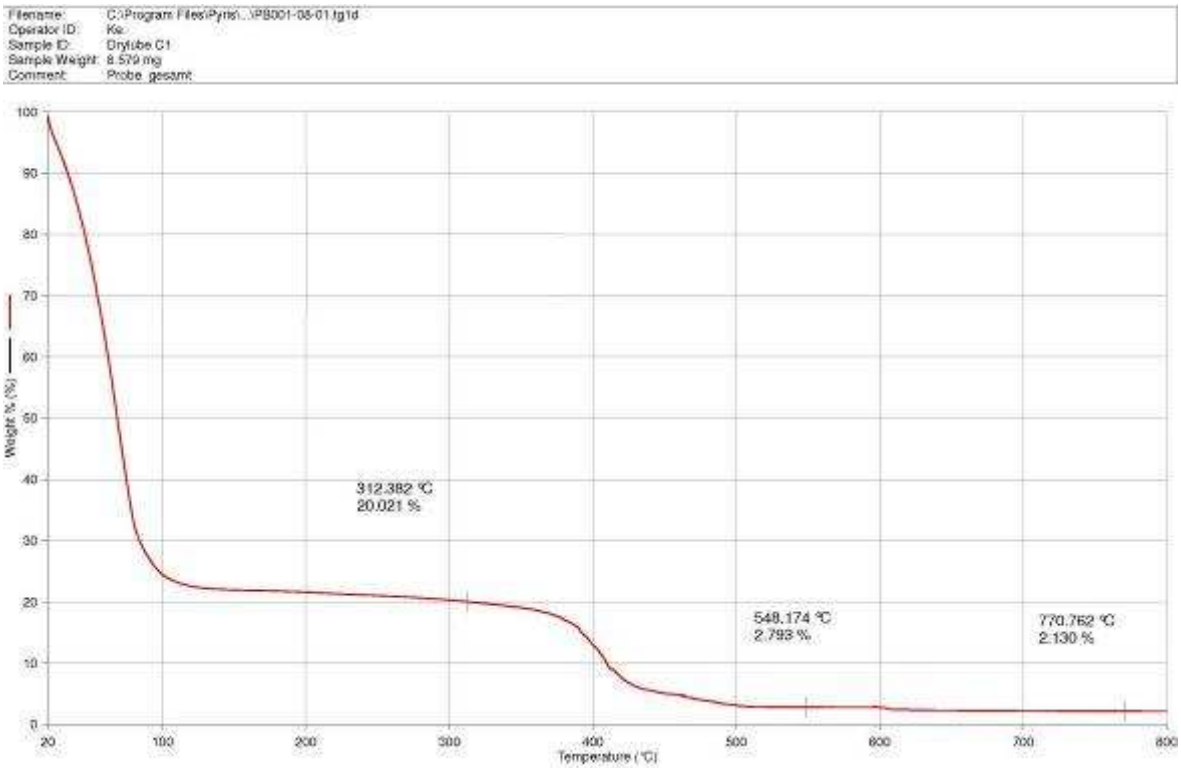


Abb. 13: TG Analyse des wasserhaltigen Schmiermittels Drylube C1

Tabelle 4: Massenverluste von Drylube E1, Drylube E1-Plus und Drylube C1 ermittelt über TGA-Messungen

Temperaturbelastung	Drylube E1	Drylube E1-Plus	Drylube C1
200℃	1,5 %	2 %	78 %
250℃	4,5 %	5 %	79 %
310℃	15 %	16%	80 %

Die Ergebnisse der TGA-Messung des wasserhaltigen Hotmelt Drylube C1 zeigen erwartungsgemäß die größten Massenverluste von bis zu 80%, wobei hiervon ca. 77% dem Wasserverlust zuzuordnen ist. Für Drylube E1 und Drylube E1-Plus wurde bis zur Belastungstemperatur von 310℃ ein Massenverlust von ca. 16% festgestellt. Da IR-spektroskopisch festgestellt wurde, dass bis zur Belastungstemperatur von 250℃ keine chemischen Ver änderungen von Drylube E1 und Drylube E1-Plus erfolgen, kann der Massenverlust von ca. 5% bis 250℃ dem Verdunsten der Hotmelts zugeordnet werden.

4.5 Tribologische Modellversuche mit dem Streifenziehversuch

Verantwortlich: Fraunhofer IWU

Ziel der tribologischen Modellversuche war es, durch ein Screening geeignete Kombinationen aus Schmierstoffen und Werkzeugbeschichtungen für Anwendungstests herauszufinden und deren prinzipielle Eignung für den vorgesehenen Anwendungsfall nachzuweisen.

In Absprache mit dem PbA wurde auf die ursprünglich geplanten Versuche mit dem Hochlasttribometer verzichtet. Stattdessen wurden temperierte Streifenziehversuche in das Versuchsprogramm aufgenommen, die eine anwendungsnähere Abbildung des Umformvorganges erlauben. Dazu wurde eine Streifenziehanlage mit Temperiereinheit am Fraunhofer IWU aufgebaut (Abb. 14). Um eine definierte Auftrag der Schmierstoffe gewährleisten zu können, wurde eine Beölungseinheit (Abb 15) in den Versuchsaufbau integriert, die von der Firma Raziol Zibulla & Sohn GmbH zur Verfügung gestellt wurde.

1. Hydraulikzylinder 1 mit Kraftmessdose
2. Temperiereinheit

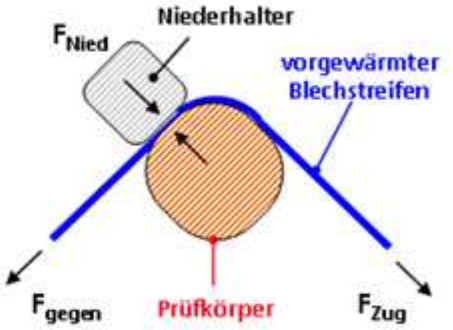


Abb. 14: Streifenziehanlage mit Temperiereinheit

Abb. 15: Beölungseinheit

Folgende Parametervariationen wurden im Streifenzug mit Umlenkung realisiert:

A) Verwendete Werkzeugwerkstoffe:
- Werkzeugstahl:1.2379 (beschichtet, unbeschichtet)
- Sprühkompaktiertes Aluminium der Firma PEAK (Dispal S225 beschichtet, unbeschichtet)

B) Verwendete Werkzeugbeschichtungen
- CrN + a-C:H:W
- CrN + a-C:H
- chemisch Nickel/Bornitrid
- chemisch Nickel (stichprobenartig)

C) Testmaterialien der Fa. amag (Östereich) (Streifen 2200 x 50mm):
- AA 6016; s_0 =1,00 mm (T4)
- AA 2024; s_0 = 0,63 mm
  s_0 = 1,0 mm
  s_0 = 1,6 mm; plattiert
  s_0 = 2,03 mm; unplattiert

D) Temperaturen: 20℃, 150℃, 200℃, 250℃

E) Schmiermittel: Drylube E1, Drylube E1-Plus, Drylube C1, KTLN-20

F) Ziehgeschwindigkeit: konstant 50 mm/s

G) Flächenpressung: 2 / 5 und 20 N/mm^2

H) Ziehbackenradius: 5 mm

I) Streifenbreite: 50 mm

Die verschiedenen Kombinationen aus Werkzeugwerkstoffen und Beschichtungen sind in Abb. 16 dargestellt. Den Vergleich der Reibwerte der unterschiedlichen Werkzeugoberflächen gegenüber AA 6016 in Abhängigkeit von der Umformtemperatur und dem Schmierstoff ist in Abb. 17 zu sehen.

Die Nickel/BN Beschichtung weist tendenziell die niedrigsten Reibwerte auf, gefolgt von der CrN + a-C:H Beschichtung und, mit leichtem Abstand, der unbeschichteten Werkzeugoberfläche aus 1.2379. Mit dem Reibwert steigt die Neigung zur Bildung von Aluminiumanhaftungen an (Abb. 18). Stichprobenartige Versuche mit chemisch Nickel beschichteten Prüfkörpern bestätigten den reibwertreduzierenden Effekt der Bornitridpartikel (vergl. Abschnitt 4.6.2).

Der Schmierstoff Drylube C1 zeigte unter allen Bedingungen den niedrigsten Reibwert, der mit zunehmender Umformtemperatur weiter abnahm. Das höchste Reibwertniveau war beim Schmierstoff Drylube E1 zu beobachten, dessen Weiterentwicklung Drylube E1-plus sich im Hinblick auf den Reibwert günstiger verhielt.

Die Versuche mit der Aluminiumlegierung AA 2024 plattiert und unplattiert zeigen tendenziell das gleiche Ergebnis. Bedingt durch die niedrigere Werkstofffestigkeit und die etwas glattere Blechoberfläche ist das Reibwertniveau jedoch etwas niedriger.

Abb. 16: Beschichtete Prüfkörper (R = 5 mm)

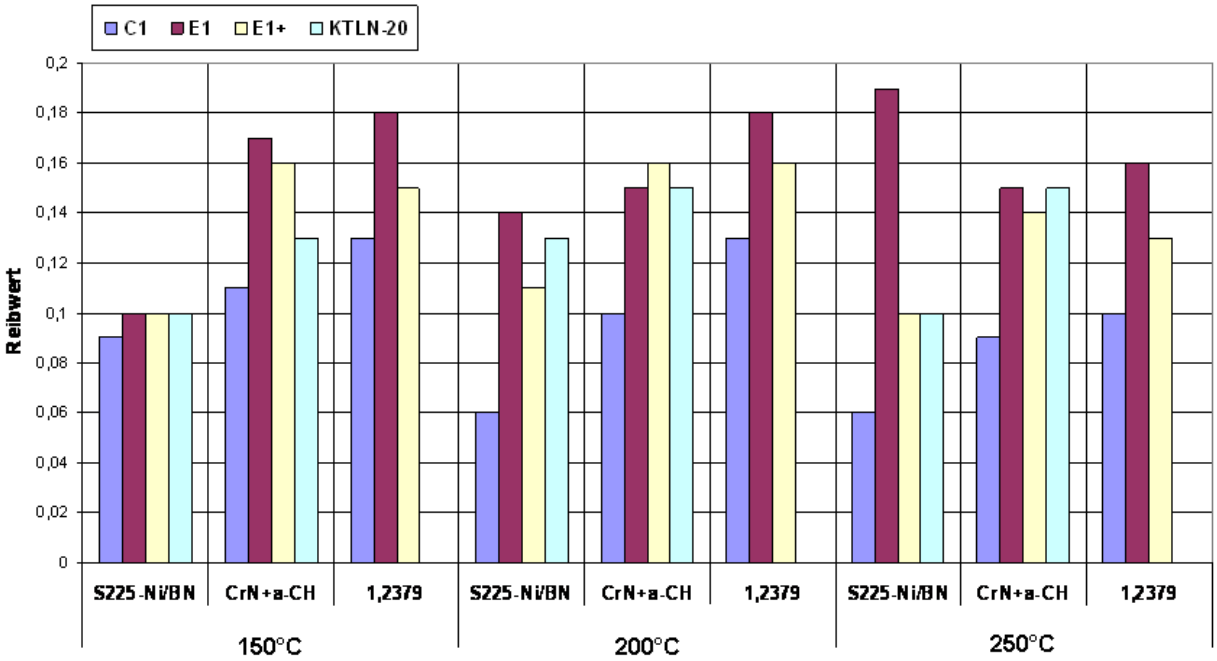


Abb. 17: Reibwertvergleich verschiedener Werkzeugoberflächen gegen AA 6016 (s_0=1,00 mm) bei einer Flächenpressung von 5 N/mm² in Abhängigkeit vom Schmierstoff und der Umformtemperatur

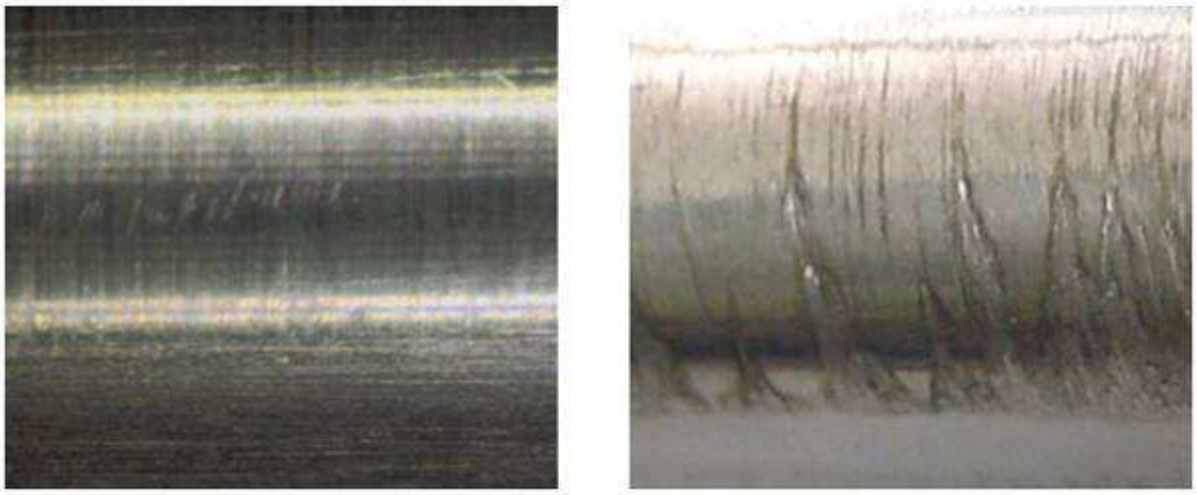


Abb. 18: Vergleich der Ziehbacken nach den Anwendungsversuchen gegen AA 6016
links: Ni/BN beschichtet
rechts: unbeschichtet

Der Einfluss der Flächenpressung auf den Reibwert ist für die drei beschichteten und unbeschichteten Werkzeugoberflächen in Abb. 19 bis 21 dargestellt. Auffällig ist, dass für nahezu alle Kombinationen der Reibwert mit der Flächenpressung sinkt. Die Bewertung der Schmierstoffe und Beschichtungen hinsichtlich ihres Umformverhaltens bleibt davon unberührt.

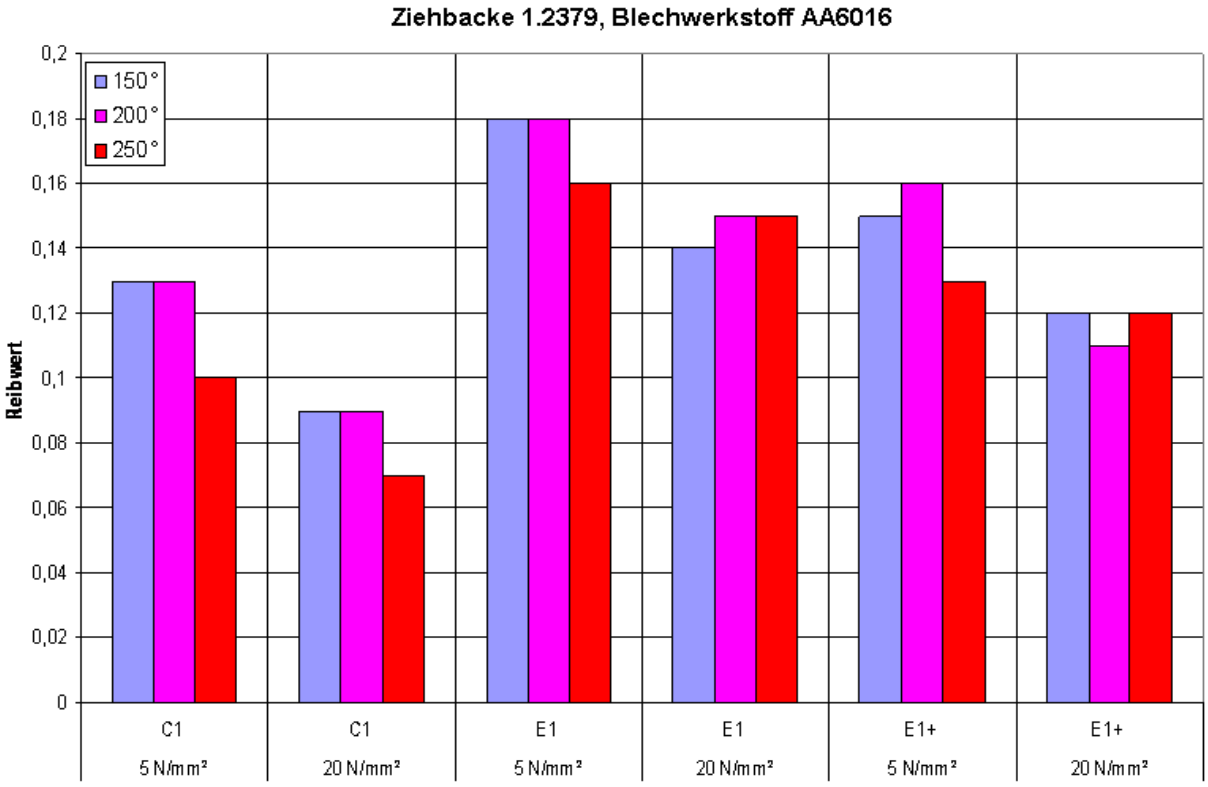


Abb. 19: Reibwert in Abhängigkeit von der Flächenpressung, dem Schmierstoff und der Umformtemperatur für die Ziehbacke aus 1.2379 unbeschichtet

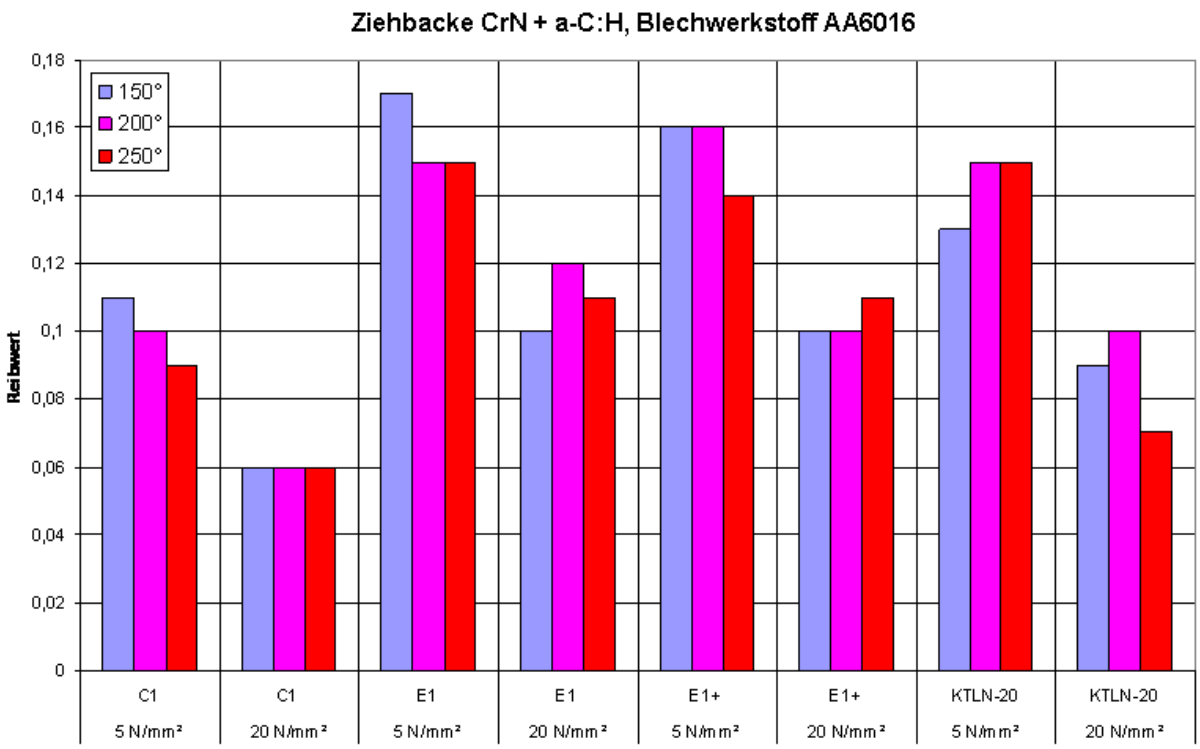


Abb. 20: Reibwert in Abhängigkeit von der Flächenpressung, dem Schmierstoff und der Umformtemperatur für die CrN + a-C:H beschichtete Ziehbacke aus 1.2379

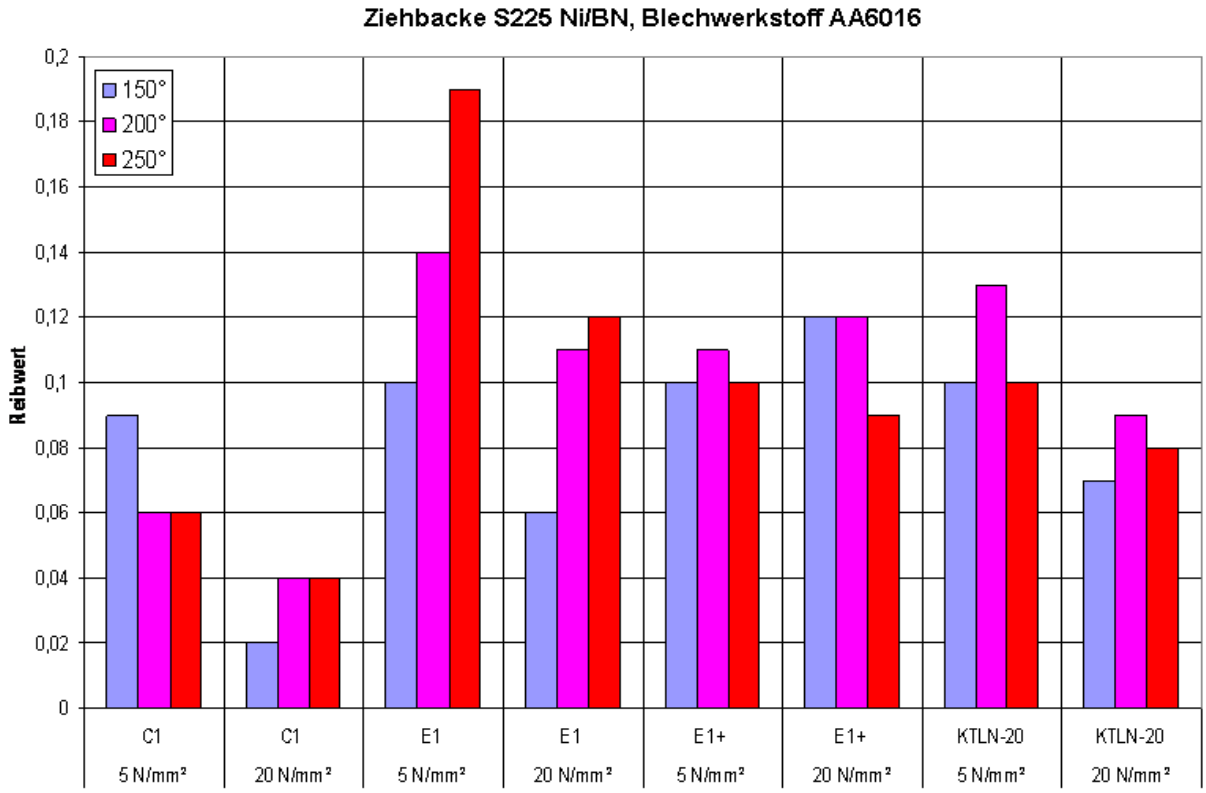


Abb. 21: Reibwert in Abhängigkeit von der Flächenpressung, dem Schmierstoff und der Umformtemperatur für die Ni/BN beschichtete Ziehbacke aus S225

Fazit der Streifenziehversuche:

Die niedrigsten Reibwerte und die beste Oberflächenqualität konnte mit einer Kombination aus einer Nickel/Bornitrid Beschichtung (Ni/BN) auf sprühkompaktiertem Aluminium S225 und dem Schmierstoff Drylube C1 für die untersuchten Blechwerkstoffe im Temperaturbereich zwischen 150 und 250°C erzielt werden. Aufgrund der stark unterschiedlichen Schicht-Werkstoffkombinationen ist ein Vergleich der Grundwerkstoffe S225 und 1.2379 nicht angebracht.

4.6 Anpassung und Optimierung der Schichtsysteme

Verantwortlich: Fraunhofer IST

Auf Basis der Ergebnisse der Charakterisierung und Vorauswahl geeigneter Beschichtungen in Abschnitt 4.3 und der Tribologischen Modellversuche mit dem Streifenziehversuch in Abschnitt 4.5 erfolgte eine Anpassung und Optimierung von zwei Schichtsystemen. Dabei wurden folgende Ziele verfolgt:

- Schichtsytem PN + a-C:H
  - Reduzierung der Rauheit der Schichtoberfläche
- Schichtsystem chemisch Nickel
  - Verbesserung der Reibeigenschaften

4.6.1 Optimierung des Schichtsystems PN + a-C:H

Beim Schichtsystem PN + a-C:H kommt es durch die Plasmanitrierung zu einer Aufrauung der Werkzeugoberfläche, die von der nachfolgenden Beschichtung abgebildet wird (vergl. 4.3). Dies führt zu einem leichten Anstieg des Reibwertes im Vergleich zu a-C:H Beschichtungen ohne vorherige Plasmanitrierung. Außerdem werden Aluminiumanhaftungen begünstigt.

Prinzipiell lässt sich die Aufrauung durch eine geringere Nitrierintensität reduzieren. Dies kann z.B. durch eine Verkürzung der Nitrierzeit, eine Reduzierung des Stickstoffangebots oder eine Verringerung der Plasmaintensität (Spannung, Verhältnis Pulsdauer/Pulspause) erfolgen. Bei einer zu schwachen Nitrierung geht jedoch der Vorteil der verbesserten Schichthaftung verloren. Daher musste zunächst geprüft werden, ob sich beide Anforderungen über eine Anpassung der Nitrierparameter vereinbaren lassen.

Testsubstrate aus 1.2379 und 1.3343 wurden Plasmanitrierbehandlung mit verschiedenen Prozessparametern unterzogen und anschließend, in der gleichen Anlage, unter konstanten Bedingungen mit einer a-C:H Schicht versehen (vergl. Tabelle2).

Verwendet wurde für die Nitrier- und Beschichtungsversuche eine modifizierte Plasmanitrieranlage PlaTeG MF-300 von Plasma Technik Grün mit folgenden technischen Daten:

- Durchmesser des Rezipienten: 400 mm
- Rezipientenhöhe: 800 mm
- Rezipientenvolumen: 100 l
- Zulässiges Chargengewicht: max. 200 kg
- Zulässige Prozesstemperatur: max. 600 °C
- Mantelheizung: 2 Zonen, 10 KW, 230V
- Enddruck: ~10^{-4} mbar
- Plasmaanregung: Bipolar-Puls

Folgende Parameter wurden bei der Plasmadiffusionsbehandlung variiert:

- Behandlungsdauer: 0 - 8 h
- Temperatur: 430 - 550°C

Die Gaszusammensetzung (N, H, Ar), Pulsdauer, Pulspause und Spannung blieben konstant.

Es zeigte sich, dass eine Mindesttemperatur von etwa 450°C bei der Nitrierung eingehalten werden muss und erst ab Nitrierzeiten von etwa 4 Stunden eine signifikante Haftungsverbesserung der a-C:H

Schicht auftritt. Dies Korrespondiert mit einer Nitrierhärtetiefen von ca. 50 µm. Tabelle 5 zeigt am Beispiel der Variation der Nitrierzeit, dass eine Verbesserung der Schichthaftung von HF4 auf HF1 mit einer Erhöhung des Ra-Wertes von etwa 0,015 auf 0,04 bis 0,06 einherging. Stichprobenartige Versuche mit anderen Spannungen zeigten einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Aufrauung und Haftungsverbesserung.

Tabelle 5: Rauheit und Schichthaftung der a-C:H Schicht in Abhängigkeit von der Nitrierzeit

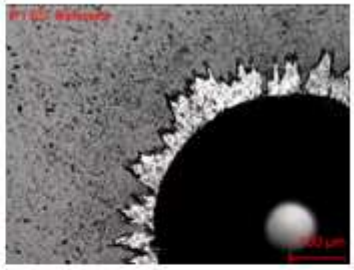
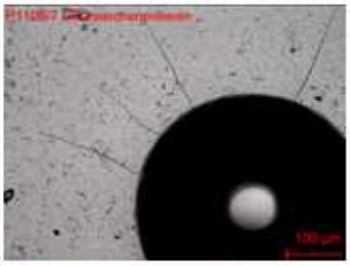
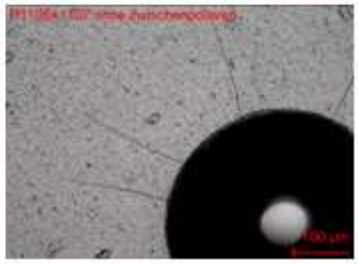
Nitrierzeit [h]	Rauheit Ra / Rz	Rockwell-Haftungstest	
0	0,015 / 0,092	HF4	
2	0,014 / 0,089	HF4	
4	0,036 / 0,254	HF1	
8	0,059 / 0,424	HF1	

Als weiterer Lösungsansatz zur Reduzierung der Rauheit wurde die Einfügung eines Zwischenpolierschrittes nach der Plasmanitrierung verfolgt. Mehrere Proben wurden dazu unter identischen Bedingungen nitriert. Die Hälfte der Proben wurde von Hand nachpoliert, gereinigt und zusammen mit den unpolierten Proben beschichtet (Zweistufiger-Prozess). Zum Vergleich wurden weitere Proben in einem Prozess - ohne Öffnung der Nitrieranlage - nitriert und beschichtet (Einstufiger-Prozess). Durch die Zwischenpolitur konnte die Rauheit der Beschichtung nahezu auf das Ausgangsniveau - ohne Beschichtung - gebracht werden. Die Haftungsverbesserung, die durch die Nitrierung, sowohl im einstufigen als auch im zweistufigen Prozess, erzielt werden konnte, blieb auch nach der Zwischenpolitur erhalten (Tabelle 6). Das Ergebnis konnte durch die Wiederholung des Versuches mit unterschiedlichen Prozessparametern bestätigt werden. Auch eine mehrtägige Unterbrechung zwischen Nitrierung und Beschichtung war ohne Qualitätseinbußen möglich.

Für die Anwendung des Schichtsystems PN + a-C:H ergibt sich dadurch die Möglichkeit, bei kritischen Anwendungen, die Rauheit zu reduzieren, ohne Einschränkungen im Hinblick auf die Schichthaftung in Kauf nehmen zu müssen. Für die Beschichtungsunternehmen bietet die Möglichkeit zur einstufigen oder zweistufigen Prozessführung das Potenzial für eine optimale Auslastung ihrer

Nitrier- und Beschichtungsanlagen. Bei Bedarf können die Nitrierung und Beschichtung in unterschiedlichen Anlagen erfolgen.

Tabelle 6: Schichthaftung und durchschnittliche Rauheit der a-C:H Schicht in Abhängigkeit von der Prozessführung

	Ra	Rz	Rockwell-Haftungstest
Ohne Nitrierung	**0,015**	**0,092**	
Nitriert mit Zwischenpolitur	**0,017**	**0,097**	
Nitriert ohne Zwischenpolitur	**0,036**	**0,256**	

4.6.2 Optimierung des Schichtsystems chemisch Nickel

Erste Anwendungsversuche im Streifenziehversuch mit nasschemisch stromlos abgeschiedenen chemisch Nickelschichten verliefen erfolgreich. Die Schichten zeigten gute Gleiteigenschaften und eine geringe Tendenz zur Bildung von Anhaftungen gegenüber den untersuchten Aluminiumlegierungen. Chemisch Nickel ist für die Beschichtung von sprühkompaktiertem Aluminium sowie von den relevanten Werkzeugstählen gut geeignet und lässt sich in Schichtdicken abscheiden, die eine nachträgliche Einglättung der Oberfläche erlauben. Es ist bekannt, dass sich die Schichteigenschaften durch den Einbau von Mikropartikeln modifizieren lassen. Ein Ansatz ist der Einbau von Partikeln aus hexagonalem Bornitrid. Es entstehen sogenannte chemisch Nickel/Bornitrid Dispersionsschichten.

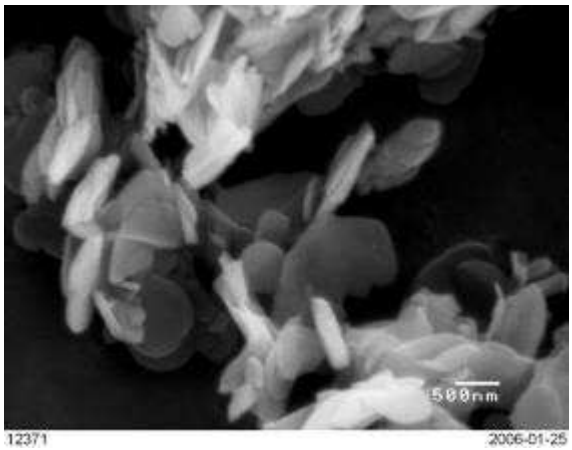
Hexagonales Bornitrid ist bis etwa 800°C Oxidations beständig. Dadurch kann das Einsatzspektrum im Vergleich zu chemisch Nickel/PTFE Schichten deutlich erweitert werden. Nickel/PTFE Schichten, die bereits industriell etabliert sind, sind bekannt für ihren niedrigen Reibwert und ihre antiadhäsiven Eigenschaften. Sie sind jedoch in ihrer maximalen Anwendungstemperatur auf etwa 200°C begrenzt

Zur Verfolgung dieses Optimierungsansatzes wurden Testsubstrate und später Versuchswerkzeuge mit chemisch Nickel/Bornitrid Dispersionsschichten beschichtet. Verwendet wurden Bornitrid-Partikel (HeBoFill 205) mit einer mittleren Korngröße von 0,5 µm (D90 < 1 µm). Abb. 22 zeigt ihre plättchenförmige Struktur. Durch Variation des Elektrolytansatzes für die Beschichtung konnten der

Einbau von ca. 20 Vol.% Bornitrid in die Nickelmatrix erreicht werden. Die Schichtdicken lagen zwischen 15 und 50 µm. Durch eine Temperierung von 1 h bei 400°C kann die Schichthärte verbessert werden. In Abb. 23 ist die homogene Verteilung der Partikel zu erkennen.

Durch EDX-Analysen konnte der Einbau von Bornitridpartikeln bestätigt werden (Abb. 24). Der nachgewiesene Phosphor ist normaler Bestandteil der chemisch Nickelschichten. Die Bornitridpartikel liegen an der Schichtoberfläche frei und können die Gleiteigenschaften positiv beeinflussen, wie die Anwendungsversuche bestätigt haben. Mit fortschreitendem Verschleiß werden immer wieder neue Partikel freigelegt; die Schichteigenschaften bleiben lange erhalten.

Abb. 22: Verwendete Bornitridpartikel (HeBoFill 205) für die Herstellung von chemisch Nickel/Bornitrid Dispersionsschichten



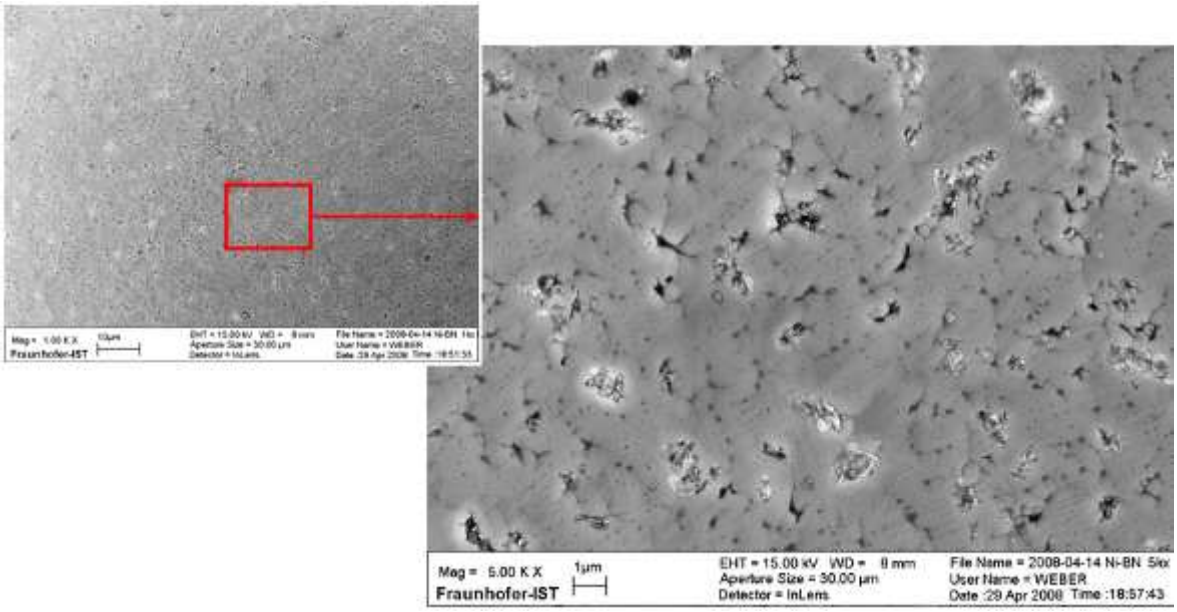
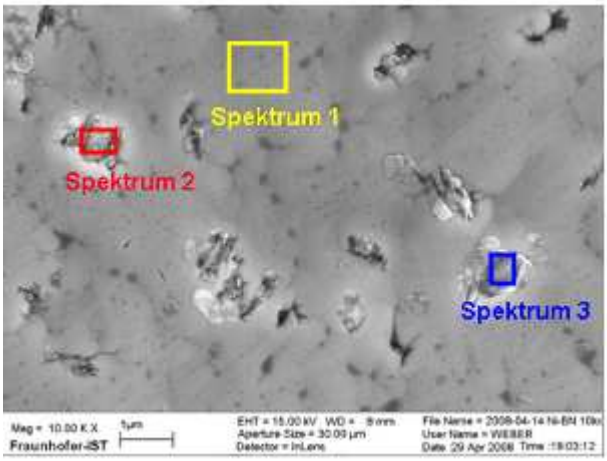


Abb. 23: Oberflächenaufnahme einer chemisch Nickel/Bornitrid Dispersionsschicht, mittlere Größe der Bornitridpartikel 0,5 µm



Spektrum	Nachgewiesene Elemente	Unterschiede
1	Ni, P	Referenz
2	Ni, P, N, B	N, B
3	Ni, P, N, B	N, B

Abb. 24: EDX-Analyse einer chemisch Nickel (Phosphor)/Bornitrid Dispersionsschicht

4.7 Beschichtung und Charakterisierung der Versuchswerkzeuge

Verantwortlich: Fraunhofer IST, IWU

Die Schichteigenschaften auf Werkzeugen können deutlich von denen auf flachen Testsubstraten abweichen. Außerdem können die Bauteilgeometrie und der Werkzeugwerkstoff, beispielsweise die Härte, durch den Beschichtungsprozess verändert werden. Dies kann erhebliche Auswirkungen auf die Anwendungseignung der beschichteten Werkzeuge haben. Um dies für die ausgewählten Beschichtungen zu untersuchen, wurden die Versuchswerkzeuge hinsichtlich der Einhaltung der Maßtoleranzen, des Verzuges und dem Auftreten von geometriebedingten Schichtdefekten charakterisiert. Ein möglicher Härteverlust des Werkzeugwerkstoffes in Folge des Beschichtungsprozesses und die Homogenität der Schichtdickenverteilung und der Schichteigenschaften wurden auf Probekörpern mit werkzeugähnlicher Geometrie untersucht. Ein unzulässiger Härteverlust oder Maßänderungen traten in keinem Fall auf. Auffällig waren jedoch die Inhomogenitäten der Schichtdickenverteilung in Abhängigkeit von der Werkzeuggeometrie bei den verwendeten PVD und PACVD-Beschichtungsverfahren.

Die mit PVD Verfahren durch reaktives Magnetronsputtern hergestellten Schichten (vergl. Tabelle 2) wiesen lokal deutlich reduzierte Schichtdicken auf. Mit Hilfe eines Rohrstückes mit gerundeten Kanten wurde die Geometrie eines Ziehringes näherungsweise nachgebildet und die Schichtdickenverteilung der CrN + a-C:H und CrN + a-C:H:W Beschichtung untersucht (Abb. 25). In Abhängigkeit von der Orientierung zum Target und bedingt durch Abschattungseffekte muss etwa mit einer Halbierung der Schichtdicke gerechnet werden.

Bei den PACVD Verfahren wurden dagegen vor allem Schichdickenüberhöhungen im Bereich von Kanten beobachtet. Im ungünstigsten Fall kann dies, infolge der Schichteigenschaften, zu selbsttätigen Schichtablösungen führen. Beim untersuchten Schichtsystem PN + a-C:H sollten Schichtdicken über 5 µm vermieden werden. Bei den zu beschichtenden Versuchswerkzeugen trat dieses Problem wiederholt auf, weshalb für die weiteren Versuche das Schichtsystem CrN + a-C:H verwendet wurde.

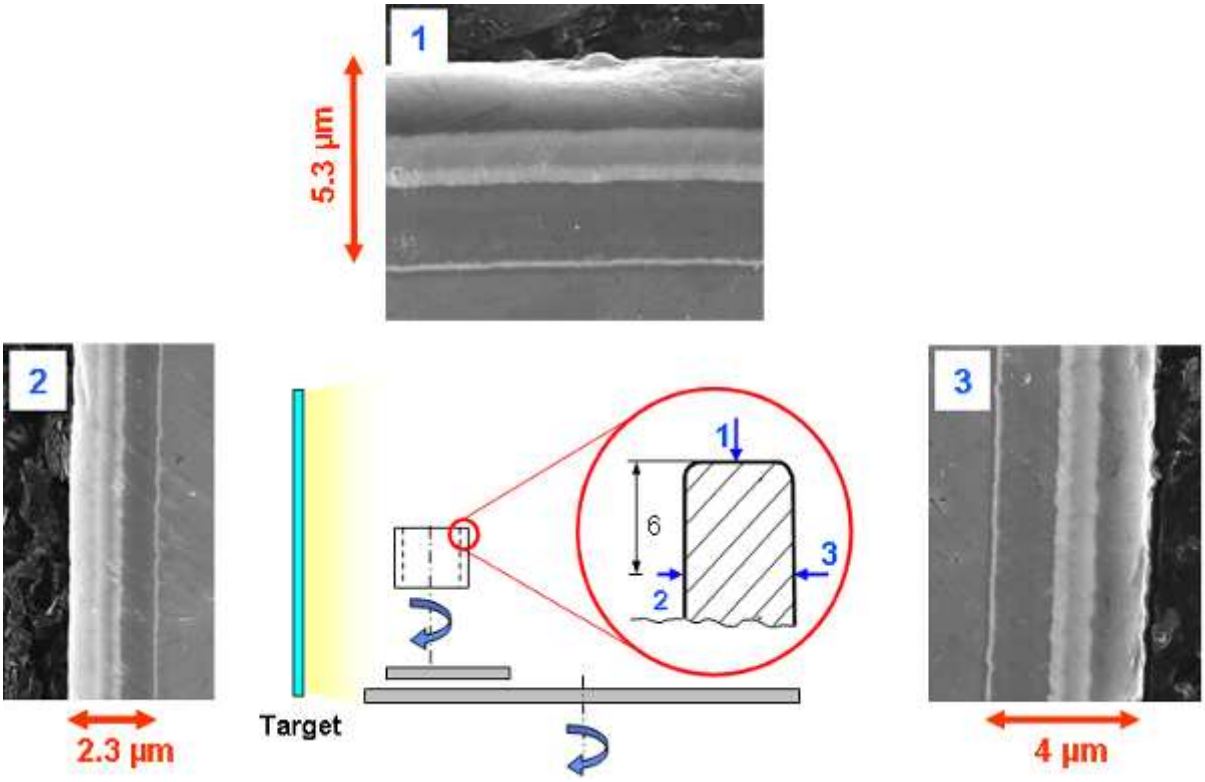


Abb. 25: Homogenität der Schichtdickenverteilung beim reaktiven Magnetronsputtern am Beispiel einer Modellgeometrie

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurde auch die Fertigung und Beschichtung der Werkzeugaktivteile für die umformtechnischen Praxistests vorgenommen. Dazu gehören die Werkzeugaktivteile für:

- den Rechteckzug (Abb. 26),
- die temperierte Innenhochdruckumformung mittels heißen Gasen (T-IHU-G),
- den Demonstrator „Knochenwerkzeug“ (vergl. Abschnitt 4.8 und 4.10).

Abb. 26: Beschichtete Ziehringe für den Rechteckzug

4.8 Umformtechnische Praxistests im Labormaßstab

Verantwortlich: Fraunhofer IWU

Experimentelle Praxistests wurden am Fraunhofer IWU Chemnitz im Labormaßstab durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung des Versagensfalles der Aktivteilbeschichtung sowie des Auftretens von Aufschweißungen oder von Unregelmäßigkeiten am finalen Bauteil. Zur Anwendung kamen:

- der temperierte Rechteckzug (Näpfchenzug),
- die temperierte Innenhochdruckumformung mittels Gasen (T-IHU-G).

Die Verfahrensparameter wurden werkstoffabhängig für die vergleichenden Untersuchungen festgelegt und konstant gehalten. Das Werkzeugprinzip für den Rechteckzug und die für die temperierte Umformung erforderlichen Modifikationen zeigen Abb. 27 und 28.

Kantenradien an den Aktivteilen:	r_E = 5 mm
Kantenlänge:	L = 50 mm
Ziehspalt:	10 bis 20% bezogen auf die Blechdicke

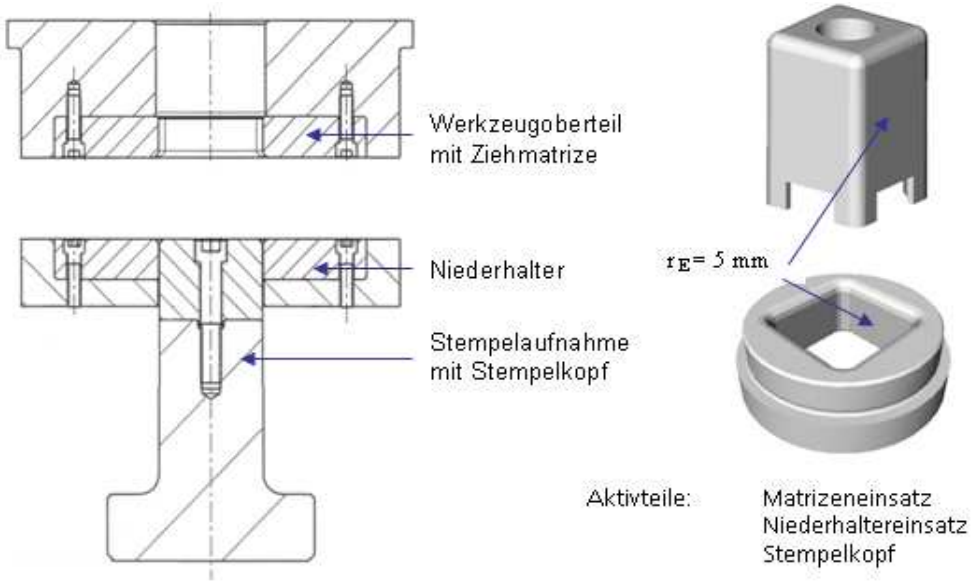


Abb. 27: Werkzeugprinzip zum kalten und warmen Tiefziehen quadratischer Werkstücke

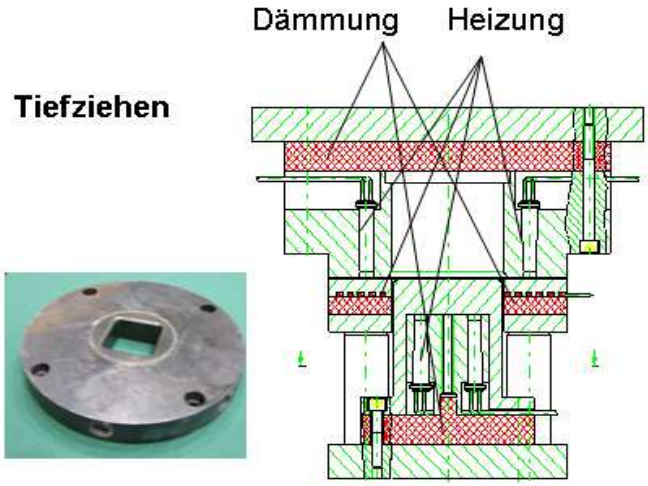


Abb. 28: Modifikationen am Versuchswerkzeug für die temperierte Umformung

Im Folgenden ist eine Übersicht der durchgeführten Umformversuche bzw. Variationen dargestellt.

A) Verwendete Werkzeugwerkstoffe für vergleichende Untersuchungen bzgl. des Einflusses einer Werkzeugbeschichtung:

- Werkzeugstahl:1.2379 (blank-unbeschichtet und beschichtet)
- Sprühkompaktiertes Aluminium der Firma PEAK (beschichtet, unbeschichtet)

B) Verwendete Werkzeugbeschichtungen: unbeschichtet, chemisch/Nickel

C) Testmaterialien:

- AA 6016 T4; (s = 1,00 mm)
- AA 7075 T6; (s = 1,00 mm) / umformbar erst ab ca. 150-200℃

D) Temperaturen: 20℃, 100℃, 150℃, 200℃, 250℃,

E) Schmiermittel: Drylube C1, KTLN 20, KTLN 16, Drylube E1

F) Konstant: Ziehgeschwindigkeit, Flächenpressung, Ziehtiefe T = 12mm

Die mit dem Rechteckzug gezogenen Teile wurden am Fraunhofer IPA (FPL) einer Kontaminierungsanalyse und einer Untersuchung hinsichtlich der Lackierbarkeit unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.9 dargestellt.

Die Notwendigkeit zur temperierten Umformung hochfester Aluminiumlegierungen zeigt sich sehr deutlich am Beispiel des Rechtecknäpfchens aus AA 7075 in Abb. 29. Bei einer Temperatur von 150℃ war keine Umformung möglich, während bei 200° C Näpfchen ohne Reißer gezogen werden konnten.

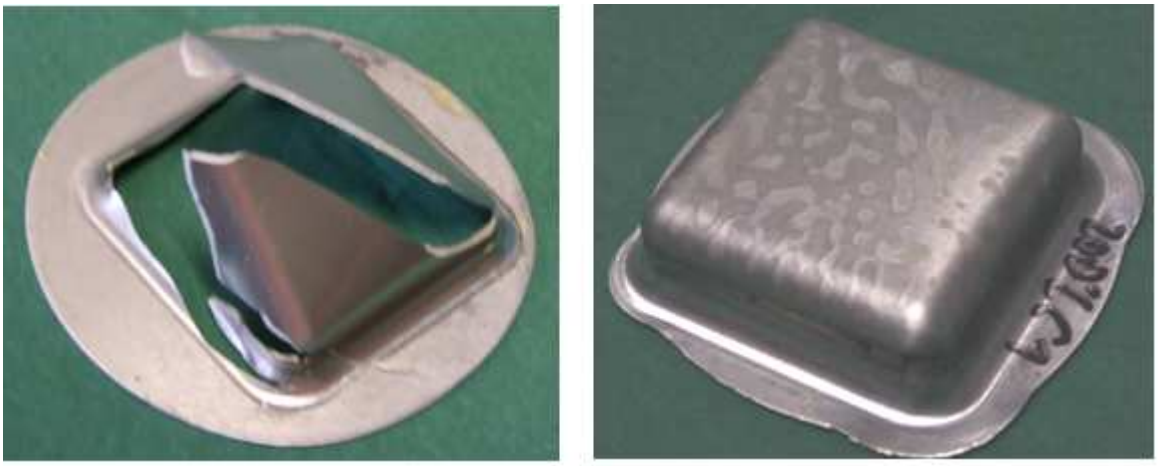


Abb. 29: Darstellung der Tiefziehergebnisse Rechtecknäpfchen für Schmiermittel C1 für Blechwerkstoff AA 7075 (Umformtemperatur links 150℃ und rechts 200℃)

Die Untersuchungen zum Innenhochdruckumformen mittels heißer Gase bei Temperaturen von bis zu 350℃ wurden am Beispiel der Ausformung des Baut eils „T-Stück“ und „Tonne“ durchgeführt.

Die Grundlage für die realisierten Untersuchungen bildeten eine Vielzahl von Vorarbeiten zur temperierten wirkmedienbasierten Umformung unterschiedlichster Aluminium- und Magnesiumlegierungen, welche auf vorhandenen Anlagen im Fraunhofer IWU-Chemnitz durchgeführt wurden. Neben Grundlagenuntersuchungen bzgl. der Ermittlung des Umformvermögens unterschiedlicher Legierungsgüten (Abb. 30) an Basisgeometrien wie z. B. Bauteil „T-Stück“, „Tonne“ sowie „Quader“ konnten bei diversen Forschungsarbeiten auch eine seriennahe Geometrie eines PKW-Achsquerträger erfolgreich umgeformt werden.

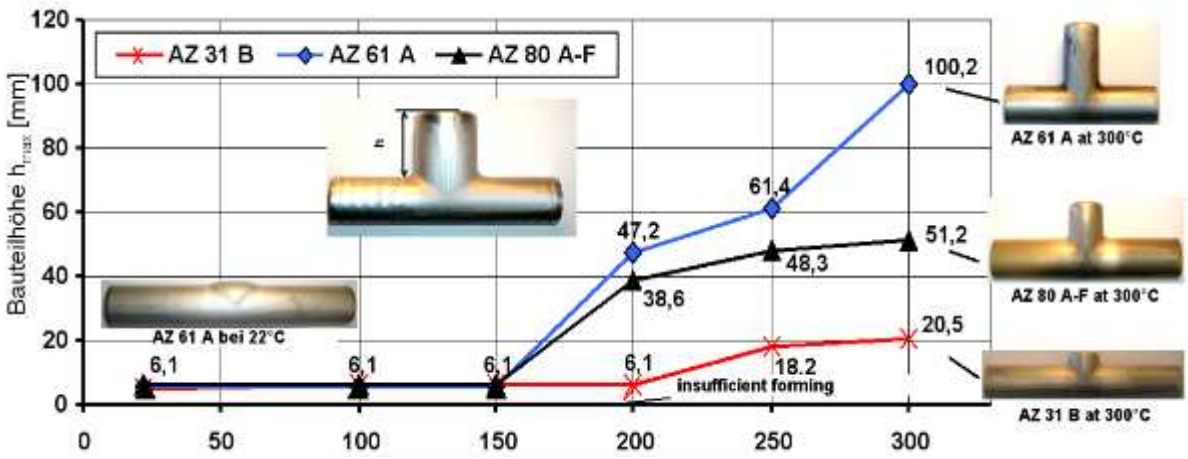


Abb. 30: Ermittlung von Umformgrenzen beim temperierten IHU von Magnesiumwerkstoffen

Erste Grundlagenuntersuchungen erfolgten dabei zunächst auf Basis einer am IWU entwickelten Temperierungsanlage für die wirkmedienbasierte Umformung mit einem Thermalöl, welches einen Temperaturbereich bis ca. 330°C und einen Druckbereich bis 800 bar abdecken kann. In Ermangelung verfügbarer hochtemperaturfester flüssiger Wirkmedien wurde das Verfahren und die Anlagentechnik dahingehend weiterentwickelt, statt flüssiger auch gasförmige Wirkmedien zu nutzen. Die zur Verfügung stehende Anlage zum temperierten Innenhochdruck-Umformen mit gasförmigen Wirkmedien kann dabei einen Druckbereich von 700 bar mit einem effektiven Arbeitsvolumen von 6 l sowie den Temperaturbereich bis 1.000°C abdecken.

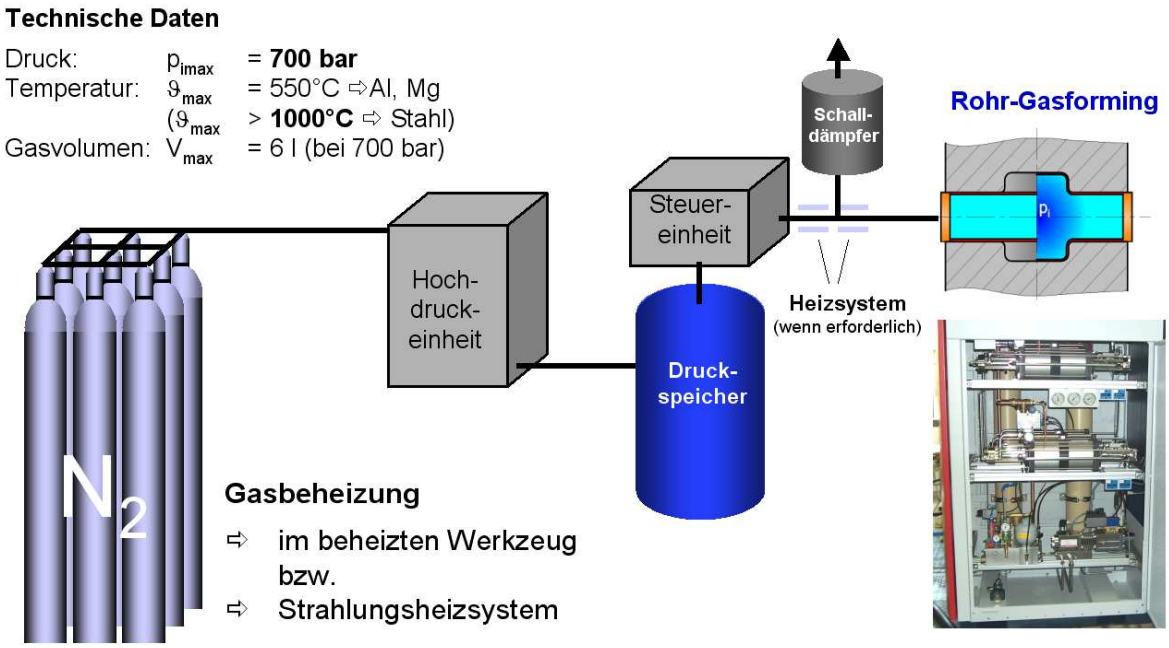


Abb. 31: Anlagenschema zum temperierten IHU mit gasförmigen Wirkmedien (T-IHU-G)

In Untersuchungen mit Versuchsgeometrien sowie seriennahen Bauteilen konnten maximale Umformtemperaturen von 600°C erreicht werden. Neben den Arbeiten zur Ermittlung umformtechnischer Grenzen des Verfahrens gab es auch umfangreiche Aktivitäten zur Einschätzung des Gefahrenpotenzials und zu entsprechenden Sicherheitsanforderungen. Dabei erfolgte die Weiterentwicklung und Optimierung von Verfahren, Anlage sowie der zugehörigen Werkzeugtechnik. Für die erforderlichen Materialkennwerte zur temperierten Umformung der gebräuchlichsten

Aluminium-, Magnesium- und Titanlegierungen sowie für verschiedene Stahlsorten liegen umfangreiche Materialdatenbanken vor.

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten sollten im Rahmen des Forschungsprojektes verfahrensorientierte Versuche zum prinzipiellen Nachweis der praktischen Umsetzbarkeit von beschichteten IHU-Werkzeugaktivteilen realisiert werden. In Vorversuche konnte zunächst anhand der Maßhaltigkeit der ausgeformten Bauteile und deren Oberflächenqualität die Umsetzbarkeit der erforderlichen thermischen Prozessparameter gezeigt werden.

Ein vorhandenes Basiswerkzeug wurde für die Durchführung von temperierten IHU-Versuchen modifiziert und konnte auf der am Fraunhofer IWU vorhandenen Gas-Forming-Anlage eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um ein modular aufgebautes Werkzeugsystem (Abb. 32). Die Kernzone des Aktivteilbereiches ist wechselbar gestaltet, so dass verschieden beschichtete Segmente getestet werden können.

In Rücksprache mit dem Arbeitskreis konzentrierten sich die Untersuchungen auf die Basis - Geometrie „T-Stück“ zur Ausformung unterschiedlicher Domhöhen. Entsprechend des definierten Untersuchungsprogramms konnte so die tribologische Wirkung der unbeschichteten und beschichteten IHU-Aktivteile aus Werkzeugstahl (1.2379) und aus sprühkompaktierten Aluminium (Peak S 250) charakterisiert werden.

Der Focus bei der Auswertung der umformtechnischen Untersuchungen lag dabei auf

- einer vollständigen Ausformung des Bauteils (ausgeformte Domhöhe beim T-Stück als Maß für die Gleitwirkung der Beschichtung),
- den erzielbaren Oberflächengüten am Bauteil,
- der Einschätzung der Werkzeugbeschichtung bzgl. Rissbildung und Abplatzungserscheinungen,
- der Standzeit der Werkzeugbeschichtung.

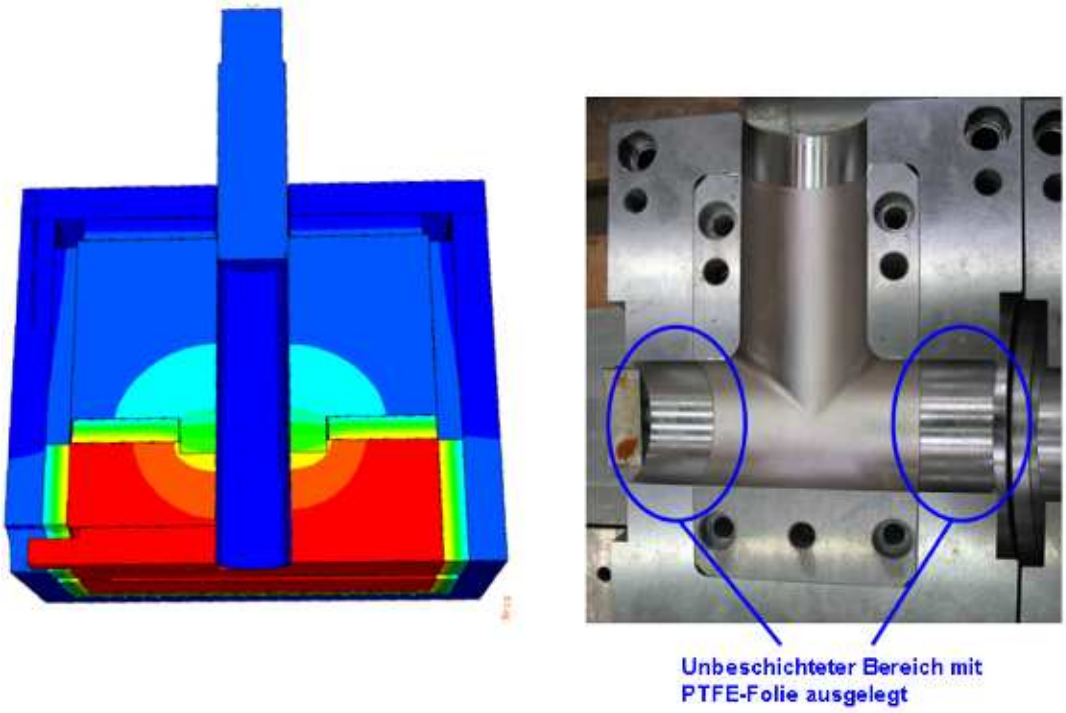


Abb. 32: Modular aufgebauter temperierbarer IHU-Werkzeugsatz
links: simulative Darstellung „T-Stück“ mit Nachschiebereich
rechts: realer Werkzeugsatz mit beschichteten Aktivteilbereich

Folgende Parameter für T-IHU-G Versuchreihen wurden definiert:

- Werkzeugwerkstoff
  a) Werkzeugstahl 1.2379 (unbeschichtet, beschichtet)
  b) sprühkompaktiertes Aluminium (unbeschichtet, beschichtet)

- Beschichtung:
  a) CrN + a-C:H
  b) chemisch Nickel
  c) chemisch Nickel + BN)

- Schmier- und Trennmittel: (die unbeschichteten Nachschiebebereiche im T-IHU-G Werkzeugbaukasten wurden prinzipiell mit PTFE-Folien am Ausgangsrohr umwickelt)
  a) Zeller + Gmelin Drylub E1
  b) PTFE-Folie (komplettes Rohr umwickelt)

- Umformtemperatur: Werkzeug + Bauteil konstant bei 250°C

- Rohrgüte und Ausgangsmaße: AA 6016 (AlMgSi0,5 / D=60mm / s=3mm)

In Abb. 33 sind für die unterschiedlichen tribologischen Verhältnisse im Radiusbereich (Einlauf zum auszuformenden Dom) die erreichten Domhöhen dargestellt.

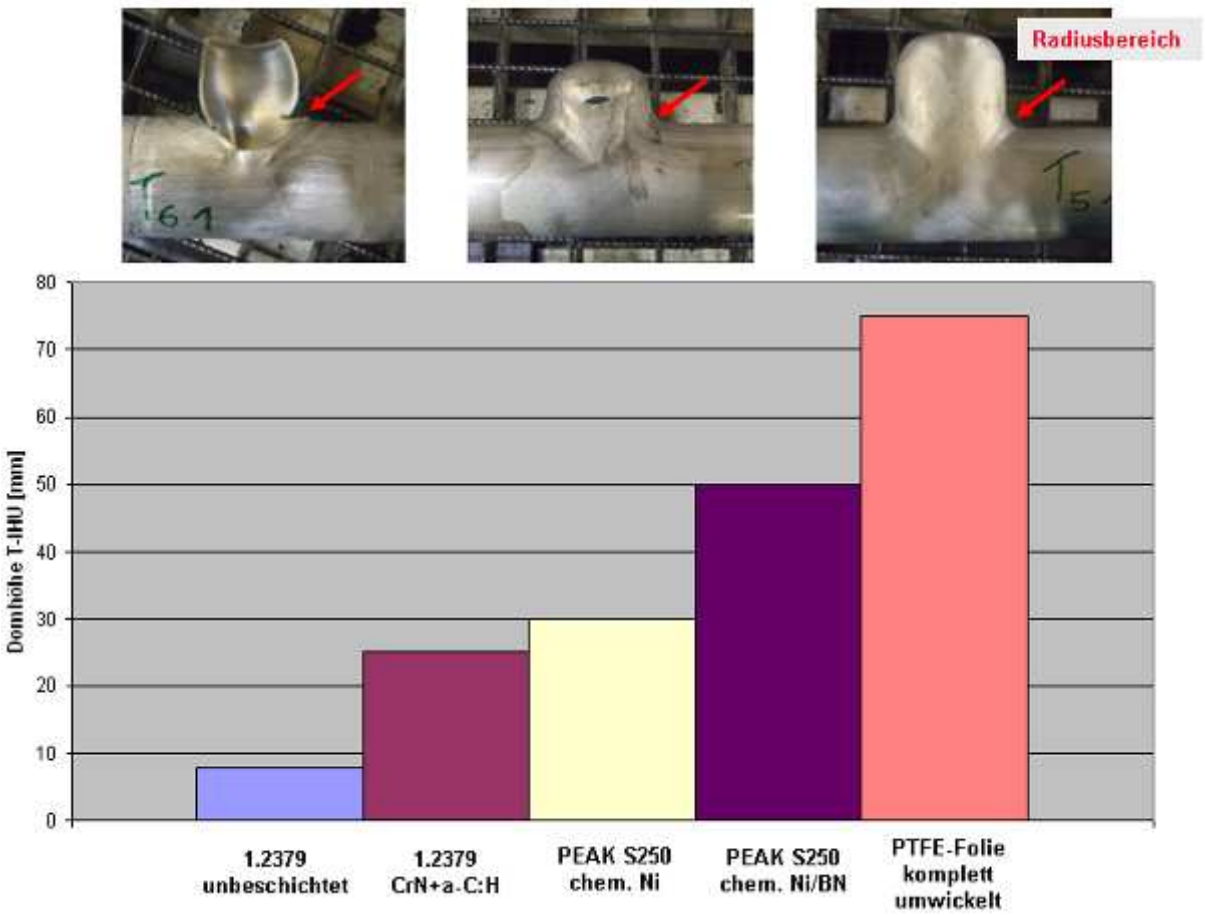


Abb. 33: Erreichte Domhöhen in Abhängigkeit von den tribologischen Verhältnissen im Radiusbereich

Fazit:

- Die größten Domhöhen bzw. das beste tribologische System konnte mittels Verwendung von komplett umwickelten Ausgangrohren mit PTFE-Folie erreicht werden (Domhöhe T=75mm).
- Beim Arbeiten mit Werkzeugbeschichtungen plus Schmiermittel Drylub E1 kam es bei allen Systemen zu Kaltaufschweißungen unterschiedlicher Größenordnung.
- Das beste Beschichtungssystem stellte die chemisch Nickel-Schicht mit Bornitridpartikeln dar. Es traten nur geringe Kaltaufschweißen auf, und es konnten dadurch Domhöhen bis H=50mm erreicht werden.
- Das Ausformen relevanter Domhöhen mittels unbeschichteter Werkzeugaktivelemente war nicht möglich.
- An keiner der Beschichtungen kam es zu Abplatzungen. Beschädigungen am Werkzeug traten nicht auf.

4.9 Untersuchung der Blechoberflächen im Hinblick auf die Lackierbarkeit

Verantwortlich: Fraunhofer IPA (FPL)

Zu den Arbeitsaufgaben in dem Berichtzeitraum gehörte, das Verhalten der Schmierstoffe (Drylube E1, Drylube E1-Plus und Drylube C1, der Fa. Zeller & Gmelin) auf den verschiedenen Aluminiumwerkstoffen (Al 2024 pl./unpl., Al 6016 std., Al 7020 unpl., Al 7075 pl./unpl.) bezüglich ihrer Überlackierbarkeit und Reinigung zu untersuchen. Dabei ist von entscheidender Bedeutung ob und wie sich die Schmierstoffe bei der Umformung der Al-Werkstoffe verändern und wie sie die Überlackierbarkeit der Bauteile beeinflussen können.

4.9.1 Auswahl eines geeigneten Reinigungsverfahren für Al-Oberflächen

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Schmierstoffen für das kalte und warme Umformen fester und hochfester Aluminiumlegierungen ist unter anderem ihre Entfernbarkeit von den umgeformten Metalloberflächen.

Für die Oberflächenreinigung der mit Hotmelts beschichteten Al-Prüfbleche wurde sowohl die Reinigung nach der VDA-Norm 230-202:2004 (Hilfsstoffe für die Produktion - Hotmelt; 5.9) als auch mit Leitungswasser ausgewählt. Zur Beurteilung der Effektivität der unterschiedlichen Reinigungsmethoden, als auch der erhaltenen Reinheit der Aluminiumoberfläche wurde die IR-Mikroskopie verwendet. Des Weiteren wurde die Bewertung der Überlackierbarkeit von entsprechend gereinigten Al-Blechen als Auswahlkriterium eingesetzt.

4.9.2 Untersuchung der Überlackierbarkeit von nicht umgeformten Al-Blechen

Bei der weiteren Verarbeitung umformtechnisch hergestellter Bauteile ist die Überlackierbarkeit ein wichtiges Kriterium. Sie wird bestimmt durch:

- den chemischen Zustand der Bauteiloberfläche, definiert durch Bestandteile der verwendeten Schmierstoffe und Öle, Reste des eventuell verwendeten Reinigungsmittels, Spuren der Werkzeugbeschichtung sowie durch gebildete Oxide und Salze der Bauteillegierung
- Topographie der Bauteiloberfläche, bestimmt durch die Abrasion und Adhesion

Für die Untersuchung der Überlackierbarkeit wurden nicht umgeformte Al-Bleche verwendet, wobei diese den bei dem Umformungsprozess typischen Temperaturbelastungen ausgesetzt wurden. Entsprechend wurden die ausgewählten Schmierstoffe auf allen Al-Blechtypen mit den vorgeschriebenen Schichtdicken aufgetragen und bei zwei verschiedenen Objekttemperaturen (250℃, 310℃) 60 Sekunden lang belastet.

Die Überlackierbarkeit wurde an diesen entsprechend vorbelasteten Prüfblechen, bei zwei unterschiedlichen Oberflächenreinheiten, getestet. Folgende Prüfblechreinigungen wurden angewendet:

- Reinigung entsprechend den Richtlinien der VDA-Norm 230-202
- Reinigung durch 10 min Spülung mit Leitungswasser

Die Beurteilung der vorbelasteten und gereinigten Prüfbleche, welche zusätzlich mit einer lösemittelhaltigen, sowie mit einer wasserhaltigen Epoxidgrundierung beschichtet waren, erfolgte gemäß der Internationalen Qualitätsrichtlinien für die Beschichtung von Bauteilen aus Aluminium GSB AL 631:2007. Hierfür wurden die beschichteten Prüfbleche 170 h lang einer sauren Salzsprühnebelprüfungen (DIN EN ISO 9227:2006) unterzogen und auf Nasshaftfestigkeit mittels Gitterschnitt (DIN EN ISO 2409:2007), auf Blasengrad (DIN EN ISO 4628-2:2004), sowie auf der von einem Ritz ausgehenden Enthaftung (DIN EN ISO 4628-8:2005) bewertet.

Überraschenderweise wurden sowohl bei einer Temperaturbelastung von 250℃, als auch bei einer Temperaturbelastung von 310℃ analoge Trends innerh alb der Bewertungsergebnisse gefunden. In den Tabellen 7 und 8 sind die bei den Belastungstemperaturen 250 und 310℃ erhaltenen Ergebnisse dargestellt.

Werden die in Tabelle 7 und 8 aufgeführten Resultate bewertet, so ergibt sich, dass die Lackhaftfestigkeit auf den untersuchten Al-Blechen hauptsächlich von der Reinigungsart bestimmt wird. Auf allen Prüfblechen, welche vor der Lackierung durch Spülung mit Leitungswasser gereinigt wurden, bildeten sich vorzeitig, schon während der Salzsprühnebelprüfung, Blasen. Ferner konnte eine verstärkte Unterwanderung festgestellt werden.

Die Beurteilung der Nasshaftfestigkeit von den mit wasserhaltiger Epoxidgrundierung beschichteten Prüfblechen ergaben GT-Werte zwischen 4 und 5, welche einer nicht zufriedenstellenden Lackhaftung entsprechen. In diesem Fall hängt die Nasshaftfestigkeit nicht von dem gewählten Reinigungsverfahren der Al-Bleche ab.

Ferner kann festgestellt werden, dass die Nasshaftfestigkeit und der Blasengrad der Lacke auf den mit Hotmelts Drylube E1 und Drylube E1-Plus beschichteten Al-Blechen sich grundsätzlich nicht unterscheiden. Bezüglich der Unterwanderung wurde bei diesen Prüfblechen ein deutlicher Vorteil der lösemittelhaltigen im Vergleich zur wasserhaltigen Beschichtung gefunden. Ausschließlich für die mit dem wasserhaltigen Schmiermittel (Drylube C1) behandelten und nachträglich mit lösemittelhaltiger Epoxidgrundierung beschichteten Al-Werkstoffe konnte eine vergleichbare Lackhaftfestigkeit bei den mit Leitungswasser gespülten Proben und den unter Durchführung der genormten Reinigung erhaltenen Proben festgestellt werden.

Tabelle 7: Prüfblechbewertung nach GSB AL 631:2007 bei Belastungstemperatur 250℃

Werkstoff-bezeichnung		Schmiermittel	Reinigung	GT		Blasengrad		Unterwanderung [mm]	
				LM	WB	LM	WB	LM	WB
2024	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M1(S2)	M2(S5)	1	4
			Wasser	5	5	M3(S4)	M4(S5)	2	8
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	1	4	M2(S2)	M3(S5)	-	4
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S5)	2	3
		Drylube C1	VDA 230-202	4	5	M1(S2)	M4(S5)	2	6
			Wasser	4	5	M2(S2)	M4(S5)	1	4
	platiniert	Drylube E1	VDA 230-202	3	5	M2(S3)	M1(S3)	-	-
			Wasser	5	5	M3(S4)	M3(S5)	-	2
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	3	5	M1(S4)	M2(S4)	-	2
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S4)	-	6
		Drylube C1	VDA 230-202	4	4-5	M2(S3)	M4(S5)	3	7
			Wasser	4	5	M4(S5)	M3(S5)	-	3
7075	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	1	5	M1(S2)	M3(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M4(S5)	M4(S5)	1	5
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M2(S3)	M3(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M4(S5)	M4(S5)	-	4
		Drylube C1	VDA 230-202	3	5	M2(S2)	M4(S5)	-	2
			Wasser	5	5	M4(S5)	M4(S5)	-	6
	platiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M2(S3)	M2(S5)	-	5
			Wasser	5	5	M3(S5)	M4(S5)	1	7
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M2(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	4	5	M2(S3)	M3(S5)	2	4
		Drylube C1	VDA 230-202	3	5	M1(S2)	M3(S3)	-	3
			Wasser	5	5	M3(S5)	M4(S5)	4	7
6016	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M1(S3)	M3(S4)	-	1
			Wasser	5	5	M1(S5)	M3(S5)	-	2
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M2(S2)	M3(S5)	-	2
			Wasser	5	4-5	M4(S3)	M4(S5)	-	2
		Drylube C1	VDA 230-202	1	5	M2(S3)	M2(S5)	1	2
			Wasser	4	5	M3(S5)	M4(S5)	3	3

GT - Gitterschnitt, LM - lösemittelhaltige Epoxidgrundierung, WB - wasserhaltige Epoxidgrundierung

Tabelle 8: Prüfblechbewertung nach GSB AL 631:2007 bei Belastungstemperatur 310°C

Werkstoff-bezeichnung		Schmiermittel	Reinigung	GT		Blasengrad		Unterwanderung [mm]	
				LM	WB	LM	WB	LM	WB
2024	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M1(S3)	M2(S5)	-	1
			Wasser	5	5	M3(S5)	M4(S5)	-	4
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	4-5	M2(S5)	M2(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S5)	-	2
		Drylube C1	VDA 230-202	3	5	M1(S2)	M4(S5)	-	4
			Wasser	3	5	M1(S3)	M4(S5)	-	6
	platiniert	Drylube E1	VDA 230-202	3	5	M2(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S5)	-	2
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	3	5	M2(S4)	M2(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S5)	-	1
		Drylube C1	VDA 230-202	4	5	M3(S3)	M4(S5)	-	2
			Wasser	4	5	M4(S5)	M4(S5)	-	3
7075	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	1	5	M1(S3)	M3(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M4(S5)	M4(S5)	-	1
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M2(S5)	M3(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M4(S5)	M4(S5)	-	1
		Drylube C1	VDA 230-202	3	5	M2(S3)	M4(S5)	-	-
			Wasser	4	5	M4(S5)	M4(S5)	-	2
	platiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M2(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M3(S5)	M3(S5)	-	1
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M2(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	4	5	M2(S3)	M3(S5)	-	-
		Drylube C1	VDA 230-202	3	4-5	M2(S3)	M3(S3)	-	3
			Wasser	3	5	M4(S5)	M4(S5)	-	4
6016	unplatiniert	Drylube E1	VDA 230-202	2	5	M1(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	4	5	M1(S5)	M3(S5)	-	2
		Drylube E1Plus	VDA 230-202	2	5	M1(S3)	M2(S5)	-	-
			Wasser	5	5	M4(S3)	M4(S5)	-	2
		Drylube C1	VDA 230-202	1	5	M1(S3)	M2(S5)	1	2
			Wasser	4	5	M4(S5)	M4(S5)	2	3

GT - Gitterschnitt, LM - lösemittelhaltige Epoxidgrundierung, WB – wasserhaltige Epoxidgrundierung

4.9.3 Untersuchung der Überlackierbarkeit von umgeformten Al-Blechen

Die Bewertungen bezüglich der Überlackierbarkeit für die mit verschiedenen Werkzeugen umgeformten Al-Bleche (AA 2024 und AA 6016) erfolgte gemäß der Internationalen Qualitätsrichtlinien für die Beschichtung von Bauteilen aus Aluminium GSB AL 631:2007. Vor der Lackierung wurden die Al-Prüfbleche konform mit der VDA-Norm 230-202 gereinigt.

In den folgenden Tabellen 9 bis 11 sind die Ergebnisse der Untersuchung der Überlackierbarkeit von umgeformten Al-Blechen anhand solcher Bewertungskriterien wie Nasshaftfestigkeit mittels Gitterschnitt (DIN EN ISO 2409:2007), Blasengrad (DIN EN ISO 4628-2:2004) und Enthaftung von einem Ritz ausgehenden (DIN EN ISO 4628-8:2005) dargestellt.

Die in den Tabellen 9 und 10 aufgeführten Bewertungsresultate für die umgeformten AA 6016-Bleche zeigen, dass generell die Unterwanderung und Gitterschnittwerte für die wasserhaltige Epoxidgrundierung im Vergleich mit der lösemittelhaltigen Epoxidgrundierung gleich oder größer ausfallen und damit einen Trend zur Verschlechterung der Schutzeigenschaften der wasserhaltigen Beschichtung signalisieren. Im Allgemeinen trifft dies auch beim Bewertungskriterium Blasengrad zu. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Beschichtung mit dieser wasserbasierenden Epoxid-

grundierung von den AA 6016 Blechen keine ausreichende Qualitätsdifferenzierung bezüglich der Überlackierbarkeit ermöglicht.

Bei den mit lösemittelhaltiger Epoxidgrundierung beschichteten Al-Blechen fällt auf, dass Drylube C1, unabhängig vom verwendeten Werkzeugtyp und der eingestellten Gegenkraft, eher bei den niedrigen Blechtemperaturen (150 oder 200℃) die besten Ergebnisse bezüglich Blasengrad, GT und Unterwanderung aufweist.

Der Einfluss des verwendeten Umformwerkzeuges auf die Qualität der Überlackierbarkeit konnte festgestellt werden. Bei Verwendung der oberflächenmodifizierten Werkzeuge im Vergleich zum unbeschichteten Werkzeug aus 1.2379 ist ein, wenn auch kleiner, positiver Effekt hinsichtlich der Lackierungsqualität feststellbar. Zwischen den optimierten Schichtsystemen war keine eindeutige Differenzierung möglich.

Es ist ferner ersichtlich, dass die Nasshaftfestigkeit der Lacke bei den Proben mit Hotmelts Drylube E1-Plus im Vergleich zu den Blechproben mit Drylube E1 besser ist. Dies gilt auch in Bezug auf den festgestellten Blasengrad.

Die in Tabelle 11 aufgeführten Bewertungen für die umgeformten AA 2024-Bleche bestätigen erneut, dass die Unterwanderung und Gitterschnittwerte für die wasserhaltige Epoxidgrundierung im Vergleich mit der lösemittelhaltigen Grundierung größer ausfallen und somit den Trend zur Verschlechterung der Schutzeigenschaften der wasserbasierten Beschichtung aufzeigen. Auch dieses Ergebnis ist unabhängig von dem verwendeten Werkzeugtyp und der eingestellten Gegenkraft.

Bezüglich der Qualität der Überlackierbarkeit verhält sich das beschichtete AA 2024 generell ähnlich wie AA 6016 mit dem Unterschied, dass die optimale Umformtemperatur tendenziell höher liegt und zwar bei 200℃ wenn nicht sogar bei 250℃.

Außerdem ist zu erkennen, dass die Bewertungen der umgeformten Al-Bleche AA 2024 T3 plattiert und 2024 plattiert nicht mit jenen der Al-Bleche AA 2024 T4 in Einklang gebracht werden können. Hierfür könnten die unterschiedlichen Blechdicken verantwortlich sein.

Tabelle 9: Bewertungsergebnisse nach GSB AL 631:2007 der mit verschiedenen Werkzeugen umgeformten AA 6016 -Bleche

						LM-Epoxidgrundierung			Wasserbasierende Epoxidgrundierung		
Werkstoff-bezeichnung	**Werkzeug**	**eingestellte Gegenkraft [%]**	**Temperatur [℃]**	**Schmierstoff Drylube**	**Probennr.**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**
6016 1,0 mm	**1.2379 blank**	5	150	E1	1.1 - 1.2	k. B.	4	4	M1(S2)	5	max
				E1 Plus	2.1 - 2.2	k. B.	4	4	k. B.	4	max
				C1	4.1 - 4.2	k. B.	4	5	M1(S5)	5	max
			200	E1	5.1 - 5.2	k. B.	4	7	M1(S5)	5	max
				E1 Plus	6.1 - 6.2	k. B.	4	6	k. B.	4	max
				C1	8.1 - 8.2	M2(S2)	5	9	M1(S5)	5	max
			250	E1	9.1 - 9.2	M1(S4)	4	7	k. B.	4	max
				E1 Plus	10.1 - 10.2	k. B.	4	2	M1(S5)	4	max
				C1	12.1 - 12.2	M2(S4)	5	max	M1(S5)	5	max
		22	150	E1	13.1 - 13.2	k. B.	3	4	M2(S3)	4	max
				E1 Plus	14.1 - 14.2	k. B.	3	3	M1(S5)	4	8
				C1	16.1 - 16.2	k. B.	3	4	M2(S3)	4	max
		20	200	E1	17.1 - 17.2	M2(S3)	3	3	M2(S5)	5	max
				E1 Plus	18.1 - 18.2	M1(S2)	3	3	M1(S5)	4	max
				C1	20.1 - 20.2	k. B.	4	2,5	M2(S5)	5	max
			250	E1	21.1 - 21.2	M1(S3)	4	5	M2(S3)	4	max
				E1 Plus	22.1 - 22.2	k. B.	4	6	M2(S5)	5	max
				C1	24.1 - 24.2	M2(S3)	4	max	M1(S5)	5	max
	1.2379 CrN+a C:H H40-08	5	150	E1	25.1 - 25.2	k. B.	4	9	M1(S2)	5	7
				E1 Plus	26.1 - 26.2	k. B.	3	8	k. B.	4	max
				C1	28.1 - 28.2	M1(S1)	5	max	k. B.	5	max
			200	E1	29.1 - 29.2	k. B.	3	5	M2(S2)	4	max
				E1 Plus	30.1 - 30.2	k. B.	4	4	k. B.	3	max
				C1	32.1 -32.2	M2(S2)	4	9	M2(S5)	5	max
			250	E1	33.1 - 33.2	k. B.	3	1	M2(S3)	5	7
				E1 Plus	34.1 -34.2	k. B.	3	2	M2(S2)	4	5
				C1	36.1 - 36.2	M2(S5)	4	max	M2(S2)	5	max
		20	150	E1	37.1 - 37.2	k. B.	1	1	M1(S2)	5	5
				E1 Plus	38.1 -38.2	M1(S5)	2	1	k. B.	3	6
				C1	40.1 - 40.2	M1(S5)	3	5	k. B.	3	9
			200	E1	41.1 - 41.2	M1(S1)	2	3	M2(S5)	3	8
				E1 Plus	42.1 -42.2	k. B.	2	2	k. B.	4	7
				C1	44.1 - 44.2	M2(S3)	5	5	M3(S4)	5	max
			250	E1	45.1 - 45.2	M2(S3)	2	4	k. B.	4	max
				E1 Plus	46.1 - 46.2	M3(S2)	3	4	M1(S5)	3	9
				C1	48.1 - 48.2	M1(S5)	4	max	M3(S4)	5	max
	1.2379 CrN+a C:H:W H38-08	5	150	E1	49.1-49.2	k. B.	2	2	M1(S2)	5	max
				E1 Plus	50.1-50.2	k. B.	2	2	k. B.	4	max
				C1	51.1-51.2	k. B.	3	4	k. B.	4	max
			200	E1	52.1-52.2	k. B.	2	4	M2(S2)	5	max
				E1 Plus	53.1-53.2	k. B.	3	4	k. B.	4	max
				C1	54.1-54.2	M2(S2)	5	5	M2(S5)	5	max
			250	E1	55.1-55.2	M1(S3)	3	3	M1(S3)	4	8
				E1 Plus	56.1-56.2	k. B.	2	5	M2(S2)	4	8
				C1	57.1-57.2	M2(S3)	4	6	M2(S4)	5	max
		20	150	E1	58.1-58.2	k. B.	1	2	k. B.	3	max
				E1 Plus	59.1-59.2	k. B.	0	1	k. B.	3	7
				C1	60.1-60.2	k. B.	1	2	M2(S3)	4	max
			200	E1	61.1-61.2	k. B.	1	1	M2(S5)	5	max
				E1 Plus	62.1-62.2	k. B.	2	2	k. B.	4	9
				C1	63.1-63.2	M2(S2)	3	2	M3(S4)	5	max
			250	E1	64.1-64.2	M1(S3)	2	4	k. B.	4	8
				E1 Plus	-	k. B.	2	2	M1(S5)	4	7
				C1	66.1-66.2	M2(S3)	4	6	M3(S4)	5	max

Tabelle 10: Bewertungsergebnisse nach GSB AL 631:2007 der mit verschiedenen Werkzeugen umgeformten AA 6016 -Bleche

						LM-Epoxidgrundierung			Wasserbasierende Epoxidgrundierung		
Werkstoff-bezeichnung	**Werkzeug**	**eingestellte Gegenkraft [%]**	**Temperatur [℃]**	**Schmierstoff Drylube**	**Probennr.**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**
6016	**S225**	5	150	E1	67.1-67.2	k. B.	2	3	M1(S2)	5	max
1,0 mm	**NiP/BN**			E1 Plus	68.1-68.2	k. B.	1	2	M2(S2)	5	max
				C1	69.1-69.2	k. B.	2	4	k. B.	4	9
			200	E1	70.1-70.2	k. B.	2	3	M2(S2)	5	max
				E1 Plus	71.1-71.2	k. B.	1	1	k. B.	4	max
				C1	72.1-72.2	M2(S2)	4	6	M2(S2)	4	max
			250	E1	73.1-73.2	M1(S3)	2	4	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	74.1-74.2	k. B.	1	4	M2(S2)	4	9
				C1	75.1-75.2	M2(S3)	4	8	M3(S3)	5	max
		20	150	E1	76.1-76.2	k. B.	2	1,5	M1(S1)	4	9
				E1 Plus	77.1-77.2	k. B.	0	1	k. B.	4	8
				C1	78.1-78.2	k. B.	1	2	M1(S2)	4	9
			200	E1	79.1-79.2	k. B.	1	1	M2(S4)	5	max
				E1 Plus	80.1-80.2	k. B.	1	1	k. B.	4	max
				C1	81.1-81.2	M2(S2)	3	3	M3(S4)	5	max
			250	E1	82.1-82.2	M1(S3)	3	3	k. B.	4	9
				E1 Plus	83.1-83.2	k. B.	2	3	k. B.	5	max
				C1	84.1-84.2	M2(S3)	4	max	M3(S4)	5	max
	S225	5	150	E1	85.1-85.2	k. B.	1	1	M1(S2)	5	max
	CrN+a C:H:W H38-08			E1 Plus	86.1-86.2	k. B.	1	2	k. B.	5	max
				C1	87.1-87.2	k. B.	3	5	k. B.	4	max
			200	E1	88.1-88.2	k. B.	1	2	M2(S2)	5	max
				E1 Plus	89.1-89.2	k. B.	2	3	M1(S2)	5	max
				C1	90.1-90.2	M2(S2)	5	8	M2(S5)	5	max
			250	E1	91.1-91.2	M1(S3)	2	3	M2(S2)	5	max
				E1 Plus	92.1-92.2	k. B.	0	2	M1(S3)	5	max
				C1	93.1-93.2	M2(S3)	4	max	M2(S2)	5	8
		20	150	E1	94.1-94.2	k. B.	1	3	M1(S2)	4	9
				E1 Plus	95.1-95.2	k. B.	0	2	k. B.	4	7
				C1	96.1-96.2	k. B.	2	4	k. B.	4	max
			200	E1	97.1-97.2	k. B.	2	2	M2(S5)	5	max
				E1 Plus	98.1-98.2	k. B.	2	2	M1(S2)	4	9
				C1	99.1-99.2	M2(S2)	3	6	M3(S4)	5	max
			250	E1	100.1-100.2	M1(S3)	2	2	M1(S3)	5	max
				E1 Plus	101.1-101.2	k. B.	1	4	M1(S2)	4	max
				C1	102.1-102.2	M2(S3)	5	max	M3(S4)	5	max

Tabelle 11: Bewertungsergebnisse nach GSB AL 631:2007 der mit verschiedenen Werkzeugen umgeformten AA 2024 -Bleche

						LM-Epoxidgrundierung			Wasserbasierende Epoxidgrundierung		
Werkstoff-bezeichnung	**Werkzeug**	**eingestellte Gegenkraft [%]**	**Temperatur [°C]**	**Schmierstoff Drylube**	**Probennr.**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**	**Blasengrad**	**GT**	**Unterwanderung [mm]**
2024 T4	**1.2379 blank**	5	150	E1	151.1 - 151.2	M2(S4)	5	5	M5(S4)	5	max
0,63 mm				E1 Plus	157.1 - 157.2	M2(S3)	4	6	M4(S3)	5	max
			250	E1	152.1 - 152.2	M1(S2)	4	8	M4(S3)	5	max
				E1 Plus	158.1 - 158.2	M2(S2)	5	8	M4(S4)	5	max
	1.2379	5	150	E1	103.1 - 103.2	k. B.	2	3	M2(S3)	5	max
	CrN+a C:H:W H38-08			E1 Plus	104.1 - 104.2	M1(S2)	2	2,5	M2(S2)	5	max
			200	E1	105.1 - 105.2	k. B.	1	3	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	106.1 - 106.2	k. B.	1	2	M2(S2)	5	max
			250	E1	107.1 - 107.2	k. B.	0	1	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	108.1 - 108.2	M2(S3)	2	2	M2(S2)	5	max
		16	150	E1	109.1 - 109.2	k. B.	1	1	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	110.1 - 110.2	k. B.	1	2	M2(S4)	4	max
			200	E1	111.1 - 111.2	k. B.	2	2	M2(S3)	4	max
				E1 Plus	112.1 - 112.2	k. B.	1	1	M2(S2)	4	max
			250	E1	113.1 - 113.2	k. B.	1	1	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	114.1 - 114.2	M2(S2)	1	1,5	M2(S3)	5	max
	1.2379	5	150	E1	115.1 - 115.2	M2(S2)	3	3	M3(S3)	5	max
	CrN+a C:H H40-08			E1 Plus	116.1 - 116.2	k. B.	1	2	M3(S3)	5	max
			200	E1	117.1 - 117.2	M2(S5)	2	3	M3(S4)	5	max
				E1 Plus	118.1 - 118.2	k. B.	1	2	M2(S3)	4	max
			250	E1	119.1 - 119.2	M1(S5)	2	2	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	120.1 - 120.2	M1(S5)	2	3	M3(S2)	5	max
		16	150	E1	121.1 - 121.2	M1(S1)	1	2	M2(S4)	5	max
				E1 Plus	122.1 - 122.2	k. B.	1	1	M2(S4)	5	max
			200	E1	123.1 - 123.2	M2(S3)	2	3	M2(S4)	4	max
				E1 Plus	124.1 - 124.2	M2(S3)	2	2	M2(S3)	5	max
			250	E1	125.1 - 125.2	M3(S2)	2	2	M2(S3)	5	max
				E1 Plus	126.1 - 126.2	M1(S5)	3	2	M3(S2)	5	max
	S225	5	150	E1	147.1 - 147.2	k. B.	3	3	M3(S2)	4	max
	NiP/BN			E1 Plus	149.1 - 149.2	M2(S2)	4	4	M3(S2)	5	max
			250	E1	148.1 - 148.2	M1(S4)	4	3	M3(S4)	5	max
				E1 Plus	150.1 - 150.2	k. B.	3	3	M2(S3)	4	max
	S225	5	150	E1	143.1 - 143.2	M2(S4)	2	2	M2(S4)	5	max
	CrN+a-C:H:W H38-08			E1 Plus	145.1 - 145.2	k. B.	3	2	M3(S4)	5	max
			250	E1	144.1 - 144.2	k. B.	2	2	M1(S4)	5	max
				E1 Plus	146.1 - 146.2	k. B.	1	2	M2(S4)	5	max
2024 T3 plattiert	**1.2379**	5	150	E1	128.1 - 128.2	k. B.	2	4	M3(S2)	5	max
1,6 mm	**CrN+a C:H:W H38-08**		250	E1	129.1 - 129.2	M3(S3)	4	3	M3(S2)	5	max
2024 plattiert	**1.2379**	5	200	E1	141.1	M1(S2)	2	5	M3(S2)	5	max
1,6 mm	**CrN+a C:H:W H38-08**		250	E1	142.1 142.2	M2(S3)	3	4	M3(S2)	5	max

4.9.4 Schlussfolgerungen

- IR-spektroskopische Untersuchungen ergaben, dass sich die Al-Bleche im Lieferzustand (mit Petrolether entfettet) nicht grundsätzlich von den mit Hotmelts beschichteten, nach VDA-Norm 230-202:2004 gereinigten Al-Blechen unterscheiden. Auch die Durchführung von Umformungen mit nachträglicher Reinigung beeinflusst die Spektren nicht. Die Al-Oberflächen können demzufolge nach einer normgerechten Reinigung als chemisch sauber betrachtet werden.

- Für die Hotmelts Drylube E1 und Drylube E1-Plus hingegen wurde eine leichte chemische Veränderung infolge der Temperaturbelastung bei 310℃ festgestellt, welche vermutlich auf eine Oxidation der Schmierstoffe zurückzuführen ist. Für Temperaturbelastungen der Proben bei ≤ 250℃ lässt sich hingegen für keines der untersucht en Schmiermittel eine thermisch bedingte, chemische Veränderung feststellen. Diese Ergebnisse konnten durch TGA Messungen bestätigt werden.

- Es zeigte sich, dass die Lackhaftfestigkeit auf den untersuchten nicht umgeformten Al-Blechen hauptsächlich von der Reinigungsart bestimmt wird. Für Prüfbleche, welche vor der Lackierung durch Spülung mit Leitungswasser gereinigt wurden, bildeten sich vorzeitig, schon während der Salzsprühnebelprüfung, Blasen, wie auch eine verstärkte Unterwanderung. Ferner kann geschlossen werden, dass die Nasshaftfestigkeit und der Blasengrad der Lacke auf den mit Drylube E1 und Drylube E1-Plus beschichteten Al-Blechen sich grundsätzlich nicht unterscheiden. Bezüglich der Unterwanderung wurde bei diesen Prüfblechen ein deutlicher Vorteil der lösemittelhaltigen im Vergleich zur wasserhaltigen Beschichtung gefunden. Ausschließlich für die mit dem wasserhaltigen Schmiermittel Drylube C1 behandelten und nachträglich mit lösemittelhaltiger Epoxidgrundierung beschichteten Al-Werkstoffe wurde eine vergleichbare Lackhaftfestigkeit für die mit Leitungswasser gespülten und normgerecht gereinigten Proben festgestellt.

- Bei den umgeformten AA 6016 und AA 2024-Blechen wurde festgestellt, dass generell die Unterwanderung und Gitterschnittwerte für die wasserhaltige Epoxidgrundierung im Vergleich zu der lösemittelhaltigen Grundierung gleich oder größer ausfallen und somit einen Trend zur Verschlechterung der Schutzeigenschaften der wasserhaltigen Beschichtung erkennen lassen.

- Bei den mit der lösemittelhaltigen Epoxidgrundierung beschichteten umgeformten Al 6016 Blechen fällt auf, dass Drylube C1, unabhängig vom verwendeten Werkzeugtyp und der eingestellten Gegenkraft, eher bei den niedrigen Blechtemperaturen (150℃ oder 200℃) die besten Ergebnisse bezüglich Blasengrad, Gitterschnitt und Unterwanderung aufweist.

- Bei Verwendung der oberflächenmodifizierten Werkzeuge im Vergleich zum Werkzeug 1.2379 blank ist ein, wenn auch kleiner, positiver Effekt hinsichtlich der Lackierungsqualität feststellbar. Eine zuverlässige Differenzierung zwischen den einzelnen oberflächenbeschichteten Werkzeugen ist jedoch nicht möglich.

- Es ist ferner ersichtlich, dass die Nasshaftfestigkeit der Lacke bei den umgeformten Proben mit Drylube E1-Plus im Vergleich zu den umgeformten Blechproben mit Drylube E1 leicht verbessert ist.

- Bezüglich der Qualität der Überlackierbarkeit verhält sich das beschichtete AA 2024 generell ähnlich wie AA 6016 mit dem Unterschied, dass die optimale Umformtemperatur tendenziell höher liegt und zwar bei 200℃ wenn nicht sogar 250 ℃.

4.10 Weiterführende umformtechnische Praxistests

Verantwortlich: Fraunhofer IWU

Die Simulation von ausgewählten Herstellungsprozessen für Teile aus festen und hochfesten Aluminiumlegierungen wurde mit der Ermittlung der maximal erreichbaren Ziehtiefe im „Demonstrator: Knochenwerkzeug“ bei isothermer Prozessführung durchgeführt. Bei einer Prozesstemperatur von ca. 250 °C konnte mit PAM-STA MP 2G die maximal erreichbare Ziehtiefe mit 72 mm für den Werkstoff AA 7075 (s0=1,6mm) abgeschätzt werden. Als Versagenskriterium wurde dabei das Erreichen der Bruchdehnung verwendet.

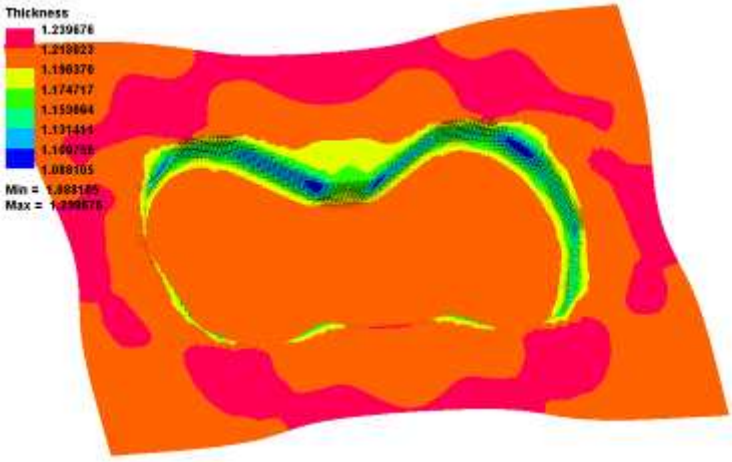


Abb. 34: Versuchswerkzeug: Blechdickenverteilung bei maximaler Ziehtiefe

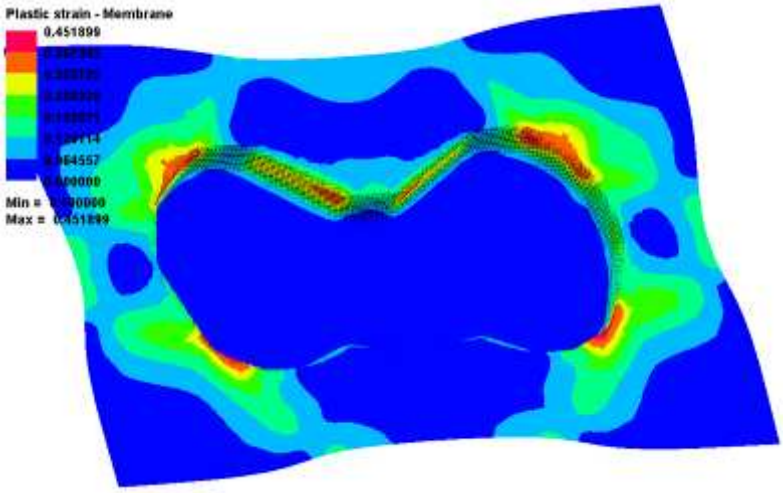


Abb. 35: Versuchswerkzeug: plastischer Vergleichsumformgrad bei maximaler Ziehtiefe

Bei der Simulation wurden eine Halbzeugtemperatur von 250 °C, eine Niederhalterkraft von 56 kN und eine Gegenhalterkraft von 5 kN angenommen. Diese Werte entsprechen im Wesentlichen den Versuchsbedingungen. Bei der im Versuch erreichten Ziehtiefe von 88 mm stellt sich in der Simulation eine Stempelkraft von 164 kN in guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ein. Im Grenzformänderungsschaubild sind noch keine Zeichen für das Erreichen eines kritischen Zustands zu erkennen. Die Ausdünnung liegt knapp unter 20%.

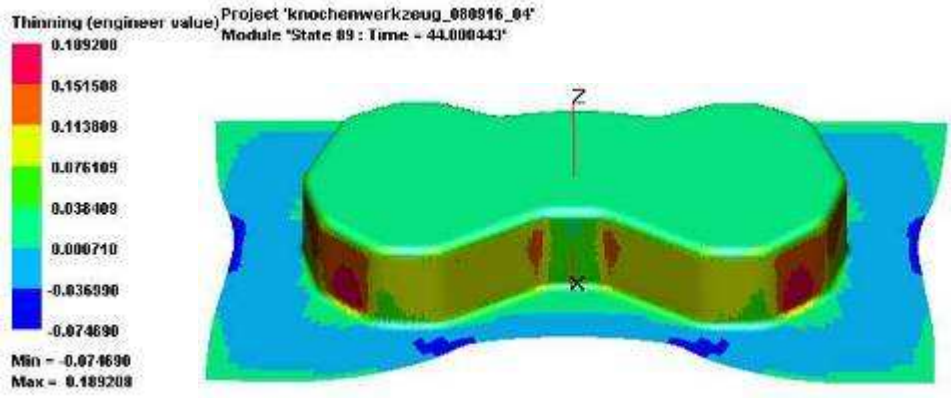


Abb. 36: Versuchswerkzeug: Ausdünnung bei maximaler Ziehtiefe t =88 mm

Neben der in der Literatur beschriebenen optimalen Umformtemperatur im Bereich zwischen 180…300 ℃, wurde ein minimaler Radius für Bauteilgeometrien von 5 mm festgelegt, der Ziehspalt wurde mit mindestens 1,3 x s_0 bestimmt. Für die Grundlagenuntersuchungen wurde am Versuchswerkzeug werkzeugseitig von einer elektrischen Erwärmung ausgegangen, während die Erwärmung der Platinen, aufgrund ihrer geringen Größe, in vorhandenen Öfen stattfand.

Die Aktivteile des Versuchswerkzeuges wurden in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis entwickelt und gebaut. Um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, wurde das in der folgenden Abbildung dargestellte Werkzeug ausgeführt. In Abb. 37 ist die Erwärmung der Aktivteile durch elektrische Heizpatronen zu erkennen.Unter Nutzung der durch die Firma amag (Ranshofen, Östereich) zur Verfügung gestellten Charge des Versuchswerkstoffes AA 7075 (s_0=1,6mm) wurden Versuche zur generellen Umformung durchgeführt. Die Basis bildeten die FEM-Ergebnisse zum Prozess. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abb. 38 dargestellt.

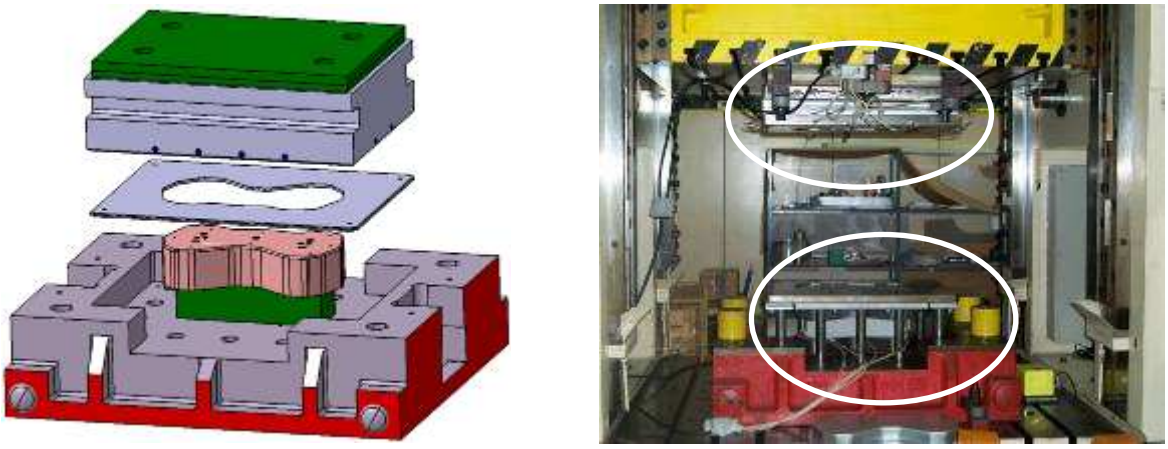


Abb. 37: Konstruktion und ausgeführtes Versuchswerkzeug

Abb. 38: Umgeformte Versuchsbauteile

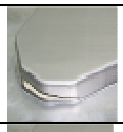
Durch Optimierungen des tribologischen Prozesses und des Zuschnitts gelang es, ein Versuchsbauteil mit einer Ziehtiefe von mehr als 100 mm herzustellen. Dies erfolgte primär durch Zuschnittsänderungen und Änderung des tribologischen Systems (Schmiermittel, Ziehfolie), während die anderen Versuchsbedingungen konstant beibehalten wurden. Wichtige Prozessschritte sind in Tabelle 12 dargestellt.

Auf Grund der im Projektverlauf bereits erlangten Ergebnisse scheiden herkömmliche, in der Kaltumformung genutzte Schmiermittel aus, da diese weder ausreichend temperaturbeständig sind, noch bzgl. der Oberflächenqualität als rückstandsfrei einzuschätzen sind. Zum Einsatz kamen aus diesem Grund hauptsächlich Neuentwicklungen verschiedener Hersteller aus dem Bereich der Trockenschmierung, deren Arbeitsbereiche oberhalb 150 °C liegen. Außerdem wurde Ziehfolie angewendet. Nachfolgend sind die Eckdaten der Versuche aufgeführt:

- SM1 (Schmiermittel 1: Zeller+Gmelin Drylube C1),
- SM2 (Schmiermittel 2: Raziol, Drylub WA 03 TLT)
- Folie: beidseitig eingelegte Teflon-Ziehfolie der Fa. PTFE Nünchritz)

Konstant: unbeschichtetes Werkzeug
Feinblech: AA 7075, s_0=1,6mm

Tabelle 12: Relevante Schritte und Ergebnisse bei der Herstellung des Versuchsbauteils

F_N gesamt	Ziehtiefe	Stößelkraft	Schmierung	Zuschnitt	90°Ecken	Zustand	Temperatur (°C)		
kN	mm	kN		mm			Anlage	WZ außen	WZ innen
56	28	106	SM1	370 x 580		Reißer	280	240	230
56	38	106	SM2	370 x 580		Reißer	280	240	230
56	38	106	Folie	370 x 580	-	i.O.	280	240	230
56	38	103	SM1 + Folie	390 x 600	-	i.O.	280	240	230
56	38	100	SM2 + Folie	390 x 600	-	i.O.	280	240	230
56	88	128	SM1 + Folie	430 x 640	-	i.O.	280	240	230
56	88	122	SM2 + Folie	430 x 640	-	i.O.	280	240	230
56	88	138	Nur Folie	430 x 640	-	Reißer	280	240	230
56	103	160	SM1 o. 2 + Folie	470 x 740	50	i.O.	280	240	230

Die Maßhaltigkeit des Ziehteils vor dem Beschnitt ist sehr genau. Abweichungen vom 90°-Zargenwinkel nach Öffnen des Werkzeuges und som it der Freisetzung der inneren Spannungen sind fast nicht vorhanden, was nicht zuletzt auch auf die temperierte Umformung zurückzuführen ist. Gleiches gilt für den umlaufenden Radius am Stempel (R 5), der äußerst genau abgebildet wird (+ s_0 = 1,24 mm). In Abb. 39 sind schematisch die ermittelten Durchschnittswerte beider Messwerte für Versuchsbauteile mit einer Ziehtiefe über 60 mm dargestellt.

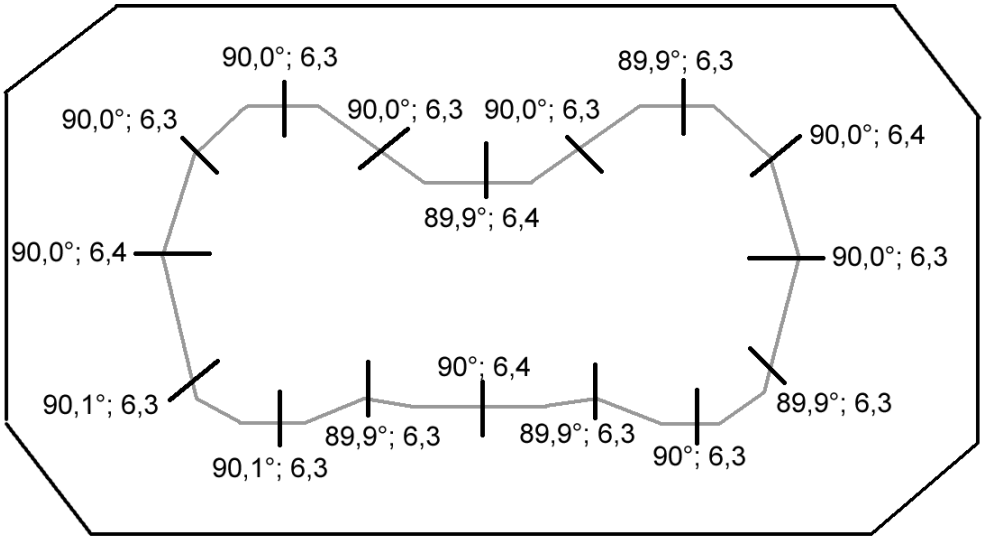


Abb. 39: Maßhaltigkeit der Bauteile

Als besonders geeignet bezüglich der erreichbaren Ziehtiefe hat sich dabei das teflonhaltige Produkt Drylub WA 03 TLT von RAZIOL Zibulla & Sohn GmbH erwiesen. Mit diesem unterhalb von 300℃ ungiftigen Trockenschmiermittel gelang es, bei einem Auftrag von ca. 1-2 g/m² einen kurzfristigen Trocknungsprozess (< 30 sec) an der Luft (!) zu erreichen. Nachteilig ist, dass die Oberflächenqualität nach der Umformung nur bedingt für Außenhautteile im Automobilbau geeignet ist. Reinigungsprozesse, wie sie bereits heute im Automobilbau für andere Bauteile üblich sind, können die im Schmierstoff enthaltenen Teflonpartikel nicht zuverlässig entfernen.

Die Anwendung des Schmiermittels Drylub Wa 03 ist eine aktuelle Entwicklung der Firma Raziol für den Temperaturbereich von 200 bis 300℃ und konnte somit in die Grundlagenuntersuchungen nicht mehr nachträglich integriert werden. Es wurde erst während der Realteilversuche stichprobenartig in das Projekt einbezogen. Es erfordert eine hohe Oberflächenqualität der Feinbleche im Anlieferungszustand, um den Anteil von Teflonpartikeln, die in der Oberfläche des Finalbauteils festsitzen, klein zu halten und somit eine anschließende Lackierfähigkeit zu garantieren. Weitere Kontaminierungsanalysen sind für eine gesicherte industrielle Anwendung erforderlich.

Weiterhin zeigt auch der wasserlösliche Schmierstoff C1 sehr gute Umformergebnisse. Dieses Schmiermittel kann vorab auf die Oberfläche aufgebracht werden und stellt eine Art Trockenschmierstoff dar, der nach dem Trocknen auf der Oberfläche festhaftet. Der Schmierstoff C1 benötigt nach der Umformung nur einen sehr einfach zu realisierenden Reinigungsprozess und garantiert somit eine sehr gute Lackierfähigkeit (vgl. Abschnitt 4.9).

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen war, dass durch den Einsatz der teflonhaltigen Schmiermittel und Ziehfolien eine Senkung der Betriebstemperatur des Werkzeuges um ca. 10℃ auf nunmehr ca. 210 ℃ möglich wurde.

Allerdings ist zur Verwendung von teflonhaltigen Ziehfolien, welche thermisch stabil sind und beste Umformresultate ermöglichen, zu bemerken, dass hierbei die Kostenproblematik zu beachten ist. Aufgrund der hohen Kosten für die Ziehfolie sollte sich die Anwendung vorrangig auf Bauteile höchster Wertschöpfung beschränken. Weiterhin war bei der Verwendung dieser Ziehfolien festzustellen, dass eine lackierfähige Oberfläche des Finalbauteils garantiert werden kann.

5 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Schwerpunkt der Untersuchungen war die Entwicklung geeigneter Werkzeugbeschichtungssysteme in Kombination mit optimierten Schmierstoffen für die Umformung fester und hochfester Aluminiumlegierungen im Temperaturbereich bis ca. 300℃. Dieser Temperaturbereich bildet die Grundvoraussetzung für ein ausreichendes Umformvermögen von Aluminiumlegierungen der 2000-er und 7000-er Güten. Ziel des Projektes war es eine wirtschaftliche Umformung zu ermöglichen

hinsichtlich der Bildung von Kaltaufschweißungen und hohen Standzeiten der Umformwerkzeuge durch ein optimales Tribosystem in diesem erhöhten Temperaturbereich.

Auf Basis einer Vorcharakterisierung verschiedener Schichtsysteme wurden eine amorphe Kohlenstoffschicht (a-C:H) und eine nasschemisch abgeschiedene Schicht (chemisch Nickel) für die umformtechnischen Versuche ausgewählt und einer Optimierung unterzogen. Eine sehr hohe Belastbarkeit der Kohlenstoffschicht konnte durch die Kombination mit einer vorherigen Plasmanitrierung (PN + a-C:H) sowie die Verwendung geeigneter Zwischenschichten erreicht werden (CrN + a-C:H). Die Gleiteigenschaften von chemisch Nickel konnten durch den Einbau von Bornitridpartikeln verbessert werden.

Schwerpunkt der Arbeiten am IWU Chemnitz waren Tests zum tribologischen und umformtechnischen Verhalten von Schichtsystemen für Umformwerkzeuge aus dem Werkzeugstahl 1.2379 sowie aus sprühkompaktiertem Aluminium (PEAK Dispal® S220 und S250). Dazu zählten die Bestimmung des Reibkoeffizienten sowie die Einschätzung der allgemeinen Gleiteigenschaften.

In den umformtechnischen Untersuchungen zum Tiefziehen von Näpfchen aus Aluminiumlegierungen wurde festgestellt, dass bei den entwickelten Beschichtungsvarianten die sehr guten Gleiteigenschaften bei Raumtemperatur auch bei Temperaturen um 250°C erhalten bleiben und die Oberflächen der Bauteile als sehr gut definiert bezeichnet werden können. Weiterhin konnte der Schmiermittelbedarf deutlich gesenkt werden. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurden die Nickel-Schichten mit Bornitrid versetzt, was zu einer weiteren Verbesserung der Gleiteigenschaften, Senkung der Kaltaufschweißungsneigung und Erweiterung des Umformvermögens führte.

Diese Resultate bildeten den Ausgangspunkt für weiterführende umformtechnische Untersuchungen. Dabei konzentrierten sich die Arbeiten auf die Umformung mittels konventionellem Tiefziehen bei ca. 250°C und auf ein Sonderverfahren, dem T-IHU-G (Hot gasforming). Die dort gewonnenen Versuchsergebnisse bestätigten Resultate der Grundlagenuntersuchungen. So bildete zum Beispiel die maximal ausgeformte Domhöhe des Bauteils „T-Stück“ ein Maß für die Optimierung des Tribosystems. Mit unbeschichtetem Werkzeug war keine Ausformung des Doms möglich. Hohe Domhöhen und damit gute Gleiteigenschaften verkörperten chemisch Nickel/Bornitrid Schichten. Diese Resultate konnten noch einmal durch die Verwendung von PTFE-Ziehfolien verbessert werden.

Erstaunlich gute Resultate konnten mit dem wasserhaltigen Schmiermittel Drylube C1 erzielt werden. Sehr gute Gleiteigenschaften und ein gutes Reinigungsverhalten wurden festgestellt.

Ein wichtiger Punkt bei der temperierten Umformung ist der Erhalt der Lackierfähigkeit der Bauteile. Es konnte gezeigt werde, dass diese bei der Anwendung geeigneter, bereits etablierter Reinigungsverfahren gewährleistet ist. Bezüglich der Unterwanderung der Lackierung wurde bei den Prüfblechen ein deutlicher Vorteil der lösemittelhaltigen im Vergleich zur wasserhaltigen Beschichtung gefunden.

6 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen

Die bereits in Abschnitt 3.4 genannten wissenschaftlich-technischen Ziele konnten erreicht werden. Diese sind

- eine wirtschaftliche Standmenge der Werkzeuge bei der warmen Umformung fester und hochfester Aluminiumwerkstoffe zu ermöglichen,
- die umformtechnischen Grenzen für diese Werkstoffe zu erweitern, d. h. das Spektrum der umformtechnisch herstellbaren Teile zu vergrößern,
- die Bauteilqualität zu erhöhen und eine gute Lackierbarkeit der umformtechnisch hergestellten Bauteile zu gewährleisten,
- den Schmierstoffeinsatz zu reduzieren und die Verwendung chlorhaltiger Schmierstoffe zu vermeiden,
- den Kenntnisstand über die tribologischen Verhältnisse und die Wechselwirkungen im System Werkzeugbeschichtung / Schmierstoff / höherfeste Aluminiumlegierungen zu erhöhen,
- Anwendungsempfehlungen für geeignete Kombinationen aus Werkzeugbeschichtungen und Schmierstoffen geben zu können.

<u>Das Ziel des Vorhabens, eine wirtschaftliche Umformung höher- und hochfester Aluminiumlegierungen zu ermöglichen, wurde erreicht.</u>

7 Verwendung der Zuwendungen und Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Bearbeitung der Aufgabenpakete erfolgte durch die verantwortlichen wissenschaftlichen Mitarbeiter, das technische Fachpersonal und studentischen Hilfskräfte. Leichte Verschiebungen hat es bezüglich der Verteilung der Mittel auf die verschiedenen Entgeltgruppen im Vergleich zum ursprünglichen Ansatz gegeben. Diese sind den zahlenmäßigen Nachweisen der Forschungsstellen zu entnehmen.

Die geleisteten Arbeiten orientierten sich vorrangig an den unter 3.4 dargestellten Projektzielen und dem Arbeitsplan im Projektantrag. Soweit Änderungen an den Arbeitspaketen erforderlich waren, erfolgten sie in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss und sind in Abschnitt 4 erläutert. Die im Projektantrag dargestellte Begründung für die Notwendigkeit der einzelnen Arbeitspakete ist nach wie vor gültig.

8 Umsetzung der Forschungsergebnisse

Die Anwendung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens ist in den Fachgebieten Werkzeugherstellung, Produktion, Verfahrenstechnik sowie Werkstoff/Materialien möglich. Von großem Interesse sind die Projektergebnisse vor allem für: Hersteller und Lieferanten von Aluminiumlegierungen, Werkzeugbauer, Werkzeugbeschichter, Schmierstoffhersteller, Fertiger von Umformteilen, Anwender von Umformteilen (z.B. im Fahrzeug-, Flugzeug-, Maschinenbau) sowie für Lackierer/Beschichter von Umformteilen.

Mit der Nutzung der Forschungsergebnisse in der industriellen Praxis sind die bereits unter 3.4 genannten Effekte zu erwarten, wie z. B.

- Erschließung neuer Märkte für die Unternehmen der Umformtechnik, der Beschichtungs- und Schmierstofftechnik, die Hersteller von Aluminiumwerkstoffen sowie für die Unternehmen, die mit Bauteilen aus höherfesten Aluminiumlegierungen beliefert werden.
- Produktivitätssteigerung bei Umformoperationen durch die mögliche Standmengenerhöhung und die Verringerung der Umrüst- und Einrichtaufwendungen.
- Reduzierung des Aufwandes für die Beschaffung und Entsorgung der Schmierstoffe sowie für die Reinigung der Bauteile durch die möglichen Schmierstoffeinsparungen und die Vermeidung chlorhaltiger Schmierstoffe
- Sicherung von Arbeitsplätzen im Wirtschaftsstandort Deutschland in Folge des Know-how-Vorsprungs bei der Umformung hochfester Aluminiumlegierungen.

Durch die enge Zusammenarbeit der drei Forschungsstellen mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses ist eine rasche Umsetzung der Forschungsergebnisse gewährleistet. Darüber hinaus ist eine weitere Verbreitung der Ergebnisse durch ein bestehendes Netzwerk aus Anwendern der Umformtechnik, Werkzeugbauern, Lohnbeschichtern, Schmierstoffherstellern, Lieferanten von Blechwerkstoffen und den Fraunhofer Instituten gegeben, die bereits in zahlreichen Projekten zusammenarbeiten. Durch die Verbreitung der Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften, bei Workshops und Vortragsveranstaltungen, gemäß den Richtlinien der EFDS, stehen die Ergebnisse darüber hinaus allen interessierten Unternehmen zur Verfügung.

9 Literaturverzeichnis

Literatur Aluminiumumformung:

/OST92/	Ostermann, F. u.a.:	Aluminium Werkstofftechnik für den Automobilbau, Expert Verlag 1992
/ROT97/	Rottländer:	Prozesskettenoptimierung beim Aluminiumeinsatz in der Karosseriefertigung. SFU Tagungsband, S. 141-177, 05./06.11.1997 Chemnitz
/AMA05a/	Fa. AMAG	http://www.amag.at
/HOF99/	Hofmann, A.; Pohl, Th., Geiger, M.:	Deep drawing of locally optimized Aluminium blanks. Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, Proceedings of the 6th ICTP, Sept. 19 - 24, 1999
/OST96/	Ostermann, F.:	Stand der Aussichten auf dem Gebiet der Aluminiumumformung. SFU Tagungsband, S. 53-68, 05./06.12.1996 Dresden
/BER05/	Berndsen, U.:	Beste Chancen für neue Entwicklungen im Flugzeugbau. http://www.corusgroup-koblenz.com/deutsch/aktuelles/presse/pdf/2005/alu_d_01_05_s8-9.pdf
/FRI94/	Friedrich, H.E.:	Voraussetzungen hochfester Aluminiumlegierungen für moderne Umform- und Fügetechniken im Flugzeugbau, Metall 48 (6) (1994) 446-450
/AMA05b/	Fa. AMAG	http://www.amag.at/dt/fs_b.htm
/CAN05/	Fa.Cannondale	http://de.cannondale.com/bikes/innovation/archive/sihollowgram.html

Literatur Kohlenstoffschichten:

/Bew00/	Bewilogua, K.; Cooper, C.V.; Specht, C.; Schröder, J.; Wittorf, R.; Grischke, M.:	Erratum to: „Effect of target material on deposition and properties of metal-containing DLC (Me-DLC) coatings“, Surface and Coatings Technology 127 (2000) 224-232
/Bew04/	Bewilogua, K.; Wittorf, R.; Thomsen, H.; Weber, M.:	DLC based coatings prepared by reactive d.c. magnetron sputtering, Thin Solid Films 447-448 (2004) 142-147
/Cla89/	Clages, C.-P.; Memming, R.:	Mater. Sci. Forum 53-53 (1989) 609
/Der99/	Derflinger, V.; Brändle, H.; Zimmermann, H.:	New hard/lubricant coating for dry machining, Surface and Coatings Technology 113 (1999) 286-292
/Don96/	Donnet, C.:	Advanced solid lubricant coatings for high vacuum environments, Surface and Coatings Technology 80 (1996) 151-156

/Hie00/	Hieke, A.:	Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC) - verschleißfest und reibarm, Mat.-wiss. U. Werkstofftech. 31 (2000) 625-628
/Hie01/	Hieke, A.:	Verschleißfeste Antihaftschichten auf Basis modifizierter diamantähnlicher Kohlenstoffschichten, Vakuum in Forschung und Praxis Nr. 1 (2001) 9-13
/Gro04/	Groche, P.; Nitzsche, G.:	Reduzierung des Adhäsionsverschleißes bei der Umformung von Aluminiumblechen. EFB/AiF Forschungsvorhaben 13313N, EFB-Forschungsbericht Nr. 230, 2004
/Mat94/	Matthews, A.; Eskildsen, S.:	Engineering applications of diamond-like carbon, Diamand Relat. Mater 3 (1994) 902-911
/Mori02/	Mori, H.; Tachikawa, H.:	Increased adhesion of diamond-like carbon-Si coatings and its tribological properties, Surface and Coatings Technology 149 (2002) 225-230
/Rei03/	Reisel, G.; Wielage, B.; Steinhäuser, S.; Hartwig, H.:	DLC for tools protection in warm massive forming, Diamand Relat. Mater. 12 (2003) 1024-1029
/Tau94/	Taube, K.; Grischke, M.; Bewilogua, K.:	Improvement of carbon-based coatings for use in the cold forming of non-ferrous metals, Surface and Coatings Technology 68/69 (1994) 662-668
/Tau98/	Taube, K.:	Carbon-based coatings for dry sheet-metal working, Surface and Coatings Technology 98 (1998) 976-984
/Web03/	Weber, M.; Bewilogua, K.; Hieke, A.; Thomsen, H.; Wittorf, R.:	Improved adhesion of DLC coatings by defined interlayer systems, International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films San Diego, April 28 to May 2, 2003

Literatur borbasierte Schichtsysteme:

/Gis94/	Gissler, W.:	Structure and properties of Ti-B-N coatings, Surface and Coatings Technology 68/69 (1994) 556-563
/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 (1995) 540-547
/Ham94/	Hammer, P.; Steiner, A.; Villa, R.; Baker, M.; Gibson, P.N.; Haupt, J.; Gissler, W.:	Titanium boron nitride coatings of very high hardness, Surface and Coatings Technology 68/69 (1994) 194-198
/Keu02/	Keunecke, M.:	Abschlussbericht Boridische und silizidische Trockenschmierstoffschichten Teilvorhaben des Fraunhofer - Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik im Teilprojekt 4 des BMBF-Verbundprojekts „Verschleißfeste PVD- / CVD-Trockenschmierstoffschichten für die umweltschonende und innovative Fertigung“, Förderkennzeichen: 03N5016D4, Zeitraum: 01.01.1998 bis 31.12.2001

/Keu04/	Keunecke, M. et al.:	Boron based and other combination tool coatings – characterization and application tests, Tagungsband „4th International Conference „THE Coatings“ in Manufacturing Engineering, Erlangen, 5.-7. April 2004
/See05/	Seebach, I.:	Entwicklung, Einsatz und Reinigung von hartstoffbeschichteten Aluminium-Strangpresswerkzeugen. Dissertation, Berichte aus Forschung und Entwicklung Nr. 22, Fraunhofer IRB Verlag 2005
/Wat95/	Watanabe, S.; Miyake, S.; Murakawa, M.:	Friction behavior of amorphous-BN-cubic-BN dual-layered film, Surface and Coatings Technology 76-77 (1995) 600-603
/Yu93/	Yu, N.; Romero-Borja, F.; Zhang, Z. H. et al.:	Formation of boron nitride and boron carbide composite by nitrogen implantation at elevated temperature, Applied Physics Letters 63 (1993) 1643-1645

Literatur CrVN Schichtsysteme:

/VDI02/	VDI-Richtlinie 3824 Blatt 1:	Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtung, Eigenschaftsprofile und Anwendungsgebiete von Hartstoffbeschichtungen. März 2002
/Lew04/	Lewis, D.B.; Creasey, S.; Zhou, Z.; Forsyth, J.J.; Ehiasarian, A.P.; Hovsepian, P.Eh.; Luo, Q.; Rainforth, W.M.; Münz, W.-D.:	The effect of (Ti + Al):V ratio on structure and oxidation behaviour of TiAlN/VN nano-scale multilayer coatings, Surface and Coatings Technology, 177-178 (2004) 252-259
/Mue00/	Münz, W.-D.; Donhue, L.A.; Hovsepian, P.Eh.:	Properties of various large-scale fabricated TiAlN- and CrN-based superlattice coatings grown by combined cathodic arc-unbalanced magnetron sputter deposition, Surface and Coatings Technology 125 (2000) 269-277
/See05/	Seebach, I.:	Entwicklung, Einsatz und Reinigung von hartstoffbeschichteten Aluminium-Strangpresswerkzeugen. Dissertation, Berichte aus Forschung und Entwicklung Nr. 22, Fraunhofer IRB Verlag 2005
/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 (2004) 627-630

Literatur Schmierstofftechnik:

/DOW77/	Dowson; Duncan:	Elasto-hydrodynamic lubrication, Pergamon Pr., Oxford, 1977, ISBN 0-08-021302-2
/BOB00/	Bobzin, K.:	Benetzungs- und Korrosionsverhalten von PVD-beschichteten Werkstoffen für den Einsatz in umweltverträglichen Tribosystemen, Dissertation RWTH Aachen 2000
/WUE02 /	Wünsch, M.; Pyka, P.:	Chlorfreie Tiefziehöle für Edelstahl, Tribologie-Fachtagung, GfT, Göttingen, 23.-25.09.2002

/LUG02/	Lugscheider, E.; Bobzin, K; Beckers, M.; Colmenares, C.; Klocke, F.; Raedt, H.-W.:	Das tribologische Verhalten von neu entwickelten PVD-Schichtsystemen für die umweltverträgliche Kaltumformung, Tribologie + Schmierungstechnik 49 (6) (2002) 19-25
/LUG03/	Lugscheider, E.; Bobzin, K.:	Wettability of PVD compound materials by lubricants, Surface and Coatings Technology 165 (2003) 51-57
/KLO05/	Klocke, K.; Maßmann, T.; Bobzin, K.; Lugscheider, E.; Bagcivan, N.:	Carbon based tool coatings as an approach for environmentally friendly metal forming processes, Wear xxx (2005) xxx-xxx (Article in press)
/POP02/	Popp, U.; Engel, U.:	Erhöhung der Lebensdauer von Werkzeugen durch Oberflächenstrukturierung, 17. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 6.-7. Februar 2002, VDI-Haus Düsseldorf

Literatur Lackiertechnik:

/MEY01/	Meyer, D.; Schulz, W.-D.:	Minimale Verschmutzung bestimmen, Metalloberfläche 55 (6) (2001) 13-18
/NAM01/	Namkanisorn, A.; Ghatak, A.; Chandhury, M.K.; Berry, D.H.:	A kinetic approatch to study the hydrolytic stability of polymer-metal adhesion, J. Adhesion Sci. Technol. 15 (14) (2001) 1725-1745
/BAG97/	Baghdachi, J.A.:	Fundamentals of adhesion, J. Coatings Technol. 69 (870) (1997) 85-91
/JUP02/	Juptner, U.:	Environmental compatible pretreatment of aluminum and other metals for powder painting, European Coatings Congress, Nürnberg 15-17 January 2002

10 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Reimund Neugebauer (Institutsleiter) Dipl.-Ing. Matthias Demmler (Projektbearbeiter)
Forschungsstelle 2:	Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST Braunschweig Prof. Dr. rer. nat. Günter Bräuer (Institutsleiter) Dipl.-Ing. Martin Weber (Projektbearbeiter)
Forschungsstelle 3:	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (vormals Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke e.V. - FPL) Stuttgart Dr. Michael Hilt (Geschäftsführer) Dr. Thadeus Schauer (Projektbearbeiter)