

**LS-Mechanik GmbH**

**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**

**von**

**Dipl.-Ing. Horst Ludwig  
Dipl.-Ing. Sebastian Zang  
Dipl.-Ing. Oliver Oehler  
Dr. Joachim Holz  
Dr. Hendrik Venzlaff  
Dr. Jens Ostrowski**

**Alsfeld, 29. Januar 2016**

06/02		<b>Projektkennblatt</b>			
		der			
<b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>					
Az	<b>30738</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>493.041,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Umweltfreundliche Prozessketten in der Kaltmassivumformung von Abschnitten durch den Verzicht auf nasschemisch aufgebrauchte Konversionsschichten</b>			
<b>Stichworte</b>		Phosphatfrei, Inline-Beschichtung, Kaltmassivumformung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>34 Monate</b>	<b>01.01.2013</b>	<b>31.10.2015</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	31.07.2013				
<b>Bewilligungsempfänger</b>		LS Mechanik GmbH Ernst-Diegel-Straße 4a D-36304 Alsfeld		Tel	06631-80190220
				Fax	06631-80190212
				Projektleitung	
				Dipl.-Ing. Horst Ludwig	
				Bearbeiter	
				Dipl.-Ing. Horst Ludwig	
<b>Kooperationspartner</b>		Carl Bechem GmbH Weststraße 120 in 58089 Hagen <hr/> Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) Otto-Bernd-Str. 2 in 64287 Darmstadt <hr/> Schondelmaier GmbH - Presswerk Hornbergstraße 18 in 77793 Gutach <hr/> ZWEZ-Chemie GmbH Schreinerweg 7 in 51789 Lindlar			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung von Methoden zur Einführung von neuartigen Einschichtschmierstoffen in der Kaltmassivumformung von Stahlabschnitten. Durch den Einsatz inline-applizierbarer Schmierstoffe soll das konventionelle Tribosystem aus Konversionsschicht und Schmierstoff substituiert werden. Der Einsatz eines Salzschniermittelträgers, Molybdändisulfids oder Polymers als Einschichtschmierstoff ermöglicht aufgrund der kurzen Applikationszeit neuartige Prozessfolgen. Im Rahmen des Projektes soll eine Prozessfolge ausgearbeitet werden, die eine logistisch und technologisch optimierte Vorbehandlung und Umformung von Stahlabschnitten gestattet sowie die ökologischen Nachteile der Phosphatierung umgeht.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Rahmen des Projekts werden von den Firmen Bechem und Zwez Einschichtschmierstoffe entwickelt, die an die tribologischen Lasten eines mehrstufigen Fließpressprozesses angepasst sind. Durch die Variation der Zusammensetzung und die gezielte Einstellung der Viskosität soll die Aufbringbarkeit und das Anhaften des Schmierstoffes auf den durch Strahlen funktional gestalteten Bauteiloberflächen gewährleistet werden. Mit den Ergebnissen dieser Konzeptionierung der Bäderfolge und der Aufbringart des Schmierstoffes detailliert die Firma LS Mechanik zusätzlich mit weiteren Anmerkungen der Firma Schondelmaier den Entwurf für eine inline Beschichtungsanlage. Diese wird im Anschluss an die Konzipierung und Fertigung vor Ort bei der Firma Schondelmaier für die Beschichtung der Butzen für ein mehrstufiges Werkzeug eingesetzt.

Das PtU untersucht die Schichtwandlung des Schmierstoffes entlang dieser neuartigen Prozesskette. Hierfür erarbeitet das PtU ein phänomenologisches Modell, mit dem es möglich ist, die Belastungsfähigkeit des Schmierstoffes über die Umformung zu beschreiben. Ausgehend von den jeweiligen Entwicklungsständen der Firmen Bechem und Zwez werden die Einschichtschmierstoffe anhand von Gleitstauchversuchen untersucht, um so die Grenzen des tribologischen Systems hinsichtlich der Einsatztemperatur, der Kontaktnormalspannung, der Oberflächenvergrößerung und der Relativwege zwischen Werkzeug und Werkstück zu erfassen.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Im Projekt wurden neuartige Schmierstoffe auf Basis von Molybdändisulfid, Polymer und Salz-Wachs neu- oder konsequent weiterentwickelt. Die Schmierstoffe sind in Laboruntersuchungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Belastungen wie Oberflächenvergrößerungen, Kontaktnormalspannungen und erhöhten Temperaturen untersucht worden. Dabei ist festzuhalten, dass diese vergleichbare Ergebnisse wie etablierte Systeme bestehend aus Zinkphosphat als Konversionsschicht und einer reaktiven Seife als Schmierstoff geliefert haben.

Der im Projekt entwickelte Prototyp einer inlinefähigen Beschichtungsanlage ermöglicht eine allseitig homogene Schmierstoffverteilung auf den, für den Demonstratorprozess ausgewählten, Bauteilen. Die Beschichtung kann im Pressentakt von bis zu 30 Teilen/Minute aufgebracht werden. Versuche im industriellen Umfeld haben gezeigt, dass die entwickelten Schmierstoffe auf Basis von MoS<sub>2</sub> eine fehlerfreie Umformung ermöglichen. Die Schmierstoffe auf Basis von Polymer und Salz-Wachs lassen zum bisherigen Zeitpunkt noch keine durchgängig fehlerfreie Produktion zu.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse sind vielfältig veröffentlicht worden. Dabei wurden die Ergebnisse zum einen auf Tagungen vorgestellt und zum anderen in Fachzeitschriften präsentiert. Die einzelnen Transfermaßnahmen sind im Folgenden dargestellt:

### **Tagungen**

- 20.06.13: „Entwicklungen in der konversionsschichtfreien Kaltmassivumformung“, Triboforum, Darmstadt, Deutschland
- 26.08.2013: „Innovative Kaltmassivumformung auf nicht phosphatiertem Halbzeug“, Umform-Meeting, Hagen, Deutschland
- 11.09.2014: „Influence of Temperature on Environmentally Benign Tribological Systems in Cold Forging Operations“, North American Manufacturing Research Center, Detroit, USA
- 15.09.2015: „State of the art in phosphate-free lubrication in cold forging“, International Cold Forging Group, Daejeon, Südkorea
- Projektsitzungen der AG Tribologie im Rahmen der German Cold Forging Group

### **Veröffentlichungen**

- Groche, P. et al.: A study on the performance of environmentally benign lubricants at elevated temperatures in bulk metal forming. In Journal of Manufacturing Processes, 2014.
- Groche, Peter, Müller, Christoph (PtU), Zang, Sebastian: „Veränderung der Oberfläche bei der Umformung“. In: Werkstatttechnik online, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 103 (11-12) S. 939-945.
- Groche, Peter, Zang, Sebastian: „Zinkphosphatfreie Kaltmassivumformung von Abschnitten“. massivUMFORMUNG, Ausgabe März 2016, Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V., ISSN 2366-5106.

## **Fazit**

Die vorgegebenen Projektziele sind zum Großteil erreicht worden. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse haben gezeigt, dass alternative Schmierstoffsysteme ohne energieaufwändige und umweltbelastende Zinkphosphatschichten tribologisch anspruchsvollen Prozessen standhalten können. Hierfür sind insbesondere Schmierstoffe auf Basis von Molybdändisulfid geeignet. Produkte die auf Salz-Wachs oder Polymer basieren können bereits einstufige anspruchsvolle Verfahren realisiert werden. Bei mehrstufigen Prozessen garantieren die „weißen“ Schmierstoffe zum jetzigen Zeitpunkt noch keine durchgängig einwandfreie Fertigung. Hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf. Die Funktionalität des im Projekt entwickelten Prototypen einer inline-Beschichtungsanlage wurde erfolgreich nachgewiesen. Um diesen zur Marktreife zu bringen sind jedoch noch Nachbesserungen im Hinblick auf flexible Bauteildurchmesser und -längen notwendig. Ebenso gilt es ein Transfersystem zur automatischen Bestückung der Beschichtungsanlage sowie der Weitergabe an die Presse zu integrieren. Die Verwendung von großen Schmierstofftanks hat sich als nachhaltig bei der Reinigung und einem Wechsel des Schmierstoffs erwiesen. Ein direkter Anschluss an ein Schmierstofffass erscheint zielführend.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....	7
1. Zusammenfassung.....	9
2. Einleitung.....	10
2.1. Ausgangssituation .....	10
2.2. Zielsetzung .....	11
3. Stand der Technik .....	12
3.1. Zink-Phosphatierung .....	12
3.1.1. Niedrigtemperatur-Phosphatierung.....	13
3.1.2. Elektrolytische-Phosphatierung.....	14
3.1.3. Zwischenfazit – Zink-Phosphatierung .....	15
3.2. Alternative Schmiersysteme .....	15
3.2.1. Neuartige Konversionsschichten.....	15
3.2.2. Schmierstoffsysteme ohne Konversionsschicht.....	16
3.2.3. Zwischenfazit – Alternative Schmiersysteme .....	19
4. Ergebnisdarstellung.....	20
4.1. Entwicklung von Einschichtschmierstoffen für zinkphosphatfreie Kaltmassivumformung.....	20
4.1.1. Allgemeine Vorgehensweise.....	20
4.1.2. Implementierung der Trennfunktion .....	20
4.1.3. Optimierung der Haftung ohne separate Trägerschicht .....	21
4.1.4. Optimierung der Schmierwirkung.....	21
4.1.5. Gewährleistung einer hohen Temperaturstabilität.....	22
4.1.6. Umweltaspekt bei der Schmierstoffentwicklung .....	23
4.1.7. Bauteilreinigung .....	24
4.2. Entwicklung eines Demonstratorprozess.....	24
4.2.1. Dreistufiger Umformprozess .....	25
4.2.2. Ermittlung der tribologischen Last „Temperatur“ im Prozess .....	27

4.3. Entwicklung von Applikationsmöglichkeiten und Bewertung von ökologisch optimierten Schmierstoffsystemen .....	28
4.3.1. Applikation von ökologisch optimierten Schmierstoffen .....	28
4.3.2. Tribologische Charakterisierung .....	31
4.3.3. Einstufiger Prozess .....	33
4.4. Neuartige Prozesskette zur zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung .....	34
4.4.1. Anforderungsliste .....	34
4.4.2. Konstruktion .....	36
4.4.3. Erprobung im Laborumfeld .....	38
4.4.4. Erprobung im industriellen Umfeld .....	40
5. Fazit.....	43
6. Ausblick .....	44
7. Literaturverzeichnis .....	46
8. Anhänge .....	48
8.1. Produkte - Zwez .....	48
8.2. Produkte – Bechem .....	48

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Energieeinsatz und Werkstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren [Dob10] .....	10
Abbildung 2: Phosphatieranlage der Schondelmaier Presswerk GmbH .....	12
Abbildung 3: Querschnitt und Draufsicht auf eine poröse Beschichtung [Bay10] .....	16
Abbildung 4: Schematische Darstellung des MEC Homat nach [Kas00] .....	16
Abbildung 5: Mehrstufige Kaltschmiedevorgänge mit ILUB [Illu14] .....	17
Abbildung 6: Wirkprinzip MoS <sub>2</sub> nach [Nbh10] .....	18
Abbildung 7: Schematischer Schichtaufbau von Salzschmiermittelträger nach [Ste08] und [Köh09] (links); Vergleich des prinzipiellen Schichtaufbaus (rechts) .....	19
Abbildung 8: Vergleich Reibwerte verschiedener Schmierstoffe .....	23
Abbildung 9: Geometrien der einzelnen Stufen des Demonstratorprozesses .....	25
Abbildung 10: Auftretende Spannungen im Demonstratorprozess .....	26
Abbildung 11: Positionierung der Thermoelemente im Werkzeug .....	27
Abbildung 12: Temperaturentwicklung in Abhängigkeit unterschiedlicher Schmierstoffsysteme .....	28
Abbildung 13: Trocknungszeit in Abhängigkeit der Proben temperatur .....	29
Abbildung 14: Qualität der Schmierstoffschicht auf den Bauteilen .....	30
Abbildung 15: Schichtgewicht in Abhängigkeit der Proben temperatur .....	30
Abbildung 16: Vergleich zwischen phosphatfreien und phosphatbasierenden Schmierstoffsystemen .....	32
Abbildung 17: Schmierstoffverhalten bei erhöhten Temperaturen .....	32
Abbildung 18: Kraftverlauf in Abhängigkeit der Matrizentemperatur (Salz-Wachs) ..	33
Abbildung 19: Kraftverlauf in Abhängigkeit der Matrizentemperatur (Polymer) .....	34
Abbildung 20: Anforderungsliste Reinigungs- und Beschichtungsanlage .....	35
Abbildung 21: Reinigungs- und Beschichtungsanlage .....	37
Abbildung 21: Reinigungs- und Beschichtungsanlage – Seitenansicht quer .....	37
Abbildung 23: Aufbau der Beschichtungs-, Reinigungs- und Trocknungseinheit und Transfersystem .....	38
Abbildung 24: Transfersystem mit eingelegten Rohlingen .....	38
Abbildung 20: Schmierstoffschichtgewichte .....	39
Abbildung 21: Mit MoS <sub>2</sub> beschichtetes Bauteil .....	40
Abbildung 22: Rundlaufmessung .....	41

Abbildung 23: Demonstratorbauteile .....	42
Abbildung 24: Konventionelle Prozesskette.....	44
Abbildung 25: Neuartige Prozesskette .....	45

## 1. Zusammenfassung

In der Kaltmassivumformung gelten, seit Singer's Patent im Jahr 1934, hochbelastbare Schmierstoffträgerschichten auf Basis von Zinkphosphat in Kombination mit reaktiven Seifen als Stand der Technik. Diese werden, insbesondere bei der Umformung von Abschnitten, für hoch anspruchsvolle Prozesse mit großen Oberflächenvergrößerungen, Kontaktnormalspannungen, Temperaturen eingesetzt. Trotz zahlreicher Weiterentwicklungen in den vergangenen Jahren sind die Aufbringung dieser Schmierstoffe auf Bauteile und deren Reinigung nach dem Umformen noch immer mit Nachteilen behaftet. Charakteristisch für die Aufbringung von nasschemischen Systemen ist ein hoher Wasser- und Chemikalienverbrauch sowie die Bildung von umweltschädlichen Phosphatierschlämmen. Darüber hinaus müssen die Bauteile mehrere Bäder durchlaufen. Aufgrund der Bauteilabmessungen und der Menge an Bauteilen, die beschichtet werden müssen, geschieht die Applikation des Schmierstoffsystems in batches, die anschließend zwischengelagert werden müssen.

Heutige Prozessketten sind nicht mehr allein auf Produktivität ausgelegt. Ebenso müssen Umweltstandards erfüllt werden. Insbesondere seit der Einführung der europäischen Chemikalienordnung REACH gilt es, einen übermäßigen Chemikalienverbrauch zu reduzieren. Abhilfe können sogenannte Einschichtschmierstoffe schaffen. Bisher wurden diese aufgrund ihrer, im Vergleich zu Zinkphosphat + Seife, geringeren Leistungsfähigkeit jedoch nur für Prozesse mit geringeren Belastungen eingesetzt. Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts sind Schmierstoffe auf Basis von Molybdändisulfid, Polymer und Salz-Wachs entwickelt worden, die auch höchsten Belastungen Stand halten. In einem Demonstratorprozess wurden die Schmierstoffe für eine dreistufige Umformung verwendet. Dabei hat sich gezeigt, dass Molybdändisulfid eine durchgängig fehlerfreie Umformung ermöglicht hat. Bei Salz-Wachs und Polymer haben Laboruntersuchungen gezeigt, dass die Schmierstoffe zwar sehr hohen Belastungen in einem einstufigen Prozess standhalten können, jedoch bei mehrstufigen Operationen noch nicht durchgängig eine fehlerfreie Produktion garantieren können. Hier besteht noch weiteres Verbesserungspotential.

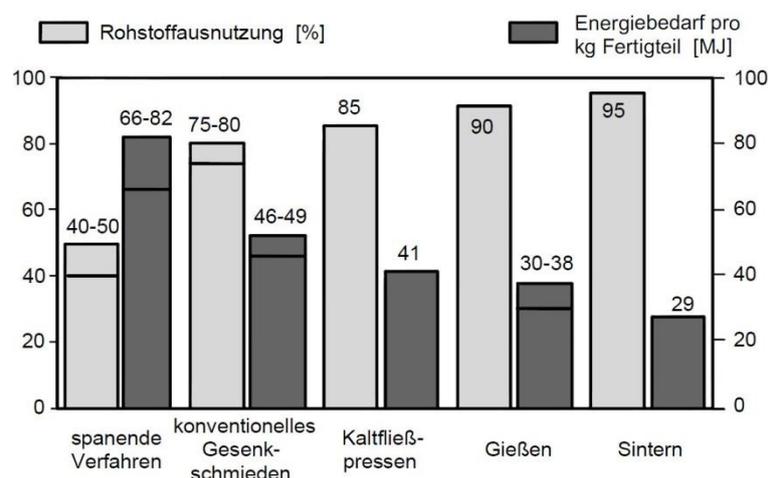
Die entwickelten Einschichtschmierstoffe werden direkt auf eine gestrahlte Bauteiloberfläche appliziert. Dies ermöglicht die Beschichtung von Halbzeugen im Pressentakt. Eine im Projekt entwickelte Inline-Beschichtungsanlage hat gezeigt, dass sowohl Molybdändisulfid, Salz-Wachs und Polymer bei einer Taktzahl von 30 Teilen pro Minute allseitig und homogen beschichtet werden können. Durch die Verwendung phosphatfreier Schmierstoffe, die mittels inline-Beschichtungsanlage appliziert werden ergeben sich im Vergleich zu herkömmlichen Beschichtungssystemen viele Vorteile wie der Verzicht auf einen hohen Wasser- und Chemikalienverbrauch, Zwischenlagerungen und die aufwändige Entsorgung von Phosphatierschlämmen.

## 2. Einleitung

### 2.1. Ausgangssituation

Verfahren der Kaltmassivumformung zeichnen sich durch ihre hohe Maßgenauigkeit sowie eine gute Werkstoffausnutzung aus. Die hergestellten Bauteile weisen eine hohe Oberflächengüte, eine geringe Bearbeitungszugabe und einen geringen Energieeinsatz für die Formgebung auf, da die Umformung bei Raumtemperatur stattfindet [Lan88], [Dob10]. Bedingt durch die Kaltverfestigung des Materials bei niedrigen Umformtemperaturen und hohen Umformgraden eignen sich kaltmassivumgeformte Bauteile besonders für hohe statische und dynamische Belastungen [Klk6]. Das herstellbare Werkstückspektrum reicht von Kleinstteilen, wie Schrauben oder Nadeln, bis hin zu Fahrwerksteilen, wie Radnaben, Achsträger oder Antriebswellen. Als Halbzeuge finden einerseits Abschnitte von Stangen oder Rohren und andererseits Drahtcoils Verwendung [Kap05].

Abbildung 1 zeigt den spezifischen Energiebedarf je kg Fertigteil und die relative Rohstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren der Metallverarbeitung. Gegenüber den spanenden Fertigungsverfahren zeichnen sich umformende, insbesondere kaltumformende, Fertigungstechnologien durch ihre hohe Rohstoffnutzung und niedrigen Energieverbrauch aus. Lediglich die Verfahren Gießen und Sintern sind in Betrachtung des Energieeinsatzes und der Rohstoffausnutzung effizienter. Jedoch sind aufgrund der nicht zufriedenstellenden Festigkeitseigenschaften oder aufwändigen Werkzeuge und Anlagen diese Verfahren oftmals nicht wirtschaftlich einsetzbar.



**Abbildung 1: Energieeinsatz und Werkstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren [Dob10]**

Um die vorteilhaften Eigenschaften kaltmassiv umgeformter Bauteile nutzbar zu machen, werden jedoch aufwändige tribologische Systeme eingesetzt, die einem frühzeitigen Verschleiß und damit dem Ausfall teurer Umformwerkzeuge entgegenwirken sollen. Da die auftretenden tribologischen Lasten lokale Temperatursteigerungen bis auf 500 °C, Kontaktnormalspannungen bis zu 3000 N/mm<sup>2</sup> und bis zu 30-fache Ober-

flächenvergrößerungen beinhalten können, werden oftmals komplexe Trennschicht-Schmierstoff-Systeme eingesetzt [Gar07], [Bab04]. Dabei haben sich Zinkphosphat-schichten als Trennschichten im industriellen Einsatz etabliert. Der Verwendung von nasschemisch aufgetragenen Konversionsschichten stehen jedoch ein hoher Energie- und Entsorgungsaufwand, eine hohe Belastung der Mitarbeiter und der Umwelt sowie die Verschmutzung von Anlagen und Maschinen entgegen [Rup97]. Die batchweise Aufbringung dieser Konversionsschichten bedingt zudem eine unterbrochene Prozesskette aufgrund der langen Durchlaufzeiten.

## **2.2. Zielsetzung**

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist das Sammeln von Grundlagenwissen für die zinkphosphatfreie, mehrstufige Kaltmassivumformung von Abschnitten, um die Einführung dieser neuartigen Schichtsysteme auf breiter Basis bei Anwendern der Kaltmassivumformung zu ermöglichen. Dazu soll die Funktionalität von zinkphosphatfreien Schmierstoffen in Wechselwirkung mit der Halbzeugoberfläche wissenschaftlich untersucht werden. Der Einsatz schnell applizierbarer Schmierstoffe in der umformenden Verarbeitung von Abschnitten ermöglicht eine Vielzahl von neuartigen Prozessfolgen. Im Rahmen dieses Projektes soll eine inlinefähige Oberflächenvorbehandlung realisiert werden, welche die verkettete Oberflächenvorbehandlung und Umformung von Abschnitten in der Kaltmassivumformung beinhaltet. Durch den Verzicht auf die Zinkphosphatierung soll es ermöglicht werden, eine umweltfreundlichere Oberflächenvorbehandlung in Verbindung mit kürzeren Durchlaufzeiten, kleineren Puffervolumen und somit geringeren Kosten sowie ein höheres Maß an Flexibilität in der Fertigungsteuerung zu erreichen. Durch die Optimierung der logistischen Prozessführung werden weiterhin zuvor schwer erfassbare Störeinflüsse, bedingt durch lange Lagerzeiten und Witterungseinflüsse auf die Halbzeugoberfläche, eliminiert.

### 3. Stand der Technik

#### 3.1. Zink-Phosphatierung

Die Phosphatierung von Komponenten aus Draht oder Einzelteilen ist der am häufigsten verwendete Vorbehandlungsprozess für Metalloberflächen von mehrschichtigen Schmierstoffsystemen bei Kaltumformverfahren [Tam15a]. Dieses System führte Singer in den frühen 1930er Jahren [Sin34] ein. Die Zink-Phosphat-Beschichtung dient als Konversionsschicht welche die Komponenten vor Korrosion schützt und eine ausgezeichnete Verschleiß- und Haftfestigkeit der Schmiermittel bietet [Fre86]. Die Aufbringung der Phosphatbeschichtung geschieht in mehreren Behandlungsschritten, die wie folgt ablaufen [Tam15a]:

Reinigen – Spülen – Beizen – Kaskadenspülung – Aktivierung – Phosphatieren – Kaskadenspülung – Neutralisieren – Nachbehandeln – Trocknen

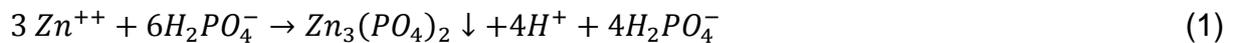


**Abbildung 2: Phosphatieranlage der Schondelmaier Presswerk GmbH**

Abbildung 2 zeigt die vorliegende Phosphatieranlage der Firma Schondelmaier GmbH. Darin sind gut die verschiedenen notwendigen Bäder und die dabei entstehenden Dämpfe zu erkennen. Vor dem Phosphatieren müssen zunächst alle Verunreinigungen von der Metalloberfläche entfernt werden. Dafür werden alkalische Mittel wie Natronlauge, Soda, Silikate, Phosphate und Borate genutzt und die Bauteile anschließend mit Frischwasser gespült [Bay94]. Darauf folgt das Beizen der Oberfläche, um jegliche Verschmutzung zu entfernen und die Anhaftung der Zinkphosphatschicht auf der Bauteiloberfläche zu erhöhen. Die für das Beizen verwendeten Chemikalien sind Schwefelsäure und Chlorwasserstoffsäure [Bay94]. In einer anschließenden Kaskadenspülung werden drei Bäder mit unterschiedlichen pH-Werten durchlaufen. Die Aktivierung der Oberfläche geschieht unmittelbar vor dem eigentlichen Phosphatieren und wird bei einer Badtemperatur zwischen Raumtemperatur und bis zu 70 °C durchgeführt. Die Aktivierung verkürzt die Phosphatierungsdauer und ermöglicht gleichzeitig eine geringere Schlamm- sowie dünnere Phosphatschichten. Diese liegen heutzutage im Bereich der Drahtbehandlung bei ca.

6 g/m<sup>2</sup> und bei Abschnitten zwischen 12-20 g/m<sup>2</sup>. Bereits seit den frühen 1990er Jahren werden in der Automobilbranche organische Beschleuniger eingesetzt [Rau90]. Erst mit der Akzeptanz, geringere Schichtgewichte als 30 g/m<sup>2</sup> bei der Kaltmassivumformung von Abschnitten einzusetzen, sind die organischen Beschleuniger seit Beginn des neuen Jahrtausends auch für kaltmassiv umgeformte Bauteile im Einsatz. Andere Möglichkeiten zur Beschleunigung des Phosphatierungsprozesses wie die Aufbringung im Sprühverfahren sind seit langer Zeit bekannt, aber aufgrund der Verwendung von Schüttgut in der Kaltmassivumformung nicht zweckmäßig. Tamiselvi et al. führen in ihrer Übersicht zudem noch die chemische [Raj00, Jam71] und elektrochemische Beschleunigung an [Tam15a].

Die Phosphatierung selbst findet in einem Bad mit einer Temperatur zwischen 55 °C und 65 °C statt. Die ablaufende Reaktion bei der Bildung einer Zinkphosphatschicht kann wie folgt beschrieben werden [Rau90]:



Anschließend erfolgt erneut eine Spülung der Bauteile in einer Kaskade bevor diese eine Neutralisierung erfahren. Die Nachbehandlung beinhaltet je nach Art der Kaltumformung einen Borax- Kalk- oder Schmierstoffauftrag.

Die Phosphatierung ist gekennzeichnet durch einen hohen Energie- und Wasserverbrauch. So benötigen die Reinigungsbäder Betriebstemperaturen, die von Raumtemperatur bis zu 60 °C [Bay94] reichen. Darüber hinaus bilden sich neben der gewünschten Phosphatbeschichtung auch Schwermetallschlämme aus, die meist als Folge der Beize vorkommen und aus  $\text{Fe}^{++}$  und  $\text{Fe}^{+++}$  Ionen [Don00] zusammen gesetzt sind. Diese Schlämme sind umweltgefährdend und müssen aufwändig gefiltert und kostenintensiv entsorgt werden. Hohe Durchlaufzeiten machen zusätzlich ein Zwischenlager unumgänglich, so dass hier weitere Kosten entstehen. Dadurch dass die Bauteile nur in Batches beschichtet werden können ist die Flexibilität einer Phosphatierstraße als gering anzusehen. Bäderwechsel sind aufwändig (Reinigung) und zeitintensiv.

Aus den oben genannten Gründen gibt es viel Verbesserungspotential bei der Phosphatierung von Metallen. Im Folgenden werden die Ansätze der Niedrig-Temperatur Phosphatierung und die elektrolytische Phosphatierung kurz diskutiert.

### 3.1.1. Niedrigtemperatur-Phosphatierung

Der Energieverbrauch spielt aus ökologischen Gründen eine immer bedeutendere Rolle. Deshalb haben Tamiselvi et al. weitere Untersuchungen in Richtung Niedrigtemperatur-Bäder unternommen [Tam15a]. Obwohl der Ansatz der Bäder mit geringer Temperatur seit den 1940er Jahren bekannt ist, konnten sich die Niedrigtemperaturbäder, aufgrund der Tatsache, dass sie langsam und somit nicht wirtschaftlich [Guy74] sind, nicht etablieren. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Phosphatierung bei niedrigen Temperaturen einen höheren Verbrauch von Chemikalien aufweist und somit ökologisch bedenklich ist.

Trotzdem haben jüngste Entwicklungen gute Ergebnisse gezeigt, die auch mit den ökologischen Ansprüchen im Einklang stehen. Im Jahr 2010 hat Feng Fang et al. [Fan10] eine Niedrigtemperatur-Zinkphosphatierungsbeschichtung durch ein umweltfreundliches Hydroxylaminsulfat (HAS) beschleunigt, welches auf hochgekohten Stahl aufgebracht wurde. Der umweltfreundliche Beschleuniger ermöglicht es im Vergleich zu Nitriten, die von der Umweltschutzagentur EPA (environmental protection agency) im Jahre 2000 [Tam15b] als giftig klassifiziert wurden, mit weniger Umweltbelastung auszukommen. Die Phosphatbeschichtung, bestehend aus  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  und  $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  Phasen, ist aufgrund der Zugabe von HAS dünner und kompakter. Die Kristallgröße hat sich deutlich von 100  $\mu m$  auf 50  $\mu m$  verringert und der Gehalt an  $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  erhöht sich durch die Zugabe von HAS [Fan10] von etwa 30 % auf 44 %. Arthanareeswari et al. [Art13] untersuchten die Effekte der galvanischen Kopplung von Baustahl und ihre Fähigkeit, niedrigtemperatur-Phosphatierverfahren zu beschleunigen. Im Jahr 2015 haben Tamiselvi et al. [Tam15b] eine Untersuchung von Nanozinkphosphatüberzügen auf Weichstahlproben mit Nano-SiO<sub>2</sub> in den Zink-Phosphatierbädern präsentiert. Sie erreichten eine Beschichtung mit einem Gewicht von 10 - 12 g/m<sup>2</sup> nach 15 Minuten Beschichtungszeit in einem Bad bei Raumtemperatur (27 °C).

Dementsprechend sind zwar Beschichtungen bei niedrigen Temperaturen möglich, allerdings für die Kaltmassivumformung nicht zweckmäßig aufgrund der oftmals damit einhergehenden deutlichen Verlängerung der Beschichtungszeit.

### 3.1.2. Elektrolytische-Phosphatierung

Bjerrum et al. [Ole98] entwickelten die elektrolytische Phosphatierung in den späten 1990er Jahren, um die Bildung von Metallschlamm während der Phosphatierung zu reduzieren. Dieses Verfahren bietet verschiedene Vorteile, wie z.B. ein Schlamm freies Phosphatierbad, den Wegfall von Säure beim Beizen, die Möglichkeit hochlegierte und rostfreien Stähle zu phosphatieren sowie eine Verringerung der Behandlungszeit auf 4 Sekunden für das elektrochemische Verfahren im Vergleich zu 5 Minuten die für das chemische Verfahren [Kob05]. Weiterhin kann die Dicke der Beschichtung besser durch Anwendung der elektrolytischen Phosphatierung gesteuert werden, da sie linear mit der Stromdichte und der Behandlungszeit zusammenhängt.

Durch den Wegfall einer chemischen Zink oder Zink-Kalzium-Phosphatierung durch die elektrolytische Calcium Phosphatierung sind darüber hinaus auch niedrigere Badtemperaturen von 25 °C [Nit08] möglich. Dieses Verfahren vereint somit die oben erwähnten Vorteile mit der Möglichkeit einer Energieeinsparung, da keine Erwärmung des Phosphatierbades erforderlich ist. Bei der Wahl der Schmiermittel muss nicht zwischen einer herkömmlichen Zinkphosphatschicht und einer elektrolytisch aufgetragenen Calcium Phosphatschicht unterschieden werden. Somit können Mineralöle, Metallstearate aber auch Emulsionen und Dispersionen von Polyamiden eingesetzt werden [Nit08].

Allerdings setzt eine elektrolytische Phosphatierung die Kontaktierung jedes einzelnen Bauteils voraus, was aufgrund der hohen Hubzahlen und der damit verbundenen Produktionsmenge in der Kaltmassivumformung nicht vereinbar ist.

### **3.1.3. Zwischenfazit – Zink-Phosphatierung**

Obwohl die Zinkphosphatschicht seit Jahrzehnten bei der Umformung sehr gute Ergebnisse liefert und viele Umformverfahren aufgrund der hohen tribologischen Lasten erst ermöglicht, gibt es dennoch Gründe für einen Wechsel zu alternativen phosphatfreien Schmiersystemen. Jüngste Entwicklungen haben gezeigt, dass Phosphatierverfahren im Hinblick auf Zeit und Energieverbrauch sowie die Umweltverträglichkeit, verbessert werden können. Dennoch hat die Phosphatierung noch immer viele Nachteile. Obwohl die Beschleuniger die Verarbeitungszeit deutlich reduzieren können, erfordert der Prozess eine gewisse Zeit, so dass eine vorübergehende Lagerung der Bauteile unvermeidlich ist.

Darüber hinaus haben Phosphatschichten keine Schmierwirkung, sondern dienen als effiziente Schmiermittelträger. Somit muss das Schmiermittel aufgebracht werden, nachdem die Komponente mit der Phosphatschicht überzogen wurde. Dieser zusätzliche Verfahrensschritt steht bei der Verwendung eines Zinkphosphat-basierten Schmierstoffsystems dem Gedanken einer schlanken Produktion entgegen. Der Energieverbrauch für die verschiedenen Bäder wird als hoch eingestuft. Herlan [Her08] schätzt, dass der gesamte Vorgang des Schmierstoffauftrags bis zu 0,25 kWh/kg erfordert, während für die Umformung selbst, mit 0,05-0,30 kWh/kg, nur unwesentlich mehr Energie benötigt wird.

Der Verzicht auf Phosphat als Konversionsbeschichtung bietet verschiedene Einsparpotenziale wie zum Beispiel die Reduzierung der Chemikalienkosten, des Lagerbereichs und die Entsorgung von Schwermetallschlamm sowie die Gelegenheit der Implementierung einer schlanken Produktion, bei der die Bauteile unmittelbar vor dem Umformvorgang beschichtet werden.

## **3.2. Alternative Schmiersysteme**

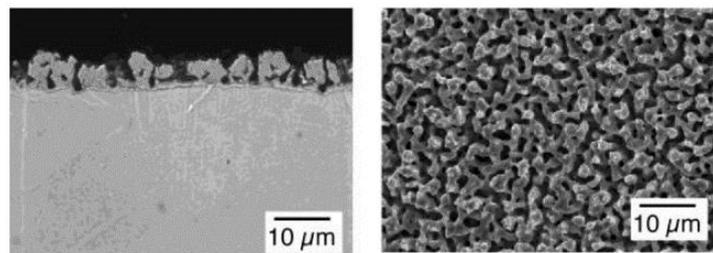
Es existieren verschiedene Konzepte für alternative Schmiersysteme. Bay et al. [Bay10] unterscheiden zwischen neuartigen Konversionsschichten und Schmierstoffen ohne Konversionsbeschichtung, speziell Ein-Bad-Beschichtungssystemen. Während neue Konversionsschichten die ökologischen Anforderungen erfüllen und oft schneller in deren Aufbringung sind, benötigen sie dennoch einen zusätzlichen Schritt mit der Applikation des Schmiermittels.

### **3.2.1. Neuartige Konversionsschichten**

#### **Mikroporöse Beschichtung**

Die mikroporöse Beschichtung dient als Schmiermittelträger und basiert auf der Idee einer porösen Oberfläche, die vorteilhaft für den Einschluss von flüssigen Schmier-

mitteln ist. Eine Technik, um poröse Oberflächen zu erzeugen wurde von Utsunomiya et al. [Uts07] entwickelt. Die Oberfläche wird dabei durch eine künstlich eingebrachte Oxidation in Luft bei 600 °C, gefolgt von einer anschließenden Reduktion der Oxide in einer Wasserstoffatmosphäre bei gleicher Temperatur, erzeugt. Die zweite Behandlung wandelt die Oxidschicht zu einer porösen Oberflächenschicht mit einer durchschnittlichen Dicke von 1 µm und einem Porendurchmesser von etwa 300 nm um. Eine andere Technik wurde von Tang et al. [Are09] entwickelt. Bei dieser Technik wird die poröse Oberflächenschicht durch eine elektrochemisch aufgebrachte zweiphasige Legierung aus Sn und Zn und einer nachfolgenden Ätzung von einem der beiden Metalle erzeugt. Die Schichtdicke für diese Methode liegt bei etwa 5 µm. Ein Querschnitt und eine Ansicht von oben auf die poröse Beschichtung, ist in Abbildung 3 zu sehen.

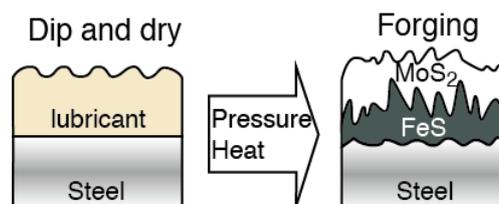


**Abbildung 3: Querschnitt und Draufsicht auf eine poröse Beschichtung [Bay10]**

Das Wirkprinzip dieser Schicht ist das gleiche wie das von Utsunomiya; der auf die Oberfläche aufgebrachte flüssige Schmierstoff wird in den kleinen Hohlräumen, die als eine Vielzahl von kleinen Schmierstofftaschen fungieren, eingeschlossen.

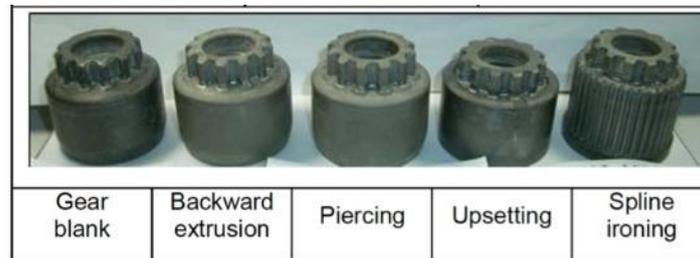
### 3.2.2. Schmierstoffsysteme ohne Konversionsschicht

Japan gilt im Bereich phosphatfreier Schmierstoffsysteme international als Vorreiter. MEC Homat war der erste phosphatfreie Schmierstoff, welcher dort im Jahr 1999 von Toyota Motor und MEC International für einen Massenfertigungsprozess von Antriebsritzeln entwickelt und eingesetzt wurde. Dieser Schmierstoff hat eine Wasserbasis mit Metall- und organischen Schwefelverbindungen [Mec00]. Das Schmiermittel wird auf die zuvor gestrahlte Oberfläche des Rohlings aufgebracht. Aufgrund des Drucks und der Hitze (thermo-chemische Reaktion), bilden die Schwefelradikale wie in Abbildung 4 gezeigt, einen Film aus Eisensulfid, der eine gute Schmierwirkung besitzt [Gar07].



**Abbildung 4: Schematische Darstellung des MEC Homat nach [Kas00]**

Allerdings werden in Japan häufig die Umformprozesse auf die noch ertragbaren Lasten für das verwendete Schmiersystem ausgelegt. Abbildung 5 zeigt beispielsweise die Prozessfolge für einen mehrstufigen Prozess der vom Ausgangszustand „Gear blank“ in 4 Stufen zum fertigen Bauteil umgeformt wird. Verwendet wird hierfür ein sogenanntes Doppelschicht-Schmiersystem ILUB, welches vom Aufbau her einem phosphatfreien Konversionsschichtsystem in Kombination mit einem Schmierstoff her ähnelt.



**Abbildung 5: Mehrstufige Kaltschmiedevorgänge mit ILUB [Il14]**

In Deutschland wird hingegen die Philosophie verfolgt, die Schmiersysteme an den Prozess anzupassen. Um den auftretenden hohen tribologischen Lasten widerstehen zu können stellen nach [Bag10], [Nsg11] und [Kle09] die folgenden Schmierstoffsysteme eine denkbare Alternative zu den Systemen mit Zinkphosphatkonversionsschichten dar:

- Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ )
- Polymerbeschichtungen
- Salzschiemstoffträger mit integrierter Schmierung

### **Molybdändisulfid**

Für die Umformung durch Fließpressen mit hohen Oberflächenspannungen eignet sich  $\text{MoS}_2$  mit Graphit als Schmierstoff. Bedingt durch die hexagonale Gitterstruktur können die einzelnen Gleitebenen, welche über Schwefelbrücken verbunden sind, bei geringen Scherkräften aneinander abgleiten [Nbh10, Czh10]. Das funktionale Prinzip wird in Abbildung 6 verdeutlicht.

Mit  $\text{MoS}_2$  und Graphit auf blanker Stahloberfläche können derzeit Umformgrade bis 0,7 erreicht und Material mit einer Ausgangshärte von etwa 200 HB verarbeitet werden. Dem breiten, flächendeckenden Einsatz von Molybdändisulfid in der Kaltmassivumformung stehen jedoch einige Nachteile gegenüber. So ist neben der beschränkten Leistungsfähigkeit, schlechten Reinigungsfähigkeit und hohen Rohstoffkosten auch die nicht vorhersehbare Preisentwicklung zu nennen. Weiterhin kommt es bei etwa einem Drittel der mit  $\text{MoS}_2$  als Substitutionsschmierstoff umgeformten Teile zu einem Anstieg der Umformkraft und der Auswerferkraft um bis zu 10 %, was wiederum mit niedrigeren Werkzeugstandzeiten einhergeht [Kle09].

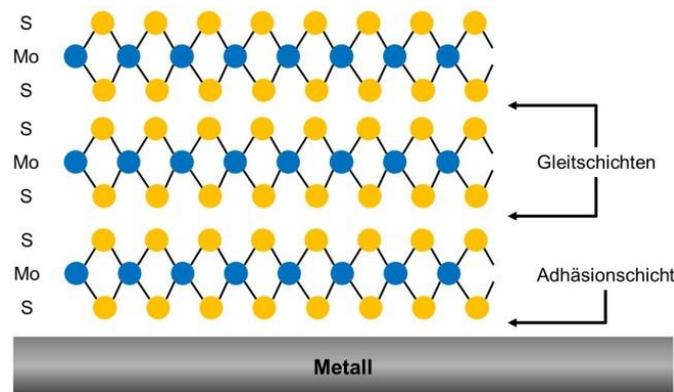


Abbildung 6: Wirkprinzip MoS<sub>2</sub> nach [Nbh10]

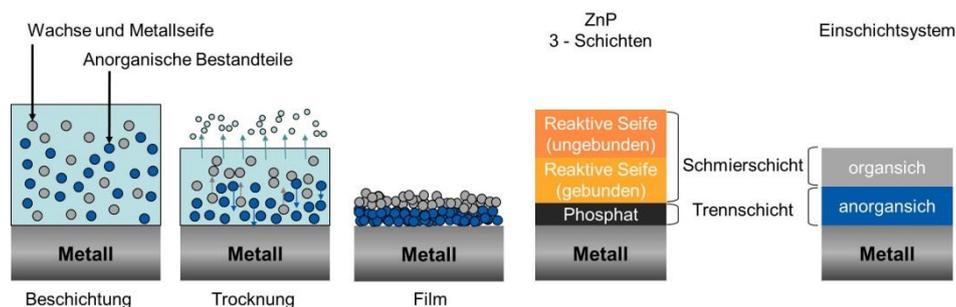
Molybdändisulfid-Dispersionen für die Kaltmassivumformung weisen Schichtdicken von 4 – 6 g/m<sup>2</sup> auf und sind bis zu 400 °C beständig [Her08, Nsg11]. Reine MoS<sub>2</sub> Auflageschichten versagen bei Scherbelastung weniger durch Ausdünnen, sondern mehr durch Blasenbildung und Aufplatzen, welche durch Oxidationsvorgänge stark beschleunigt werden. Daher werden auch aus Kostengründen MoS<sub>2</sub>-Mischungen mit Graphitanteilen verwendet, welche aufgebrochene MoS<sub>2</sub>-Lammellen trennen und ein Aufstauen dieser verhindern [Stb05].

### Polymerbeschichtungen

Eine weitere Alternative zum Trennschicht-Schmierstoffsystem aus Zinkphosphat und Seife stellt der Einsatz von Polymerbeschichtungen dar. Dabei handelt es sich um synthetisch hergestellte dünne Schichten. Diese langkettigen Verbindungen beziehen ihre Leistungsfähigkeit aus der Haftung auf der Metalloberfläche und ihrem Temperatur-Viskositätsverhalten [Bab04]. Im Vergleich zu MoS<sub>2</sub>haltigen Schmierstoffen zeichnen sich Polymerbeschichtungen durch die vereinfachte Teilereinigung nach der Umformung sowie eine niedrigere Verschmutzung der Umgebung während der Umformung aus [Bäc08]. Verglichen mit dem Einsatz von Zinkphosphat und Seife führt die Verwendung polymerer Schmierstoffe ebenso wie MoS<sub>2</sub> zu einer Reduzierung der Umformkraft und somit zu einer Erhöhung der Werkzeugstandzeiten. Polymere Schmierstoffschichten sind ähnlich temperaturbeständig wie seifenbasierende Schmierschichten. Die niedrigen Schichtgewichte von 2 - 3 g/m<sup>2</sup> ermöglichen eine Fertigung nahe der Endkontur des Bauteils [Nit08]. Für Umformoperationen mit langen Gleitwegen oder großen Oberflächenvergrößerungen wirken sich die niedrigen Schichtgewichte dagegen nachteilig aus, da es zum Abreißen des Schmierfilmes kommen kann [Bäc08]. Um auch beim Versagen des Schmierfilms eine Trennung von Werkzeug- und Werkstückoberfläche zu gewährleisten, werden Polymer-schmierstoffe und MoS<sub>2</sub>-Dispersionen oftmals in Kombination mit Zinkphosphat-schichten eingesetzt. Die Zinkphosphatkonversionsschicht wirkt aufgrund ihrer Porosität und der Oberflächenstruktur zudem als Schmierstoffreservoir.

## Salzschmiermittelträger

Salzschmiermittelträgerschichten finden derzeit als umweltverträgliche Alternative in Nischenbereichen der Kaltmassivumformung Verwendung. Dabei wird zwischen Salzschmiermittelträgerschicht mit und ohne integrierte Schmierwirkung unterschieden. Salzschmiermittelträgerschichten ohne schmieraktive Eigenwirkung wurden in [Kap05] anhand von Verjüngerversuchen in Verbindung mit Kaltfließpressölen untersucht. Für die erste Umformstufe zeigten sich niedrige Umformkräfte, jedoch wurde die Schicht in dieser Stufe so stark abgetragen, dass bei weiterer Umformung Verschleißerscheinungen und Reibung unverhältnismäßig anstiegen. Neuere Entwicklungen beinhalten Salzschmiermittelträgerschichten mit integrierter Schmierwirkung. Diese Schmierstoffsysteme setzen sich aus organischen Bestandteilen, Polymeren oder Wachsen, und anorganischen Salzen zusammen. Nach der Aufbringung der Schmierstoffschicht als wässrige Dispersion ordnen sich die anorganischen Bestandteile der Schicht aufgrund ihrer starken Polarität an der Substratoberfläche an. Die organischen Bestandteile lagern sich auf der sich so gebildeten Trennschicht ab und bilden die Schmierstoffschicht [Ods06], [Ste08]. Die folgende Darstellung zeigt schematisch den Schichtaufbau eines Salzschmiermittelträgers mit integrierter Schmierwirkung und stellt den Schichtaufbau konventioneller Trennschicht-Schmierstoffschichtsysteme gegenüber.



**Abbildung 7: Schematischer Schichtaufbau von Salzschmiermittelträger nach [Ste08] und [Köh09] (links); Vergleich des prinzipiellen Schichtaufbaus (rechts)**

### 3.2.3. Zwischenfazit – Alternative Schmiersysteme

Zusammenfassend lässt der internationale Stand der Technik einerseits die Frage der Leistungsfähigkeit konversionsschichtfreier Schmierstoffsysteme bei hohen tribologischen Lasten, wie sie bei der kaltmassivumformenden Verarbeitung von Abschnitten auftreten können, noch unbeantwortet. Während in Japan die Philosophie verfolgt wird den Prozess an das Schmiersystem anzupassen verfolgt man in Deutschland ein gegensätzliches Konzept. Weiterführend ergibt sich die Problematik einer stabilen, prozessfähigen Schichtaufbringung, die mehreren Umformstufen standhalten kann.

## **4. Ergebnisdarstellung**

### **4.1. Entwicklung von Einschichtschmierstoffen für zinkphosphatfreie Kaltmassivumformung**

#### **4.1.1. Allgemeine Vorgehensweise**

Aus Sicht der Schmierstoffentwicklung lag die grundlegende Zielsetzung im Rahmen dieses Projekts in der Neu- und Weiterentwicklung sowie der stufenweisen Optimierung von Schmierstoffen, die auch ohne zuvor applizierte Zinkphosphatschicht eine vergleichbar hohe Leistungsfähigkeit bei der Kaltmassivumformung besitzen. Als Ausgangspunkt müssen hierbei die beiden Kernfunktionen der Zink-Phosphatschicht in einem Tribosystem betrachtet werden: Einerseits dient diese als Trägerschicht für im Folgeprozess applizierte Schmierstoffe. Gleichzeitig ist sie aber darüber hinaus eine Trennschicht, die während des Umformvorganges einen direkten Metall-Metall-Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug verhindern soll. Derartige sogenannte Kaltverschweißungen bzw. Fresser führen nicht nur zu Ausschuss bei der Produktion sondern auch zu erheblich verkürzten Werkzeugstandmengen oder gar zu unmittelbaren Werkzeugdefekten mit entsprechend hohen Folgekosten für die Instandsetzung (Produktionsausfall). Im Falle von Schmierstoffen auf Seifenbasis kommt die chemische Umsetzung der Zinkphosphatschicht mit Seifenbestandteilen zu besonders schmierwirksamen Metallstearaten als weitere Funktion hinzu.

Im Falle von Einschichtschmierstoffen müssen die zuvor genannten Kernfunktionen „Tragen“ und „Trennen“ in geeigneter Weise in einem Schmierstoff vereint werden. Gleichzeitig müssen die unverändert auftretenden tribologischen Lasten von diesem Schmierstoff aufgenommen werden. Mögliche Schmierstoffsysteme, die eine Alternative zu Systemen mit Zinkphosphatkonversionsschichten darstellen können, wurde bereits in Kap. 3.2.2. vorgestellt.

Basierend auf diesen Systemen sind die im Folgenden dargestellten Punkte bei der Entwicklung neuer Einschichtschmierstoffe berücksichtigt worden.

#### **4.1.2. Implementierung der Trennfunktion**

Aufgrund ihres besonderen Wirkprinzips besitzen Schmierstoffsysteme auf Basis der Festschmierstoffe Molybdändisulfid und Graphit bereits ohne weitere Zusätze eine gewisse Trennfunktion. Durch ihren in Abbildung 6 dargestellten lamellaren Aufbau auf molekularer Ebene können Sie auch extremen Oberflächenvergrößerungen, wie sie insbesondere in Abstreck- und Napfoperationen bei der Kaltmassivumformung auftreten, standhalten. Es kommt hierbei lediglich zur Ausdünnung der Lamellenpakete und nur selten zu einem vollständigen Abriss des Schmierfilms, der zum Metall-Metall-Kontakt führen würde.

Im Falle organischer, das heißt auf Polymeren und/oder Wachsen aufbauender Schmierstoffsysteme, ist die Implementierung der Trennfunktion von entscheidender Bedeutung, da diese Komponenten im Umformvorgang erweichen und somit selbst

kaum Trennwirkung besitzen. Die Suche, Einarbeitung und Untersuchung zu implementierender Trennkörper stellte aus diesem Grund einen wichtigen Baustein bei der Schmierstoffentwicklung der Firmen Zwez und Bechem dar. Hier galt es verschiedene Einflussfaktoren zu unterscheiden: Bei Zinkphosphatkristallen handelt es sich um relativ harte kristalline Körper. Trennschichten mit entsprechend hoher Härte in einem Schmierstoff zu integrieren ist jedoch kritisch, da sich diese Bestandteile homogen in der gesamten Schmierstoffbeschichtung, also auch an der dem Werkzeug zugewandten Oberfläche befinden. Harte Substanzen können somit schnell abrasiv und somit kontraproduktiv sein. Neben der Härte (bezogen auf die Mohs'sche Skala) spielt auch die Partikelgröße eine wichtige Rolle. Bei der Auswahl der Substanzen wurde eine geringe mittlere Partikelgröße ( $d_{50}$ -Wert) und eine möglichst enge Korngrößenverteilung bevorzugt.

#### **4.1.3. Optimierung der Haftung ohne separate Trägerschicht**

Die Anhaftung von Schmierstoffen ist bei der Entwicklung neuartiger Schmierstoffsysteme von zentraler Bedeutung. Die gute Trennwirkung von  $\text{MoS}_2$  und die sich daraus ergebende potentiell hohe Leistungsfähigkeit nützt im praktischen Einsatz nichts, wenn der Schmierstoff nicht sehr gut haftet. Allerdings muss auch dieser Punkt differenziert betrachtet werden, denn eine Haftung im Sinne von „kleben“ ist zu starr und verhindert, dass der Schmierfilm dem Umformweg folgt. Bei unzureichender Haftung wird hingegen die gesamte Beschichtung abgeschoben und es kann zu Verschleiß kommen.

Während eine Zinkphosphatschicht als Trägerschicht allein durch die hiermit erzeugte Topographie auch bei nicht reaktiven Schmierstoffen die Haftung wesentlich verbessert, müssen ohne diese Trägerschicht spezielle Haftkomponenten beispielsweise auf Basis von Silikaten oder auch auf Basis organischer Verbindungen gefunden und in die Schmierstoffe integriert werden. Diese spezielle Additivierung mit Haftvermittlern ist sowohl bei Schmierstoffen auf Basis  $\text{MoS}_2$  als auch bei Polymerschmierstoffen in vergleichbarer Weise erforderlich und wurde im Rahmen dieses Projekts umfangreich untersucht und entsprechend weiterentwickelt.

In ganz entscheidender Weise ist eine mechanische Vorbehandlung der Werkstückoberfläche durch Strahlen in der Lage, die Haftung von Einschichtschmierstoff zu verbessern. Aus diesem Grund wurde schon zu Beginn des Projekts eine gestrahlte Oberfläche als zwingend vorausgesetzt. Der Ersatz einer chemischen Reinigung durch eine mechanische Reinigung ist auch aus Umweltgesichtspunkten vorteilhaft. Gleichzeitig erzeugt die durch das Strahlen erzeugte Mikrorauigkeit in der Oberfläche Schmierstoffreservoirs, die während des Umformvorgangs genutzt werden können.

#### **4.1.4. Optimierung der Schmierwirkung**

Auch unter diesem Aspekt bieten Schmierstoffe auf Basis von  $\text{MoS}_2$  und Graphit den Vorteil, dass diese Verbindungen selbst eine hervorragende Schmierwirkung besitzen. Allerdings ist zu beachten, dass das Wirkprinzip des Abscherens der Lamellen-

pakete nur unter vergleichsweise hohen Drücken zum Tragen kommt. Daher sind die sogenannten Reibwerte dieser Schmierstoffe recht hoch und für bestimmte Umformprozesse wie Ziehprozesse in vielen Fällen schlicht zu hoch. Pressen müssen auf diese erhöhten Reibwerte eingestellt werden. Die bereits in Kap. 3.2.2. beschriebene Beimischung von Graphit stellt in diesem Zusammenhang ein besonderes Problem dar, da Graphit im Vergleich zu MoS<sub>2</sub> noch höhere Reibwerte besitzt, die erst bei höheren Umformtemperaturen in einen technologisch interessanten Bereich sinken. Graphit selbst ist daher ein in der (Halb-) Warmumformung sehr häufig, in der Kaltumformung dagegen kaum eingesetzter Schmierstoff. Bei der Weiterentwicklung MoS<sub>2</sub>-basierter Schmierstoffe war es daher Aufgabe, das Verhältnis dieser Festschmierstoffe untereinander weiter zu optimieren.

Die Schmierwirkung von Polymeren und Wachsen beruht hingegen auf ihrer Erweichung (d.h. Lockerung der inneren molekularen Struktur) bzw. gegebenenfalls sogar dem Aufschmelzen unter der erhöhten Druck- und Temperaturbelastung während des Umformvorgangs, wodurch ein Gleitfilm erzeugt wird. Durch geeignete Auswahl bestimmter Komponenten ist daher die Schmierwirkung unmittelbar beeinflussbar. Von zentraler Bedeutung sind insbesondere die Erweichungs- und Schmelzpunkte dieser Verbindungen, die je nach chemischen Aufbau einen weiten Bereich abdecken können. Als besonders vorteilhaft erweist sich die Wahl einer Kombination verschiedener Komponenten mit unterschiedlichen, aufeinander abgestimmten Erweichungspunkten.

Weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung der Schmierwirkung bei polymerbasierten Schmierstoffen ist die Integration von Festschmierstoffen. MoS<sub>2</sub> und Graphit kommen hierbei zwar grundsätzlich in Frage, sind jedoch weniger bevorzugt, da sie dem Schmierstoff eine schwarze Färbung verleihen, die bei Polymerschmierstoffen in der Regel nicht erwünscht ist. Andere Festschmierstoffe (z.B. Bornitrid) wurden im Rahmen dieses Projekts in Versuchsprodukten ebenfalls eingesetzt und getestet, zeigten aber keine signifikante Verbesserung der Schmierwirkung. Auch bestimmte mineralische Komponenten mit geringer Härte und spezieller Schichtstruktur (z.B. Schichtsilikate) kamen hier zum Einsatz.

#### **4.1.5. Gewährleistung einer hohen Temperaturstabilität**

Bei der Temperaturstabilität bietet der Einsatz von Festschmierstoffen Vorteile, da diese Stoffe selbst bei hohen Umformtemperaturen nicht erweichen oder aufschmelzen. Strukturänderungen bewirken jedoch ab einer gewissen Temperatur einen starken Anstieg der Reibwerte, wie Abbildung 8 zu entnehmen ist. Die dargestellten Daten wurden mit Hilfe eines Ringstauchversuchs ermittelt. Für MoS<sub>2</sub> stellen die bei der Kaltmassivumformung maximal auftretenden Temperaturen von 500°C kein Problem dar. Bei Graphit müssen eher die zu hohen Reibwerte bei Temperaturen, die unter 300°C liegen, als kritisch angesehen werden.

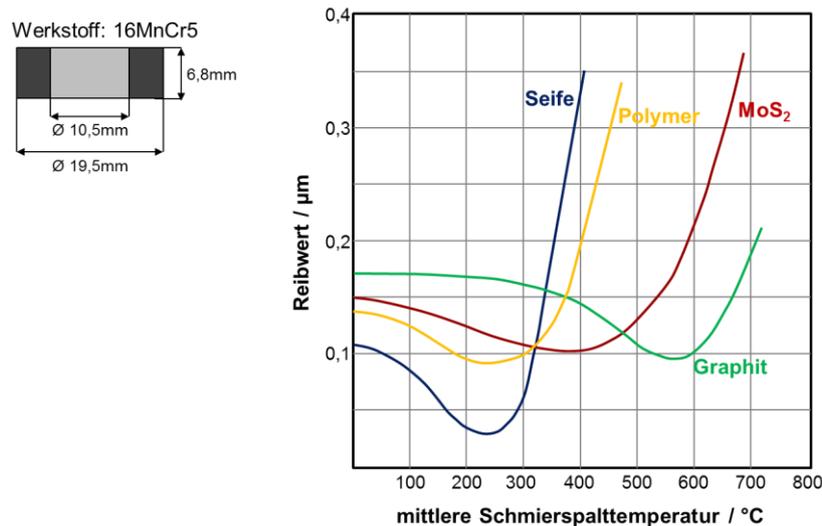


Abbildung 8: Vergleich Reibwerte verschiedener Schmierstoffe

Ungleich mehr Entwicklungsbedarf existiert bei den Polymerschmierstoffen, deren Basis organische Verbindungen darstellen, die oberhalb definierter Temperaturen nicht nur – wie erwünscht – erweichen und dann schmelzen, sondern schließlich zersetzt werden. In gewissen Grenzen stellt dies kein Problem dar, da Temperaturen von über 200°C nur während des Umformvorgangs, das heißt für Sekundenbruchteile auf den Schmierstoff einwirken. Doch auch ein vollständiges Aufschmelzen aller Komponenten ist kritisch, da ein sehr dünnflüssiger Film eine Gleitbewegung nur noch unzureichend unterstützen kann. Durch geeignete hochschmelzende anorganische Additive konnte die Viskosität des verflüssigten Gleitfilms erhöht werden. Weitergehende Untersuchungen, u.a. auch unter realen Umformbedingungen, haben gezeigt, dass auch länger einwirkende Temperaturen von >250°C eine weitgehend organische Schmierstoffbeschichtung zwar optisch deutlich beeinflussen (Braunfärbung), dies jedoch nicht zwangsläufig mit einer signifikant reduzierten Leistungsfähigkeit des Schmierstoff einhergehen muss.

#### 4.1.6. Umweltaspekt bei der Schmierstoffentwicklung

Die Festschmierstoffe MoS<sub>2</sub> und Graphit sind chemisch weitgehend inert und keine Gefahrstoffe. In Form von Dispersionen ist auch keine Belastung durch Stäube gegeben. Dennoch sollte der Eintrag von MoS<sub>2</sub> in die Umwelt weitgehend reduziert werden. Während die Behandlungsbäder als Dauerbäder ausgelegt sind und eine Entsorgung somit nicht erforderlich ist, werden gewisse Mengen MoS<sub>2</sub> in Medien zur Reinigung umgeformter Bauteile eingetragen, die in regelmäßigen Abständen erneuert werden müssen.

Polymere und Wachse werden meist synthetisch erzeugt. Während die Grundkomponenten typischerweise nicht als Gefahrstoff einzustufen sind, sind bisweilen einzustufende Additive erforderlich, um eine erhöhte Stabilität der Dispersionen sicherzustellen. Diese Dispergatoren kommen jedoch in nur sehr geringen Mengen zum Einsatz.

Grundsätzlich wurden bei der Auswahl enthaltener Komponenten neben technologischen Aspekten auch die Umwelteinflüsse mitberücksichtigt. Auf die Verwendung von Phosphaten oder Boraten (letztere sind z.T. als SVHC-Stoffe eingestuft) wurde gänzlich verzichtet.

#### **4.1.7. Bauteilreinigung**

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung und Beurteilung von Schmierstoffsystemen ist die Entfernbarekeit von Schmierstoffrückständen auf umgeformten Bauteilen. Medien zur Bauteilreinigung setzen sich aus sogenannten Buildern (alkalische anorganische Komponenten, z.B. Alkalihydroxide) und Tensiden zusammen. Insbesondere bei den organischen Tensidbestandteilen ist Entwicklungsbedarf vorhanden, da sehr gut auf Metalloberflächen haftende Schmierstoffbestandteile meist gleichzeitig eine erschwerte Entfernbarekeit beim Reinigungsprozess mit sich bringen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Struktur und der Aufbau des Schmierstoffs durch die hohen Drücke und Temperaturen während der Umformung verändert werden und ein Reinigungstest vor und nach Umformung völlig unterschiedliche Ergebnisse liefern kann. In besonderem Maße gilt dies für Polymerschmierstoffe.

Auf der anderen Seite besteht bei organisch basierten Beschichtungen im Gegensatz zu MoS<sub>2</sub>-Schmierstoffen aber die Möglichkeit auch ohne nasschemischen Reinigungsprozess eine weitgehend rückstandsfreie Bauteiloberfläche zu erhalten. Dies ist möglich, wenn die Menge an Rückständen wegen der von vorne herein niedrigeren Auflagemenge an Schmierstoff so gering ist, dass Bauteile ohne Reinigung direkt weiterverarbeitet werden können. Zudem besteht bei (rein) organischen Beschichtungen die Möglichkeit der Entfernung von Restschmierstoff durch eine Wärmebehandlung, die in vielen Fällen ohnehin im weiteren Verarbeitungsprozess vorgesehen ist.

#### **4.2. Entwicklung eines Demonstratorprozess**

Im Vorfeld der Prozessauslegung wurden verschiedene Serienprozesse bei Schödelmaier untersucht um die Kriterien zu identifizieren nach denen der Demonstratorprozess gestaltet werden muss. Es wurde in den Serienprozessen nach hohe Temperaturen an Pressteilen gesucht was ein Indikator für hohe Belastungen darstellt. Dies geschah zum einen mittels eines Pyrometers mit dem schnell auf der Oberfläche der Teile die Temperatur ermittelt werden kann. Zum anderen wurde die Temperatur in verschiedenen Prozessen mittels stationärer Einrichtungen zur Temperaturerfassung erfasst. Zusätzlich wurden die einzelnen Prozesse optisch bewertet. Hier waren insbesondere die Oberflächen der Pressteile sowie die Menge des darauf verbliebenen Schmierstoffes von gesteigertem Interesse. Blanke metallische Oberflächen deuten darauf hin dass der ursprünglich aufgebrauchte Schmierstoff im Prozess komplett „verbraucht“ worden ist was ebenfalls als Zeichen für eine hohe Belastung bewertet werden kann.

Aufgrund dieser Voruntersuchungen wurden folgende Kriterien definiert welche in dem Demonstrator-Prozess repräsentiert sein sollten:

- Ein seriennaher Prozess mit praxisrelevanten Umformverfahren auf einer mechanischen Mehrstufenpresse
- Generierung hoher tribologischer Lasten
  - Hohe Oberflächenvergrößerung
  - Umformung auf bereits umgeformter Oberfläche
  - Hohe Kontaktnormalspannungen
- Ein gängiges Material für die Kaltmassivumformung

#### 4.2.1. Dreistufiger Umformprozess

Auf Basis der oben genannten Kriterien wurde ein dreistufiger Umformprozess ausgewählt, der die drei Hauptverfahren der Kaltmassivumformung beinhaltet. Die Geometrien der einzelnen Stufen des Demonstratorprozesses sind in Abbildung 9 dargestellt. Üblicherweise ergibt sich der Ausgangsdurchmesser des Rohteils aus der Geometrie des Fertigteils in Verbindung mit der vorgesehenen Prozessfolge. Da hier keine Fertigteilgeometrie durch einen Kunden vorgegeben war konnte der Ausgangsdurchmesser frei gewählt werden ( $\varnothing 27,3$  mm). Als Material wurde 16MnCrS5 definiert, ein für die Kaltmassivumformung typischer Stahl. Dieser Einsatzstahl wird vorwiegend für auf Verschleiß beanspruchte Teile, wie z.B. Nockenwellen, verwendet. Einsatzstähle im Allgemeinen eignen sich aufgrund ihres geringeren Kohlenstoffgehaltes gut für die Kaltmassivumformung.

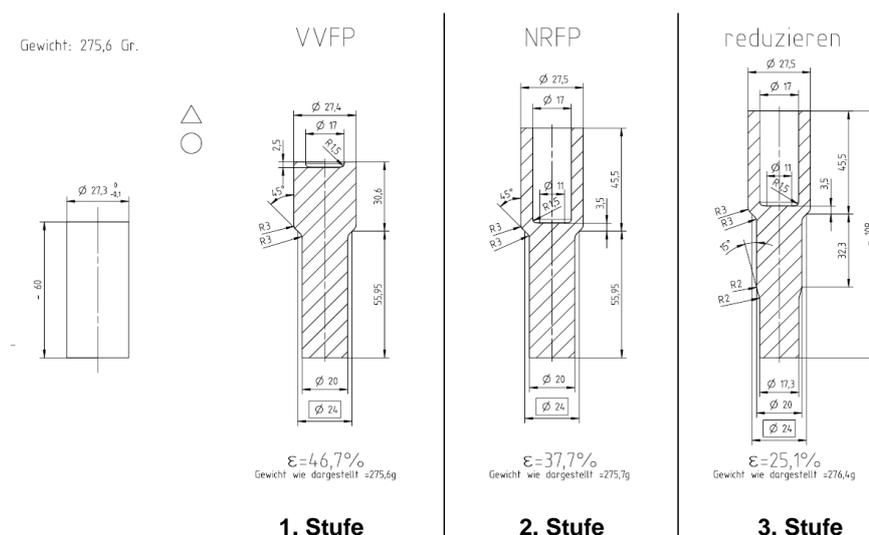
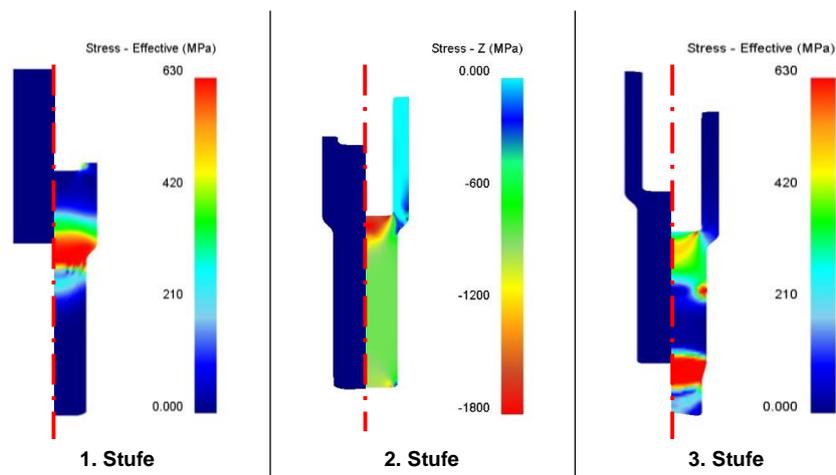


Abbildung 9: Geometrien der einzelnen Stufen des Demonstratorprozesses

In der ersten Umformstufe wird ausgehend von  $\varnothing 27,3$  mm der Schaft mittels eines Voll-Vorwärts-Fließpressens erzeugt. Die bezogene Formänderung  $\varepsilon$  beträgt 46,7%. Hierbei ist noch genügend Abstand zu der Prozessgrenze gegeben, so dass mit einem robusten Prozessschritt in der ersten Stufe zu rechnen ist. Das zweite Argument

für eine Formänderung in dieser Größenordnung war die Idee, im weiteren Prozess die erzeugte Mantelfläche des Schaftes erneut umzuformen. Um dies darstellen zu können, ist es zwingend erforderlich nicht die gesamte Leistungsfähigkeit des Tribosystems bereits in der ersten Stufe zu aufzubrauchen.

In Abbildung 10 ist in der 1. Stufe links zunächst die Ausgangsgeometrie des Sägeabschnitts in der Finiten-Elemente-Software DEFORM nachgebildet. Die rechte Seite zeigt das Bauteil nach der ersten Umformstufe fertig ausgeformt. Dargestellt wird die Vergleichsspannung nach *von Mises*. Hierbei ist gut die Umformzone (roter Bereich) erkennbar, in der die zur Aufrechterhaltung der plastischen Deformation nötige Fließspannung von ca. 630 N/mm<sup>2</sup> herrscht.



**Abbildung 10: Auftretende Spannungen im Demonstratorprozess**

Zusätzlich wird in dieser Stufe in die obere Stirnfläche des Bauteils eine Zentrierung für die im weiteren Prozess folgende Napf-Operation eingebracht. Diese dient zur Verbesserung der Rundlaufabweichung des entstehenden Napfs.

In der zweiten Umformstufe folgt ein Napf-Rückwärts-Fließpressen. Hierbei wird der Napf mit Hilfe der in der Vorstufe eingebrachten Zentrierung in die Stirnseite der Stadien eingebracht. Das Tribosystem in diesem Bereich ist abgesehen von der Zentrieroperation, welche eine vernachlässigbare Umformung darstellt, noch im Ausgangszustand. Wie in Abbildung 10, 2. Stufe, zu sehen ist, herrschen hierbei an der Wirkfläche des Napfstempels Flächenpressungen bis 1.800 N/mm<sup>2</sup> während der Umformung. Hierbei ist der Prozessbeginn wieder auf der linken- das Prozessende auf der rechten Seite dargestellt. Das Napfverhältnis (Tiefe/Ø) beträgt  $\approx 2,5$ , die bezogene Formänderung 37,7%. Die ursprüngliche Oberfläche vergrößert sich hierbei um 770% was eine zusätzliche Herausforderung für das Tribosystem darstellt.

Mit einem freien Reduzieren wird in der dritten Umformstufe ein Durchmesser von 17,3 mm auf den Schaft geformt. Bei weichgeglühtem Ausgangsmaterial sind Formänderungen im Bereich von 12-18% realisierbar ohne dass sich der Ausgangsdurchmesser der 3. Stufe (Ø 20 mm) an das Werkzeug anlegt. Da der Schaft aber in der ersten Stufe durch ein VVFP erzeugt wurde, ist das gesamte Material über den

Schaft bereits umgeformt und somit verfestigt. Somit kann mehr Kraft über den Schaft übertragen werden, bevor hier plastisches Fließen einsetzt. Bei diesem Projekt fiel die Wahl auf eine relative Formänderung  $\epsilon$  von 25%. Dies stellt abschließend eine nicht unerhebliche Belastung für das Tribosystem dar. In Abbildung 10, 3. Stufe, ist die Vergleichsspannung nach *von Mises* während des Umformvorgangs dargestellt.

#### 4.2.2. Ermittlung der tribologischen Last „Temperatur“ im Prozess

Für die Ermittlung der Temperaturen im Prozess ist an verschiedenen Stellen eine Temperaturmessung in das Werkzeug integriert worden. Abbildung 11 zeigt die Positionierung der Thermosensoren als Kreise an. Bei diesem Vorhaben stellt sich generell das Problem die Sensoren zur Erfassung der Messwerte möglichst nah an die Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück zu bekommen, in der sehr hohe Normalspannungen vorkommen. Die Position der Sensoren ist das Ergebnis eines Spannungsfeldes aus Werkzeugstandzeit (keine zu große Schwächung durch die Sensoren) und Messgenauigkeit (Erfassung der Messwerte möglichst nah an deren Ursprung). Dabei wurden in Stufe 1 und Stufe 3 jeweils ein Sensor auf Höhe der Fließpressschulter angebracht. In Stufe 2 ist zusätzlich im Napfstempel ein Sensor eingebracht worden. Die Entfernung der Sensoren von der Oberfläche beträgt ca. 10 mm. Die roten Linien zeigen den Signaltransport aus dem Werkzeug.

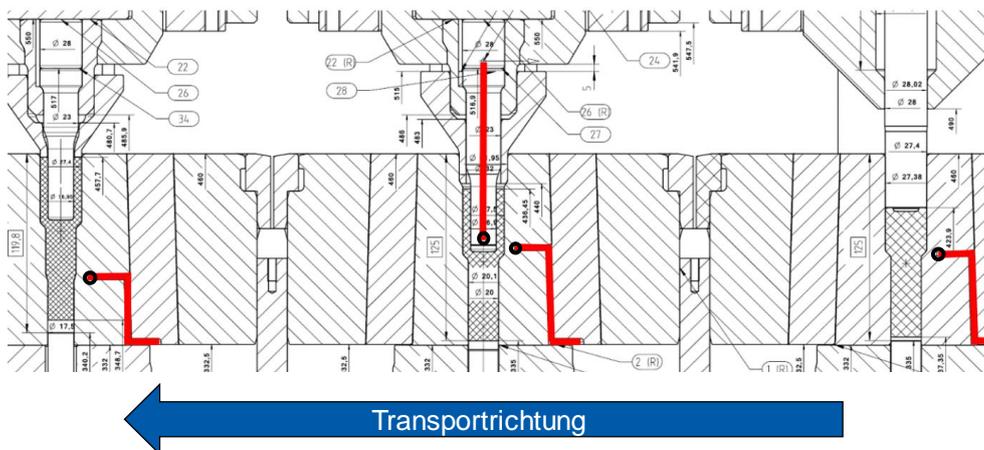
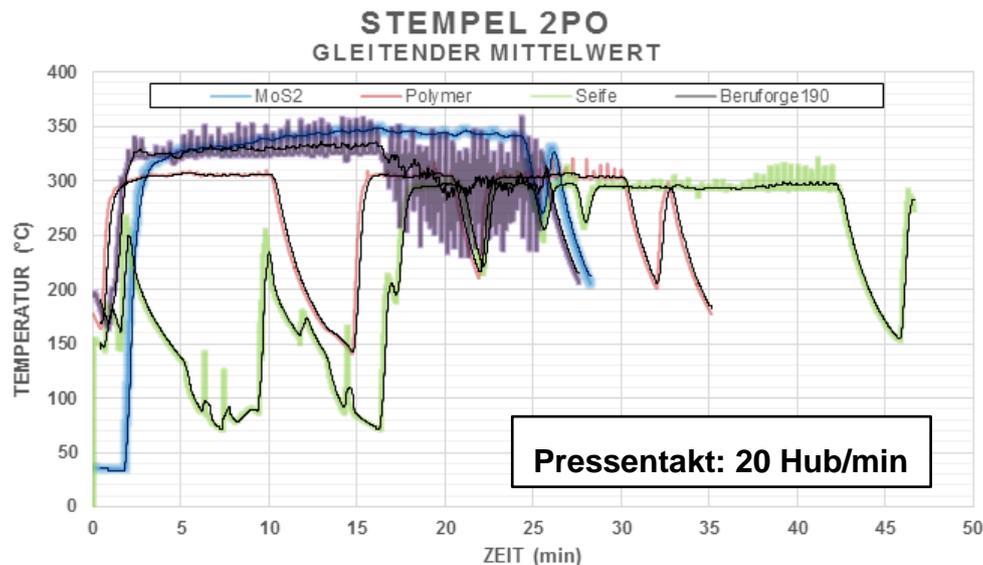


Abbildung 11: Positionierung der Thermoelemente im Werkzeug

Für die Temperaturmessung wurden bei Schondelmaier Bauteile mit vorhandenen Schmierstoffen mit Zinkphosphat als Konversionsschicht sowie einem Schmierstoff der Firma Bechem auf Basis von  $\text{MoS}_2$  ohne zusätzliche Trägerschicht beschichtet und anschließend verpresst. Die Verwendung der konventionellen Schmierstoffe liegt darin begründet die Methode zu prüfen.



**Abbildung 12: Temperaturentwicklung in Abhängigkeit unterschiedlicher Schmierstoffsysteme**

In Abbildung 12 ist ein Auszug aus den Ergebnissen dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Aufzeichnung der Temperatur-Messwerte des Stempels der zweiten Stufe. Aufgrund von Einflüssen der Messtechnik auf das Ergebnis schwingen einige Messwerte stark. Ein gleitender Mittelwert für jede Messreihe ist aus Gründen der Übersichtlichkeit eingefügt. Auffällig ist allgemein das ein recht hohes Temperaturniveau erreicht wird (im stationären Bereich der sich trotz Prozessstörungen bei jedem Schmierstoff eingestellt hat liegt bei allen gestesten Beschichtungen über 300°C). Bei dem konventionellen Schmierstoff auf MoS<sub>2</sub>-Basis sogar bei fast 350°C. Da das Thermoelement ca. 10 mm von der Wirkfuge entfernt im Stempel liegt ist davon auszugehen das die tatsächliche Temperatur sogar deutlich höher liegt.

### **4.3. Entwicklung von Applikationsmöglichkeiten und Bewertung von ökologisch optimierten Schmierstoffsystemen**

#### **4.3.1. Applikation von ökologisch optimierten Schmierstoffen**

Der Verzicht auf eine separat aufgetragene Zinkphosphatschicht ermöglicht erst die Applikation eines Schmierstoffsystems im Inline-Verfahren. Voraussetzung hierfür ist, dass sehr geringe Kontaktzeiten zwischen Werkstück und Schmierstoffmedium für eine optimale Beschichtung ausreichend sind. Schmierstoffe, die eine chemische Reaktion mit der Werkstückoberfläche eingehen, wie dies bei Seifen der Fall ist, scheiden zwangsläufig aus. Sowohl Schmierstoffe auf Basis von MoS<sub>2</sub> als auch Polymer oder Wachs sind hingegen in der Regel auf keine chemische Reaktion abgewiesen, so dass wenige Sekunden Kontaktzeit ausreichen.

Bei der Aufbringung von ökologisch optimierten Schmierstoffen ist insbesondere eine homogene Schmierstoffverteilung und Schichtdicke für eine zuverlässige Umformung notwendig. Darüber hinaus spielt die Trocknungszeit eine entscheidende Rolle für

die Entwicklung einer inlinefähigen Oberflächenvorbehandlung. Eine kurze Trocknungszeit ermöglicht eine hohe Ausbringungsmenge, die wiederum notwendig ist um eine Beschichtung im Pressentakt gewährleisten zu können. Bei der Umformung in mehreren Stufen ist außerdem die Anhaftung des Schmierstoffs auf der Bauteiloberfläche ein entscheidender Faktor. Die kann durch eine entsprechende Vorbehandlung mittels Strahlen begünstigt werden, wie Wang et al. gezeigt haben [Wan15].

Bezüglich der Applikation der Schmierstoffe bietet sich ein Überfluten der Werkstücke an. Um eine schnelle Trocknung der Beschichtung sicherzustellen, ist ein Vorwärmen der Teile unumgänglich. In mehreren Versuchsreihen am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen sind unterschiedliche Bauteiltemperaturen und deren Auswirkung auf die Trocknungszeit des Schmierstoffs getestet worden. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse für einen Salz-Wachs Schmierstoff (Beruforge 120D) der Firma Bechem und einen auf MoS<sub>2</sub> basierenden Schmierstoff (MD 210) der Firma Zwez. Beruforge 120D liegt in einer Konzentration von 70% vor, MD 210 ist zu 50% mit Wasser verdünnt. Die Schmierstoffe wurden auf, zuvor im Ofen auf Temperaturen zwischen 85°C und 200°C erwärmte, zylindrische Proben von Hand durch Übergießen aufgebracht. Bei 85°C liegt die Trocknungszeit sowohl für MoS<sub>2</sub> als auch für Salzwachs deutlich über 60 Sekunden. Der Schmierstoffoberfläche ist zwar homogen und allseitig auf die Bauteile aufgebracht, allerdings ist die Trocknungsdauer für eine Inline-Schmierung im Pressentakt deutlich zu lang.

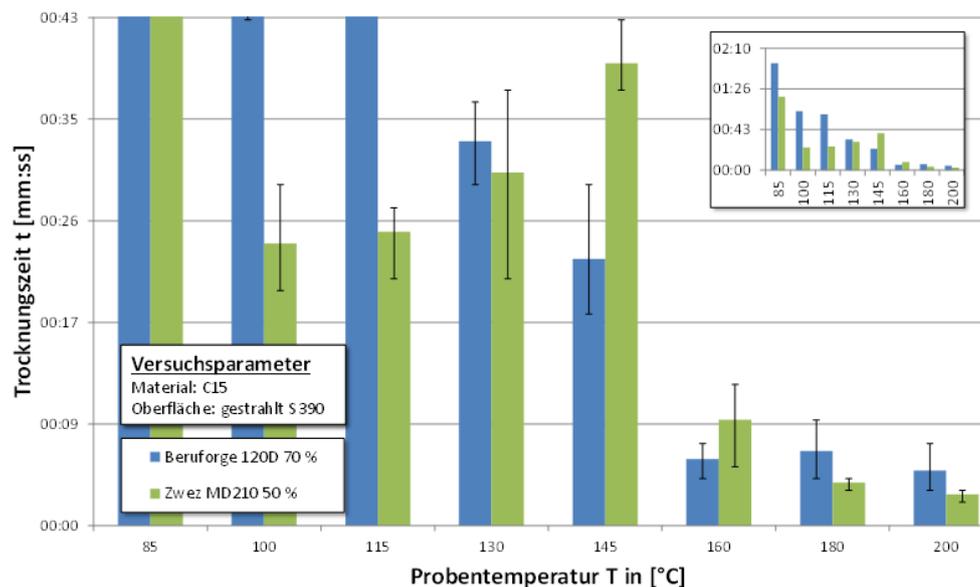


Abbildung 13: Trocknungszeit in Abhängigkeit der Probentemperatur

Mit einer Steigerung der Bauteiltemperatur sinkt die Trocknungszeit deutlich ab. Bei Temperaturen über 160°C sind nur noch wenige Sekunden notwendig. Betrachtet man jedoch die Qualität der Schmierstoffschicht, so sieht man, dass diese nicht mehr homogen verteilt ist.

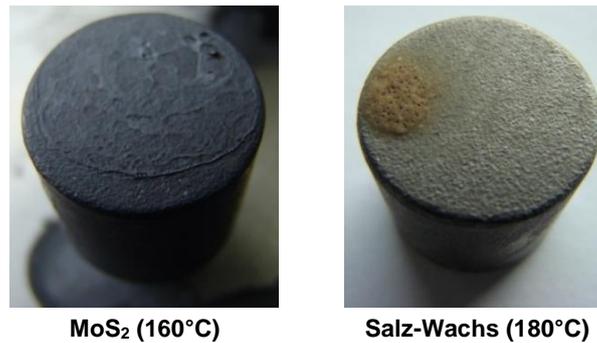


Abbildung 14: Qualität der Schmierstoffschicht auf den Bauteilen

Abbildung 14 zeigt auf der linken Seite eine mit  $\text{MoS}_2$  beschichtete Probe, die zuvor auf  $160^\circ\text{C}$  erwärmt wurde. Aufgrund des sogenannten Leidenfrost-Effekts ist es beim Kontakt des wässrigen  $\text{MoS}_2$  mit der Probenoberfläche zu Verspritzungen und Blasenbildungen infolge eines spontanen Verdampfens des Lösemittels (Wasser) gekommen. Dies resultiert in einer ungleichmäßigen und stellenweise unzureichenden Beschichtung. Auf der rechten Seite der Abbildung 14 ist eine bräunliche Verfärbung des Salz-Wachs Schmierstoffs bei einer Vorwärmung auf  $180^\circ\text{C}$  erkennbar. Auch hier haben sich zunächst infolge des Leidenfrost-Effekts Blasen auf der Oberfläche gebildet, die sich anschließend aufgrund der großen Restwärme dunkel verfärbt haben. Dementsprechend sind der Bauteilerwärmung Grenzen gesetzt.

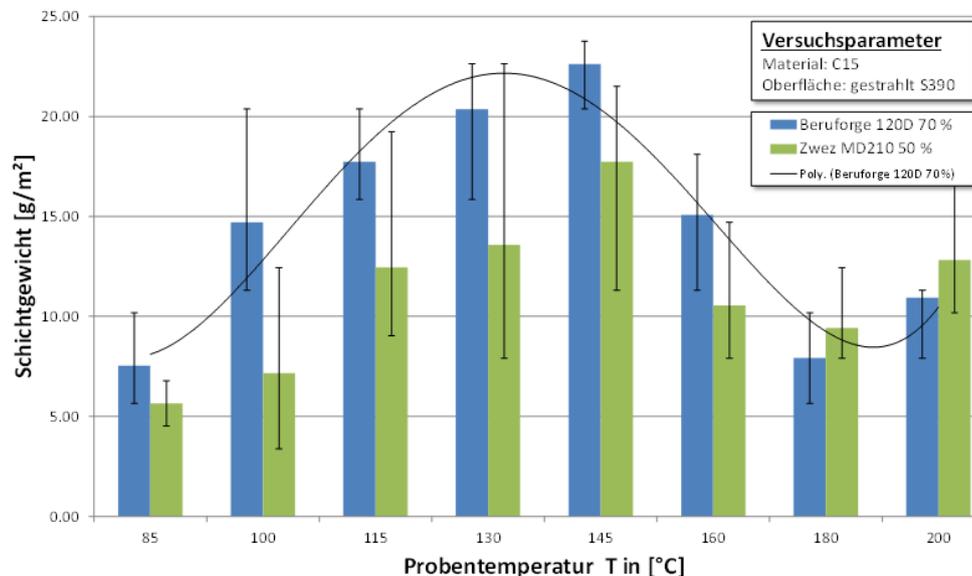


Abbildung 15: Schichtgewicht in Abhängigkeit der Probertemperatur

Unabhängig von der Homogenität der Schmierstoffverteilung zeigt Abbildung 15 auch einen deutlichen Einfluss der Probertemperatur auf das erzielbare Schmierstoffschichtgewicht. Gerade für mehrstufige Umformoperationen ist eine ausreichende Menge an appliziertem Schmierstoff notwendig. Die Schichtgewichte für Beruforge 120D liegen im Mittel deutlich über denen des  $\text{MoS}_2$ , was allerdings mit der höheren Konzentration von Schmierstoff (Salzwachs: 70%;  $\text{MoS}_2$ : 50%) zu erklären ist. Beiden Schmierstoffen gemein ist jedoch, dass mit Temperaturen  $>145^\circ\text{C}$  die

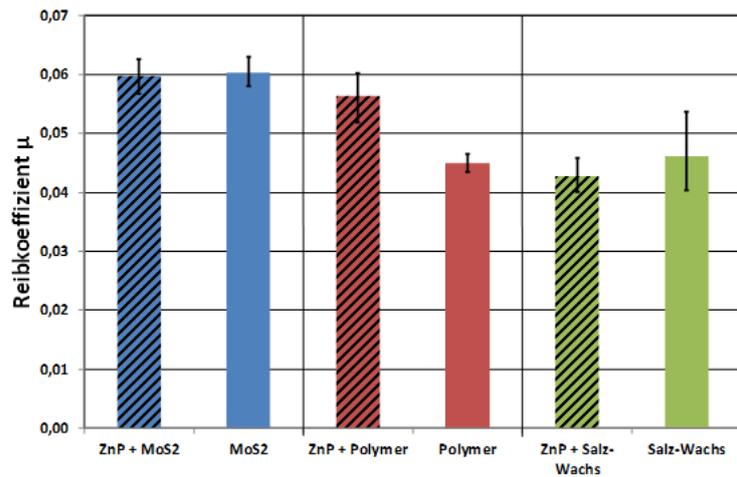
Schichtgewichte abnehmen. Ein Vorerwärmung der Proben auf 130°C stellt hinsichtlich appliziertem Schichtgewicht und Homogenität der Beschichtung nach den getroffenen Voruntersuchungen die Zieltemperatur dar. Ein vollständiges Durchwärmen der Teile auf diese Temperatur ist hierbei meist nicht erforderlich, wobei eine gewisse Kerntemperatur erreicht werden muss, um ein zu schnelles Abkühlen der Teile bis zum Zeitpunkt des Überflutens zu verhindern.

#### 4.3.2. Tribologische Charakterisierung

Nachdem die Art der Schmierstoffaufbringung in Kap. 4.3.1 untersucht wurde, gilt es im Vorfeld die Schmierstoffe zu charakterisieren und die Leistungsfähigkeit der phosphatfreien Systeme zu bestimmen. Hierfür ist ein am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen entwickeltes Tribometer zum Einsatz gekommen, welches speziell auf die Lasten der Kaltmassivumformung ausgelegt ist [Gro13]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Dabei wurde auf eine, auf einer ebenen Platte stehende, zylindrische Probe eine Stauchkraft von 450 kN aufgebracht. Anschließend erfuhr die Platte, unter Aufrechterhaltung der Kraft, eine translatorische Bewegung mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s. Durch die Stauchkraft vergrößert sich die Probenoberfläche und der Schmierstoff wird, wie in einem realen Prozess, ausgedünnt. Die für die Bewegung der Platte notwendige Kraft  $F_R$  wird gemessen und ergibt, dividiert durch die aufgebrachte Stauchkraft  $F_N$ , nach dem Gesetz von Coulomb (1) den Reibkoeffizient  $\mu$ .

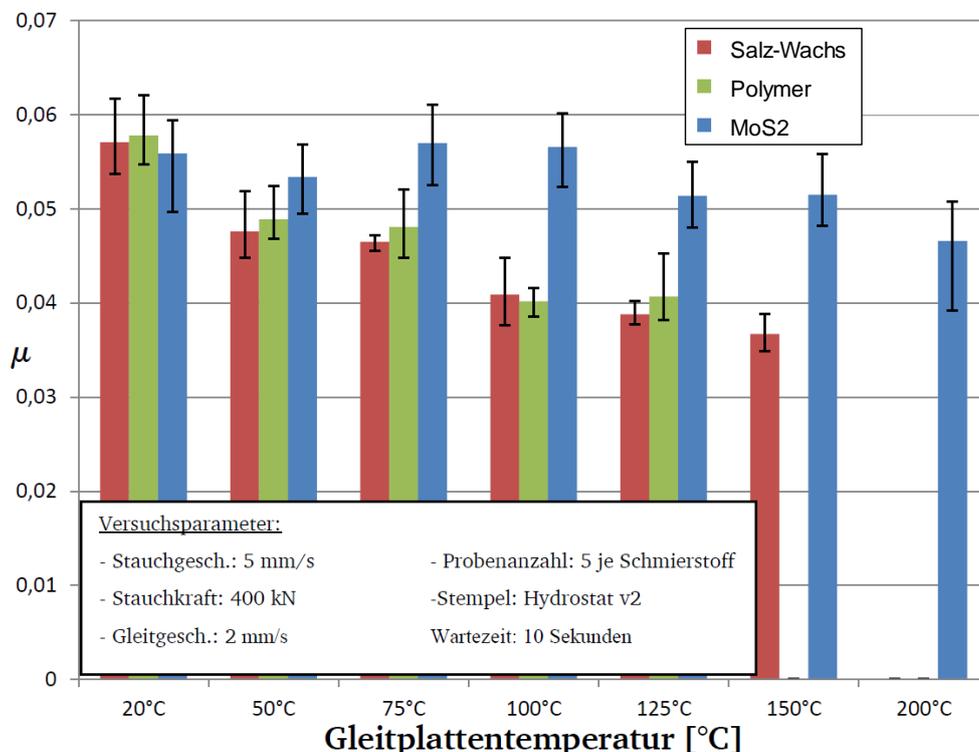
$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (1)$$

In Abbildung 16 sind die Einschichtschmierstoffe etablierten Systemen mit Zinkphosphat (ZnP) als Konversionsschicht und jeweils einem MoS<sub>2</sub>, Salz-Wachs und Polymer als Schmierstoff gegenübergestellt. Jeder einzelne Balken stellt die Mittelwerte der Reibkoeffizienten von jeweils 5 Versuchen dar, die angegebenen Streubalken repräsentieren die aufgetretenen Maxima und Minima. Für MoS<sub>2</sub> sind diese nahezu identisch. Im Fall von Polymer konnten die Werte ohne Zinkphosphat sogar um 20 % von  $\mu = 0,056$  auf  $\mu = 0,045$  gesenkt werden. Bei Salz-Wachs ist hingegen eine Zunahme des Reibkoeffizienten erkennbar. Grundsätzlich konnten alle Versuche ohne das Auftreten von Verschleiß durchgeführt werden.



**Abbildung 16: Vergleich zwischen phosphatfreien und phosphatbasierenden Schmierstoffsystemen**

Nachdem im Demonstratorprozess, wie in Kap. 4.2.2 gezeigt, Temperaturen bis über 300°C zu erwarten sind, gilt es die Schmierstoffe auch bei erhöhten Temperaturen zu testen. Um das Verhalten der Schmierstoffe bei möglichst homogenen Bedingungen hinsichtlich der Temperatur untersuchen zu können sind die Versuche auf der Gleitstauchanlage mit einer Gleitgeschwindigkeit von 2 mm/s durchgeführt worden. Somit wurde sichergestellt, dass über die Relativbewegung zwischen Gleitplatte und Probe keine zusätzliche Temperatur generiert wurde. Die Plattentemperatur wurde zwischen 25°C und 200°C stufenweise erhöht.



**Abbildung 17: Schmierstoffverhalten bei erhöhten Temperaturen**

Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Jeder Balken repräsentiert den Mittelwert aus 5 Versuchen. Die Fehlerbalken geben wiederum die auftretenden Maxima und Minima an. Grundsätzlich kann festgestellt werden dass sich sowohl bei Polymer als auch bei Salz-Wachs mit einer Erhöhung der Temperatur stark reduzierte Reibwerte einstellen, während MoS<sub>2</sub> als Festschmierstoff erwartungsgemäß weniger stark beeinflusst wird. Dieses Verhalten bestätigt die in Kap. 4.1.4 getroffenen Aussagen, wonach die Schmierwirkung von Polymeren und Wachsen auf ihrer Erweichung bzw. gegebenenfalls sogar dem Aufschmelzen und Ausbilden eines Gleitfilms beruht. Ab einer Temperatur von 125°C kommt die Schmierwirkung jedoch an ihre Grenzen. Allerdings stellt der Versuch einen Extremfall dar, der weder in dem Demonstratorprozess mit einer Taktzeit von 30 Hüben/Minute eintritt, noch in anderen Prozessen der Kaltmassivumformung zu erwarten ist. Bedingt durch die langsame translatorische Bewegung sind die Schmierstoffe bei diesen Untersuchungen den hohen Temperaturen unter Aufrechterhaltung der Stauchkraft von 400 kN ca. 40 Sekunden ausgesetzt gewesen. Gewöhnlich sind Schmierstoffe im Mittel nur eine Sekunde unter Last beansprucht. Daher sind weitere Untersuchungen vorgenommen worden, die näher an realen Bedingungen liegen.

#### 4.3.3. Einstufiger Prozess

Ein einstufiger Umformprozess in Form eines Voll-Vorwärts-Fließpressens mit beheizbarer Matrize ist zum Einsatz gekommen, um die im vorherigen Kapitel vorgenommenen Untersuchungen und die Leistungsfähigkeit von Schmierstoffen bei erhöhten Temperaturen weiter zu detaillieren. Hierfür wurde die Matrizentemperatur ebenfalls auf Werte zwischen 25°C und 200°C schrittweise erhöht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in den folgenden Abbildungen lediglich die Mittelwerte ohne Fehlerbalken angegeben.

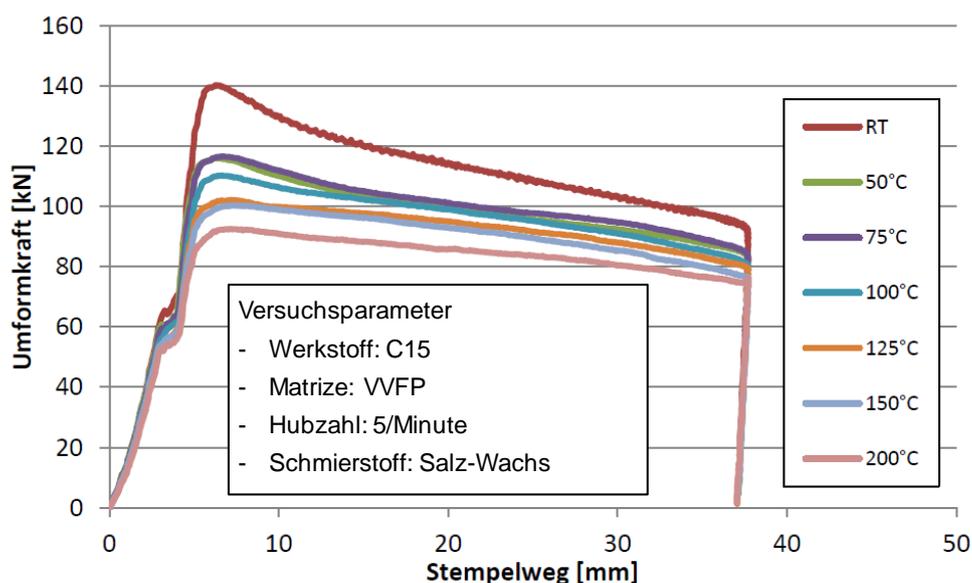


Abbildung 18: Kraftverlauf in Abhängigkeit der Matrizentemperatur (Salz-Wachs)

Sowohl in Abbildung 18 für Salz-Wachs als auch in Abbildung 19 für Polymer ist zu erkennen, dass die Schmierstoffe, im Gegensatz zu den Gleitstauchversuchen bei 200°C Plattentemperatur, eine einwandfreie Fertigung ermöglichen. Das zuvor beobachtete Versagen der Schmierstoffe ist somit auf die extremen Bedingungen während des Tribometerversuchs zurückzuführen. Weiterhin bestätigen die Versuche mit dem einstufigen Prozess jedoch auch erneut die in Kap. 4.1.4 getroffenen Aussagen. Eine weitere Erhöhung der Temperatur auf über 300°C war im Verlauf des Projekts leider nicht möglich. Dennoch zeigen die Versuche, dass phosphatfreie Schmierstoffe bei erhöhten Temperaturen ihre Leistungsfähigkeit nicht verlieren, sondern vielmehr sogar die Schmierwirkung verbessert wird.

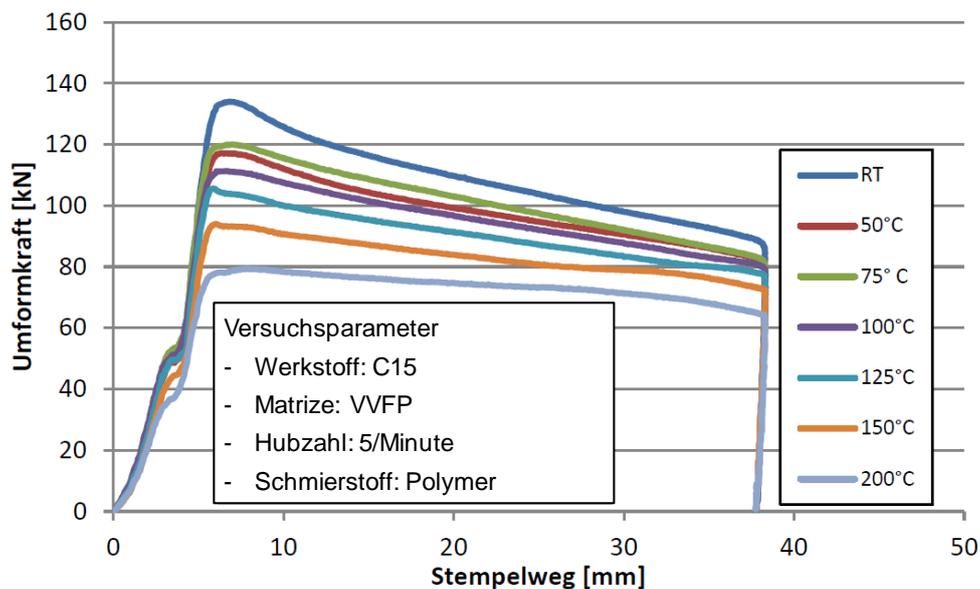


Abbildung 19: Kraftverlauf in Abhängigkeit der Matrizen­temperatur (Polymer)

#### 4.4. Neuartige Prozesskette zur zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung

##### 4.4.1. Anforderungsliste

In Abstimmung mit allen Projektpartnern wurde die Anforderungsliste für die Beschichtungsanlage erarbeitet, siehe Abbildung 20. Der Werkstoff für das Testbauteil, die Bauteilabmessungen und die Beschichtungsgeschwindigkeit waren als Fest- bzw. Zielforderung mit 16MnCr5 sowie  $\varnothing 27,3 \times 60$  mm und 30 1/Min. vom Anwender Schondelmaier vorgegeben. Eine Wunschforderung war, die Beschichtung der Bauteile in einer variablen Geschwindigkeit von 17-40 1/Min. vornehmen zu können. Eine weitere Forderung war die umweltgerechte Entsorgung der entstehenden Beschichtungsgemische.

Bei der Reinigungseinheit war die Festforderung nach einem Bäderwechsel vorgegeben, wobei die pH-Werte eines sauren Mediums mit 1,5-2 und die eines alkalischen Mediums mit 10-12 waren. Das Behältermaterial wurde aus Edelstahl angefertigt und die Heizleistung sollte  $1,5 \text{ W/cm}^3$  betragen.

			Anforderungsliste Beschichtungsanlage 	
	Nr.	FF, BF, ZF, W	Bezeichnung	Werte und Daten
Allgemein	A1	FF	Bauteilwerkstoff	16MnCr5 (Brinellhärte 145-160 HB)
	A2	ZF	Bauteilabmessungen	zylindrisch: $\varnothing$ 27,3 mm; Länge 60 mm
	A3	FF	Entsorgung Bäderabfall	Umweltgerechte Entsorgung
	A4	W	Beschichtung im Pressentakt	17 - 40 1/Min
	A5	FF	Beschichtung im Pressentakt	30 1/Min
Reinigungseinheit	R1	FF	Wechsel der Bäder	alkalisches / Saures Reinigungsmedium
	R2	BF	pH-Wert saures Medium	1,5-2
	R3	BF	pH-Wert alkalisches Medium	10-12
	R4	BF	regelbare Temperierung	75 °C - 85 °C
	R5	ZF	Behältermaterial	PP oder Edelstahl 1.4571//1.4541
	R6	W	Heizleistung	1,5 W/cm <sup>2</sup>
	R7	FF	Ruhe-/Sedimentationsbereich	Möglichkeit zum Absetzen und Entnehmen von ungelösten Verunreinigungen
	R8	FF	Anzahl Bäder /Reinigungseinheit	Reinigungsbehälter mit vorgelagerter Grobreinigung
	R9	FF	Trocknung nach Reinigung	warmer Luftstrom
Beschichtungseinheit	B1	FF	Teile vorwärmen	120 ° - 140 ° C
	B2	BF	regelbare Badtemperierung	60 °C - 85 °C
	B3	FF	Badumwälzung	z.B. Propellerrührwerk während Betrieb
	B4	FF	Wechsel der Bäder	Dispersion von Festschmierstoff oder Polymer // Dispersion von Wachsen mit Feststoffen
	B5	FF	Applikation	Fluten / Spritzen
	B6	FF	pH-Wert des Mediums	9-11
	B7	FF	Temperatur des Mediums	75°-85°C
	B8	FF	Beschichtungsdauer	15 s
	B9	FF	Anzahl Beschichtungsbäder	ein Bad
	B10	FF	Trocknung nach Beschichtung	warmer Luftstrom
Transfer	T1	FF	Beschickung Reinigungseinheit	von Hand einlegen
	T2	FF	Transport in der Reinigungseinheit	geeignete Transporttechnik
	T3	FF	Transport in der Trocknung	geeignete Transporttechnik
	T4	FF	Transport in der Beschichtungseinheit	geeignete Transporttechnik
	T5	FF	Transfer zwischen den Einheiten	geeignete Transporttechnik
	T6	FF	Zuführung zur Presse	geeignete Transporttechnik

FF: Festforderung  
 BF: Bereichsforderung  
 ZF: Zielforderung  
 W: Wunsch

**Abbildung 20: Anforderungsliste Reinigungs- und Beschichtungsanlage**

Bei den durchgeführten Versuchsreihen mit der Anlage ergab sich, dass der Einsatz eines Reinigungsbadens ausreichend war. Durch den Einsatz eines großen Reinigungsbehälters entsteht ein Wärmespeicher der eine gleichmäßige Reinigungstemperatur gewährleistet. Die Entnahme des Reinigungsmediums aus dem oberen Bereich des Behälters ermöglicht den abgeschwemmten schweren Verunreinigungen ein Absinken auf den Behälterboden, wo sie mittels eines Ablassventiles entsorgt werden können.

Im Laufe der Entwicklung stellte sich heraus, dass zur Steigerung der Flexibilität der Anlage das Konzept mit festen Bädern nicht optimal ist. Vielmehr ist der Einsatz kleiner Gebindebehälter von Vorteil. Zum einen ist das Umrüsten der Anlage auf unterschiedliche Beschichtungsmedien schneller und das Reinigen ist problemloser.

Das Erwärmen der Teile erfolgte ursprünglich durch ein Heißluftgebläse mit einer Heizleistung von 11 kW um die Werkstücktemperatur von 120 – 140°C zu erreichen. Durch den geringen Wärmeübergang durch Konvektion wurde die erforderliche Temperatur nicht erreicht. Der Einsatz einer Induktionsanlage mit einer Leistung von ca. 25 kVA konnte das Problem der Wärmeübertragung lösen. Die Restwärme der Werkstücke reichte aus, die Werkstücke nach dem Beschichten zu trocknen.

Eine Beheizung des Beschichtungsmediums war nicht erforderlich. Auch auf die Badumwälzung konnte, wegen des Einsatzes der kleinen Gebinde, verzichtet werden. Die Applikation des Beschichtungsmediums erfolgte durch Fluten. Die Beschichtungsdauer (Fluten und anschließendes Trocknen) von ca. 15 s kann durch die regulierbare Förder- und Rotationsgeschwindigkeit eingestellt werden.

Bei den Transporteinrichtungen wurden folgende Konzepte umgesetzt: Die Beschickung der Anlage wurde manuell durchgeführt. Der Transport durch die Anlage erfolgt mit einem Kettenförderer und Mitnehmern. Die Zuführung zur Presse wurde im Rahmen dieses Projektes zunächst manuell durchgeführt.

#### **4.4.2. Konstruktion**

Abbildung 21 zeigt die CAD-Umsetzung der Reinigungs- und Beschichtungsanlage in der Seitenansicht längs. Der Transfer erfolgt von links nach rechts. Im Modul 1 werden die Bauteile zunächst gereinigt und anschließend getrocknet. In Modul 2 ist die Beschichtung und die anschließende Trocknung umgesetzt. Mit Hilfe von Abbildung 22 kann man die Gesamtabmessungen der Anlage von 2,77 x 1,93 x 0,78 m erkennen. Der Transfer erfolgt auf einer Höhe von 1,42 m.

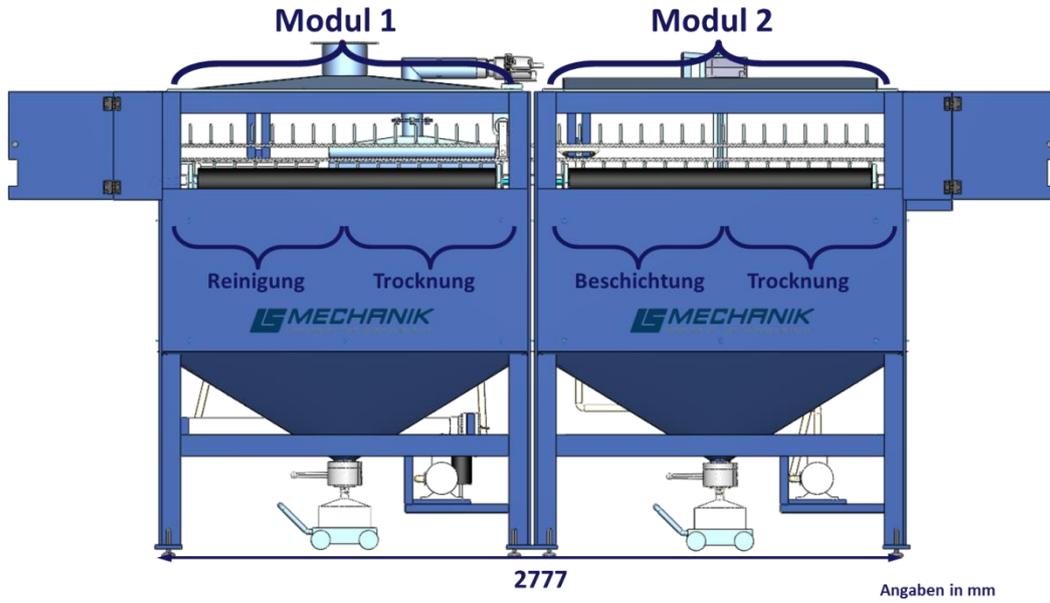


Abbildung 21: Reinigungs- und Beschichtungsanlage

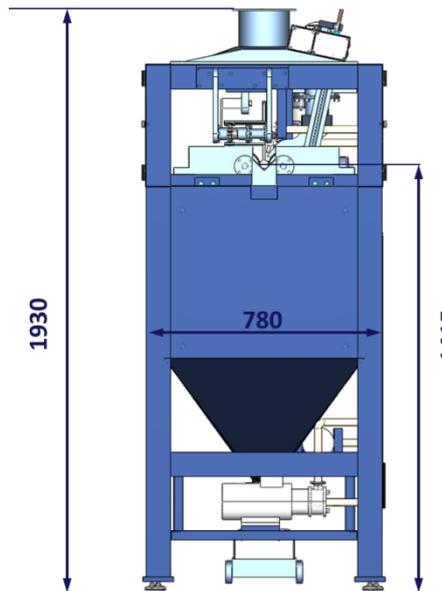
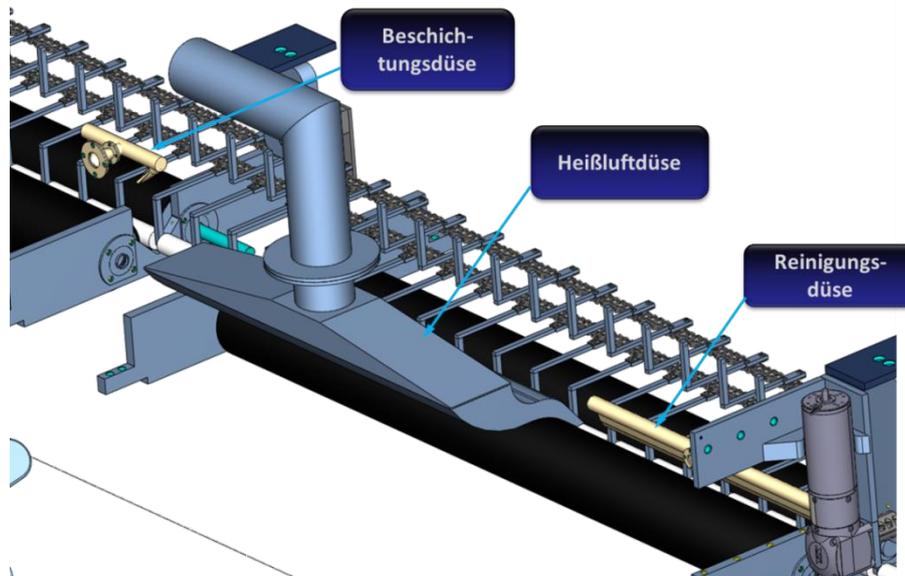
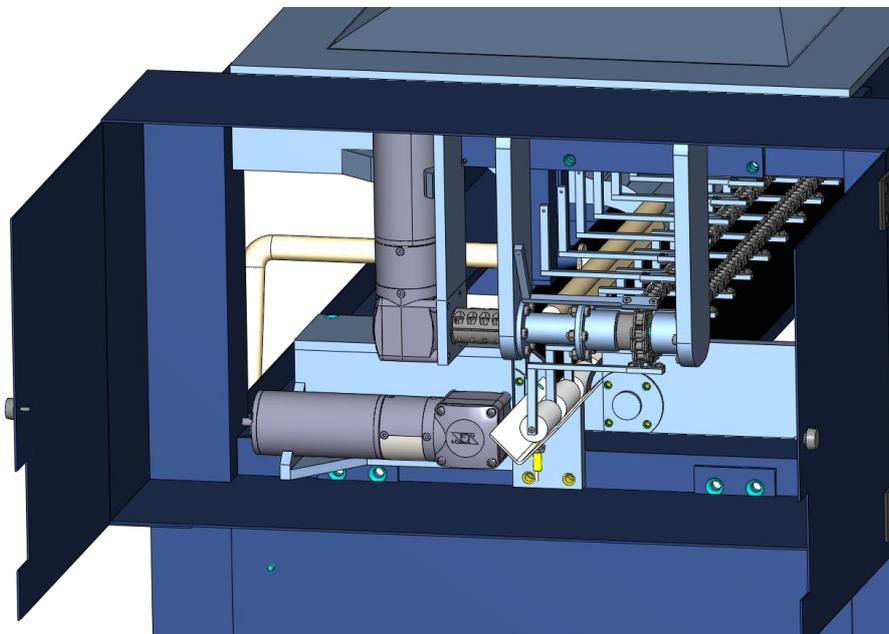


Abbildung 22: Reinigungs- und Beschichtungsanlage – Seitenansicht quer



**Abbildung 23: Aufbau der Beschichtungs-, Reinigungs- und Trocknungseinheit und Transfersystem**

Abbildung 23 zeigt die dunkelgrau dargestellten rotierenden Wellen sowie die Greifer, die für einen erzwungenen Transport sorgen. In Abbildung 24 sind eingelegte Rohlinge zwischen den Greifern dargestellt sowie auch die Motoren, die für die Transferantrieb verwendet wurden.

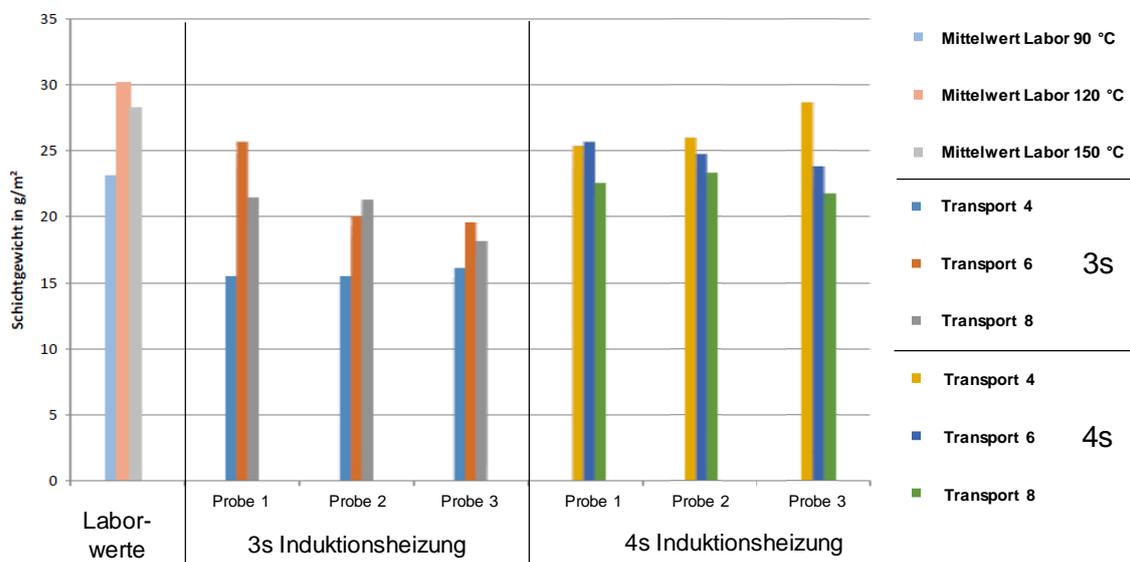


**Abbildung 24: Transfersystem mit eingelegten Rohlingen**

#### **4.4.3. Erprobung im Laborumfeld**

Bevor die Inline-Beschichtungsanlage im industriellen Umfeld getestet wurde, sind zunächst die beschichteten Bauteile im Labor untersucht worden. In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der mittels der Inline-Beschichtungsanlage erzielten Schichtgewichte im Vergleich zu den im Labor aufgetragenen dargestellt. Für das dargestellte

Beispiel wurde ein Schmierstoff auf Basis von MoS<sub>2</sub> der Firma Bechem verwendet. Die Konzentration des Schmierstoffs lag bei 100 %. Die Bestimmung der Schichtgewichte erfolgt mit Hilfe einer Feinwaage. Hierfür wurden die Bauteile direkt vor und nach der Beschichtung gewogen und aus der Differenz, geteilt durch die mathematisch berechnete Oberfläche, das Schichtgewicht ermittelt. Bei einer Erwärmungsdauer von 3 Sekunden sind die erzielbaren Temperaturen erwartungsgemäß niedriger als bei einer Erwärmungsdauer von 4 Sekunden. Dennoch liegen die Schichtgewichte bei höheren Transportgeschwindigkeiten im Bereich von knapp 20 g/m<sup>2</sup>. Dieses Schichtgewicht ist vergleichbar mit im Labor aufgetragenen Schmierstoffen. Grundsätzlich gilt, dass das Schmierstoffschichtgewicht sehr hoch ist. Aus diesem Grund ist in späteren Versuchen eine niedrigere Konzentration von 50% zum Einsatz gekommen.



**Abbildung 25: Schmierstoffschichtgewichte**

Bei 4 Sekunden Erwärmungsdauer ist der Einfluss der Transportgeschwindigkeit nicht mehr so ausgeprägt. Dies ist damit begründet, dass auch bei langsameren Transportgeschwindigkeiten die Oberflächentemperatur zum Zeitpunkt der Beschichtung im optimalen Bereich liegt. Nachdem eine Ausbringungsmenge von 30 Teilen pro Minute gewünscht ist, kommen für den Betrieb im industriellen Umfeld nur die höheren Geschwindigkeiten in Frage. Somit ist die Erwärmungsdauer für die späteren Versuche im industriellen Umfeld auf 3 Sekunden reduziert worden.

In Abbildung 26 ist ein mit MoS<sub>2</sub> beschichtetes Bauteil dargestellt. Die Einstellungen bei dieser Probe waren eine Erwärmungszeit von 3 Sekunden, sowie eine Transportgeschwindigkeit auf Stufe 6. Die Schmierstoffverteilung ist homogen und zeigt keine Fehlstellen auf.



Abbildung 26: Mit MoS<sub>2</sub> beschichtetes Bauteil

#### 4.4.4. Erprobung im industriellen Umfeld

Auf Basis der zuvor durchgeführten Versuche sind für die Erprobung im industriellen Umfeld eine Erwärmungsdauer von 3 Sekunden und eine Transportgeschwindigkeit auf Stufe 7 (entspricht 30 Teilen/Minute) festgesetzt worden. Eine automatische Probenzufuhr an die Presse konnte mit dem Prototypen der Beschichtungsanlage nicht gewährleistet werden. Somit wurden die Bauteile beschichtet, gesammelt und anschließend der Presse zugeführt.

Folgende, in Tabelle 1 dargestellte, Schmierstoffprodukte wurden im industriellen Umfeld erprobt:

Tabelle 1: Schmierstoffe für Beschichtungsanlagentest im industriellen Umfeld

Nr.	Schmierstoff	Ansatzverhältnis Wasser : Produkt	Basis
1	Bechem Beruforge 191	pur	MoS <sub>2</sub>
2	ZWEZ-Lube MD 230	1:1	MoS <sub>2</sub>
3	Bechem Beruforge 191	1:1	MoS <sub>2</sub>
4	ZWEZ-Lube PD 395	2:1	Polymer
5	Bechem Beruforge 120 DZ N	pur	„Salzwachs“

Die Schmierstoffe wurden in obiger Reihenfolge in der Beschichtungsanlage beschichtet und anschließend direkt umgeformt. Beim Wechsel von den schwarzen, auf MoS<sub>2</sub> basierenden Schmierstoffen zu den weißen Schmierstoffen auf Basis von Polymer und Salz-Wachs wurde die Anlage gründlich mit Wasser gespült, wobei dennoch bei Lube PD 395 signifikante Mengen schwarzen Schmierstoffs auf den beschichteten Teilen zu erkennen war. Insgesamt wurden rund 1000 Teile umgeformt.

Mit der Beschichtungsanlage konnte mit allen getesteten Schmierstoffvarianten ein über die gesamte Werkstückoberfläche gleichmäßigen Schmierstoffauftrag erzeugt werden, das heißt ohne Fehlstellen oder unerwünschte Ablaufspuren. Die Beschichtung auf den zuvor induktiv vorgewärmten Rohlinge trocknete nach Überfluten mit allen getesteten Schmierstoffvarianten innerhalb kurzer Zeit vollständig durch, so dass es zu keinen Problemen beim Pressvorgang aufgrund von Restfeuchtigkeit kommen konnte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide getesteten Schmierstoffprodukte auf Basis von  $\text{MoS}_2$  eine hohe Leistungsfähigkeit besitzen und uneingeschränkt in der Lage waren, die tribologischen Lasten der Umformung aufzunehmen. Versuche mit einer stärkeren Verdünnung haben gezeigt, dass auch hochleistungsfähige Schmierstoffe an ihre Grenzen kommen, wenn die Schmierstoffauflage stark reduziert wird. Hier gilt es, die für einwandfreie Ergebnisse minimal erforderliche Einsatzkonzentration in Vorversuchen zu ermitteln, um ggf. erhöhte Werkzeugkosten durch einen zu knapp bemessenen Schmierstoffeinsatz zu vermeiden.

Die Bewertung des Ergebnisses auf quantitativer Basis erfolgt über den Rundlauf am Fertigteil gemäß Abbildung 27. Hierbei wird das Pressteil von innen auf einen Dorn aufgenommen und auf die gekennzeichneten Außendurchmesser gemessen.

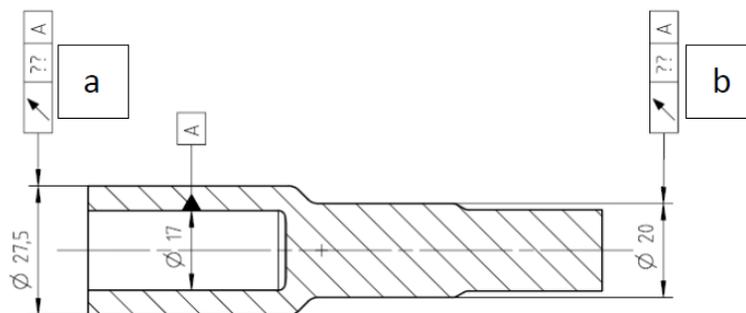


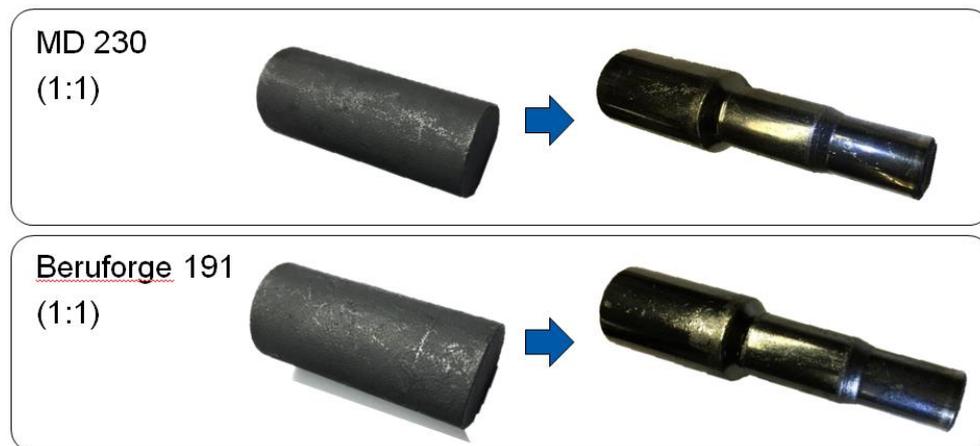
Abbildung 27: Rundlaufmessung

Die Ergebnisse der Rundlaufmessung sind in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei wurden von den ca. 200 gepressten Teilen zufällig 5 Stück entnommen und vermessen.

Tabelle 2: Rundlaufmessung

Teile Nr.	Schmierstoff Nr. 1		Schmierstoff Nr. 2		Schmierstoff Nr. 3	
	a	b	a	b	a	b
1	0,07	0,11	0,04	0,11	0,09	0,24
2	0,07	0,08	0,07	0,07	0,15	0,44
3	0,05	0,18	0,01	0,24	0,06	0,18
4	0,12	0,23	0,08	0,04	0,08	0,26
5	0,13	0,3	0,03	0,04	0,07	0,31
$\bar{x}$	0,088	0,18	0,046	0,1	0,09	0,286

Die vermessenen Bauteile sind im Rahmen der vorgegebenen Toleranzen maßhaltig und zeigen für beide  $\text{MoS}_2$  haltigen Schmierstoffe eine einwandfreie Qualität der Bauteiloberfläche, wie in Abbildung 28 dargestellt. Dies ist ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung bzw. Abschätzung von Werkzeugstandzeiten, wenn große Stückzahlen verarbeitet werden sollen, denn Oberflächendefekte in Form von Riefen durch eine unzureichende Restschmierstoffauflage lassen den Werkzeugverschleiß stark ansteigen.



**Abbildung 28: Demonstratorbauteile**

Die getesteten Schmierstoffe auf Basis von Polymer oder Salz-Wachs waren im Gegensatz zu dem MoS<sub>2</sub>-basierten Produkten nicht in der Lage, eine durchweg einwandfreie Umformung der Werkstücke sicherzustellen. Während die in die Demonstratoranwendung integrierten Voll-Vorwärts-Fließpressvorgänge problemlos durchgeführt werden konnten, kam es bei der Napf-Rückwärts-Operation in der zweiten Stufe zu einem erhöhten Verschleiß des Stempels. Erkennbar war dies an Riefen im Napfinneren der Bauteile bereits nach wenigen umgeformten Teilen. Daher wurde für die Schmierstoffe auf Basis von Polymer und Salz-Wachs auf die zuvor dargestellte Rundlaufmessung verzichtet.

Das Versagen der Schmierstoffe 4 und 5 lässt sich auf das unterschiedliche Wirkprinzip im Vergleich zu MoS<sub>2</sub> zurückführen. Während bei MoS<sub>2</sub> extreme Oberflächenvergrößerungen, wie sie beim Napfen auftreten, wegen des Abscherens der Lamellenpakete ohne Abriss des Schmierfilms möglich sind, ist dies bei Polymeren und Wachsen nicht in dem Maße gegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass weiterer Entwicklungsbedarf insbesondere bei den „weißen“ Schmierstoffen besteht.

## 5. Fazit

Im Projekt „Umweltfreundliche Prozessketten in der Kaltmassivumformung von Abschnitten durch den Verzicht auf nasschemisch aufgebrachte Konversionsschichten“ wurden neuartige Schmierstoffe auf Basis von Molybdändisulfid, Polymer und Salz-Wachs neu- oder konsequent weiterentwickelt. Die entwickelten Produkte sind im Anhang kurz vorgestellt. Die Schmierstoffe sind in Laboruntersuchungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Belastungen wie Oberflächenvergrößerungen, Kontaktnormalspannungen und erhöhten Temperatur untersucht worden. Dabei ist festzuhalten, dass diese vergleichbare Ergebnisse wie etablierte Systeme bestehend aus Zinkphosphat als Konversionsschicht und einer reaktiven Seife als Schmierstoff geliefert haben.

Der im Projekt entwickelte Prototyp einer inlinefähigen Beschichtungsanlage ermöglicht eine allseitig homogene Schmierstoffverteilung auf den, für den Demonstratorprozess ausgewählten, Bauteilen. Die Beschichtung kann im Pressentakt von bis zu 30 Teilen/Minute aufgebracht werden. Versuche im industriellen Umfeld haben gezeigt, dass die entwickelten Schmierstoffe auf Basis von  $\text{MoS}_2$  eine fehlerfreie Umformung ermöglichen. Die Schmierstoffe auf Basis von Polymer und Salz-Wachs lassen zum bisherigen Zeitpunkt noch keine durchgängig fehlerfreie Produktion zu. Die Ergebnisse zeigen, dass weiterer Entwicklungsbedarf bei den „weißen“ Schmierstoffen besteht.

Um das Produkt „Beschichtungsanlage“ zur Marktreife zu bringen sind jedoch noch Nachbesserungen im Hinblick auf flexible Bauteildurchmesser und –längen notwendig. Ebenso gilt es ein Transfersystem zur automatischen Bestückung der Beschichtungsanlage sowie der Weitergabe an die Presse zu integrieren. Die Verwendung von großen Schmierstofftanks hat sich als nachhaltig bei der Reinigung und einem Wechsel des Schmierstoffs erwiesen. Ein direkter Anschluss an ein Schmierstofffass erscheint zielführend.

## 6. Ausblick

Nach Berücksichtigung der noch offenen Punkte im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit von phosphatfreien Schmierstoffen auf Basis von Polymer und Salz-Wachs, sowie einer Überarbeitung und Weiterentwicklung des Beschichtungsanlagen-Prototypen zur Marktreife hin, ergeben sich für Unternehmen der Kaltmassivumformung neue Möglichkeiten bei der Gestaltung ihrer Prozessketten. Durch eine Einführung von Inline-Beschichtungsanlagen ergibt sich die Möglichkeit, bisher vorhandene, konventionelle Prozessketten deutlich zu optimieren. Der in Abbildung 29 gezeigte Prozessschritt „Beschichten“ existiert nach wie vor. Allerdings ermöglicht der Entfall der Zinkphosphat-Trägerschicht, die für diesen Prozessschritt in der Vergangenheit zwingend erforderlich war, die Anlage so kompakt zu gestalten, dass sie sich in die Zuführung einer Umformanlage integrieren lässt.



**Abbildung 29: Konventionelle Prozesskette**

So ist es möglich, diesen Prozessschritt dezentral inline an der Umformanlage durchzuführen. Dies hat stark positive Auswirkungen auf den innerbetrieblichen Materialtransport. Transportfahrten per Flurförderfahrzeug von und zu der herkömmlichen Beschichtungsanlage entfallen gänzlich. Auch wird der Flächenverbrauch aufgrund von zwischengelagertem Material nach der Beschichtung zwecks Pufferung verringert. Zudem fallen durch den Wegfall der Zinkphosphatschicht hohe Kosten zur Entsorgung des Phosphatschlamm weg und der Wasserverbrauch wird drastisch reduziert.

Eine neue Prozesskette könnte, wie in Abbildung 30 zu sehen ist, gestaltet werden. Die Prozessschritte Sägen, Strahlen und die Wärmebehandlung der Teile würden analog zu der konventionellen Prozessfolge bestehen bleiben. Das Beschichten kann nun allerdings im Pressentakt erfolgen, während die Teile vollautomatisch der Presse zugeführt werden. Unter der Annahme eines entsprechenden Produktes ist es zusätzlich denkbar, das nachgelagerte Reinigen sowie die 100% Kontrolle funktionskritischer Maße mit der Umformanlage zu verketteten. So ist es möglich direkt versandfertige Artikel zu produzieren, für die kein weiterer dezentraler Prozessschritt außer dem Verladen auf einen LKW mehr nötig ist.



**Abbildung 30: Neuartige Prozesskette**

## 7. Literaturverzeichnis

- [Are09] Arentoft, M. et al.: A new lubricant carrier for metal forming: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2009; pp. 243–246.
- [Art13] Arthanareeswari, M.; Kamaraj, P.; Tamilselvi, M.: Anticorrosive Performance of Zinc Phosphate Coatings on Mild Steel Developed Using Galvanic Coupling. In Journal of Chemistry, 2013, 2013; pp. 1–8.
- [Bab04] Bartz, W. J. ; Barnert, L.: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung. Renningen : Expert-Verl., 2004. – ISBN 3-8169-2161-2
- [Bäc08] Bächler, W.: Polymer-Schmierstoffe in der Kaltmassivumformung. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer : Ressourcen effizient nutzen, 2008
- [Bag10] Bay, N. ; Azushima, A. ; Groche, P. ; Ishibashi, I. ; Merklein, M. ; Morishita, M. ; Nakamura, T. ; Schmid, S. ; Yoshida, M.: Environmentally benign tribo-systems for metal forming, Bd. 59. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, S. 760–780
- [Bay10] Bay, N., Azushima, A., Groche, P., Ishibashi, I., Merklein, M., Morishita, M. et al., 2010, Environmentally benign tribo-systems for metal forming, Annals of CIRP, 59: S. 760–780.
- [Bay94] Bay, N., 1994, The state of the art in cold forging lubrication, Journal of Materials Processing Technology, 46: pp. 19–40
- [Czh10] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch : Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik ; mit 123 Tabellen. 3., überarb. und erw. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8348-0017-6
- [Dob10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik : Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin: Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-04248-5
- [Don00] Donofrio, J.: Zinc phosphating. Metal Finishing, 2000, Volume 98, pp 57-73.
- [Fan10] Fang, F. et al.: Characteristics of a fast low-temperature zinc phosphating coating accelerated by an ECO-friendly hydroxylamine sulfate. In Surface and Coatings Technology, 2010, 204; pp. 2381–2385.
- [Fre86] Freeman, D.B.: Phosphating and Metal Pretreatment, 1986.
- [Gar07] Gariety, M., Ngaile, G., Altan, T.: Evaluation of new cold forging lubricants without zinc phosphate precoat. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, Vol. 47, pp. 673-681
- [Gro13] Groche, P.; Stahlmann, J.; Müller, C.: Mechanical conditions in bulk metal forming tribometers—Part two, Tribology International, 66: S. 345-351, 2013.
- [Guy74] Guy, L.: Phosphating of Metals, Finishing Publications Ltd & ASM International, 1974.
- [Her08] Herlan, T.: Energy- and Environmental Aspects in Surface- treatment for cold forging, 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer – Ressourcen effizient nutzen, Düsseldorf, 2008.
- [Ilu14] ILUB catalogue, 2014.
- [Jam71] James, D., Freeman, D.B.: Trans. Inst. Met. Finish., 49, 79, 1971.
- [Kap05] Kappes, B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung. Aachen : Shaker, 2005. – ISBN 3-8322-3804-2
- [Kas00] Kashimura, T., Takeuchi, M., Oda, F., Kawahara, F., Ojima, H. and Tomono, M.: Development of Environmentally Friendly Lubricant with High Performance and Simple Treatment for Cold Forging (in Japanese), J. JSTP, 41-469(2000), 109-114.

- [Kle09] Kleinle, M.: Etablierte Schmierstoffsysteme in der Kaltmassivumformung. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): 24. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 2009. – ISBN 978-3-98-12624-2-1
- [Klk06] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 4 : Umformen*. 5., neu bearbeitete Auflage. 5., neu bearb. Berlin [u.a.] : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-23650-4
- [Kob05] Kobayashi, N., Moriyama, A., Yoshida, M.: Electrolytic Phosphating Process for Steel Wire Drawing. Nihon Parkerizing, Technical report No. 17, 2005.
- [Köh09] Köhler, M.: Beitrag zur zinkphosphatschichtfreien Kaltmassivumformung durch tribologisch vorteilhafte Halbzeugoberflächen. Aachen : Shaker, 2009. – ISBN 978-3-8322-8857-0
- [Lan88] Lange, K.: Massivumformung. 2., völlig Neubearb. Berlin [u.a.] : Springer, 1988. – ISBN 3-540-17709-4
- [Mec00] “Water Lubricants for Cold Forging: MEC Homat”, Technical Bulletin of MEC International, 2000.
- [Nbh10] Nittel, K.; Bucci, E.; Hellwig, R. ; Schoppe, J. ; Ostrowski, J. ; Zvez, P. ; Zvez, R. ; Stahlmann, J. ; Groche, P.: Surface Treatment - Facts, Trends and Outlook for the Cold Forging Industry. In: 43rd ICFG Plenary Meeting 2010, 2010, S. 142–152
- [Nit08] Nittel, K.D.: Neue Beschichtungen und Trends beim Kaltfließpressen und Kaltstauchen. Proceed. 23th Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Düsseldorf, VDI (2008).
- [Nsg11] Nittel, K ; Stahlmann, J.; Groche, P.: Kaltstauchdraht und Kaltmassivumformung. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): 25. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, 2011
- [Ods06] Ostrowski, J.; Dwuletzki, H.; Schoppe, J.: Phosphatfreie Kaltmassivumformung - Neue Ergebnisse aus der Praxis. In: 15th International Colloquium Tribology, 2006
- [Ole98] Olesen, P. T. et al.: Electrolytic deposition of amorphous and crystalline zinc-calcium phosphates. In Journal of Material Science, 1998, 1998; pp. 3059–3063.
- [Raj00] Rajagopal. C., Vasu, K.I.: Conversion Coatings: A Reference for Phosphating, Chromating and Anodizing, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Dehli, 2000.
- [Rau90] Rausch, W.: The Phosphating of Metals, Finishing Publications, 1990.
- [Rup97] Rupp, M.: *Möglichkeiten und Grenzen der Kaltmassivumformung zinkphosphatschichtfreier Drähte*. Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1997. – ISBN 3-8265-3257-0
- [Sin34] Singer, F.: Verfahren zur Vorbehandlung von Eisen- und Stahlwerkstücken für die spanlose Fertigung, z.B. das Ziehen, Strecken und Walzen, Reichspatentamt, Patentschrift Nr. 673405, 1934.
- [Stb05] Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W.: Engineering tribology. 3. Aufl. Amsterdam ;, Boston : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. – ISBN 978-0-7506-7836-0
- [Ste08] Stephan, H.-O.: Neue Schmierstoff-Systeme für die Kaltmassivumformung: Bonderlube FL. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): 23. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer: Ressourcen effizient nutzen, 2008
- [Tam15a] Tamilselvi, M. et al.: Progress in Zinc Phosphate Conversion Coatings: A Review: International Journal of Advanced Chemical Science and Applications; 2015, S. 25–41.
- [Tam15b] Tamilselvi, M. et al.: Development of nano SiO<sub>2</sub> incorporated nano zinc phosphate coatings on mild steel. In Applied Surface Science, 2015, 332; S. 12–21.
- [Uts07] Utsunomiya, H. et al.: Porosification of Steel Workpiece Surface. New Lubrication System for Cold Forging. Proceedings of the ICTMP 2007; pp. 63–66.
- [Wan15] Wang, Z. G. et al.: Evaluation of lubricants without zinc phosphate precoat in multi-stage cold forging. In CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64; S. 285–288, 2015.

## 8. Anhänge

### 8.1. Produkte - Zwez

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden von der Fa. Zwez sowohl Schmierstoffe auf Basis MoS<sub>2</sub> (ZWEZ-Lube MD-Reihe) sowie auf Basis von Polymeren (ZWEZ-Lube PD-Reihe) neu- bzw. weiterentwickelt.

So wurden erste Laboruntersuchungen am PtU zum Teil noch mit den Produkten ZWEZ-Lube MD 210 und ZWEZ-Lube PD 375 durchgeführt. Die Untersuchungen nach Konzeption und Bau des Beschichtungsstandes im späteren Projektverlauf wurden dann aber mit den Produkten ZWEZ-Lube MD 230 und ZWEZ-Lube PD 395 vorgenommen. Bei diesen Produkten handelt es sich um Schmierstoffe, die nach den zuvor ausgeführten Kriterien und Verfahrensweisen insbesondere als Einschichtschmierstoffe ohne vorherige Zinkphosphatierung konzipiert wurden.

#### Richtrezeptur für MoS<sub>2</sub>-basierte Schmierstoffe

- Wasser (Lösungsmittel)
- Molybdändisulfid-Pulver (Festschmierstoff)
- Graphit (Festschmierstoff)
- Dispergatoren zur Stabilisierung der Dispersion
- Haftvermittler auf anorganischer und / oder organischer Basis
- Weitere Additive für Schaumreduzierung, Konservierung und Korrosionsinhibierung

#### Richtrezeptur für Polymer-basierte Schmierstoffe

- Wasser (Lösungsmittel)
- Polymere
- Wachskomponenten, ggf. mit unterschiedlichen Erweichungspunkten
- Dispergatoren zur Stabilisierung der Dispersion
- Füllkörper (Festschmierstoffe, mineralische Komponenten)
- Haftvermittler auf anorganischer und / oder organischer Basis
- Weitere Additive für Schaumreduzierung, Konservierung und Korrosionsinhibierung

### 8.2. Produkte – Bechem

Während des Projektes kamen von der Fa. Carl Bechem sowohl Schmierstoffe auf Basis MoS<sub>2</sub> (Beruforge 191) als auch auf Basis von Salz-Wachs-Formulierungen (Beruforge 120 D, Beruforge 120 DZN) zum Einsatz. Beide Praxiskonzepte wurden auf der Grundlage der Projektergebnisse teils erheblich weiterentwickelt. Das Beruforge 120 DZN ist eine komplett neue Produktformulierung. Alle genannten Produkte

sind zur Nutzung als Einschichtschmierstoffsystem konzipiert worden, welche es dem Anwender erlauben, auch ohne vorherige Zinkphosphatierung anspruchsvolle Umformungen zu realisieren.

Die am PtU durchgeführten Versuche wurden mit Beruforge 191 und Beruforge 120 D respektive deren Modifikationen durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Projektes, nach Konzeption und Bau des Beschichtungsstandes, kam darüber hinaus auch das Beruforge 120 DZN zum Einsatz.

#### **Richtrezeptur für MoS<sub>2</sub>-basierte Schmierstoffe**

- Wasser (Basisfluid, Trägermedium Dispersion)
- Molybdändisulfid-Pulver (Festschmierstoff, prozessoptimierte Partikelgrößenverteilung)
- Graphit (Festschmierstoff, prozessoptimierte Partikelgrößenverteilung)
- Additive zur Struktureinstellung
- Haftvermittler auf anorganischer und / oder organischer Basis
- Weitere Additive für Schaumreduzierung, Konservierung, Stabilisierung und Korrosionsinhibierung

#### **Richtrezeptur für Salz-Wachs-basierte Schmierstoffe**

- Wasser (Basisfluid, Trägermedium Dispersion)
- Wachskomponenten (Filmbildung, Trägermedium des Coatings)
- Festschmierstoffe
- Haftvermittler auf anorganischer und / oder organischer Basis
- Weitere Additive für Schaumreduzierung, Konservierung, Stabilisierung und Korrosionsinhibierung