

ZWEZ-Chemie GmbH
Lindlar

**Umweltfreundliche tribologisch wirksame
Beschichtungssysteme für die Kaltmassivumformung
von Stangenabschnitten (Butzen) aus hochlegierten
Aluminiumwerkstoffen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33347 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Hendrik Venzlaff

Juni 2019

| | | | | | |
|--|--------------|--|-------------|---|-----------------|
| 06/02 | | Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt | |  | |
| Az | 33347 | Referat | 21/2 | Fördersumme | 43.810 € |
| Antragstitel | | Umweltfreundliche tribologisch wirksame Beschichtungssysteme für die Kaltmassivumformung von Stangenabschnitten (Butzen) aus hochlegierten Aluminiumwerkstoffen | | | |
| Stichworte | | | | | |
| Laufzeit | | Projektbeginn | | Projektende | |
| 27 Monate | | 10.11.2016 | | | |
| Zwischenberichte | | 28.06.2017 | | | |
| | | 07.01.2018 | | | |
| | | 05.07.2018 | | | |
| Bewilligungsempfänger | | ZWEZ-Chemie GmbH Herr Dr. Hendrik Venzlaff Schreinerweg 7 51789 Lindlar | | Tel 02266 9001-20 Fax 02266 9001-33 | |
| | | | | Projektleitung Herr Dr. Hendrik Venzlaff | |
| | | | | Bearbeiter Herr Dr. Michael Schwake | |
| Kooperationspartner | | | | | |
| Zielsetzung und Anlass des Vorhabens | | | | | |
| <p>Ziel des Projekts ist die Entwicklung neuer Produkte für die konversionsschichtfreie Kaltmassivumformung von Halbzeugen aus hochlegierten Aluminiumwerkstoffen mit besonderem Schwerpunkt auf der Optimierung von Einschichtschmiersystemen und der Anwendbarkeit bei einer breiten Palette von Werkstoffen und verschiedensten Umformoperationen. Durch den Verzicht auf das Aufbringen einer Konversionsschicht wird die Umweltbilanz der Oberflächenbehandlung in signifikantem Umfang verbessert im Hinblick auf Energieeinsparung und Ressourcenschonung (Chemikalieneinsatz, Wasserbedarf und Abwasseraufkommen).</p> | | | | | |
| Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden | | | | | |
| <p>In der ersten Projektphase liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung leistungsfähiger Einschichtschmiersysteme für die konversionsschichtfreie Kaltmassivumformung höherlegierter Aluminiumlegierungen. Dabei wird auch auf bisherige Erfahrungen bei der Entwicklung wasserbasierter, d.h. öl- und lösemittelfreier Einschicht-Schmierstoffsysteme für Stahlwerkstoffe zurückgegriffen, um diese weiterzuführen und speziell auf die Anforderungen bei der Aluminiumumformung abzustimmen. Parallel werden in Abstimmung mit einem Hersteller für Aluminium-Halbzeuge (Butzen) und einem Umformbetrieb Aluminiumwerkstoffe und Bauteilgeometrien / Umformstrategien für die Umformtests ausgewählt, die einen unmittelbaren Praxisbezug besitzen. Sobald sich in Vorversuchen (Beschichtungen von Werkstücken im Labor und Umformtests in geringer Stückzahl) vielversprechende Resultate der entwickelten Schmiersysteme zeigen, erfolgt die Übertragung der Beschichtungen und Tests in den industrienahen Technikummaßstab (größere Stückzahlen). Sobald sich in diesen Versuchen ebenfalls Resultate ergeben, die auf ein praxistaugliches Verfahren für die industrielle Oberflächenbehandlung von Aluminiumwerkstoffen schließen lassen, folgen in der abschließenden Projektphase Vorbereitungen für die Umsetzung im industriellen Maßstab (Übertragung auf weitere Bauteile bzw. die gesamte Fertigung, automatisierte Badführung, Bauteilreinigung).</p> | | | | | |
| Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de | | | | | |

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt wurden neuartige polymerbasierte Einschichtschmierstoffe entwickelt, optimiert und im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Diese Untersuchungen erfolgten nach Durchführung erster Vorversuche in Form von Umformversuchen mit unmittelbarem Praxisbezug durch Wahl praxisrelevanter Werkstofftypen und eines Bremskolbens aus ehemaliger Serienfertigung als Demonstratorbauteil.

In diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Einschichtschmierstoffe mindestens so leistungsfähig sein können wie das Referenzsystem aus Konversionsschicht plus Seifenschmierstoff. Daneben zeigen die Versuchsergebnisse weitere Vorteile auf, die im industriellen Einsatz von großer Bedeutung sind. Zum einen stellt die Reinigung umgeformter Bauteile durch wässrige Reinigungsverfahren keinerlei Probleme dar – quasi eine Grundvoraussetzung für deren Serieneinsatz. Zum anderen zeigte sich in den Versuchen eine reduzierte Neigung zur Verunreinigung der Werkzeuge und Pressenumgebung durch Schmierstoffrückstände. Zudem ist im Gegensatz zu Schmierstoffen auf Basis von Seifen die Staubentwicklung bei Polymerschmierstoffen kein Thema. Dies ist nicht nur aus der Sicht des Arbeitsschutzes zu begrüßen sondern bedeutet auch einen reduzierten Reinigungs- und Wartungsaufwand. Gleichzeitig zeigten die Rückstände der getesteten Schmierstoffe auch eine im Vergleich zum Referenzsystem geringere Neigung zum Zusetzen der Werkzeuge, was neben dem reduzierten Reinigungsaufwand eine Erhöhung der Produktionsleistung bedeuten kann.

Der in diesen Untersuchungen leistungsfähigste Einschichtschmierstoff bietet darüber hinaus im Vergleich zum Referenzsystem sogar Leistungsreserven. Allerdings muss hierzu einschränkend gesagt werden, dass dies – wie in der Serienfertigung auch – nur unter Einsatz eines Ölschmierstoffs zur Zusatzschmierung möglich war. Ein Verzicht auf diese Zusatzschmierung wäre selbstverständlich wünschenswert, sodass hier noch ein gewisses Optimierungspotential liegt. Möglichkeiten der Optimierung liegen z.B. in der Anpassung der Stempelgeometrie und in der mechanischen Oberflächenbehandlung der Butzen. Der Einsatz von Stahl oder auch Edelstahl als Strahlmaterial anstatt eines deutlich weicheeren Aluminiumgranulats erzeugt eine wesentlich stärkere Aufrauung der Oberfläche und damit mehr Schmierstofftaschen, die die Umformleistung des Schmierstoffs weiter steigern könnten. Eine Ausdehnung der Tests auf weitere Bauteile aus dem aktuellen Fertigungsspektrum war nicht möglich, die Wahl des untersuchten Bremskolbens kann jedoch als Referenz angesehen werden, die das Anforderungsspektrum bei der Fertigung von Aluminiumbauteilen durch Kaltmassivumformung in weiten Bereichen abdeckt. Neben dem ökologisch vorteilhaften und mit geringeren Investitionen verbundenen Beschichtungsverfahren ermöglicht der Einsatz von Einschichtschmierstoffen die Umsetzung einer vollautomatisierten und in die gesamte Produktionskette integrierte Oberflächenbehandlung im Kontext von „Industrie 4.0“. Der gesamte Fertigungsprozess wird hierdurch flexibilisiert und digital erfassbar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die wesentlichen Projektinhalte und Ergebnisse wurden im Mai 2019 auf der NEMU-Tagung (Neuere Entwicklungen in der Massivumformung) in einem Vortrag präsentiert und veröffentlicht:

H. Venzlaff: Environmentally Friendly Tribosystems for Cold Forging of High-Alloyed Aluminium Materials. Conference Proceedings on “New Developments in Forging Technology” in Stuttgart – Germany, 14.-15.05.2019, ISBN: 978-3-947085-02-6

Eine weitere Veröffentlichung in der Zeitschrift “Massivumformung” ist angedacht.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass Einschichtschmierstoffe Tribosysteme mit Konversionsschicht auch im industriellen Serieneinsatz ersetzen können. Das primäre Projektziel konnte somit erreicht werden. Darüber hinaus bieten diese Schmierstoffe noch weitere signifikante Vorteile, die in erster Linie im deutlich vereinfachten Beschichtungsverfahren selbst liegen. Es ist mit erheblich geringeren Investitionskosten verbunden und erleichtert hierdurch die Einführung dieser Produkte auf breiter Basis bei Anwendern der Kaltmassivumformung von Aluminiumwerkstoffen. Gleichzeitig bietet das Verfahren durch den Wegfall der zahlreichen (Vor-)behandlungsschritte zahlreiche ökologische wie logistische Vorteile.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Projektkennblatt..... | 2 |
| Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen..... | 5 |
| Verzeichnis von Begriffen und Definitionen | 6 |
| 1. Zusammenfassung | 7 |
| 2. Einleitung..... | 8 |
| 3. Ergebnisdarstellung..... | 14 |
| 3.1. Festlegung des Testsystems für praxisnahe Umformversuche im industriellen Umfeld..... | 14 |
| 3.2. Orientierende Vorversuche zur Schmierstoff-Auswahl im Labormaßstab (Testphase 1)..... | 17 |
| 3.3. Herstellung und Beschichtung von Butzen für praxisnahe Umformversuche | 22 |
| 3.4. Praxisnahe Umformversuche im Labormaßstab (Testphase 2)..... | 24 |
| 3.5. Praxisnahe Umformversuche im Technikumsmaßstab (Testphase 3) | 30 |
| 3.6. Umformversuche mit neuartigem pastösen Schmierstoff..... | 34 |
| 3.7. Untersuchungen zur Bauteilreinigung nach KMU | 37 |
| 3.8. Prüfung auf Inline-Tauglichkeit und vollautomatische Badführung..... | 39 |
| 3.9. Bewertung der Untersuchungsergebnisse..... | 44 |
| 3.10. Veröffentlichung der Projektergebnisse | 45 |
| 4. Fazit und Ausblick | 46 |
| 5. Literaturverzeichnis..... | 48 |
| 6. Anhänge..... | 50 |

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Aluminiumanteil im PKW | 8 |
| Abbildung 2: Übersicht Aluminium-Knetlegierungen nach Euronorm EN 573 | 9 |
| Abbildung 3: Auswahl Schmiersysteme an Hand der Legierung und des Umformgrades | 10 |
| Abbildung 4: Prozessfolge beim Aufbringen eines Schmiersystems für Aluminiumwerkstoffe mit Calciumaluminat als Konversionsschicht | 11 |
| Abbildung 5: Abmessungen der Butzen zur Herstellung der Bremskolben | 14 |
| Abbildung 6: Ausgangsbutze, umgeformter Bremskolben mit Seriengeometrie und Bremskolben mit erhöhter Napftiefe / erhöhtem Umformgrad | 15 |
| Abbildung 7: Stufenweise Erhöhung der Zustellung zur Fertigung von Bremskolben mit höherem Umformgrad.. | 15 |
| Abbildung 8: Vereinfachte Prinzipskizze zum NRFP und VVFP in Testphase 1 | 18 |
| Abbildung 9: Innenraum der in Testphase 1 eingesetzten Presse..... | 19 |
| Abbildung 10: Butze sowie mit Umformgrad $\varphi = 1,4$ napfrückwärtsfließgepresstes und vollvorwärtsfließgepresstes Teil aus Testphase 1 | 20 |
| Abbildung 11: Allgemeiner Prozessablauf bei der Butzenherstellung..... | 22 |
| Abbildung 12: Stempel für die Fertigung der Bremskolben | 25 |
| Abbildung 13: Umgeformter und gereinigter Bremskolben ohne Riefen im Napfinneren..... | 27 |
| Abbildung 14: Umgeformter Bremskolben mit deutlichen Riefen im Napfinneren | 28 |
| Abbildung 15: Ungestahlte, mit Aluminiumgranulat gestahlte und mit Stahl-Rundkorn gestahlte Butzen | 34 |
| Abbildung 16: Trommel mit Alubutzen und pastösem Schmierstoff ZWEZ-Lube AX..... | 35 |
| Abbildung 17: Prinzipskizze einer Beschichtungsanlage für Einschichtschmierstoffe im Trommeltauchverfahren | 39 |
| Abbildung 18: Integration der Oberflächenbehandlung und Verkettung der Produktionsschritte..... | 40 |
| Abbildung 19: Prinzipskizze zur automatisierten und selbstregulierenden Badführung..... | 41 |
| Abbildung 20: Messwertdarstellung beim Ultraschallmesssystem der Fa. SensoTech | 42 |
| Abbildung 21: Vergleich Konzentrationsmessung nach Referenzmethode und Ultraschallmethode..... | 42 |
| | |
| Tabelle 1: Daten zur Ausgangs- und Endgeometrie der eingesetzten Werkstücke in Testphase 1..... | 18 |
| Tabelle 2: Ablauf und Badparameter bei der Butzenbeschichtung | 23 |
| Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Testphase 2..... | 30 |
| Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Testphase 3..... | 36 |
| Tabelle 5: Zusammenfassung der Reinigungstests an umgeformten Bremskolben | 38 |
| Tabelle A 1: Wichtige Werkstoffkennndaten der im Projekt untersuchten Aluminiumwerkstoffe..... | 50 |

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

| | |
|---------------------------------|--|
| A_0 [mm ²] | Fläche vor der Umformung |
| A_1 / A_0 | Oberflächenvergrößerung |
| A_1 [mm ²] | Fläche nach der Umformung |
| alutec | Fa. alutec metal innovations GmbH, Sternenfels (D) |
| AWW | Fa. Aluminiumwerke Wutöschingen AG (D) |
| CNC | Computerized Numerical Control |
| d_0 [mm] | Durchmesser vor der Umformung |
| d_1 [mm] | Durchmesser nach der Umformung |
| DIN | Deutsche Industrienorm |
| DP | Dosierpumpe |
| EN | Europäische Norm |
| HB | Brinell-Härte |
| KFP | Kaltfließpressöl |
| KMU | Kaltmassivumformung |
| ln | Natürlicher Logarithmus |
| MAK-Wert | Maximale Arbeitsplatz-Konzentration |
| MoS ₂ | Molybdändisulfid |
| NaOH | Natriumhydroxid |
| NRFP | Napf-Rückwärts-Fließpressen |
| PER | Perchlorethylen (Tetrachlorethen) |
| R_m [N/mm ²] | Zugfestigkeit |
| $R_{p0,2}$ [N/mm ²] | Streckgrenze |
| TiN | Titannitrid |
| VVFP | Voll-Vorwärts-Fließpressen |
| WB | Wärmebehandlungszustand |
| α | Winkel / Einlaufschräge |
| φ | Umformgrad |

1. Zusammenfassung

Der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen im Automobilbereich spielt im Zusammenhang mit dem Thema Ressourcenschonung durch Leichtbaukonzepte eine wichtige und stetig wachsende Rolle. Bei der Herstellung von Motor- und Antriebskomponenten bietet die Kaltmasivumformung von Aluminium gegenüber der spanenden Bearbeitung und dem Warmumformen in Bezug auf Materialnutzung, Materialeigenschaften und Energieverbrauch diverse entscheidende Vorteile, erfordert jedoch den Einsatz spezialisierter Tribosysteme.

Während niedriglegierte und damit weiche Aluminiumwerkstoffe meist unter Verwendung einfacher Schmiermittel auf der Basis von Ölen oder Metallseifen (z. B. Zinkstearat) kaltgeformt werden können (wobei letzteres mit einer erheblichen Staubbelastung während der Anwendung verbunden ist), so sind hingegen im Automobilbereich die Anforderungen bezüglich der mechanischen Festigkeit von Bauteilen so hoch, dass hochlegierte Aluminiumwerkstoffe zum Einsatz kommen müssen, bei deren Fertigung diese Schmierstoffe an ihre Leistungsgrenzen stoßen. In diesen Fällen sind bisher in Analogie zur weit verbreiteten Zinkphosphatierung von Stahlwerkstoffen Mehrschichtschmiersysteme auf Basis von Calciumaluminat erforderlich, die jedoch im Markt recht wenig etabliert sind und ebenfalls zahlreiche ökologische Nachteile aufweisen (hoher Chemikalien- und Energieeinsatz, hohes Abwasseraufkommen, Gefahrstoffpotential).

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az 33347 geförderten Projekts wurden vor diesem Hintergrund neue, für hochlegierte Aluminiumwerkstoffe ausgelegte Einschichtschmiersysteme entwickelt und mehreren aufeinander aufbauenden Testphasen zur Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit unterzogen. Nach Vorauswahl (Testphase 1) erfolgten in der 2. Phase Umformtests unter industriellen Praxisbedingungen in Zusammenarbeit mit einem Butzenhersteller (Aluminiumwerke Wutöschingen AG) und einem Aluminium-kaltumformenden Produktionsbetrieb (alutec metal innovations GmbH). Hierbei wurden Butzen aus verschiedenen gängigen Aluminiumwerkstoffen zu einem Bauteil aus der ehemaligen Serienfertigung (Bremskolben) umgeformt.

Die Ergebnisse der abschließenden Testphase 3 mit erhöhten Stückzahlen bestätigen die prinzipielle Eignung von Einschichtschmierstoffen auf Polymerbasis für die Serienfertigung, wobei eines der getesteten Produkte nicht nur mindestens so leistungsfähig wie das konventionelle Tribosystem aus Aluminat und Seifenschmierstoff ist, sondern darüber hinaus Vorteile aufgrund geringerer Rückstände im Werkzeug sowie zusätzlicher Leistungsreserven zeigt.

Der industrielle Einsatz dieser Schmierstoffe und der damit verbundene Verzicht auf eine Konversionsschicht führt zu einer umweltfreundlicheren Herstellung von Bauteilen und gleichzeitig zu kürzeren Verarbeitungszeiten, geringerem Bedarf an Lagerkapazitäten und letztendlich zu geringeren Kosten. Außerdem ermöglicht er die Integration der Oberflächenbehandlung in den gesamten Produktionsprozess im Sinne von Industrie 4.0.

2. Einleitung

Der Werkstoff Aluminium besitzt gerade im Automotive-Sektor ein hohes Potential wenn es um die Schonung von Ressourcen unter dem Stichwort „Leichtbau“ geht. Aluminium besitzt eine im Vergleich zu Stahl um rund 2/3 reduzierte Dichte, die es unter anderem sehr interessant für die Konstruktion von Karosserieteilen und Fahrwerkselementen macht. Entsprechend ist hier der Aluminiumanteil in PKWs in den vergangenen Jahrzehnten stetig gestiegen (Abb. 1).

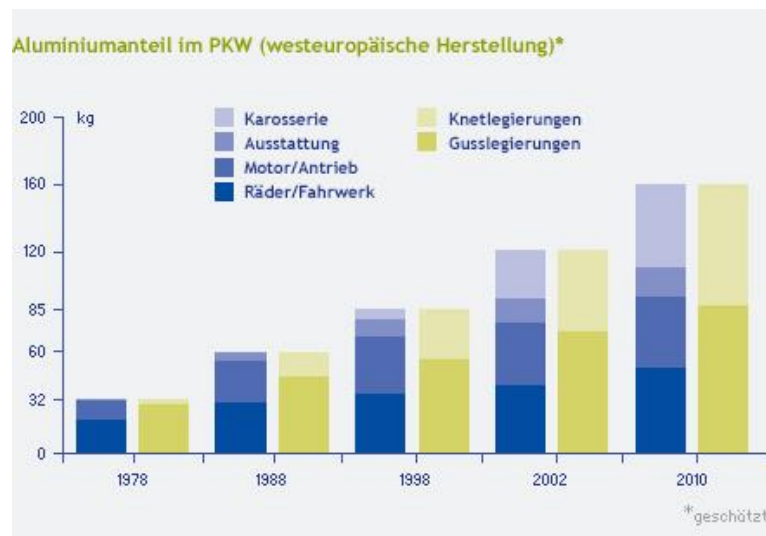


Abbildung 1: Aluminiumanteil im PKW [ALU 15]

Aber auch bei Motor- und Antriebskomponenten möchte man zunehmend Leichtbaukonzepte umsetzen, sei es beispielsweise durch den Einsatz von Hohlwellen oder filigranerer Bauteilkonstruktionen oder eben durch den Wechsel von Stahl zu Aluminium [BÜC 12]. Allerdings sollen bei diesem Wechsel die mechanischen Eigenschaften wie die hohe statische und dynamische Belastbarkeit erhalten bleiben. Um dies zu gewährleisten müssen derartige Bauteile aus höherlegierten Aluminiumwerkstoffen gefertigt werden. Hierbei können Legierungselemente wie Silicium und Magnesium dem Aluminiumwerkstoff eine Festigkeit verleihen, die der von Stahl nahekommmt. Abb. 2 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Knetlegierungen, deren Bezeichnung nach EN 573 auf Basis ihrer Hauptlegierungsbestandteile erfolgt.

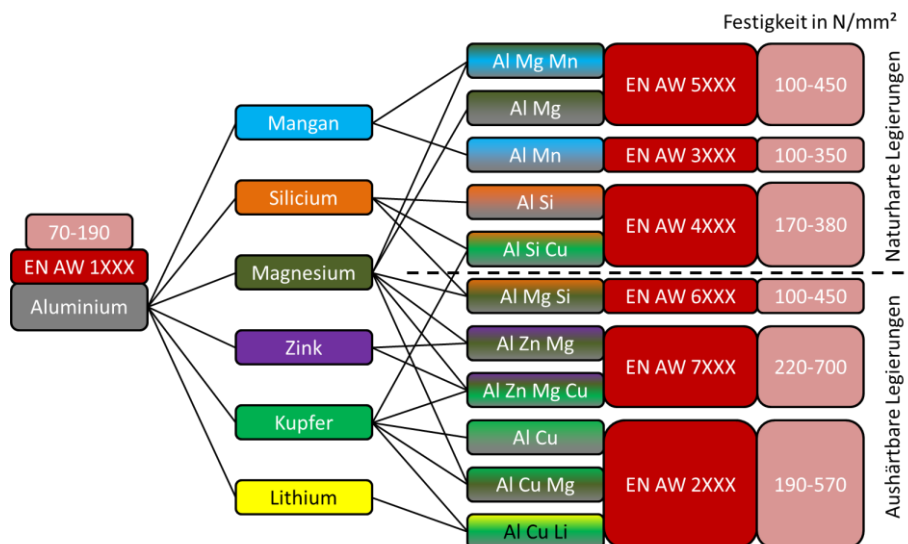


Abbildung 2: Übersicht Aluminium-Knetlegierungen nach Euronorm EN 573; A = Aluminium ; W = Erzeugnisform Knetlegierung (von engl. wrench)

Oft werden Motor- und Antriebskomponenten durch Kaltumformung hergestellt, da dieses Verfahren gegenüber der Warmumformung oder spanenden Verfahren zahlreiche Vorteile bezüglich Maßgenauigkeit, Werkstoffausnutzung, Oberflächengüte und Energieeffizienz bietet. Allerdings ist hierbei der Einsatz spezialisierter Tribosysteme erforderlich, die sich prinzipiell aus einer Schmierstoffbeschichtung des umzuformenden Werkstücks sowie einer möglichst langlebigen Beschichtung des Werkzeugs zusammensetzen, um einen Metall-Metall-Kontakt im Umformprozess zu vermeiden. Dieser würde unweigerlich frühzeitigen Verschleiß oder ein vollständiges Versagen teurer Umformwerkzeuge sowie viel kostspieligen Ausschuss bei den zu produzierenden Bauteilen verursachen. Sowohl aus ökonomischen als auch ökologischen Gesichtspunkten ist es daher geboten, das Tribosystem an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Das vorliegende Projekt hat sich auf die Entwicklung von geeigneten Schmierstoffsystemen zur Beschichtung von Werkstücken fokussiert und klammert somit die Beschichtung von Werkzeugen aus.

Die Entscheidung, welches Schmierstoffsystem für eine Umformung in Frage kommt, fällt unter Berücksichtigung der Aluminiumlegierung, des Produktionsprozesses und der zu erreichenden Umformgrade (Abb. 3).

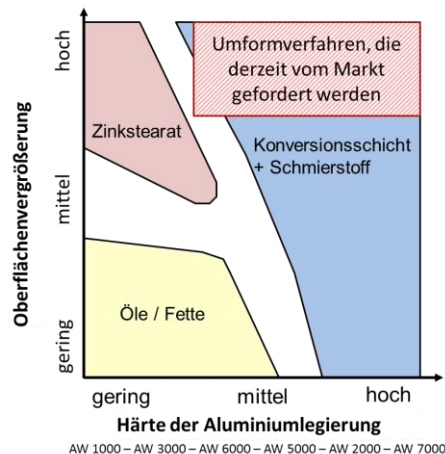


Abbildung 3: Auswahl Schmiersysteme an Hand der Legierung und des Umformgrades

Niedriglegierte Aluminiumwerkstoffe (EN AW 1xxx) besitzen eine so geringe Festigkeit, dass ölbasierte Schmierstoffe bei niedrigen Umformgraden bzw. pulverförmige Metallseifen (meist Zinkstearat) bei höheren Umformgraden ausreichend leistungsfähig sind. Letztere haben jedoch aufgrund der erheblichen Staubentwicklung beim Auftrommeln der Halbzeuge (Butzen) und bei der Umformung selbst erhebliche Nachteile in der industriellen Praxis, stellen hier dennoch weiterhin den derzeitigen Stand der Technik dar.

Da in den vergangenen Jahren die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumbauteilen stetig gewachsen sind, mussten zunehmend festere Legierungen (insbesondere aus der Gruppe EN AW 6xxx) in immer anspruchsvolleren Kaltumformoperationen zum Einsatz kommen. Für diesen in Abb. 3 gekennzeichneten Bereich fordert der Markt entsprechend leistungsfähigere Beschichtungssysteme, die den hohen Ansprüchen an das Tribosystem gerecht werden. Hier bieten bisher nur mehrschichtige Schmierstoffsysteme mit Konversionsschicht das erforderliche Leistungsniveau. Im Bereich der Stahlwerkstoffe stellt nach wie vor das System aus einer Zinkphosphatschicht plus Schmierstoff den Stand der Technik dar.

Das Zinkphosphatieren von Aluminium ist zwar prinzipiell möglich, spielt in der Praxis jedoch aufgrund zahlreicher Verfahrensprobleme keine Rolle. Stattdessen ist das Aufbringen einer Calciumaluminatschicht als Konversionsschicht für Aluminium Stand der Technik. Während der Angriff auf das Grundmetall als initiierender Schritt dabei durch Alkalität statt durch Säure wie beim Phosphatieren erfolgt, ähnelt der Prozessablauf selbst dem Zinkphosphatieren sehr und stellt ebenfalls ein vielstufiges Oberflächenbehandlungsverfahren dar, das bis zu 16 Tauchvorgänge umfassen kann, wie in Abb. 4 dargestellt.

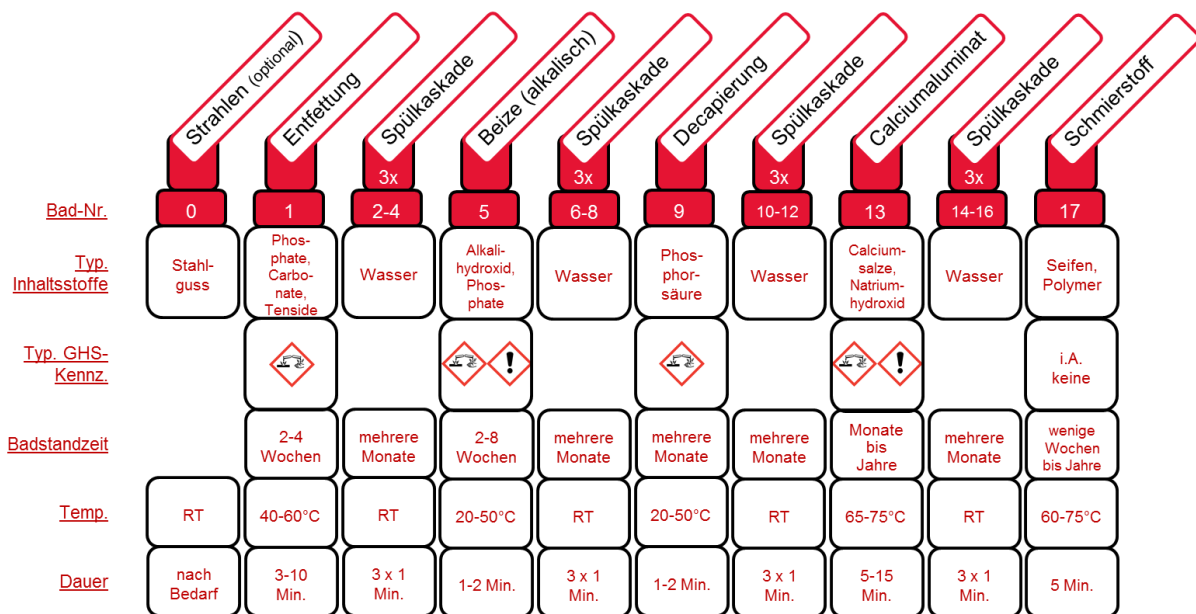


Abbildung 4: Prozessfolge beim Aufbringen eines Schmierensystems für Aluminiumwerkstoffe mit Calciumaluminat als Konversionsschicht – die Prozessschritte 5 und 9 sowie die darauffolgenden Spülschritte werden in der Praxis nur bei Bedarf durchgeführt

Ob Zinkphosphatschicht oder Calciumaluminatschicht, eine aufgebrachte Konversionsschicht dient immer sowohl als Trennschicht, um die hohen Verschleiß verursachenden Metall-Metall-Kontakte zwischen Werkstück und Werkzeug zu vermeiden, und zugleich als Trägerschicht für den Schmierstoff. Eine Konversionsschicht allein hat keinerlei schmierwirksame Eigenschaften und muss zwingend mit einem Schmierstoff kombiniert werden.

Ebenfalls in Analogie zur Zinkphosphatierung von Stahlrohlingen stellen auch bei Aluminat-behandelten Aluminiumteilen Alkaliseifen die am weitesten verbreitete Schmierstoffgruppe dar. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie nicht nur auf der Oberfläche physikalisch haften, sondern durch chemische Reaktion mit dem Calciumaluminat fest verzahnt werden. Es kommt hierbei zu einer teilweisen Umwandlung des Natriumstearats in Calciumstearat, in Analogie zu Zinkstearat, das sich mit Zinkphosphatschichten bildet. Hierdurch bildet sich ein dreischichtiges Tribosystem aus Calciumaluminat, Calciumstearat und Natriumstearat, bei dem das Calciumstearat maßgeblich schmierend wirkt.

Aus ökologischen Gesichtspunkten ist das Aufbringen eines mehrschichtigen Schmierstoffsystems mit Konversionsschicht – ob nun Zinkphosphatschicht oder Calciumaluminatschicht – mit zahlreichen Nachteilen verbunden.

So werden für die zahlreichen Bäder große Mengen an Frischwasser benötigt, das nach mehr oder weniger langer Nutzungsdauer mit erheblichen Mengen an Aluminium und weiteren Legierungsmetallen kontaminiert, als Abwasser anfällt und aufbereitet werden muss [RAU 05]. Hinzu kommt, dass zwischen allen Prozessschritten und sowohl vor wie nach der Aluminatschichtbildung die Teile gründlich gespült werden müssen. Auch wenn heutzutage derartige Spülen kaskadierend mit Rückführung in die Aktivbäder ausgelegt sind, erhöht dies den Frischwasserbedarf und Abwasseranfall.

Die stetige Erwärmung der Bäder und die daraus resultierenden Verdampfungsverluste gehen mit entsprechenden energetischen Verlusten einher. Die verhältnismäßig großen Beschichtungsanlagen sind in der Anschaffung teuer und binden Platz, der für weitere fertige Aggregate nicht mehr zur Verfügung steht [BAY 10a], [BAY 10b]. Das Entfetten und Beizen der Rohlinge bei erhöhten Temperaturen birgt die stetige Gefahr, dass sich Nebel und Dämpfe der Laugen und Säuren bzw. ätzende Aerosole bilden und in die Umgebungsluft der zumeist offenen Bäder eingetragen werden. Dies macht eine Absaugung zwingend erforderlich und erhöht damit den anlagentechnischen Aufwand. Des Weiteren muss bei dieser Art der nasschemischen Halbzeugvorbehandlung durch den Umgang mit konzentrierten Säuren und Laugen der Arbeiterschutz gewährleistet werden.

Bezüglich der energetischen Verluste haben Untersuchungen gezeigt, dass für die Oberflächenbehandlung meist nahezu gleichviel spezifische Energie benötigt wird wie für die eigentliche Umformung [HER 08]. Der hohe spezifische Energieanteil der Oberflächenvorbehandlung liegt in der stetigen Erwärmung der Reinigungslösung, des Beizmediums sowie der eigentlichen Beschichtungsbäder und den damit verbundenen Verdunstungsverlusten begründet. Die in Abb. 4 dargestellte Badfolge ist durch den Wechsel von Warm- zu Kaltbädern gekennzeichnet, so dass stetig weitere Wärmeverluste durch das aufeinanderfolgende Erwärmen und Abkühlen der Bauteile entstehen.

Hieraus wird ersichtlich, dass sich deutliche Potentiale zur Energie- bzw. allgemein Ressourceneinsparung ergeben, wenn bei der Oberflächenbehandlung auf die Bildung einer Konversionsschicht verzichtet werden kann. Im Bereich Stahl existieren bereits zahlreiche Lösungsansätze zur Beseitigung der vorgenannten ökologischen wie logistischen Nachteile der Ausbildung von Konversionsschichten durch eine vollständige Substitution der Konversionsschicht [BAY 10a], [BAY 13], [HOL 14], [GRO 15], [LUD 16]. Diese sind jedoch nicht zwangsläufig auf den Werkstoff Aluminium übertragbar.

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist somit die Entwicklung neuer Produkte auf Basis bisheriger Erfahrungen im Bereich der konversionsschichtfreien Kaltmassivumformung von Stangenabschnitten, explizit ausgerichtet auf hochlegierte Aluminiumwerkstoffe mit besonderem Schwerpunkt auf der Optimierung von Einschichtschmierensystemen.

Hierbei spielen Seifenschmierstoffe grundsätzlich keine Rolle, da ihr Funktionsprinzip zwangsläufig auf eine Konversionsschicht angewiesen ist. Schmierstoffe auf Basis von Festschmierstoffen oder polymeren Substanzen und Wachsen können hingegen auch direkt auf das Metall appliziert werden. Bei der Kaltmassivumformung von Stahlwerkstoffen bieten Festschmierstoffe auf Basis Molybdändisulfid (MoS_2) die höchste Leistungsfähigkeit und gleichzeitig höchste Temperaturstabilität. Bei Aluminium kommt MoS_2 derzeit dennoch nicht in Frage. Grund hierfür sind die schwierige Reinigung nach der Umformung sowie die Optik, die im Markt aktuell keine Akzeptanz findet.

Somit konzentriert sich die Entwicklung von Einschichtschmierstoffen für die Kaltumformung von Aluminium in diesem Projekt auf Polymerbeschichtungen, d.h. synthetisch hergestellte dünne Schichten, die sich zum überwiegenden Teil aus langkettigen polymeren Verbindun-

gen zusammensetzen. Ihre Leistungsfähigkeit beruht zum einen auf ihrem guten Haftungsvermögen an metallischen Oberflächen (adhäsive Filmbildungseigenschaften) und auf ihrem Temperatur-Viskositätsverhalten [BAR 03], [NIT 08]. Die in der aufgetragenen Schicht vorliegenden langkettigen Moleküle sind bei niedrigen Temperaturen stark verknäult. Erst während des Umformprozesses, d.h. wenn durch die Reibung von Werkstück und Werkzeug gegeneinander hohe Drücke und Temperaturen entstehen, strecken sich die Moleküle und der Film weicht auf. Durch die je nach Erweichungstemperatur der ausgewählten Polymertypen mehr oder weniger viskose Polymerbeschichtung wird das Gleiten der Reibpartner ermöglicht. Die Viskosität bestimmt die auftretenden Reibkräfte bei dieser Gleitbewegung.

Im Vergleich zu MoS₂-haltigen Schmierstoffen, die auch extremen Flächenpressungen durch das Abscheren der Gleitebenen standhalten können [NIT 10], [CZI 10], ist die Leistungsfähigkeit von Polymerschmierstoffen auch nach heutigem Stand geringer. Letztere zeichnen sich jedoch durch eine vereinfachte Teilereinigung nach der Umformung aus [BÄC 08] und ermöglichen durch niedrige Schichtgewichte von 2 - 4 g/m² eine Fertigung nahe der Endkontur des Bauteils (near-net-shape-Fertigung) [NIT 08]. Für Umformoperationen mit langen Gleitwegen oder großen Oberflächenvergrößerungen können sich die niedrigen Schichtgewichte dagegen auch nachteilig auswirken, da es zum Abreißen des Schmierfilmes kommen kann [BÄC 08]. Um diesem entgegenzuwirken ist das Aufbringen von Einschichtschmierstoffen auf eine meist durch Strahlen mechanisch aufgeraute Oberfläche vorteilhaft. Hierdurch wird ein Reservoir an Schmierstoff, sogenannte Schmierstofftaschen geschaffen [SCH 10].

Die Leistungsfähigkeit der im Rahmen des Projekts entwickelten Einschichtschmierstoffe soll unter möglichst praxisnahen Bedingungen untersucht werden. Hierzu wurden aufeinander aufbauende Umformversuche in mehreren Testphasen konzipiert, ausgehend von standardisierten Umformtests im Labormaßstab zur Vorauswahl potentiell geeigneter Schmierstoffe. Parallel wurde in enger Absprache mit einem Hersteller für Aluminiumbutzen (AWW) sowie einem aluminium-kaltumformenden Produktionsbetrieb (alutec) ein Testsystem ausgewählt, bestehend aus einem realen Demonstratorbauteil ehemaliger Serienfertigung sowie mehreren bei Automotive-Bauteilen gängigen Aluminiumwerkstoffen. Diese praxisnahen Versuche in Testphase 2 wurden in der 3. Phase mit einer deutlich größeren Teilezahl wiederholt, damit die erhaltenen Resultate eine definitive Aussage bezüglich der Serientauglichkeit der getesteten Schmierstoffsysteme erlauben. Neben der reinen Umformleistung wurden auch weitere zentrale Aspekte zur Beurteilung der Serieneignung eines Schmierstoffs untersucht, so z.B. die Bauteilreinigung nach Umformung und die Eignung für eine vollautomatische Badführung als Voraussetzung zur Implementierung von Industrie 4.0 in die Oberflächenbehandlung.

3. Ergebnisdarstellung

3.1. Festlegung des Testsystems für praxisnahe Umformversuche im industriellen Umfeld

Kern des durchgeführten Projekts zur Entwicklung leistungsfähiger umweltfreundlicher Einschicht-Schmierstoffsysteme für die Kaltmassivumformung von Aluminium stellten reale Umformtests bei einem Aluminium-verarbeitenden Umformbetrieb (alutec) dar, um den unmittelbaren Praxisbezug der Ergebnisse sicherzustellen.

Hierzu wurden zu Projektbeginn in gemeinsamer Absprache der ZWEZ-Chemie GmbH mit dem Umformbetrieb sowie dem ebenfalls projekt-unterstützenden Hersteller von Aluminiumbutzen (AWW) – die hierzu erforderlichen Rahmenbedingungen im Detail abgesteckt.

Entgegen der ursprünglichen Idee, mehrere Bauteile aus der Serienfertigung auszuwählen, deren Herstellung verschiedene Umformarten und Umformgrade abbilden, wurde dabei vereinbart, diese Tests auf ein Bauteil zu konzentrieren, das nach den Erfahrungen von alutec sehr gut zur Beurteilung der Eignung von Schmierstoffen geeignet ist. Hierbei handelt es sich um einen PKW-Bremskolben aus der ehemaligen Serienfertigung (Skizze in Abb. 5).

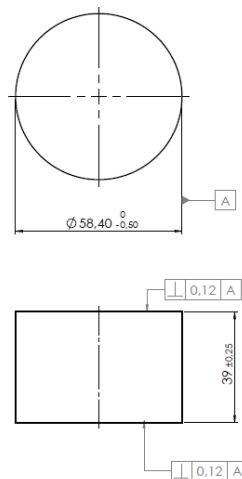


Abbildung 5: Abmessungen der Butzen zur Herstellung der Bremskolben

Auch das ursprüngliche Vorhaben, neben einstufigen Umformungen die im Bereich der Kaltmassivumformung von Stahl oft angewendeten mehrstufigen Umformungen ohne Zwischenbeschichtung miteinzubeziehen, wurde nach der ersten gemeinsamen Absprache zu Projektbeginn verworfen. Grund ist die Tatsache, dass nach Angaben von alutec mehrstufige Umformungen im Bereich der KMU von Aluminium die absolute Ausnahme sind (> 98%) und wenn sie doch zum Einsatz kommen, dann ausnahmslos 2-stufig. Ein Grund hierfür ist, dass Alu-Halbzeuge (Butzen) in wesentlich komplexeren Geometrien (beispielsweise als eckige Butzen) hergestellt werden können als dies bei der KMU von Stahl möglich wäre. Zum anderen sind in der Alu-KMU in einem einzigen Prozessschritt generell wesentlich höhere Umformgrade und damit komplexere Endgeometrien möglich. Während bei Stahl schon Um-

formgrade von 1,5 durchaus sehr anspruchsvoll sind, sind bei harten Aluminium-Legierungen Umformgrade von 2-3 möglich, bei weicheren Legierungen sogar Umformgrade bis 8.

Ein besonderer Vorteil bei der Herstellung des ausgewählten Bremskolbens liegt in der Option durch Änderungen der Pressenparameter Einfluss auf die Endgeometrie des Bauteils zu nehmen. So kann der Stempelweg (die sogenannte Zustellung) erhöht werden. Hierdurch fließt mehr Material aus dem Boden in die Wand der Kolben, die Länge der Kolben erhöht sich, es kann ein tieferer Napf hergestellt werden (Abb. 6).

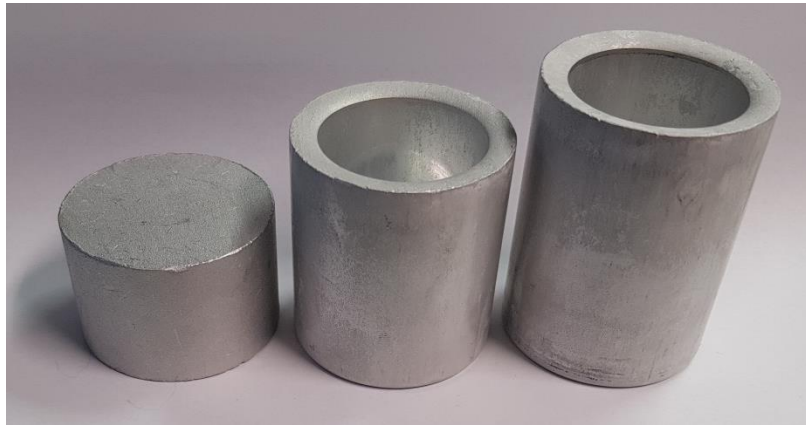


Abbildung 6: Ausgangsbütze (links), umgeformter Bremskolben mit Seriengeometrie (Mitte) und Bremskolben mit erhöhter Napftiefe / erhöhtem Umformgrad (rechts)

Für die Ermittlung der korrekten Pressenparameter erfolgte die Erhöhung der Zustellung schrittweise (Abb. 7). Als Kontrollkriterium diente dabei die Messung der Bodendicke, die ausgehend vom Serienbauteil gesenkt wurde.



Abbildung 7: Stufenweise Erhöhung der Zustellung zur Fertigung von Bremskolben mit höherem Umformgrad

Insgesamt kann durch diese Modifikation der maximale Umformgrad im Bereich des inneren Radius von $\varphi = 3,5$ bei der Seriengeometrie auf $\varphi = 4,5$ erhöht werden – ohne dass hierzu Butzen mit veränderter Geometrie eingesetzt werden müssten. Versuche mit erhöhtem Umformgrad wurden in Testphase 3 durchgeführt.

Neben dem Umformgrad und der Oberflächenvergrößerung sowie der Umformgeschwindigkeit (und damit den anfallenden Temperaturen im Umformprozess) ist die Werkstoffhärte entscheidend dafür verantwortlich wie anspruchsvoll eine Umformung ist.

Daher war im Rahmen des Projekts vorgesehen, verschiedene hochlegierte Aluminiumwerkstoffe aus unterschiedlichen Gruppen und mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften in den praxisnahen Tests zu berücksichtigen. Bei den aushärtbaren Aluminiumlegierungen muss dabei neben der Legierungszusammensetzung selbst auch der jeweilige Wärmebehandlungszustand (WB) vor der Umformung berücksichtigt werden.

So wurde in gemeinsamer Absprache vereinbart, den im Automotive-Sektor für die Herstellung von Karosserieteilen und Komponenten sehr häufig eingesetzten Werkstoff EN AW 6082 nicht nur im weichen Zustand [„O“ mit Härte HB = 40], sondern auch in den Wärmebehandlungszuständen

T4 = lösungsgeglüht, kaltausgelagert (HB = 70)

T6 = lösungsgeglüht, warmausgelagert (HB = 100) einzusetzen.

Während generell mit der Härte des Materials der Anspruch an die Umformung steigt, bietet die Umformung von T6-Material den Vorteil, dass im Anschluss keine weitere Wärmebehandlung erfolgen muss und das Bauteil praktisch einbaufertig ist. Durch die Kaltmassivumformung selbst wird darüber hinaus die Festigkeit weiter erhöht (Kaltverfestigung), so dass der hierbei erzeugte Zustand als „T9“ bezeichnet wird:

T9 = lösungsgeglüht, warmausgelagert und anschließend kaltfließgepresst

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projekts hat diese Werkstoffwahl den Vorteil, dass aus chemischer Sicht identische Legierungen mit deutlich unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften für die Umformung miteinander verglichen werden können. Dieser Ansatz wurde im Projektantrag nicht formuliert, stellt aber eine sehr sinnvolle Ergänzung dar.

Neben EN AW 6082 (AlSi1MgMn) in den drei genannten Wärmebehandlungszuständen wurden mit EN AW 3103 (AlMn1) und EN AW 5754 (AlMg3) zwei nicht aushärtbare, d.h. naturharte Legierungen ausgewählt.

Die naturharten Al-Mn-Legierungen der Serie EN AW 3xxx weisen die geringsten Festigkeiten unter den höherlegierten Legierungen auf. Sie besitzen ein gutes Verformungsvermögen und werden oft durch Walzen verarbeitet. Je nach Wärmebehandlung ist auch eine gute Kaltumformbarkeit gegeben. Eine Legierung dieser Reihe wurde gewählt, um hiermit bei geringem Risiko in die praxisnahen Umformversuche einsteigen zu können. Zum Einsatz kommen diese Legierungen vorwiegend in der Bau-, chemischen und Nahrungsmittelindustrie, der Haustechnik, bei Haushalts- und Küchengeräten.

Bei Legierungen der Reihe EN AW 5xxx handelt es sich wie bei den Legierungen der EN AW 6xxx-Reihe um Al-Mg-Legierungen, allerdings im Unterschied dazu ohne signifikanten Gehalt an Silicium. Hierdurch verlieren die Legierungen ihre Aushärtbarkeit, weisen prinzipiell aber ähnliche und für naturharte Legierungen relativ hohe Festigkeiten auf. Sie kommen beim Schiffbau, bei Brückenkonstruktionen, bei der Herstellung von Druckkesseln und bei zahlreichen weiteren Anwendungen zum Einsatz.

In Tabelle A 1 (Anhang) sind die mechanischen Eigenschaften sowie die chemische Zusammensetzung der ausgewählten Werkstoffe zusammengefasst.

In der Antragsphase des Projekts war angedacht, auch einen Werkstoff aus der Reihe EN AW 7xxx miteinzubeziehen. Es handelt sich hierbei um Al-Zn-Legierungen, die die höchsten Festigkeitswerte unter den Aluminiumlegierungen bieten (Härte HB 130-150, Zugfestigkeit R_m bis über 500 N/mm²). Gleichzeitig bieten sie einen ausgezeichneten Korrosionsschutz, so dass sie zunehmend die Al-Cu-Legierungen der Reihe EN AW 2xxx im Bereich der Luft- und Raumfahrt ablösen, deren hoher Cu-Gehalt die Korrosionsbeständigkeit und die Schweißbarkeit herabsetzt.

Bedarf nach derart hochfesten Aluminiumwerkstoffen gibt es gerade auch im Automotive-Sektor sehr wohl, allerdings stehen die Umformbetriebe hier vor einem Problem: Bei gleicher Festigkeitsklasse kommt es bei der Kaltmassivumformung von Aluminium viel früher zur Rissbildung als bei Stahl, so dass sich bei Werkstoffen mit derart hoher Ausgangfestigkeit immer die Frage stellt, ob diese überhaupt noch rissfrei kaltumformbar sind. Da somit die Frage nach der Umformbarkeit bei diesen Werkstoffen nicht mehr (allein) von dem zu untersuchenden Schmierstoffsystem abhängt und Fehlversuche auch auf Werkstoffeigenschaften zurückgeführt werden könnten, wurde nach einer ausführlichen Diskussion mit den Firmen AWW und alutec zu Projektbeginn entschieden, keine Legierung der Reihe EN AW 7xxx miteinzubeziehen. Unabhängig von diesen Überlegungen bereiten EN AW 7xxx-Legierungen auch logistisch Schwierigkeiten, da deren Zinkgehalt das Recycling parallel zu zinkfreien Legierungen erschweren.

3.2. Orientierende Vorversuche zur Schmierstoff-Auswahl im Labormaßstab (Testphase 1)

Angesichts der Varianz bezüglich der ausgewählten Werkstoffe war es erforderlich, eine Vorauswahl potentiell geeigneter bzw. vielversprechender Einschicht-Schmierstoffsysteme für die praxisnahen Umformversuche in Testphase 2 und 3 vorzunehmen. Für diese vorausgehenden orientierenden Tests im Labormaßstab wurde ein Testsystem eingesetzt, das sich nicht auf tribologische Labortestverfahren (siehe u.a. [BAY 95], [SCH 06], [GAR 07], [BAY 13], [GRO 13a], [GRO 13b]) stützt, sondern bei dem bereits reale Umformversuche unter genau definierten Bedingungen durchgeführt werden können. Dieses Testsystem kam bereits zuvor in zahlreichen Versuchsreihen der ZWEZ-Chemie zur Untersuchung von Einschichtschmierstoffen für die Stahl-KMU erfolgreich zum Einsatz und lieferte hier wertvolle Resultate zur Beurteilung der Eignung neuentwickelter Schmierstoffe in diesem Bereich. Nun sollte dieses System erstmals für die Umformung von Aluminiumwerkstoffen eingesetzt werden.

Bei diesen Tests werden die beiden am häufigsten in der Praxis eingesetzten Umformverfahren, das Napfrückwärts-Fließpressen (NRFP) und das Vollvorwärts-Fließpressen (VVFP) durchgeführt, s. Skizzen in Abb. 8.

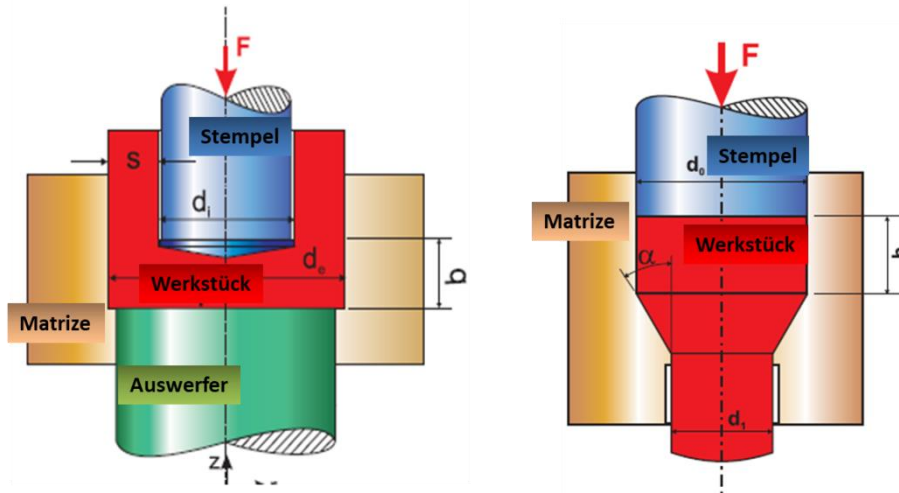


Abbildung 8: Vereinfachte Prinzipskizze zum NRFP (links) und VVFP (rechts) in Testphase 1

Beide Umformverfahren wurden als einstufige Umformoperation mit jeweils abgestuften Umformgraden ausgeführt, wobei sich der Umformgrad φ nach folgender Formel berechnet:

$$\varphi = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \left(\frac{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}\right)$$

Hierbei fließt der Ausgangsdurchmesser d_0 des Rohteils (Halbzeug) und der Enddurchmesser des umgeformten Teils beim VVFP bzw. der Durchmesser des Stempels beim NRFP d_1 in die Berechnung ein. Bei allen Versuchen kamen als Halbzeuge Stangenabschnitte mit einem Durchmesser von 25 mm sowie 25 mm Länge zum Einsatz. Die entsprechenden Daten sind in Tab. 1 zusammengefasst.

| Umformgrad φ | Ausgangsdurchmesser Werkstück d_0 [mm] | Enddurchmesser Umformteil d_1 [mm] beim VVFP | Durchmesser Stempel d_1 [mm] beim NRFP |
|----------------------|--|--|--|
| 0,7 | 25,0 | 17,62 | n.g. |
| 1,0 | 25,0 | 15,16 | 19,87 |
| 1,4 | 25,0 | 12,41 | 21,7 |

Tabelle 1: Daten zur Ausgangs- und Endgeometrie der eingesetzten Werkstücke in Testphase 1; n.g = nicht getestet

Neben dem Umformgrad ist auch der Winkel α ein wesentlicher Parameter für die im Umformprozess auftretenden Lasten. Bei allen eingesetzten Werkzeugen wurde ein Winkel von $2\alpha = 120^\circ$ gewählt. Damit sind die durchgeführten Umformungen bei gleichem Umformgrad anspruchsvoller als bei einem in der Praxis oft auf $2\alpha = 90^\circ$ begrenzten Winkel.

Um die Variationsbreite bei diesen orientierenden Umformversuchen zu begrenzen, wurden alle Versuche mit einem Werkstoff durchgeführt. Um eine möglichst hohe Beanspruchung der Schmierstoffsysteme zu erzielen, fiel hierbei die Wahl auf EN AW 6082 in WB = T6, da dieser Werkstoff die höchste Festigkeit unter den im weiteren Verlauf eingesetzten Werkstoffen und gleichzeitig bereits eine hohe Praxisrelevanz besitzt.

Entsprechende Stangenabschnitte bzw. Butzen aus diesem Material wurde von Fa. AWW gefertigt und durch Strahlen mit Aluminiumgranulat mechanisch vorbehandelt.

Diese Butzen wurden ohne jegliche chemische Vorbehandlung im Labor der ZWEZ-Chemie GmbH mit diversen Einschichtschmierstoffen aus verschiedenen Produktgruppen beschichtet. Die Beschichtung erfolgte in einem auch in der Praxis üblichen Tauchprozess nach Erwärmung der verdünnten Schmierstoffbäder auf ca. 70°C und anschließender Trocknung durch aufgenommene Eigenwärme, unterstützt durch Warmluft. Bei allen getesteten Schmierstoffvarianten konnte hiermit ein geschlossener, transparent bis leicht weißlicher trockener und vor allem geschlossener Schmierstofffilm aufgebracht werden.

Außerdem wurden Butzen mit dem Referenz-Schmierstoffsystem, bestehend aus einer Aluminat-Konversionsschicht und einem darauf abgestimmten Seifenschmierstoff, beschichtet. Die Beschichtung erfolgte hier in einem mehrstufigen Tauchprozess, beginnend mit einer chemischen Reinigung und mit zwischengeschalteten Spülvorgängen, analog zum in Abb. 4 gezeigten Prozess.

Die beschichteten Butzen wurden unter Variation des Umformgrades an einer mechanischen Umformpresse von Komatsu-MAWI mit einer Presskraft von 300 Tonnen (Abb. 9) umgeformt. Bei den eingesetzten Werkzeugen wurde nur beim Stempel für das NRFP eine TiN-Beschichtung verwendet.



Abbildung 9: Innenraum der in Testphase 1 eingesetzten Presse

Von jeder Schmierstoffvariante wurden je Umformgrad 6 Umformoperationen durchgeführt. Die Kraft-Weg-Diagramme wurden bei jeder Operation aufgezeichnet, anschließend gemittelt und ausgewertet. Neben der Ermittlung der maximalen Presskraft erfolgt eine detaillierte Begutachtung der umgeformten Teile anhand verschiedener Kriterien. Hierbei flossen insbesondere die Integrität und Gleichmäßigkeit des Schmierstofffilms, das Auftreten möglicher Riefen am Schaft bzw. auch im Napfinneren sowie die Beurteilung der Schmierstoffrückstände ein.

Bei der Auswertung der aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramme zeigte sich, dass die maximale Presskraft bei allen getesteten Schmierstoffvarianten in Bezug auf die maximale Presskraft nahezu identisch ist. Lediglich beim VVFP eines Schmierstoffs aus der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 47x war die maximale Presskraft um ca. 7% geringer. Dieses Ergebnis korreliert mit früheren Erfahrungen aus den Umformversuchen mit Stahl-Halbzeugen. Auch vollkommen unterschiedliche Schmierstoffsysteme (Zinkphosphatschicht und Seife im Vergleich zu MoS₂ oder Polymer ohne Konversionsschicht) zeigten in diesen Tests meist nur marginale Unterschiede in den maximalen Presskräften. Aufgrund der insgesamt deutlich geringeren erforderlichen Presskräfte bedingt durch das im Vergleich zu Stahl weichere Material fielen diese Unterschiede nun nochmals geringer aus.

Bei der Begutachtung der umgeformten Teile konnten nur die genannten Beurteilungskriterien Anwendung finden, die allesamt eher subjektiven Charakter haben. Abb. 10 zeigt exemplarisch eine Butze im Vergleich zu umgeformten Teilen mit jeweils höchstem Umformgrad $\varphi = 1,4$.



Abbildung 10: Butze (links), mit Umformgrad $\varphi = 1,4$ naprückwärtsfließgepresstes (Mitte) und vollwärtsfließgepresstes Teil aus Testphase 1

Bei der Begutachtung zeigten sich zwischen den getesteten Schmierstoffvarianten auch beim höchsten Umformgrad nur geringfügige Unterschiede. So zeigte ein Schmierstoff der Gruppe ZWEZ-Lube PD 38x beim NRFP eine leicht erhöhte Neigung zur Riefenbildung im Napfinneren. Dies könnte in der Formulierung des Schmierstoff begründet sein, da in dieser Produktgruppe u.a. anorganische Additive mit Schichtcharakter sowie organische partikuläre Trennkörper zur Erhöhung der Trennwirkung und Druckstabilität integriert wurden. Es ist

durchaus vorstellbar, dass derartige Komponenten die Gesamt-Schmierwirksamkeit in Bezug auf gleitende Bewegungen herabsetzen können und somit bei hohen Oberflächenvergrößerungen wie sie im Napfprozess auftreten zu einer eher unterdurchschnittlichen Leistungsfähigkeit führen. Aus diesem Grund wurden Schmierstoffe der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 38x in den folgenden praxisnahen Umformversuchen nicht mit einbezogen.

Bei prinzipiell vergleichbarer Basisformulierung wurden hingegen bei der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 37x Modifikationen vorgenommen, die den speziellen Eigenschaften des Werkstoffs Aluminium Rechnung tragen sollten. Ein Punkt ist die passivierende Oxidschicht, mit der Aluminium überzogen ist und die die Oberfläche im Gegensatz zu beispielsweise blanken Stahloberflächen unpolar macht. Diese z.T. entgegengesetzten Wechselwirkungen zwischen Metalloberfläche und Schmierstoffkomponenten sollten hier Berücksichtigung finden, um bei der Substitution einer Konversionsschicht deren Hauptfunktionen, das Trennen und Tragen, durch optimierte Haftung übernehmen zu können. Tatsächlich konnten sich Schmierstoffe dieser Produktgruppe bereits zuvor bei Umformungen niedriglegierter Aluminiumwerkstoffe bewähren.

Schmierstoffe der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 47x setzen sich aus im Vergleich zur Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 3xx deutlich abweichenden Basiskomponenten (Polymer- und Wachsbestandteile) zusammen. Das hierdurch potentiell optimierte Viskositätsverhalten unter Druck- und Temperaturbelastung in Kombination mit zusätzlichen anorganischen haftvermittelnden Komponenten soll eine Steigerung der Leistungsfähigkeit insbesondere bei sehr anspruchsvollen Umformoperationen bewirken.

Anhand der Begutachtung der umgeformten Teile konnten anhand dieser orientierenden Versuche keine Vorteile dieser Entwicklungsansätze festgestellt werden. Dennoch wurde neben einem Schmierstoff der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 37x auch ein Schmierstoff der Produktgruppe ZWEZ-Lube PD 47x für die praxisnahen Versuche ausgewählt. Grund hierfür war weniger die etwas geringere gemessene Prozesskraft mit ihrer eher eingeschränkten Aussagekraft als vielmehr die Überlegung, dass in Testphase 2 wesentlich höhere Belastungen für das Schmierstoffsystem und damit einhergehend u.a. auch deutlich höhere Temperaturen im Umformprozess auftreten durften. Gerade im Kontext der Temperaturstabilität zeigen anorganische Zusätze zwangsläufig Vorzüge gegenüber organischen Komponenten.

3.3. Herstellung und Beschichtung von Butzen für praxisnahe Umformversuche

Von jedem der 5 ausgewählten Werkstoffe wurden Butzen zur Herstellung der Bremskolben nach Vorgabe von alutec durch AWW hergestellt und der ZWEZ-Chemie zur Verfügung gestellt. Die Herstellung der Butzen erfolgte nach dem in Abb. 11 dargestellten Prozessablauf.

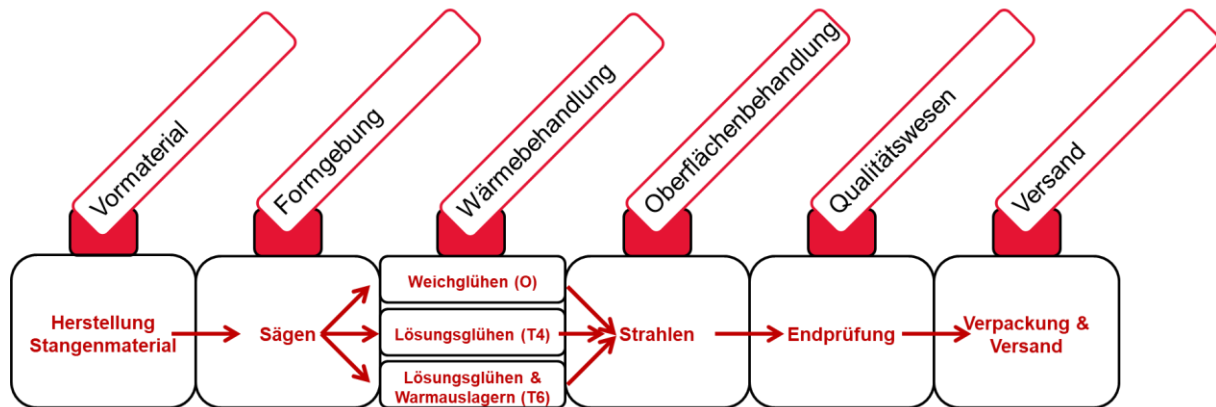


Abbildung 11: Allgemeiner Prozessablauf bei der Butzenherstellung

Abweichend von der ursprünglichen Planung konnten die Butzen für den ersten Testdurchgang aus technischen Gründen nicht gestrahlt werden. Hintergrund ist, dass für diese Versuche zunächst nur eine begrenzte Menge an Butzen erforderlich war, die ein Strahlen nicht zuließ. Außerdem wurden die Butzen in einer – gegenüber den in Abb. 5 dargestellten Abmessungen – kleineren Ausführung hergestellt. Dies stellte jedoch für die Versuche in Testphase 2 kein Problem dar, da hier noch keine Versuche mit erhöhtem Umformgrad vorgesehen wurden.

Der Ablauf und die genauen Parameter der Beschichtung der Butzen für Testphase 2 in den drei ausgewählten Schmierstoffvarianten sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Um mögliche störende und den Vergleich verschiedener Schmierstoffe ggf. verfälschender Einflüsse von Rückständen aus der Butzenherstellung (Sägeschmierstoffe, Materialrückstände etc.) auszuschließen, wurden die Butzen vor der Schmierstoffbeschichtung einer chemischen Reinigung unterzogen. Hierbei kam ein vergleichsweise schwach alkalisches Reinigungsprodukt zum Einsatz, das bei einer Anwendungstemperatur von 60°C zu einem nur geringen Materialangriff – erkennbar an der nur mäßigen Gasentwicklung (Wasserstoff) – führte. Eine anschließende saure Nachbehandlung (Dekapierung) der Teile war bei keinem der getesteten Werkstoffe erforderlich.

| Schritt | Produkt | Konzentration | Temperatur | Behandlungsdauer |
|--|------------------------|-----------------------------|------------|------------------|
| Referenz-Beschichtung: Aluminat + Seife | | | | |
| Reinigung | ZWEZ-Clean 5575 | 5 Gew.% | 60°C | 5 Min. |
| Spülen | Wasser | | RT | < 1 Min. |
| Aluminat-Beschichtung | ZWEZ-Coat 2025 | 3 Gew.% | 70°C | 10 Min. |
| Spülen | Wasser | | RT | < 1 Min. |
| Schmierstoff-Beschichtung | ZWEZ-Lube Z 30 | 3 Gew.% | 70°C | 5 Min. |
| Trocknung (passiv) | | | | |
| Test-Beschichtung: Polymerschmierstoffe ohne Konversionsschicht | | | | |
| Reinigung | ZWEZ-Clean 5575 | 5 Gew.% | 60°C | 5 Min. |
| Spülen | Wasser | | RT | < 1 Min. |
| Schmierstoff-Beschichtung | ZWEZ-Lube PD 37x / 47x | ca. 10% Festkörpergehalt | 70°C | 5 Min. |
| Trocknung (passiv) | | | | |

Tabelle 2: Ablauf und Badparameter bei der Butzenbeschichtung

Die Beschichtung der Butzen erfolgte trotz der geringen Anzahl von 30 pro Werkstoff/Schmierstoff-Variante bereits im ZWEZ-Technikum, mit Ausnahme der Beschichtung mit dem Referenz-System Aluminat + Seife, da hier der Ansatz der jeweiligen Behandlungsbäder (Aluminat, Spülen, Seifenschmierstoff) mit einem unverhältnismäßigem Aufwand verbunden gewesen wäre.

Für die Beschichtung im Technikum wurde zu Projektbeginn eine Kunststofftrommel ohne Stolperstege aber dafür in Achteckform angeschafft, die eine möglichst schonende Behandlung der Butzen, d.h. mit geringen Schlagspuren, und trotzdem guter Vereinzelung der Butzen sicherstellte.

Die Behandlung der Butzen aus Werkstoff EN AW 3103, EN AW 5754 und EN AW 6082 (0) mit dem Referenzsystem erfolgte im ZWEZ-Labor durch manuelles Tauchen in kleinen Behandlungsbädern von ca. 10 L Volumen. Während auf eine Untersuchung des Referenzsystems bei Werkstoff EN AW 6082 T4 verzichtet werden konnte, erfolgte die Behandlung der

Butzen aus Werkstoff EN AW 6082 T6 bei einem Lohnbeschichter mit den gleichen in Tab. 2 genannten Produkten. Mit dieser Vorgehensweise wurde verifiziert, inwieweit im Falle des Aluminat-Verfahrens eine Laborbeschichtung im kleinen Maßstab und eine Behandlung von Teilen in der industriellen Praxis vergleichbare Resultate liefern.

Die mit dem Referenzsystem behandelten Butzen aus Werkstoff EN AW 3103 zeigten überraschenderweise deutliche Auffälligkeiten. So waren hier nach der Behandlung im Aluminatbad ca. 40% der Butzenoberfläche weiterhin metallisch blank und optisch wie unbeschichtet. Diese Fehlstellen waren willkürlich verteilt und lageunabhängig, d.h. sie konnten nicht auf mögliche Auflagestellen mit dem Badbehältnis zurückgeführt werden. Auch eine testweise Erhöhung der Temperatur und Behandlungszeit änderte am Erscheinungsbild der Butzen nichts. Da im Vorfeld keine weiteren Erfahrungen mit der Behandlung eines Werkstoffs der Reihe EN AW 3xxx vorlagen, wurde die Behandlung mit der Schmierstoffbeschichtung fortgesetzt. Eine mögliche Ursache für die fehlerhafte Beschichtung könnte der im Vergleich zu anderen Aluminiumlegierungen signifikant höhere Mangananteil sein. Es ist durchaus denkbar, dass Mangan die Schichtbildungsreaktion stört. Angesichts der relativ geringen Härte dieses Werkstoffs und einer eingehenden Risikoabschätzung wurden auch diese nicht optimal beschichteten Butzen dennoch mit in die Umformtests einbezogen.

3.4. Praxisnahe Umformversuche im Labormaßstab (Testphase 2)

Wie schon in der ersten Planungsphase des Projekts vorgesehen, wurden alle folgenden Umformversuche unter möglichst praxisnahen Bedingungen bei der Firma alutec durchgeführt.

Die Versuche wurden mit einer mechanischen Presse vom Typ BE535 mit einer maximalen Presskraft von 630t durchgeführt, die auch in der früheren Serienproduktion dieses Bauteils zum Einsatz kam. Sowohl die Matrize als auch die eingesetzten Stempel sind aus Stahl gefertigt und mit einer Keramikbeschichtung versehen. Die Zuführung der Presse erfolgt von oben, nach Umformung werden die Kolben nach unten auf ein Transportband ausgeworfen, das diese in eine Kiste befördert. Die Kolben wurden in gewissen Abständen direkt vom Förderband entnommen, nummeriert und unmittelbar begutachtet. Außerdem erfolgte in regelmäßigen Abständen eine visuelle Kontrolle des Stempels, da hier nach Erfahrungen der Mitarbeiter von alutec noch eindeutiger die Eignung bzw. Leistungsfähigkeit eines Schmierstoffs eingeschätzt werden kann.

Die optische Begutachtung umgeformter Bremskolben erfolgte unmittelbar während der Versuche. In der früheren Serienproduktion wurden diese Kolben als i.O. bewertet, wenn im Napfinneren nahezu keine und auf dem Außenmantel nur maximal feine Riefen zu sehen waren. Dieses Kriterium wurde für die Beurteilung der Testkolben dieses Projekts übernommen. Dass überhaupt in der Serienfertigung eine gewisse leichte Riefigkeit toleriert werden konnte, liegt daran, dass diese Kolben in der Serie noch weiteren Fertigungsschritten unterzogen wurden wie u.a. einer spanenden Nachbearbeitung. Müssen hingegen Bauteile einbaufertig umgeformt werden – was im Bereich der KMU von Aluminium eher Ausnahme als

Regel ist – ist zwangsläufig eine einwandfreie Oberflächenbeschaffenheit nach der Umformung erforderlich.



Abbildung 12: Stempel für die Fertigung der Bremskolben

Doch bereits bevor sichtbare Riefen im Napfinneren auftreten gibt es Anzeichen für eine nicht optimale Umformung, so dass man folgende „Eskalationsstufen“ für ein Versagen des Tribosystems benennen kann:

- Stufe 1: Der für dieses Bauteil verwendete Stempel (Abb. 12) besitzt in einem gewissen Abstand vom Stempelkopf einen leicht erhöhten Durchmesser. An dieser Verdickung, Fangstufe genannt, baut sich beim Umformvorgang Aluminium auf. Ab einer gewissen Menge an aufgebautem Material verursacht dies Riefen im Napfinneren der weiteren umgeformten Kolben. Zu erkennen ist dieses erste Anzeichen auch an einer matten Oberfläche unterhalb der Napfkante innen.
- Stufe 2: Auch im Bereich des Stempelkopfes baut sich Material auf. Hierdurch kommt es im Napfinneren zu durchgehenden Riefen über die gesamte Länge.
- Stufe 3: Es kommt sofort zu einem massiven Materialaufbau am Stempelkopf. Hierdurch bleiben Teile im Gesenk stecken.
- Stufe 4: Teile bleiben am Stempel hängen weil zu viel überschüssiges Material am Stempel klebt.
- Stufe 5: Bei völligem Versagen des Tribosystems bleiben Teile im Gesenk stecken und zugleich lässt sich der Stempel nicht mehr herausziehen. In diesem Fall wären umfangreiche Reparaturmaßnahmen an der Anlage erforderlich, so dass man es in Anbetracht der oben genannten Anzeichen nicht soweit kommen lässt.

Grundsätzlich kann neben dem Aufbau von Aluminium im Werkzeug (sowohl im Gesenk wie am Stempel) auch der Aufbau von Schmierstoffrückständen zu entsprechenden Probleme in der Umformung führen, dies jedoch erst bei erhöhten Stückzahlen, so dass in Testphase 2 hierüber noch keine Aussagen getroffen werden konnten.

Für die Versuche standen mehrere identische polierte Stempel zur Verfügung, sodass bei Auftreten von Materialaufbau insbesondere beim Wechsel zu einer anderen Schmierstoff-Werkstoff-Variante der Stempel komplett ausgetauscht werden konnte.

Für die frühere Serienfertigung dieser Bremskolben (aus Material EN AW 6082 T6) kam das Tribosystem bestehend aus Aluminat und Seife zum Einsatz. Trotz der hohen Leistungsfähigkeit war es erforderlich, eine zusätzliche sogenannte Minimalmengenschmierung mit Öl einzusetzen, um in Serie eine ausreichend hohe Lebensdauer der eingesetzten Werkzeuge zu erreichen. Ohne dieses Öl kam es auch in der Serienfertigung recht schnell zum Materialaufbau an der in diesem Zusammenhang besonders kritischen Fangstufe. Diese Zusatzschmierung erfolgt dabei mit einem Standard-Kaltfließpressöl (KFP), das im Sprühen mit Druckluft appliziert wird, wobei die Düsen ringförmig um den Stempel im Bereich der Fangstufe, im 120°-Winkel zur Umformachse, installiert sind.

Vor diesem Hintergrund wurde eingangs der Versuchsreihe entschieden, die zu testenden alternativen Schmierstoffsysteme sowohl mit als auch ohne Öl-Zusatzschmierung zu testen. Da die Ölzufuhr jederzeit ein- und ausgeschaltet werden konnte, war dies mit vertretbarem zeitlichen Mehraufwand umsetzbar.

Bei diesem ersten Durchgang der Umformversuche wurden somit jeweils 20 bis 30 Butzen einer Schmierstoff-Werkstoff-Variante mit und ohne Ölzusatzschmierung getestet um deren grundsätzliche Eignung festzustellen und um im Anschluss die Varianten auszuwählen, die für Testphase 3, d.h. für Versuche mit deutlich höherer Stückzahl in Frage kommen.

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde stichprobenartig die Bodendicke bei einem Bremskolben gemessen und geprüft, inwieweit hier Nachjustierungen an den Presseneinstellungen erforderlich sind. Da dies nicht der Fall war, konnte davon ausgegangen werden, dass der Versuchsaufbau zum Zeitpunkt der Versuche einwandfrei funktionierte.

Zunächst erfolgte in dieser Versuchsreihe die Umformung mit dem Referenzsystem Aluminat + Seifenschmierstoff, hier jedoch ausschließlich mit Ölzusatzschmierung. In Anbetracht der früheren Serienfertigung erwartungsgemäß konnten alle getesteten Werkstoffe ohne jegliche Auffälligkeiten in Form von Materialaufbau oder Riefenbildung umgeformt werden, auch der nicht optimal mit Aluminat beschichtbare Werkstoff EN AW 3103, hier vermutlich aufgrund der geringen Härte.

Für Testphase 2 wurden neben dem Referenzsystem zwei Einschichtschmierstoffe aus den Reihen ZWEZ-Lube PD 37x (im Folgenden kurz als „Polymer 1“ bezeichnet) und 47x („Polymer 2“) ausgewählt. Die Reihenfolge der Pressversuche erfolgte in der Regel anhand der zu erwartenden Beanspruchung an das Tribosystem, d.h. zuerst erfolgten Umformtests mit beschichteten Butzen aus dem relativ weichen EN AW 3103, anschließend die zunehmend härteren Werkstoffe.

Umformergebnisse bei Werkstoff EN AW 3103 (30 HB)

Ohne Ölzusatzschmierung war im Fall von Polymer 1 nach 20 Teilen ein geringfügiger Materialaufbau an der Fangstufe des Stempels zu erkennen, der jedoch noch zu keinen Riefen im Kolbeninneren führte. Unter Einsatz der Ölzusatzschmierung kam es nicht zu diesem Materialaufbau.

Bei Polymer 2 war auch ohne Öleinsatz nach 30 Teilen die Stempeloberfläche noch völlig unbelegt, so dass auf einen Test mit Öl verzichtet werden konnte. Entsprechend zeigten umgeformte Kolben im Inneren keinerlei Riefen (Abb. 13).



Abbildung 13: Umgeformter und gereinigter Bremskolben ohne Riefen im Napfinneren

Umformergebnisse bei Werkstoff EN AW 6082 0 (40 HB)

Die Umformergebnisse entsprechen denen bei Werkstoff EN AW 3103, d.h. problemlose Umformung ohne Materialaufbau am Stempel bei Polymer 1 und Öl-Zusatzschmierung, ebenso bei Polymer 2 ohne Einsatz von Öl. Bei Polymer 1 ohne Öl hingegen ein vergleichbarer Materialaufbau an der Fangstufe nach 20 Teilen.

Umformergebnisse bei Werkstoff EN AW 5754 (45 HB)

Hier kam es im Fall der mit Polymer 1 beschichteten Butzen bereits mit Ölzusatzschmierung zu einem offensichtlich derart massiven Materialaufbau am Stempel, dass Teil Nr. 17 nicht mehr im Gesenk verblieben ist, sondern mit dem Stempelkopf herausgezogen wurde. Entsprechend konnte im Napfinneren eine deutliche Riefenbildung festgestellt werden (Abb. 14).

Da in diesem Fall nicht gänzlich ausgeschlossen werden konnte, dass der Stempel durch vorherige Versuche vorgeschädigt war, wurden im Anschluss auch Versuche ohne Zusatzschmierung durchgeführt und hierfür ein neuer Stempel eingesetzt. Dieser Stempel zeigte bereits nach 20 Teilen einen erneuten deutlichen Materialaufbau an der Fangstufe, die Kolben jedoch weniger Riefen im Inneren.



Abbildung 14: Umgeformter Bremskolben mit deutlichen Riefen im Napfinneren

Ohne Ölzusatzschmierung zeigte sich erstmals auch bei Polymer 2 ein signifikanter Materialaufbau am Stempel, der ab Teil 15 auch zu ersten feinen Riefen führte.

Mit Ölzusatzschmierung konnten mit Polymer 2 30 Butzen aus diesem Werkstoff absolut fehlerfrei umgeformt werden, ohne Materialaufbau am Stempel oder Riefen im Kolbeninneren.

Umformergebnisse bei Werkstoff EN AW 6082 T4 (70 HB)

Bei den härteren Werkstoffen wurde aufgrund der bisherigen Ergebnisse die Reihenfolge der Versuche umgestellt, d.h. zunächst Polymer 2.

Ohne Ölzusatzschmierung waren hier bereits ab Teil 7 erste Anzeichen von Riefen festzustellen, jedoch nur sporadisch und nicht über die gesamte Napflänge. Eine Zunahme der Riefigkeit konnte bis Teil 30 nicht festgestellt werden. Ein gewisser Materialaufbau an der Fangstufe des Stempels war ersichtlich, so dass für weitere Versuche ein neuer Stempel eingesetzt wurde.

Bei den Versuchen dieses nun signifikant härteren Werkstoffs mit Polymer 1 zeigte sich, dass die Leistungsgrenze dieses Schmierstoffs erreicht wird. Im Unterschied zu Polymer 2 baut sich hier Material verstärkt am Stempelkopf und nicht an der Fangstufe auf, was grundsätzlich problematischer ist (s. „Eskalationsstufe 2“ oben). So zeigen sich ohne Ölzusatzschmierung bereits bei den ersten Teilen durchgehende Riefen und bis Teil 14 hat sich so viel Material am Stempelkopf aufgebaut, dass dieser Kolben im Gesenk steckenbleibt und der Stempel nicht weiter verwendet werden kann. Die bis dahin umgeformten Kolben zeigten im noch warmen Zustand eine im Vergleich zu mit Polymer 2 umgeformten Teile deutlich klebrigere Oberfläche und eine wesentlich ungleichmäßige Verteilung der Schmierstoffrückstände. Beides deutet darauf hin, dass bei diesem Schmierstoff bei erhöhter Teilezahl Probleme durch Schmierstoffreste im Werkzeug möglich sind.

Der Versuch wurde dennoch aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit einem neuen Stempel und Einsatz von Ölzusatzschmierung fortgesetzt, mit nur geringfügig besserem Ergebnis:

Zwar setzen Riefen erst beim 6. Teil ein, aber auch diese sind durchgehend entlang des gesamten Napfes. Vermutlich aufgrund des Ölzusatzes sind die Oberflächen der umgeformten

Teile in warmem Zustand noch klebriger. Die vorgesehenen 30 Teile konnte verpresst werden, der Zustand des Stempels mit recht massivem Materialaufbau am Stempelkopf erforderte dann aber einen erneuten Austausch.

Umformergebnisse bei Werkstoff EN AW 6082 T6 (105 HB)

Bei diesem nochmals härteren Werkstoff ist beim Test mit Polymer 2 ohne Ölzusatz ein noch wesentlich ausgeprägter Materialaufbau an der Fangstufe festzustellen, der schon beim 2. Teil Riefen verursacht. 30 Teile können verpresst werden, wobei die letzten Teile dann auch durchgehende Riefen über die gesamte Napftiefe aufweisen. Die Oberflächentemperatur der umgeformten Teile steigt im Verlauf des Versuchs auf über 200°C, was aufgrund der Härte dieser Legierung aber normal ist und auch im Serieneinsatz festgestellt wurde.

Mit Ölzusatzschmierung fällt das Ergebnis deutlich besser aus. Erst beim letzten Teil sind 2 kleine Riefen erkennbar, der Stempel bleibt vollkommen unbelegt.

Auch mit Polymer 1 und Ölzusatzschmierung können 30 Butzen umgeformt werden, bereits nach 10 Teilen ist jedoch die Fangstufe mit Material belegt, jedoch nicht der Stempelkopf, so dass die daraus resultierenden Riefen nicht durchgehend sind. Angesichts der mäßigen Ergebnisse schon bei weicherem Werkstoff, ist dieses Ergebnis besser als erwartet, aber eindeutig schwächer als bei Polymer 2. Auf einen Versuch ohne Ölzusatzschmierung wurde daher zur Schonung der Werkzeuge verzichtet. Die Ergebnisse des ersten Testdurchgangs sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Die im Fall von Polymer 2 allein durch den Einsatz der Ölzusatzschmierung festgestellte erhebliche Leistungsverbesserung ist überraschend und wurde zuvor in der Serienfertigung mit dem Referenzsystem Aluminat + Seife nicht beobachtet. Bei der Kaltumformung von Stahl mit konversionsschichtfreien Schmierstoffen auf Polymerbasis ist der Einsatz von Zusatzschmierung auf Ölbasis zum Teil kritisch und führt abhängig von der Art der Applikation und Menge zu zum Teil erheblicher Reduzierung der Leistungsfähigkeit des Schmierstoffs. Durch die in diesen Versuchen stark begrenzte und nur lokal durch Sprühen unmittelbar im Umformvorgang selbst applizierte Ölmenge kommt es zu keinem potentiell negativen Einfluss durch ein gewisses Anlösen des Polymerschmierstofffilms durch das Öl. Dass wiederum der Einfluss des Öls so deutlich positiv ausfällt, dürfte wiederum mit den Besonderheiten der KMU von Aluminium (einstufig und weiches Material, dafür aber sehr hohe Umformgrade und Oberflächenvergrößerungen) zusammenhängen.

| Werkstoff | | | Beschichtung mit ZWEZ-Lube PD 37x (Polymer 1) | | Beschichtung mit ZWEZ-Lube PD 47x (Polymer 2) | |
|---------------------|----------------------|------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| Bezeichnung nach EN | Kurzname nach DIN/EN | WB-Zustand | Mit Ölzusatzschmierung | Ohne Ölzusatzschmierung | Mit Ölzusatzschmierung | Ohne Ölzusatzschmierung |
| AW 3103 | AlMn1 | 0 | ++ | ○+ | n.g. | ++ |
| AW 5754 | AlMg3 | 0 | ○ | ○ | ++ | ○+ |
| AW 6082 | AlSi1MgMn | 0 | ++ | ○+ | n.g. | ++ |
| | | T4 | - | -- | n.g. | ○ |
| | | T6 | ○- | n.g. | ++ | ○- |

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Testphase 2 (n.g. = Variante wurde nicht getestet)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Polymerschmierstoff der Reihe ZWEZ-Lube PD 47x mit Ölzusatzschmierung die Umformung auch des härtesten Werkstoffs EN AW 6082 T6 ähnlich fehlerfrei ermöglicht wie das Referenzsystem Aluminat + Seife. Allerdings basiert diese Aussage auf der Umformung einer sehr geringen Stückzahl von nur 30 Teilen.

Der Polymerschmierstoff der Reihe ZWEZ-Lube PD 37x ermöglicht hingegen nur bei den eher weichen höherlegierten Aluminiumwerkstoffen eine fehlerfreie Umformung, und auch hier nur mit Ölzusatzschmierung.

3.5. Praxisnahe Umformversuche im Technikumsmaßstab (Testphase 3)

Zur Verifikation der Ergebnisse aus Testphase 2 und zur Überprüfung der tatsächlichen Praxistauglichkeit der entwickelten Einschicht-Schmierstoffsysteme war in der Planung des Projekts von vornherein eine weitere Versuchsreihe vorgesehen. Hierbei soll die gleiche Umformung unter identischen Bedingungen, jedoch in erheblich größerer Stückzahl vorgenommen werden.

Nach den Erfahrungen von alutec sind Aussagen, inwieweit ein getesteter Schmierstoff für den Serieneinsatz geeignet ist, nach Umformung von ca. 600 Butzen möglich. Das heißt, wenn diese Teilezahl mit einem Stempel gefertigt werden kann, dann sind erfahrungsgemäß auch mindestens 10.000 Teile möglich. Diese Standmenge entspricht der durchschnittlichen Teileanzahl, die mit einem Stempel im Serienprozess mit dem Referenzsystem erreicht werden konnte.

Um den Gesamtumfang an Versuchen in Testphase 3 zu begrenzen, wurde nur noch mit dem Werkstoff EN AW 6082 getestet, jedoch in den beiden vom Härtegrad sehr unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen weich (0) und T6. Die Butzen wurden erneut von AWW gefertigt, wobei aufgrund der nun höheren Stückzahl pro Werkstoffvariante eine mechani-

sche Vorbehandlung der Butzen in Form von Strahlen möglich war, so wie es ursprünglich auch schon für Testphase 2 vorgesehen war.

Als Strahlgut kommt hierbei standardmäßig ein Aluminiumgranulat zum Einsatz. Genaue Angaben zum Material des Strahlguts konnten nicht mitgeteilt werden, es ist jedoch anzunehmen, dass die Härte des Materials wenn überhaupt nur geringfügig oberhalb der von EN AW 6082 T6 liegen dürfte. Dies erklärt, weshalb die Butzen aus dem härteren Werkstoff trotz identischer Strahlparameter eine nochmals wesentlich weniger texturierte, aufgeraute Oberfläche aufwiesen als Butzen aus EN AW 6082 0. Im Vergleich zu industriell gestrahlten Halbzeugen aus Stahl wiesen jedoch beide Werkstoffvarianten ein erheblich feineres Strahlbild auf.

Nach den Erfahrungen im Bereich der Stahl-KMU führt ein Strahlen der Oberfläche fast immer zu einer mehr oder weniger starken Leistungsverbesserung des eingesetzten Schmierstoffs. In besonderem Maße gilt dies für Schmierstoffsysteme ohne Konversionsschicht. Um zu überprüfen, ob dies auch auf die KMU von Aluminium übertragbar ist, wurden in dieser Versuchsreihe Butzen der weicheren Variante nicht nur mit Polymer 2 sondern auch mit dem in Testphase 2 etwas weniger leistungsfähigen Polymer 1 beschichtet. Butzen aus EN 6082 AW T6 wurden hingegen lediglich mit Polymer 2 beschichtet. Die Beschichtung von jeweils 600 Butzen pro Variante erfolgte dabei vollkommen analog zu Testphase 2 im Technikum der ZWEZ-Chemie.

Die Umformversuche wurden bei jeder Werkstoff-Schmierstoff-Variante nach folgendem Schema durchgeführt:

Zunächst wurden Kolben unter Einsatz von Öl zur Zusatzschmierung gepresst, die ersten 100 Butzen schrittweise wobei jeder 10. Kolben auf Riefen überprüft wurde. Die kurze Unterbrechung wurde zudem zur optischen Überprüfung der Stempeloberfläche genutzt. Im Anschluss erfolgte das Pressen weiterer 300 Butzen ohne größere Unterbrechung mit einer Hubzahl von ca. 15 Butzen pro Minute (analog der Serienfertigung). Auch hier wurden in regelmäßigen Abständen Kolben zur Überprüfung entnommen.

Nach erneuter Sichtkontrolle des Stempels wurden die Presseneinstellungen modifiziert, um nun insgesamt 100 Bremskolben mit erhöhtem maximalen Umformgrad ($\varphi = 4,5$ statt 3,5) zu fertigen.

Im Anschluss wurden die Presseneinstellungen wieder zurückgesetzt und 50 weitere Kolben in regulärer Geometrie, nun aber ohne Ölzusatzschmierung umgeformt. Die letzten 50 Kolben wurden erneut mit erhöhtem Umformgrad ohne Einsatz von Öl umgeformt.

Ergebnisse mit Polymer 1 (ZWEZ-Lube PD 37x) und Werkstoff EN AW 6082 0

Bei der Pressung der 400 Butzen zu Kolben mit regulärer Bauteilgeometrie unter Einsatz von Ölzusatzschmierung kommt es zu keinem Materialaufbau am Stempel. Entsprechend zeigen sich auch im Kolbeninneren keine Riefen. Das Ergebnis wird als „serienreif“ beurteilt.

Auch die folgenden 100 Kolben mit erhöhtem Umformgrad konnten problemlos mit diesem Schmierstoff hergestellt werden, die Oberfläche des Stempels bleibt unbelegt.

Bei den folgenden Pressversuchen ohne Öl zeigten sich nach den ersten 50 Kolben mit regulärer Geometrie erste Spuren sich ablagernden Butzenmaterials. Aber erst bei Pressung der längeren Kolben war diese so ausgeprägt, dass es zu leichten Riefen nach 40 Teilen kam. Das Ergebnis wurde als noch i.O. gewertet.

Ergebnisse mit Polymer 2 (ZWEZ-Lube PD 47x) und Werkstoff EN AW 6082 0

Nach Einsatz eines neuen Stempels zur Gewährleistung gleicher Ausgangsbedingungen lassen sich auch mit diesem Polymerschmierstoff die 400 Butzen einwandfrei zu Kolben verpressen. Im Vergleich zum Polymer 1 fällt auf, dass weniger Schmierstoffrückstände im Napfinneren verbleiben und die Kolben hierdurch „sauberer“ erscheinen. Gleichzeitig ist eine höhere Temperatur bei gerade gepressten Kolben festzustellen und die noch warmen Teile fühlen sich weniger „klebrig“ an. Nach Abkühlung ist dieser Unterschied zwischen den beiden Schmierstoffen nicht mehr festzustellen. Ein eindeutiger Vorzug dieses Schmierstoffs ist jedoch, dass sich im Verlauf des Versuches keine Schmierstoffrückstände im Gesenk sammeln, da diese immer wieder durch den Umformvorgang selbst herausgezogen werden. Dieses Verhalten hat man zuvor noch bei keinem anderen Schmierstoff festgestellt und wird sehr positiv in Bezug auf einen Serieneinsatz gesehen.

Beim Pressen der längeren Kolben erhöht sich die Temperatur weiter, es sind mehr und dunklere, aber lose Rückstände im Kolbeninneren vorzufinden. Ein Materialaufbau am Stempel ist weiterhin nicht feststellbar.

Beim anschließenden Versuch ohne Öl ist eine weitere Zunahme der Temperatur festzustellen, zum Materialauftrag und in Folge zur Riefenbildung kommt es aber weder bei den kurzen noch den anschließend verpressten langen Kolben.

Ergebnisse mit Polymer 2 (ZWEZ-Lube PD 47x) und Werkstoff EN AW 6082 T6

Da sich bei dem vorherigen Versuch kein Materialaufbau nach den 600 Umformungen zeigte, wurde dieser Stempel zunächst weiterverwendet.

Nach rund 40 Teilen zeigen sich erste kleine, nicht durchgehende Riefen an den Kolben, die mit sehr hoher Temperatur aus der Presse kommen. Die Riefigkeit nimmt in Folge zu, so dass bei Teil 80 zunächst abgebrochen wird. Der Stempel zeigt am Stempelkopf und an der Fangstufe über den halben Umfang aufgebautes Material.

Die Versuche werden mit einem neuen Stempel fortgesetzt, wobei sich auch hier bereits nach weiteren 80 Teilen erste kleine Riefen zeigen, jedoch immer nur an einzelnen Stellen, so dass man davon ausgehen kann, dass der Materialaufbau am Stempel nur stellenweise einsetzt. Der Versuch wird nach dem vorgegebenen Schema fortgeführt, wobei sich zeigt, dass die Riefigkeit und die Belegung des Stempels im Weiteren nicht zunehmen. Üblicherweise muss nach initialer Belegung des Stempels dieser zeitnah ausgewechselt bzw. aufgearbeitet werden, da der Materialaufbau mit weiteren Umformvorgängen schnell massiv wird.

Dies ist bei dem Versuch mit Polymer 2 jedoch nicht der Fall, trotz erkennbarem Materialaufbau am Stempelkopf (kaum an der Fangstufe) bereits nach 80 Teilen nimmt dieser auch nach weiteren 200 Teilen nicht erkennbar zu. Entsprechend bleibt auch die Riefenbildung begrenzt und wird als in Ordnung gewertet, da bei diesem Bremskolben eine minimale Riefenbildung auch im Inneren toleriert werden kann, was nicht bei allen Bauteilen je nach weiteren Bearbeitungsschritten oder Funktionalität der Flächen der Fall ist.

Butzen aus dem Serienwerkstoff EN AW 6082 T6 sind zuvor noch nie mit erhöhtem Umformgrad verpresst worden, auch nicht testweise mit dem Referenzschmierstoffsystem Aluminat + Seife. Bei der Fortsetzung des Versuchs mit gleichem Stempel zeigte sich, dass diese Umformung mit Polymer 2 prinzipiell umsetzbar ist. Allerdings nimmt die Intensität der Riefen nach 10 Teilen sichtbar zu und die Temperatur der gepressten Teile erreicht ein sehr hohes Niveau (Rauchentwicklung über mehrere Minuten). Zu Fressern durch Metall-Metall-Kontakt oder einem Steckenbleiben der Kolben kommt es jedoch nicht. Überraschenderweise nimmt der Materialaufbau am Stempel nicht erkennbar zu, an der Fangstufe ist dieser sogar weiterhin nur minimal. Aufgrund dieser weiterhin konstanten Bedingungen und zumindest akzeptablen Oberflächengüte der Kolben wertet man das Ergebnis als „positive Überraschung“ und setzt die Tests ohne Ölzusatzschmierung und mit gleichem Stempel fort.

Bei regulärer Geometrie ist das Ergebnis zufriedenstellend: kleinere Riefen über die gesamte Napflänge, jedoch keine Fresser oder ein Steckenbleiben von Teilen. Dazu kommt es auch bei erhöhtem Umformgrad nicht, wobei die Riefen nach 30 Teilen doch so tief werden, dass das Ergebnis nun als „grenzwertig, jedoch gar nicht so schlecht“ bewertet wird. Da es nach wie vor zu keiner massiven Belegung des Stempels mit Butzenmaterial gekommen ist und sich diese auf den Radius des Stempelkopfes beschränkt, wäre eine weitere Verwendung des Stempels nach Einschätzung der Mitarbeiter von alutec möglich. Bei verändertem Radius des Stempelkopf hält man es für durchaus denkbar, die Belegung mit Material an dieser Stelle und die hierdurch verursachte Riefenbildung im Kolbeninneren zu reduzieren. Im Rahmen des Projekts war es jedoch nicht möglich, diese Maßnahme praktisch in einem weiteren Testdurchgang umzusetzen.

Insgesamt wird das Pressergebnis der 600 Butzen trotz der zunehmenden Riefenbildung als in Ordnung bewertet. Es ist davon auszugehen, dass auch deutliche höhere Stückzahlen an Kolben unter Einsatz von Ölzusatzschmierung und bei regulärem Umformgrad, d.h. unter Serienbedingungen, mit dem Einschichtschmierstoff der Gruppe ZWEZ-Lube PD 47x umgeformt werden können. Somit wird dieser Schmierstoff als vollumfänglich serienreif beurteilt.

Dennoch ist aufgrund der offensichtlich nahen Leistungsgrenze ohne Ölzusatzschmierung und mit höherem Umformgrad das Ergebnis als noch nicht optimal einzustufen. Neben einer nicht kurzfristig umsetzbaren Modifikation des Stempelkopfradius besteht vor allem Optimierungspotential im Tribosystem selbst. So führt die erheblich höhere Härte des Werkstoffs EN AW 6082 T6 nicht nur zu einer erschwerten Umformung, sie sorgt gleichzeitig für eine nur sehr fein gestrahlte Oberfläche mit nur schwach ausgeprägten Schmierstofftaschen, da das

Standard-Strahlgut aus Aluminiumgranulat eine maximal unwesentlich höhere Härte aufweist als das Butzenmaterial selbst.

Die Überlegung war somit, durch Modifikation des Strahlgutmaterials Butzen mit erheblich stärker bzw. gröber gestrahlter Oberfläche bereitzustellen, die die Leistungsfähigkeit des Schmierstoffs signifikant steigern könnte. Eine entsprechende Tendenz konnte bei Vergleich der Umformergebnisse von Polymer 1 in Testphase 2 mit ungestrahlten und 3 mit gestrahlten Butzen eindeutig festgestellt werden, insbesondere wenn auf den Einsatz von Öl verzichtet wurde.

In Absprache mit einem Stahl-Kaltumformbetrieb war es möglich, die Oberfläche von 600 weiteren Butzen aus EN AW 6082 T6 durch Strahlen mit einem im Bereich der Stahl-KMU sehr gängigen Stahl-Rundkorn-Strahlgut (Asikos S 390, Korngröße ca. 1 mm) nachzubearbeiten. Die Oberfläche dieser Butzen weist eine erheblich größere Strahlrauheit auf (Abb. 15) und entspricht in der Topographie Oberflächen von Stahl-Halbzeugen für anspruchsvolle Kaltmassivumform-Operationen. Umformversuche mit diesen grob gestrahlten Butzen konnten innerhalb der Projektlaufzeit leider nicht mehr durchgeführt werden.

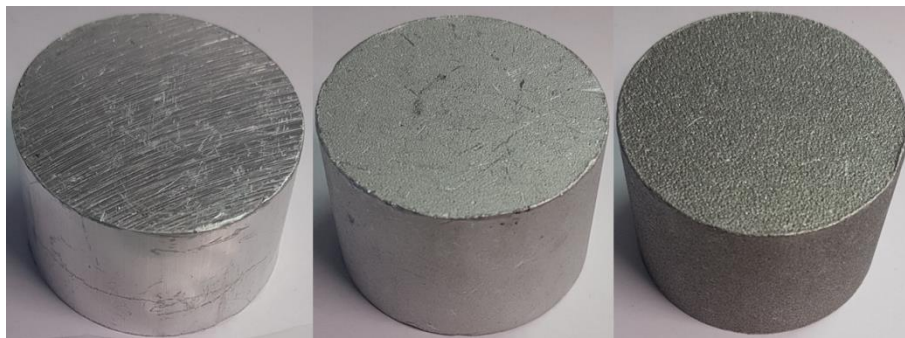


Abbildung 15: Ungestahlte (links), mit Aluminiumgranulat gestrahlte (Mitte) und mit Stahl-Rundkorn gestrahlte Butzen (rechts)

Auf Versuche zur Optimierung der Beschichtungsparameter im Sinne einer Senkung auf das mindesterforderliche Maß wurde zum Projektende hin bewusst verzichtet. Zum einen deuten die Versuchsergebnisse aus Testphase 3 an, dass tendenziell eher noch eine etwas höhere Schmierstoffauflage zu einem noch besseren Umformergebnis geführt haben dürfte (wobei dies nicht zwangsläufig nur durch eine erhöhte Schmierstoffkonzentration im Schmierstoffbad, sondern vielmehr durch eine stärker gestrahlte Oberfläche der Butzen erreicht werden kann). Zum anderen erwies sich das Thema Schmierstoffrückstände im Werkzeug auch bei höheren Stückzahlen als weit weniger problematisch als im Vorfeld vermutet und in jedem Fall als unkritischer als beim Referenz-Tribosystem bestehend aus Aluminat und Seife.

3.6. Umformversuche mit neuartigem pastösen Schmierstoff

Aufgrund zunehmender Anforderungen im Bereich des Umwelt- und Gesundheitsschutzes wird auch im Bereich der Umformung weicher Aluminiumlegierungen bzw. von Aluminium der Reihe EN AW 1xxx der Wunsch nach alternativen Schmierstoffen größer. Hier stellt derzeit Zinkstearat den Stand der Technik und das Mittel der Wahl dar. Allerdings verursacht die

Applikation des Zinkstearat-Pulvers auf Butzen in einem Trommelprozess und auch der anschließende Pressvorgang eine erhebliche Staubbelastung für Mitarbeiter und Verunreinigung der Werkshallen.

Vor diesem Hintergrund würden im Tauchen applizierbare Schmierstoffe auf Basis von Polymeren auch in diesem Produktionssegment Vorteile bringen. Allerdings eignet sich Zinkstearat umformtechnisch sehr gut und von Seiten der Leistungsfähigkeit besteht hier in den meisten Fällen kein Handlungsbedarf. Entsprechend zurückhaltend wird hier ein Schmierstoffauftrag im Tauchverfahren gesehen, da diese Möglichkeit der Beschichtung in Betrieben der Aluminium-Kaltmassivumformung aktuell meist nicht vorgesehen ist.

Aus diesem Grund wurden neben den bereits beschriebenen Schmierstoffentwicklungen im Rahmen des Projekts mit Schwerpunkt auf Polymerschmierstoffe für die Tauchanwendung auch Entwicklungen für eine direkte Alternative zu Zinkstearat gestartet. Dies führte zur Entwicklung eines pastösen, wässrigen Schmierstoffs, der analog zu Zinkstearat durch Auftrommeln auf Butzen appliziert werden kann (Abb. 16).



Abbildung 16: Trommel mit Alubutzen und pastösem Schmierstoff ZWEZ-Lube AX

Nach ersten vielversprechenden Resultaten im Bereich der Umformung niedriglegierter Aluminiumwerkstoffe, die bereits eine gegenüber Zinkstearat erhöhte Leistungsfähigkeit erkennen ließen, wurde dieser neuartige Schmierstoff auch in die letzten Tests im Rahmen dieses Projekts integriert.

Parallel zu den in Abschnitt 3.5 dargestellten Versuchen (Testphase 3) wurden auch jeweils 50 Butzen aus EN AW 6082 0 und T6 in einer von alutec bereitgestellten Versuchstrommel mit diesem Schmierstoff beschichtet und zu Kolben gepresst. Für das Auftrommeln wurden 40 Butzen (14 kg) mit 20 g des pastösen Schmierstoffs in die Trommel gegeben und für 15 Minuten eingetrommelt. Der Schmierstoff verteilt sich dabei vollkommen homogen über die Butzenoberfläche und trocknet nach Entnahme aus der Trommel innerhalb einer Minute als eine vergleichsweise haft- bzw. abriebfeste Schicht auf.

Die Umformung erfolgte bei diesem Test ohne Ölzusatzschmierung und konnte im Fall des weicheren EN AW 6082 0 einwandfrei umgesetzt werden. Ein Materialaufbau am Stempel wurde weder bei regulärer Bauteilgeometrie noch bei erhöhtem Umformgrad festgestellt. Somit zeigt dieser Schmierstoff zumindest bei geringer Stückzahl ohne Ölzusatzschmierung

ein tendenziell besseres Ergebnis als Polymer 1. Versuche in höheren Stückzahlen konnten leider im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr realisiert werden.

Beim härteren Werkstoff EN AW 6082 T6 zeigt sich dann die Leistungsgrenze dieses pastösen Schmierstoffs. Nur wenige Kolben in Originalgeometrie konnten fehlerfrei umgeformt werden, bevor sehr schnell Riefen einsetzen und an Intensität zunehmen. Der Stempel zeigt am Stempelkopfradius sehr bald Materialaufbau, wohingegen die Fangstufe weitgehend frei bleibt, da das Material mit jedem Hub nach vorne geschoben wird. Auch hier wird vermutet, dass ein modifizierter Stempelkopfradius ein besseres Ergebnis liefern könnte. Auf einen Test mit erhöhtem Umformgrad wurde verzichtet.

Dieses Versuchsergebnis wird als „positive Überraschung“ gewertet und zeigt, dass der neuartige pastöse Schmierstoff nicht nur Zinkstearat ersetzen kann, sondern auch Leistungsreserven besitzt, die ihn für Umformungen mittelharter Werkstoffe befähigt. Bis zu einer gewissen Grenze erlaubt er somit auch ohne Investition in eine Trommeltauchanlage die Eliminierung der Staubbelastung in der Fertigung. Ein wesentlicher Hemmschuh bei der Etablierung umweltfreundlicher Schmierstoffe in die Aluminium-KMU wäre damit beseitigt.

Die Ergebnisse aus Testphase 3 sind in Tab. 4 zusammengefasst.

| Werkstoff | Beschichtung mit ZWEZ-Lube PD 37x (Polymer 1) | Beschichtung mit ZWEZ-Lube PD 47x (Polymer 2) | | Beschichtung mit Schmierstoff-Paste ZWEZ-Lube AX | |
|---|---|---|---------------|--|---------------|
| | EN AW 6082 0 | EN AW 6082 0 | EN AW 6082 T6 | EN AW 6082 0 | EN AW 6082 T6 |
| 400 Butzen Seriengeometrie Mit Ölzusatzschmierung | ++ | ++ | + | n.g. | n.g. |
| 100 Butzen Erhöhter Umformgrad Mit Ölzusatzschmierung | ++ | ++ | ○+ | n.g. | n.g. |
| 50 Butzen Seriengeometrie Ohne Ölzusatzschmierung | + | ++ | ○ | ++ | ○- |
| 50 Butzen Erhöhter Umformgrad Ohne Ölzusatzschmierung | ○ | ++ | ○- | ++ | n.g. |

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Testphase 3

3.7. Untersuchungen zur Bauteilreinigung nach KMU

Einige der in Testphase 2 hergestellten Bremskolben wurden Untersuchungen zur Entfernung der Rückstände der jeweils aufgetragenen Schmierstoffsysteme unterzogen. Entscheidend ist die möglichst rückstandsfreie Entfernung von Schmierstoffresten sowohl bei praktisch einbaufertig produzierten Bauteilen, viel mehr aber noch bei Bauteilen, die weiteren, z.B. spanenden oder auch dekorativen Nachbearbeitungsschritten unterzogen werden. In diesen Fertigungsschritten kommen z.T. Medien und Werkzeuge zum Einsatz, die bei Anwesenheit von Fremdstoffen (je nach Typ und Menge) schneller verschleifen oder altern könnten. Ein Beispiel sind Kühlschmierstoffe bei einer anschließenden CNC-Bearbeitung, die durch Eintrag von Zinkstearat eindicken können.

Um auch hier einen direkten Praxisbezug zu gewährleisten, wurden die umgeformten Kolben durch alutec verschiedenen Reinigungstests unterzogen. Hierbei kamen die drei bei der Aluminiumverarbeitung gängigen Reinigungsmethoden bzw. -medien zum Einsatz:

- Organische Reiniger

Reiniger auf Basis von Tetrachlorethen (Perchloroethylen – PER) stellen im Bereich Aluminium nach wie vor den Stand der Technik dar, trotz des recht hohen apparativen Aufwands (geschlossener Medienkreislauf, Recycling durch Destillation, hohe Auflagen bzgl. Einhaltung der MAK-Werte). Hintergrund ist, dass diese Reiniger die höchstmögliche Materialschonung gewährleisten. Neben PER können auch andere organische Reiniger auf Basis sowohl paraffinischer wie aromatischer Kohlenwasserstoffe zum Einsatz kommen.

- Wässrige, mild-saure Reiniger

Auch diese Reinigungsmedien greifen Aluminium recht wenig an und führen z.T. zu einer meist gewünschten Aufhellung des Metalls. Bei alutec kommt ein Produkt der Fa. Wigol, VR X 46 NS mit einem pH-Wert von ca. 2,5 zum Einsatz. Im Rahmen der stärkeren Auseinandersetzung mit dem Thema Aluminium hat die ZWEZ-Chemie unabhängig von den Umformversuchen im Rahmen des Projekts eigene Erfahrungen im Bereich der Aluminium-Bauteilreinigung sammeln können. Bei derartigen Entwicklungsversuchen bestätigte sich, dass saure wässrige Reinigungsmedien oft den besten Kompromiss aus Reinigungswirkung und Materialschonung bieten.

- Wässrige, mild-alkalische Reiniger

Im Stahlbereich kommen zur Bauteilreinigung nach der Kaltumformung fast ausschließlich hoch-alkalische wässrige Reiniger auf Basis von Natrium- und / oder Kaliumhydroxid zum Einsatz. Aufgrund der starken Materialauflösung in derartigen Reinigern finden bei Aluminium hingegen oft schwächer alkalische Medien auf Basis nicht-hydroxidischer Builder-Komponenten (Carbonate, Phosphate) Anwendung. Das bei alutec eingesetzte Produkt Wigol VR X 81 TA enthält allerdings Hydroxide und einen recht hohen pH-Wert von ca. 12.

Die Anwendung der 3 verschiedenen Reinigungsmedien erfolgte nach den bei alutec in der Praxis eingesetzten Parametern (Konzentration 4,5% bzw. nach Leitwert, 60°C Anwendungstemperatur, 8-12 Minuten Reinigungsdauer). Anschließend wurde die jeweilige Reinigungsleistung beurteilt. Hierzu wurde einerseits die Benetzbarkeit der Oberfläche durch einen sogenannten Tintentest als auch die Rückstandsfreiheit durch einen sogenannten Klebetest untersucht.

Beim Tintentest in Anlehnung an die DIN ISO 8296 wird die gereinigte Oberfläche mit Testtinten verschiedener Oberflächenspannungen im Bereich 32-42 mN/m bestrichen. Bleibt der Strich eine festgelegte Zeit erhalten, so ist die Oberfläche gut benetzbar. Der Wert ihrer Oberflächenspannung entspricht mindestens dem Wert der Testtinte. Man testet nun weitere Testtinten mit absteigender Oberflächenspannung bis zu dem Punkt, ab dem sich die Tintenflüssigkeit innerhalb kurzer Zeit zu einzelnen Tröpfchen zusammenzieht.

Beim Klebetest wird ein Silikonkleber (Semicosil von Wacker) auf die gereinigte Oberfläche aufgetragen und eine Stunde bei 140°C im Ofen belassen. Anschließend wird der Kleber abgeschabt und optisch kontrolliert, ob es zu einer Verbindung mit dem Grundmaterial gekommen ist. Rückstände von z.B. Schmierstoffen nach der Reinigung reduzieren die Haftung, können den weiteren Fertigungsprozess beeinträchtigen und beispielsweise Fehler beim Lackieren von Bauteilen verursachen.

| Reinigungsverfahren | Reinigung nach Umformung mit ZWEZ-Lube PD 37x (Polymer 1) | Reinigung nach Umformung mit ZWEZ-Lube PD 47x (Polymer 2) |
|--|---|---|
| Auf Basis organischer Lösungsmittel (z.B. PER) | O | O- |
| Auf Basis wässriger, saurer Reiniger | + | ++ |
| Auf Basis wässriger, alkalischer Reiniger | ++ | ++ |

Tabelle 5: Zusammenfassung der Reinigungstests an umgeformten Bremskolben

Diese Untersuchungen von alutec (Tab. 5) zeigen, dass Rückstände der beiden Polymerschmierstoffe nur unzureichend durch organische Reinigungsmedien entfernt werden können. Besonders mäßig war die Rückstandentfernung beim Polymer 2 (ZWEZ-Lube PD 47x). Grund dürfte bei letzterem der Anteil an anorganischen Komponenten im Schmierstoff sein. Generell erschwert die höhere Polarität durch die funktionellen Gruppen in den organischen Polymerkomponenten im Vergleich z.B. zu Stearaten, den Lösevorgang in organischen, kurzkettigen Verbindungen.

Polare, wässrige Reinigungsmedien bieten hier somit per se Vorteile und dies bestätigten auch die Vergleichsversuche. Die wässrig-saure Reinigung hinterlässt nur im Fall von Poly-

mer 1 noch spürbare Rückstände, wohingegen das Reinigungsergebnis zumindest haptisch bei Polymer 2 bereits sehr gut beurteilt wird.

Die wässrige alkalische Reinigung liefert bei beiden Polymerschmierstoffen sowohl nach optischer wie haptischer Beurteilung und auch in den Tests sehr gute Ergebnisse, führte allerdings aufgrund des relativ hohen pH-Wertes zu einer etwas ausgeprägteren Mattierung der Oberfläche, die bei diesem Bauteil nicht störend ist. Das Ergebnis wird als absolut serientauglich eingestuft.

Dass das oft noch als Standard eingesetzte PER keine gute Reinigung zeigte, kann aus Umweltgesichtspunkten sogar als vorteilhaft gewertet werden. Einschichtschmierstoffe auf Basis von Polymeren könnten bei verstärktem Einsatz in der Aluminium-KMU die organischen Reinigungsverfahren verdrängen und umweltfreundlichere wässrige Reinigungsmedien in der Fertigung etablieren.

3.8. Prüfung auf Inline-Tauglichkeit und vollautomatische Badführung

In den praxisnahen Versuchen konnte die grundsätzliche Eignung der entwickelten Einschichtschmierstoffe für anspruchsvolle Umformoperationen und deren problemlose Entfernbarkeit nach der Umformung gezeigt werden. Für einen Einsatz in der industriellen Praxis können jedoch noch weitere Faktoren entscheidend sein.

Ein wesentlicher Punkt ist die Frage inwieweit diese Produkte tatsächlich ohne große (Neu-) Investitionen eingesetzt werden können. Prinzipbedingt bieten Einschichtschmierstoffe hier klare Vorteile, da eine Beschichtungsanlage für die Applikation dieser Schmierstoffe im gängigen Trommeltauchverfahren nur vergleichsweise wenige Komponenten enthält. Abb. 17 zeigt die Prinzipskizze einer solchen Anlage mit den Stationen Trommel-Befüllung, Beschichtung, Trocknung und Trommel-Entleerung.

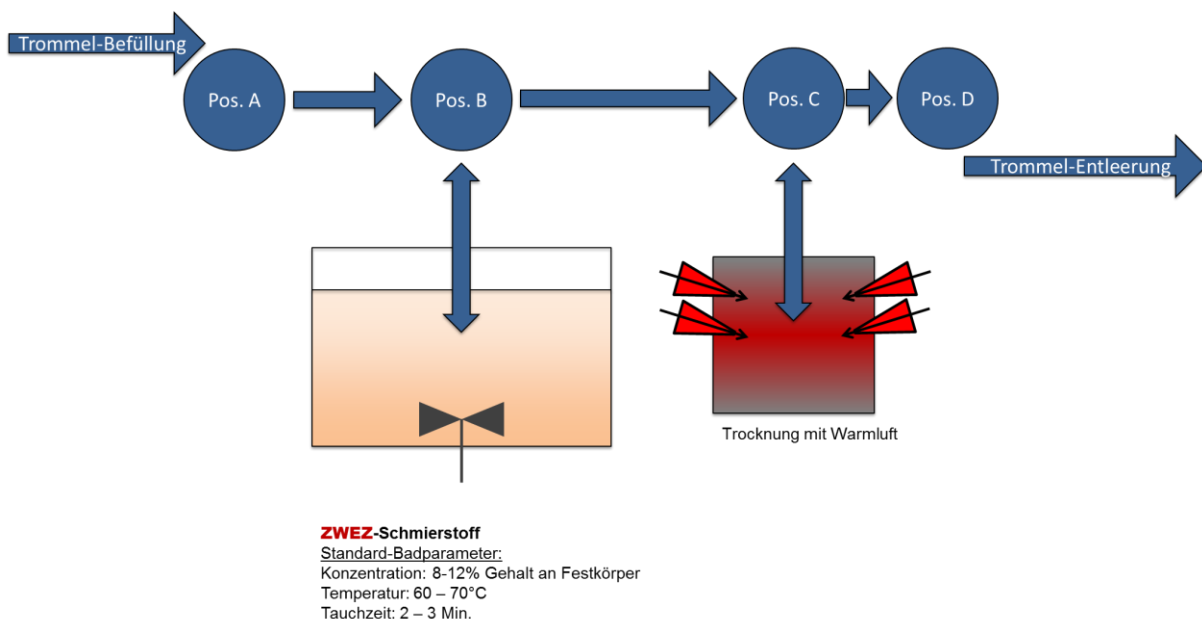


Abbildung 17: Prinzipskizze einer Beschichtungsanlage für Einschichtschmierstoffe im Trommeltauchverfahren

Einstufige Beschichtungsanlagen bieten neben den überschaubaren Investitionskosten aber noch weiteres Potential: Während vielstufige Beschichtungsanlagen für konventionelle Schmierstoffsysteme mit Konversionsschicht praktisch immer eine Zwischenlagerung von Teilen vor wie nach der Oberflächenbehandlung erfordern, ist eine unmittelbare Verkettung der vorausgehenden wie nachfolgenden Fertigungsschritte bei einstufigen Beschichtungsanlagen sehr gut vorstellbar. Hierbei muss die Beschichtung selbst nicht zwangsweise im In-line-Verfahren, d.h. kontinuierlich erfolgen. Auch eine batchweise Oberflächenbehandlung ist möglich, sofern Takt, Auftragsart und Auftragsvolumen mit der vorausgehenden Vorbehandlung des Halbzeugs und dem Takt der unmittelbar sich anschließenden Umformung abgestimmt werden. Diese Verkettung des gesamten Fertigungsprozesses, wie in Abb. 18 dargestellt, stellt ein zentrales Element der Umsetzung von „Industrie 4.0“ in der Produktion dar.

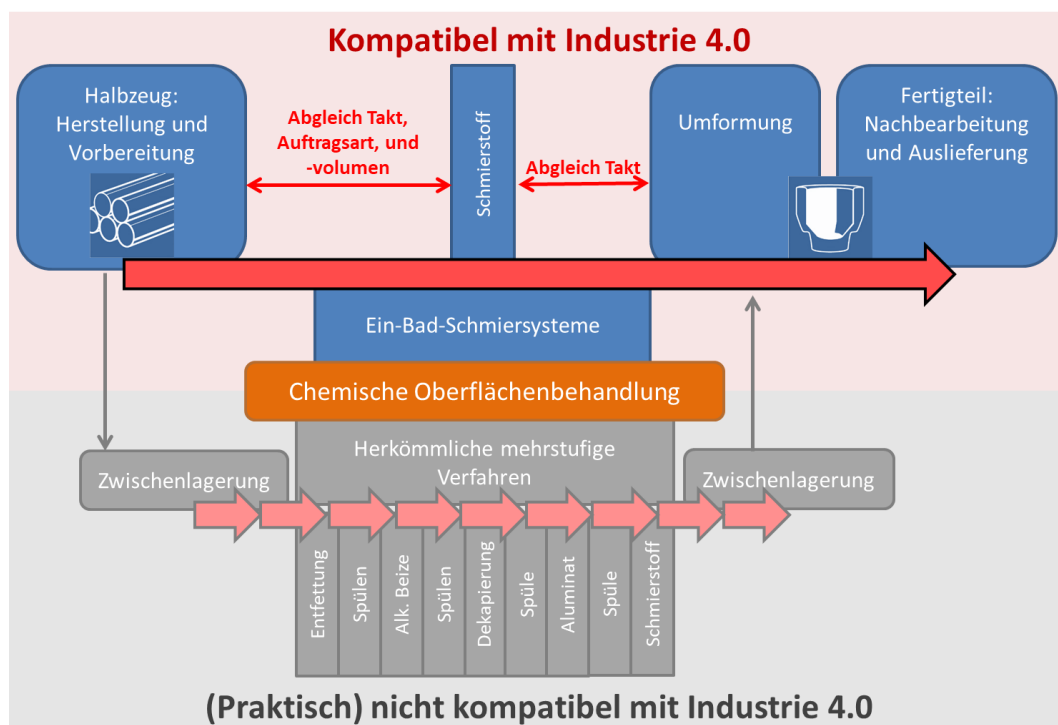


Abbildung 18: Integration der Oberflächenbehandlung und Verkettung der Produktionsschritte

Einschichtschmierstoffe können insofern als notwendige Voraussetzung bei der Realisierung von Industrie 4.0-Konzepten angesehen werden. Neben der Verkettung der Oberflächenbehandlung mit den anderen Fertigungsschritten müssen aber auch die Schmierstoffe selbst bzw. ihre Anwendung kompatibel mit Industrie 4.0 sein. Eine Kompatibilität ist gegeben, wenn die Überwachung und Einhaltung aller Betriebsparameter vollautomatisiert und selbstregulierend erfolgen kann. Polymerschmierstoffe erfüllen die hierfür erforderlichen Kriterien:

- Alle für den Betrieb erforderlichen Badparameter (Temperatur, Konzentration und pH) können automatisiert bestimmt werden.
- Badparameter liegen in digital transformierter Form vor, d.h. Sensoren liefern kontinuierlich Daten. Es müssen keine Proben entnommen, im Labor analysiert und Daten manuell übertragen werden.

- Die Bäder unterliegen keinen analytisch nicht oder nur schwer erfassbaren Alterungserscheinungen, so dass eine konstante Leistungsfähigkeit über einen langen Zeitraum sichergestellt wird.
- Alle Sollparameter können durch einfache Flüssig-Dosierung eingestellt werden, wobei die Regelung direkt mit der Analytik gekoppelt werden kann.

Die technische Umsetzung einer vollautomatischen Badführung zeigt die Prinzipskizze in Abb. 19.

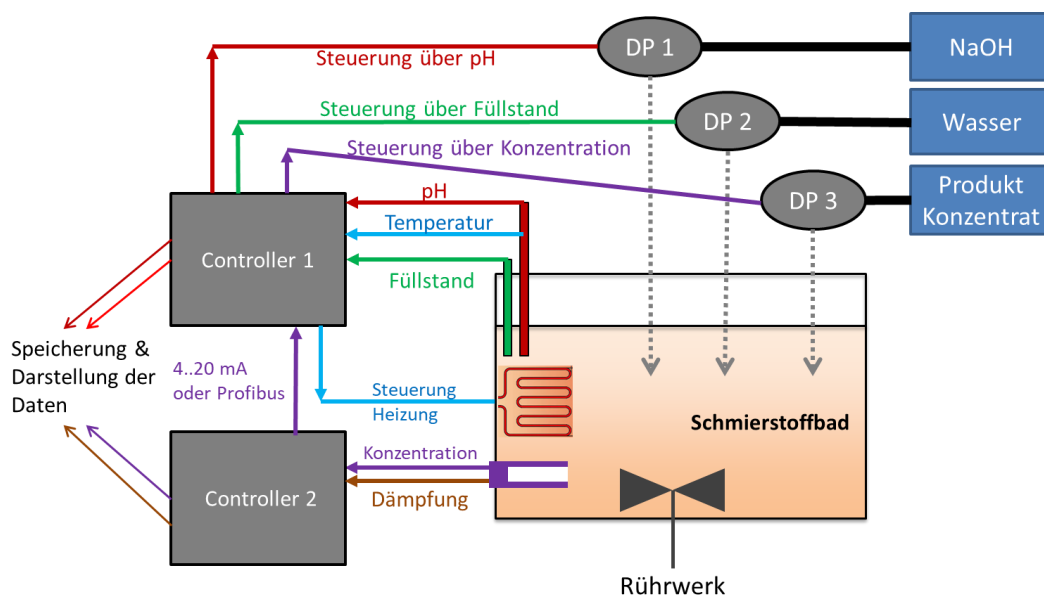


Abbildung 19: Prinzipskizze zur automatisierten und selbstregulierenden Badführung

Die Erfassung der Badparameter Temperatur, pH-Wert sowie des Badfüllstandes kann über handelsübliche Sensoren erfolgen. Die Daten werden von einem Controller erfasst, angezeigt und gespeichert. Nach Abgleich mit hinterlegten Sollwerten gibt der Controller Regelungsimpulse aus und erlaubt so die Ansteuerung von Dosierpumpen, die Betriebsmittel bis zum Erreichen der Sollwerte hinzugeben. Die Badbeheizung wird analog über den Controller geregelt.

Der Badparameter Konzentration entspricht bei Schmierstoffbädern dem Gehalt an Trockensubstanz. Üblicherweise muss zur Bestimmung eine Probe der Badflüssigkeit entnommen und eine gravimetrische Bestimmung nach Trocknung erfolgen. Auch wenn diese Messung durch Feuchtebestimmungsgeräte inzwischen halbautomatisch erfolgen kann, so ist eine kontinuierliche Messung im Betrieb hiermit nicht möglich. Es existieren auf dem Markt inzwischen aber Messverfahren, die eine Echtzeitmessung der Badkonzentration ermöglichen. Ihr Messprinzip beruht auf der Messung der Schallgeschwindigkeit in der Betriebsflüssigkeit durch Eintauchen von Sensoren, die Ultraschallsignale senden und empfangen.

Jede Flüssigkeit besitzt eine spezifische Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Konzentration und Temperatur. Daher müssen zunächst Kalibrationsmessungen bei verschiedenen Temperaturen sowie verschiedenen Konzentrationen gegen die Referenzmethode (Feuchtebestimmung)

gemessenen Konzentrationen erfolgen. Der Temperatursensor ist hierzu direkt in den Ultraschallsensor integriert. Nach Kalibration wird die absolut gemessene Schallgeschwindigkeit direkt als Konzentration auf dem Gerätedisplay ausgegeben und gespeichert (Abb. 20). Diese Daten können unmittelbar zur Ausgabe von Regelpulsen zur Ansteuerung einer Dosierpumpe zur Zugabe von Produktkonzentrat (Abb. 19) verwendet werden.

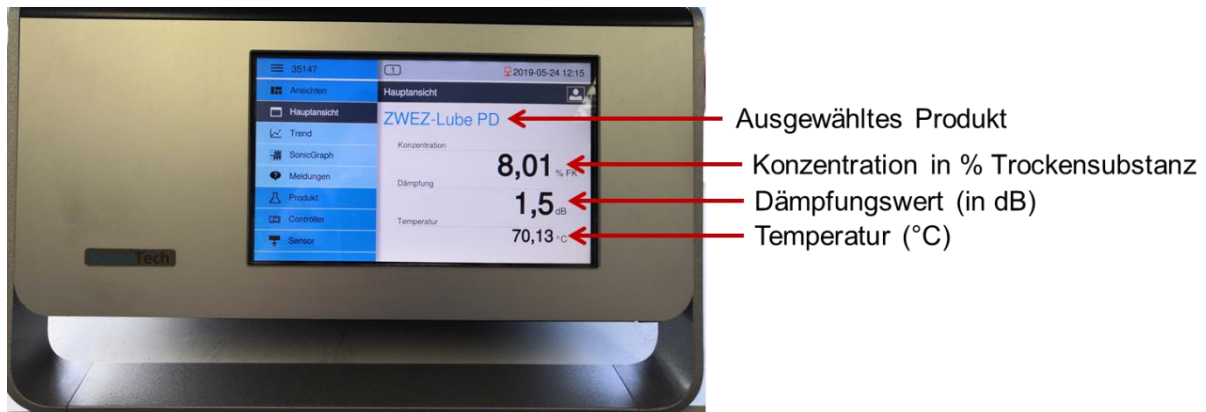


Abbildung 20: Messwertdarstellung beim Ultraschallmesssystem der Fa. SensoTech

Um die Eignung dieser Messmethode bei verschiedene Schmierstoffprodukten untersuchen zu können, wurde ein Laborsystem der Fa. SensoTech angeschafft, das nach Durchführung derartiger Kalibrationsmessungen die Erstellung sogenannter Datensätze für jedes einzelne Produkt zulässt, die dann im Gerät hinterlegt werden. Hierdurch konnten auch mögliche Probleme und Verfahrensgrenzen der Methode aufgezeigt und im Detail untersucht werden.

Die Messmethode kommt bereits bei einigen wenigen Industrieunternehmen zum Einsatz. Entsprechend bestätigte sich die grundsätzliche Eignung bei diversen Produkten der Oberflächenbehandlung, auch über Schmierstoffbäder hinaus.

Beispielhaft zeigt Abb. 21 einen Vergleich der Messwerte für den Gehalt an Trockensubstanz in einem Bad von Polymer 2 (ZWEZ-Lube PD 47x).

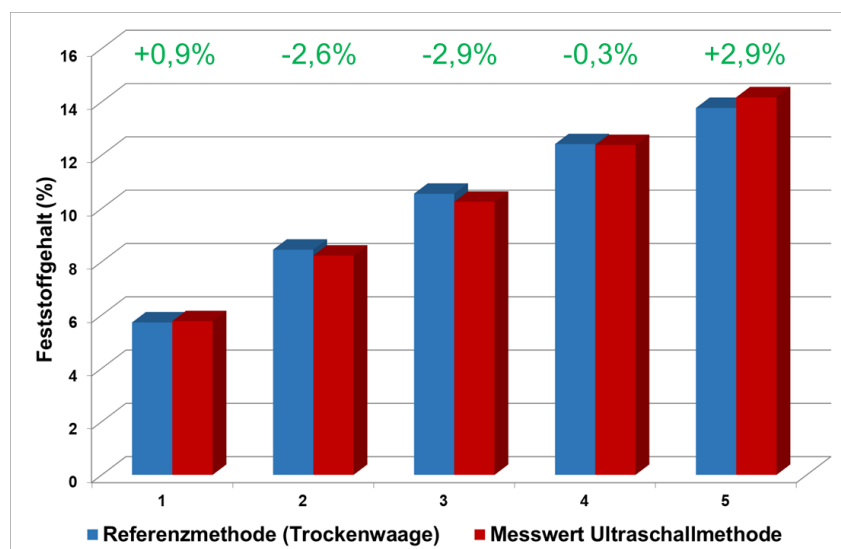


Abbildung 21: Vergleich Konzentrationsmessung nach Referenzmethode und Ultraschallmethode

Die vorherige Kalibration und Erstellung des Datensatzes erfolgte über den kompletten in der Praxis eingesetzten Konzentrationsbereich von 5 bis 15% Trockensubstanz sowie im Temperaturbereich von 60 bis 80°C.

Die relativen Abweichungen bei den anschließend durchgeführten Ultraschallmessungen bei beliebigen Badtemperaturen im zulässigen Bereich liegen bei maximal $\pm 3\%$ verglichen mit der Bestimmung der Trockensubstanz einer zeitgleich entnommenen Badprobe mittels Feuchtebestimmungsgerät. Diese Abweichung liegt damit in einem in der Praxis akzeptablen Bereich. Eine Erhöhung der Messwertgenauigkeit ist möglich wenn nach Erstellung des allgemeinen und weit gefassten Datensatzes für das Produkt eine weitere Ein- oder Zweipunkt-Kalibration durchgeführt wird. Hierbei wird in einem eng gefassten Konzentrationsbereich um die Sollkonzentration (z.B. $\pm 2\%$ TS) ein erneuter Abgleich der Messwerte mit der Referenzmethode vorgenommen und im Gerät abgespeichert. Hierdurch konnten in Versuchsreihen die prozentualen Abweichungen auf unter $\pm 1\%$ reduziert werden. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass Messwerte außerhalb des nachjustierten Bereiches mit z.T. erheblich größeren Fehlern verbunden sind als ohne zusätzliche Kalibration.

Die Messungen verschiedener Prozessflüssigkeiten zeigten einige anwendungstechnische Probleme auf, die insbesondere die Datensatzerstellung unter Laborbedingungen erschweren, grundsätzlich aber auch im industriellen Praxiseinsatz eine Rolle spielen können.

So führen Lufteinschlüsse oder auch Agglomerate von Feststoffanteilen in der Prozessflüssigkeit zwangsläufig zu Messfehlern. Die Richtigkeit der Messwerte nimmt deutlich ab. Neben der Ultraschallgeschwindigkeit und Temperatur kann der Sensor jedoch auch die Dämpfung des Schallsignals in dB messen, d.h. die Differenz der Signalintensität zwischen Sender und Empfänger. Die Dämpfung stellt dabei eine Art Kontrollfaktor für die Plausibilität der Schallgeschwindigkeit bzw. Konzentrationswerte dar. Bei höheren Dämpfungswerten ist mit einem höheren Messfehler zu rechnen. Ein exakter Schwellenwert kann hierbei nicht genannt werden, dieser ist abhängig vom jeweiligen Produkt. Bei sehr hohen Dämpfungswerten gibt das Messgerät eine Fehlermeldung aus.

Der Zusammenhang der Messwertfehler mit Lufteinschlüssen zeigte sich in der Tatsache dass eine Behandlung der Prozessflüssigkeit in einem Ultraschallbad zum Austreiben der Luft und unmittelbar zu einer deutlichen Senkung des Dämpfungswertes führt.

Da es sich bei den Schmierstoffbädern nicht um klare Flüssigkeiten sondern um wässrige Feststoffdispersionen handelt, hat auch die Bewegung der Flüssigkeit um den Sensor einen gewissen Einfluss. Das Bad muss immer in Bewegung bleiben um Schlierenbildung durch Inhomogenität der Flüssigkeit zu vermeiden und um einen schnellen Temperatúrausgleich sicherzustellen, zu starke Bewegungen können wiederum zum Eintrag von Luft führen und ebenfalls die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen.

Insgesamt bestätigten die durchgeführten Versuchsmessungen, dass die Ultraschallmessmethode zur kontinuierlichen Konzentrationsmessung und Regelung in Schmierstoffbädern und anderen Prozessflüssigkeiten geeignet ist.

Damit ist eine vollautomatisierte selbstregelnde Badführung umsetzbar, die die Oberflächenbehandlung von Halbzeugen für die Kaltumformung fit für „Industrie 4.0“ in der industriellen Praxis macht.

3.9. Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der 3. Testphase (s. Abschnitt 3.5) haben gezeigt, dass der Einschichtschmierstoff der Reihe ZWEZ-Lube PD 47x für die Herstellung von Bremskolben aus hochlegiertem Aluminium EN AW 6082 T6 im Serieneinsatz vollumfänglich geeignet ist. Bisher konnten diese Bauteile ausschließlich nach konventioneller Behandlung der Butzen mit dem Tribosystem aus Calciumaluminat und Seifenschmierstoff gefertigt werden. Durch den nun möglichen Verzicht auf das Aufbringen einer Konversionsschicht wird die Umweltbilanz der Oberflächenbehandlung in erheblichem Umfang verbessert. Da jegliche chemische Vorbehandlung vollständig entfällt, muss nur ein Beschichtungsbad auf Betriebstemperatur gehalten werden. Durch den gleichzeitigen Wegfall des mehrfachen Wechsels zwischen Kalt- und Warmbädern reduziert sich der Energiebedarf drastisch.

Die konversionsschichtfreie Oberflächenbehandlung leistet darüber hinaus einen weiteren ganz erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung und dem Umweltschutz. Prinzipiell kann eine solche Behandlungsanlage vollständig abwasserfrei betrieben werden. Die im Aluminatverfahren erforderlichen Spülschritte zwischen den einzelnen Behandlungsbädern entfallen gänzlich und das Schmierstoffbad selbst ist je nach Produkteigenschaften als Dauerbad geeignet. Das heißt, bei ordnungsgemäßer Badführung sind ein Austausch und damit eine Entsorgung des Mediums nicht erforderlich. Gleichzeitig ist der Bedarf an Frischwasser sehr gering, da nur Verdampfungsverluste im Schmierstoffbad auszugleichen sind.

Die Möglichkeit mit Einschichtschmierstoffen umgeformte Bauteile mit wässrigen Badlösungen statt mit Reinigern auf Basis organischer Lösemittel reinigen zu können (s. Abschnitt 3.7) stellt unter Umweltgesichtspunkten ebenfalls einen großen Vorteil dar.

Die konventionelle Oberflächenbehandlung mit bis zu 16 Behandlungsschritten bedeutet einen sehr hohen apparativen wie logistischen Aufwand. Bereits heute werden Neuinvestitionen in derartige Anlagen von kaltumformenden Betrieben in der Aluminiumbranche vermieden. Stattdessen werden Aufträge zur Beschichtung von Halbzeugen nach dem Aluminatverfahren an Lohnbetriebe vergeben. Die Folge ist ein hohes Transportvolumen für Halbzeuge, vom Lieferant über den Lohnbeschichter zum Umformer. Diese zusätzlichen Transporte entfallen wenn Umformbetriebe aufgrund des erheblich geringeren Investitionsbedarfs in eine eigene einstufige Beschichtungsanlage investieren. Die Vergabe von Beschichtungsaufträgen an externe Lohnbetriebe ist zudem mit hohen laufenden Kosten verbunden, die die Wertschöpfung bei der Fertigung von Bauteilen deutlich verschlechtert. Daher können sich die Kosten für die Implementierung einer Inhouse-Beschichtung mit Einschichtschmierstoffen recht schnell amortisieren, was die Einführung derartiger Schmierstoffprodukte im Markt begünstigt.

Technologisch bieten einstufige Beschichtungsverfahren die Möglichkeit der vollständig automatisierten Badführung (s. Abschnitt 3.8). Alle erforderlichen Badparameter können inline überwacht, mit Sollwerten abgeglichen und geregelt werden. Die Daten werden gespeichert und stehen im Bedarfsfall, z.B. bei einer erforderlichen Chargenkontrollprüfung zur Verfügung. Im Kontext der immer höheren Anforderungen an Qualitätssicherungsmaßnahmen gerade in der Automobilzulieferindustrie bietet dies neue Möglichkeiten z.B. im Falle von Reklamationen.

3.10. Veröffentlichung der Projektergebnisse

Die wesentlichen Projektinhalte und Ergebnisse wurden im Mai 2019 auf der NEMU-Tagung (Neuere Entwicklungen in der Massivumformung) in einem Vortrag präsentiert und veröffentlicht:

H. Venzlaff: Environmentally Friendly Tribosystems for Cold Forging of High-Alloyed Aluminium Materials. Conference Proceedings on “New Developments in Forging Technology” in Stuttgart – Germany, 14.-15.05.2019, ISBN: 978-3-947085-02-6 [VEN 19]

Eine weitere Veröffentlichung in der Zeitschrift “Massivumformung” ist angedacht.

4. Fazit und Ausblick

Im Projekt „Umweltfreundliche tribologisch wirksame Beschichtungssysteme für die Kaltmasivumformung von Stangenabschnitten (Butzen) aus hochlegierten Aluminiumwerkstoffen“ wurden neuartige polymerbasierte Einschichtschmierstoffe entwickelt, optimiert und im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Diese Untersuchungen erfolgten nach Durchführung erster Vorversuche in Form von Umformversuchen mit unmittelbarem Praxisbezug durch Wahl praxisrelevanter Werkstofftypen und eines Bremskolbens aus ehemaliger Serienfertigung als Demonstratorbauteil.

Die Ergebnisse zeigen, dass Einschichtschmierstoffe Tribosysteme mit Konversionsschicht auch im industriellen Serieneinsatz ersetzen können. Das primäre Projektziel konnte somit erreicht werden. Darüber hinaus bieten diese Schmierstoffe noch weitere signifikante Vorteile, die in erster Linie im deutlich vereinfachten Beschichtungsverfahren selbst liegen. Es ist mit erheblich geringeren Investitionskosten verbunden und erleichtert hierdurch die Einführung dieser neuartigen Schmierstoffsysteme auf breiter Basis bei Anwendern der Kaltmasivumformung von Aluminiumwerkstoffen. Gleichzeitig bietet dieses Verfahren durch den Wegfall der zahlreichen (Vor-)behandlungsschritte zahlreiche ökologische wie logistische Vorteile.

Weitere Energieeffizienz-Gewinne sind zu erzielen, wenn die Oberflächenbehandlung als Inline-Applikation ausgelegt wird. Hier bietet es sich an, die Rohlinge vor dem Kontakt mit dem Beschichtungsmedium – meist durch ein Überfluten – induktiv vorzuwärmen. Dies erlaubt eine wesentlich schnellere Trocknung der aufgetragenen Beschichtung durch die von den Rohlingen aufgenommene Wärme und macht eine anschließende Unterstützung der Trocknung durch Warmluft (die meist vergleichsweise ineffizient ist) überflüssig.

Neben dem vereinfachten Beschichtungsverfahren zeigen die Versuchsergebnisse weitere Vorteile auf, die im industriellen Einsatz von großer Bedeutung sind. Zum einen stellte die Reinigung umgeformter Bauteile durch wässrige Reinigungsverfahren keinerlei Probleme dar – quasi eine Grundvoraussetzung für deren Serieneinsatz. Zum anderen zeigte sich in den Versuchen eine reduzierte Neigung zur Verunreinigung der Werkzeuge und Pressenumgebung durch Schmierstoffrückstände. Zudem ist im Gegensatz zu Schmierstoffen auf Basis von Seifen Staubentwicklung bei Polymerschmierstoffen kein Thema. Dies ist nicht nur aus der Sicht des Arbeitsschutzes zu begrüßen sondern bedeutet auch einen reduzierten Reinigungs- und Wartungsaufwand. Gleichzeitig zeigten die Rückstände der getesteten Schmierstoffe auch eine im Vergleich zum System aus Aluminat und Seife geringere Neigung zum Zusetzen der Werkzeuge, was neben dem reduzierten Reinigungsaufwand eine Erhöhung der Produktionsleistung bedeuten kann.

Der in diesen Untersuchungen beste Einschichtschmierstoff aus der Reihe ZWEZ-Lube PD 47x zeigte darüber hinaus sogar eine im Vergleich zum Referenzsystem höhere Leistungsfähigkeit. Allerdings muss hierzu einschränkend gesagt werden, dass dies – wie in der Serienfertigung auch – nur unter Einsatz eines Ölschmierstoffs zur Zusatzschmierung möglich war. Ein Verzicht auf diese Zusatzschmierung wäre selbstverständlich wünschenswert, so-

dass hier noch ein gewisses weiteres Optimierungspotential liegt. Möglichkeiten der Optimierung liegen z.B. in der Anpassung der Stempelgeometrien und in der mechanischen Oberflächenbehandlung der Butzen. Die in der letzten Projektphase getesteten Butzen wurden mit Aluminiumgranulat gestrahlt und zeigten bei gleicher Schmierstoffbeschichtung ein höheres Leistungsniveau als die zuvor ungestrahlten Butzen. Der Einsatz von Aluminiumgranulat erzeugt jedoch durch die vergleichsweise geringe Härte des Strahlmaterials nur ein sehr feines Strahlbild. Der Einsatz von Stahl oder auch Edelstahl als Strahlmaterial erzeugt eine wesentlich stärkere Aufrauung der Oberfläche und damit mehr Schmierstofftaschen, die die Umformleistung des Schmierstoffs weiter steigern könnten. Entsprechende Butzen wurden am Ende des Projekts noch vorbereitet, konnten jedoch aus zeitlichen Gründen nicht mehr in Umformtests untersucht werden. Auch war es nicht möglich, die Tests auf weitere Bauteile aus dem Fertigungsspektrum der Fa. alutec auszudehnen. Die Wahl des untersuchten Bremskolbens kann jedoch als Referenz angesehen werden, die das Anforderungsspektrum bei der Fertigung von Aluminiumbauteilen durch Kaltmassivumformung in weiten Bereichen abdeckt.

Eine weitere Leistungssteigerung bei der Umformung hochfester Aluminiumlegierung ist denkbar wenn Butzen vor der Umformung (induktiv) erwärmt werden. Dieses im Bereich Stahl bereits gelegentlich eingesetzte Mittel (Stichwort: Lauwarmumformung) spielt bei Aluminium bislang keine Rolle. Durch die Vorwärmung des Materials wird die Härte herabgesetzt und die Umformung erleichtert. Während Seifenschmierstoffe durch ihre sehr begrenzte Temperaturstabilität für dieses Umformprinzip wenig geeignet sind, erlauben Polymerschmierstoffe prinzipiell ein Vorwärmen auf Temperaturen von 150°C und darüber ohne signifikante Einbußen in ihrer Leistungsfähigkeit.

Neben dem ökologisch vorteilhaften und mit geringeren Investitionen verbundenen Beschichtungsverfahren ermöglicht der Einsatz von Einschichtschmierstoffen die Umsetzung einer vollautomatisierten und in die gesamte Produktionskette integrierte Oberflächenbehandlung im Kontext von „Industrie 4.0“. Der gesamte Fertigungsprozess wird hierdurch flexibilisiert und digital erfassbar.

Besteht hingegen keinerlei Möglichkeit, in eine Trommeltauchbeschichtung zu investieren, so bietet der im Rahmen des Projekts völlig neu konzipierte pastöse Schmierstoff ZWEZ-Lube AX hierzu eine Alternative, da dieser im herkömmlichen Auftrommelverfahren gänzlich analog zu pulverförmigen Metallseifen (Zinkstearat) eingesetzt wird. Er beseitigt weitgehend die Staubbelastung bei der Applikation und während der Umformung. Sein Leistungsvermögen übersteigt nach bisherigen Erfahrungen das von Zinkstearat und erreicht in etwa das Niveau des getesteten Polymerschmierstoffs der Reihe ZWEZ-Lube PD 37x und dürfte somit ebenfalls die Umformung zumindest mittelharter hochlegierter Aluminiumwerkstoffe in Serie erlauben.

5. Literaturverzeichnis

- [ALU 15] Homepage des Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: www.aluinfo.de
- [BÄC 08] W. Bächler: Polymer-Schmierstoffe in der Kaltmassivumformung. VDI Wissensforum (Hrsg.): 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer: Ressourcen effizient nutzen, 2008
- [BAR 03] W.J. Bartz (Hrsg.): Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung. Expert-Verlag (Renningen), 2003, ISBN 978-3-8169-2161-5
- [BAY 95] N. Bay, O. Wibom, J.A. Nielsen: A new friction and lubrication test for cold forging. *Annals of the CIRP*, 44, 1995, S. 217–221
- [BAY 10a] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid, M. Yoshida: Environmentally benign tribo-systems for metal-forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 2010, S. 760–780
- [BAY 10b] N. Bay, T. Nakamura, S. Schmid: Green Lubricants for Metal Forming. *Tribology of Manufacturing Processes, Volume 1. Proceedings of the 4th International Conference on Tribology in manufacturing Processes (ICTMP) 2010*
- [BAY 13] N. Bay: New tribo-systems for cold forming of steel, stainless steel and aluminium alloys. *Proceedings of the 46th International Cold Forging Group (ICFG) Plenary Meeting 2013*
- [BÜC 12] H.J. Büchner, M. Mohaupt: Aktuelle Rohstofftrends und ihre Auswirkungen auf die Aluminiumindustrie. IKB Information Aluminiumindustrie. Beitrag aus Aluminium-Lieferverzeichnis 2012
- [CZI 10] H. Czichos, K.H. Habig: Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg + Teubner (Wiesbaden), 2010, ISBN 978-3-8348-0017-6
- [GAR 07] M. Gariety, G. Ngaile, T. Altan: Evaluation of new cold forging lubricants without zinc phosphate precoat. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007, S. 673–681
- [GRO 13a] P. Groche, C. Müller, J. Stahlmann, S. Zang: Mechanical conditions in bulk metal forming tribometers – Part one. *Tribology International* 62, 2013, S. 223–231
- [GRO 13b] P. Groche, J. Stahlmann C. Müller: Mechanical conditions in bulk metal forming tribometers – Part two. *Tribology International* 66, 2013, S. 345–351
- [GRO 15] P. Groche, S. Zang, K. Hayakawa: State of the art in phosphate-free lubrication in cold forging. *Proceedings of the 48th International Cold Forging Group (ICFG) Plenary Meeting. KIMM Press*, 2015
- [HER 08] T.B. Herlan: Energie und Umweltaspekte bei der Oberflächenbehandlung zum Kaltmassivumformen. VDI Wissensforum (Hrsg.): 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer: Ressourcen effizient nutzen, 2008

- [HOL 14] J. Holz: Cold forming without conversion coating – Recent advances and future prospects. Proceedings of the 47th International Cold Forging Group (ICFG) Plenary Meeting 2014
- [LUD 16] H. Ludwig, S. Zang, O. Oehler, J. Holz, H. Venzlaff, J. Ostrowski: Umweltfreundliche Prozessketten in der Kaltmassivumformung von Abschnitten durch den Verzicht auf nasschemisch aufgebrauchte Konversionsschichten. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 30738 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2016
- [NIT 08] K. Nittel: Neue Beschichtungen und Trends beim Kaltfließpressen und Kaltstauchen. VDI Wissensforum (Hrsg.): 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer : Ressourcen effizient nutzen, 2008
- [NIT 10] K. Nittel, E. Bucci, R. Hellwig, J. Schoppe, J. Ostrowski, P. Zvez, R. Zvez, J. Stahlmann, P. Groche: Surface Treatment – Facts, Trends and Outlook for the Cold Forging Industry. Proceedings of the 43rd International Cold Forging Group (ICFG) Plenary Meeting 2010, S. 142–152
- [RAU 05] W. Rausch: Die Phosphatierung von Metallen. 3. überarbeitete Auflage, Leuze Verlag (Bad Saulgau), 2005, ISBN: 3-87480-197-7
- [SCH 06] T. Schrader, M. Shirgaokar, T. Altan: Analysis of the Double Cup Extrusion Test for Evaluation of Lubricants. Proceedings of the 4th JSTP International Seminar on Precision Forging, 2006, S. 77–82
- [SCH 10] J. Schulz, F. Klocke, P. Mattfeld: Physikalische und chemische Wechselwirkungen von Schmierstoffen mit Metalloberflächen in der Kaltmassivumformung. Tribologie + Schmierungstechnik, 58. Jahrgang, 2011
- [VEN 19] H. Venzlaff: Environmentally Friendly Tribosystems for Cold Forging of High-Alloyed Aluminium Materials. Conference Proceedings on “New Developments in Forging Technology” in Stuttgart – Germany, 14.-15.05.2019, ISBN: 978-3-947085-02-6

6. Anhänge

| Werkstoff | | | Mechanische Eigenschaften | | | | Chemische Zusammensetzung Legierungsbestandteile [Gew. %] | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------------|---------------------------|---|---|---------------------|--|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Bezeichnung nach EN | Kurzname nach DIN/EN | WB-Zustand | Brinell-Härte HB | Zugfestigkeit R _m [N/mm ²] | Streckgrenze R _{p0,2} [N/mm ²] | Bruchdehnung A5 [%] | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | andere |
| AW 3103 | AlMn1 | 0 | 30 | 95-135 | 35-90 | 25 | <0,5 | <0,7 | <0,1 | 0,9-1,5 | <0,3 | <0,1 | <0,2 | <0,1 | <0,15 |
| AW 5754 | AlMg3 | 0 | 45 | 180-250 | 80-150 | 17 | <0,4 | <0,4 | <0,1 | <0,5 | 2,6-3,4 | <0,3 | <0,2 | <0,15 | <0,15 |
| AW 6082 | AlSi1MgMn | 0 | 34-44 (40) | 100-160 | 50-110 | 14 | 0,70-1,30 (1,00) | <0,50 (0,32) | <0,10 (0,05) | 0,40-1,00 (0,49) | 0,60-1,20 (0,70) | <0,25 (0,07) | <0,20 (0,02) | <0,10 (0,02) | <0,15 (k.A.) |
| | | T4 | 70 | 205-280 | 110-200 | 14 | | | | | | | | | |
| | | T6 | >95 (106) | 295-370 | 250-350 | 8 | | | | | | | | | |

Tabelle A 1: Wichtige Werkstoffkenndaten der im Projekt untersuchten Aluminiumwerkstoffe. Die in blau angegebenen Werte geben beispielhaft die tatsächliche chemische Zusammensetzung sowie Härte der von Fa. AWW gelieferten Butzenchargen für die Versuche im Technikumsmaßstab wider