

Schondelmaier Presswerk GmbH

Weiterentwicklung einer Reinigungs- und Beschichtungseinheit für die umweltfreundliche Verarbeitung von Halbzeugen und Ermittlung der Praxistauglichkeit bei der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 30738-02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

von

Dipl.-Ing. Oliver Oehler

Dipl.-Ing. Horst Ludwig

Dr.-Ing. Manuel Ludwig

Patrick Volke, M. Sc.

Gutach, 11. Dezember 2019

06/02		Projektkennblatt			
		der			
Deutschen Bundesstiftung Umwelt					
Az	30738-02	Referat	21/2	Fördersumme	278.430,00 €
Antragstitel		Weiterentwicklung einer Reinigungs- und Beschichtungseinheit für die umweltfreundliche Verarbeitung von Halbzeugen und Ermittlung der Praxistauglichkeit bei der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung			
Stichworte		Phosphatfrei, Inline-Beschichtung, Kaltmassivumformung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
34 Monate	01.09.2016	31.08.2019	1		
Zwischenberichte	31.01.2017	31.01.2018			
Bewilligungsempfänger	Schondelmaier GmbH Presswerk (SPW)			Tel	07833-791 351
	Hornbergstr. 18			Fax	07833-791 4351
	D-77793 Gutach			Projektleitung	
				Dipl.-Ing. Oliver Oehler	
Kooperationspartner	LS-Mechanik GmbH			Bearbeiter	
	Ernst-Diegel-Straße 4a in 36304 Alsfeld			Dipl.-Ing. Oliver Oehler	
	Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU)				
	Otto-Bernd-Str. 2 in 64287 Darmstadt				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Ziel der Untersuchungen ist die Weiterentwicklung und der Beleg der Praxistauglichkeit einer Prototypenanlage zur Reinigung und Beschichtung von Rohlingen bei der Kaltmassivumformung. Anwendung finden hier die in einem Vorgängerprojekt von Schmierstoffherstellern entwickelten Beschichtungsmedien, die eine Inline-Applikation in direkter Umgebung der Umformpresse ermöglichen.

Die Funktionsfähigkeit der entwickelten Schmierstoffe wurde bereits mit der Prototypenanlage belegt. Daher ist es ein weiteres Ziel, während der Untersuchungen auch die Flexibilität der Anlage hinsichtlich beschichtbarer Halbzeuge zu erhöhen. Durch diese formulierten Zielsetzungen können in der Prozesskette bei der Kaltmassivumformung ökologische Fortschritte hinsichtlich einer stark verkürzten Prozesskette und der Verwendung umweltfreundlicher Schmierstoffe erzielt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage abgeleitet. Unter der Prämisse der Praxistauglichkeit sowie der Flexibilität in der industriellen Anwendung war weiterhin ein geeignetes Bauteil für die späteren Versuche im industriellen Umfeld auszuwählen.

Eine wissenschaftlich systematische Analyse zur Auswahl der Schmierstoffe sowie geeigneter Beschichtungsarten bei der Aufbringung der Schmierstoffe führt zu dem Pflichtenheft für die Transport-, Reinigungs- und Beschichtungseinheit der industrietauglichen Anlage zur Beschichtung von scheibenförmigen Bauteilen. Im Vergleich zum Vorgängerprojekt bestand die Schwierigkeit darin, auch ungestrahlte Proben sowie die Innenflächen von scheibenförmigen Proben beschichten zu können.

Nach Konstruktion und Bau der Anlage sind systematische Beschichtungsversuche zur Applikation der Schmierstoffschichten bei der Firma LS-Mechanik durchgeführt worden. Eine wissenschaftliche Charakterisierung des tribologischen Verhaltens der beschichteten Proben führte zudem das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) durch. Basierend auf all diesen Erkenntnissen sind die ermittelten Einstellungs- und Beschichtungsparameter der Anlage in die Untersuchungen zur Praxistauglichkeit in einem Serienprozess bei der Firma Schondelmaier Presswerk eingeflossen, bei dem die Anlage direkt in der Fertigungsumgebung im Dauerbetrieb getestet wurde.

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt wurde eine weiterentwickelte Anlage zur phosphatfreien Beschichtung von Rohlingen für die Kaltmassivumformung gebaut. Die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Art der Schmierstoffapplikation brachten wesentliche Erkenntnisse für die Umsetzung der Beschichtungseinheit. Dabei ist festzuhalten, dass die Beschichtungsart Tauchen das beste Prozessergebnis lieferte und damit auch so in der neuen Anlage integriert wurde.

Mit Hilfe der weiterentwickelten Anlage konnte die Flexibilität sowie die Modularität der Anlage im Vergleich zu einer Prototypenanlage stark verbessert werden. Mit der Anlage sind nun sowohl rotationssymmetrische Rohlinge als auch scheibenförmige Probekörper für die Reinigung, Erwärmung und Beschichtung verwendbar. Die modular aufgebaute Anlage erlaubt es weiterhin, die Reinigungs-, Erwärmungs- und Beschichtungseinheit je nach Bedarf zu kombinieren oder sogar weitere Module in die Anlage zu integrieren. Der geringe Platzbedarf bei der Aufstellung der Anlage ist auch ein Vorteil für die zukünftige Verwendung der Anlage bei Umformunternehmen.

Über die Versuche zum Beleg der Praxistauglichkeit in einem Serienprozess kann festgehalten werden, dass die Beschichtung der geforderten 30-40 Teile/Minute im Presentakt des Umformaggregats möglich ist. Allerdings müssen hierbei noch Einstellungsparameter an der Anlage feinjustiert werden, um eine vollständig störungsfreie Produktion zu gewährleisten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

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

Tagungen

- 22.02.17: „Der Werkzeugbau und die Möglichkeiten mit Industrie 4.0“, 32. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Düsseldorf, Deutschland.
- 18.03.2018: „Weiterentwicklung einer Reinigungs- und Beschichtungseinheit für die umweltfreundliche Verarbeitung von Halbzeugen und Ermittlung der Praxistauglichkeit bei der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung“, Gastvortrag in der AG Tribologie der GCFG, Darmstadt, Deutschland.
- 26.02.2020: „Werkzeugbau 4.0“, 35. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Düsseldorf, Deutschland.
- Alle Zwischenstände wurden regelmäßig bei den Projektsitzungen der AG Tribologie im Rahmen der German Cold Forging Group vorgetragen und mit den Teilnehmern diskutiert.

Veröffentlichungen

Geplante Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

- Fachzeitschrift „Draht“, Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg, Ausgabe 2/2020.
- Fachzeitschrift „Umformtechnik – Massiv- und Leichtbau“, Verlag Meisenbach GmbH, Bamberg, Ausgabe 2/2020.
- White-Paper zum Artikel in der Fachzeitschrift „Draht“, Februar 2020.

Fazit

Die vorgegebenen Projektziele sind größtenteils erreicht worden. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse haben gezeigt, dass die entwickelte Inline-Beschichtungsanlage praxistauglich im industriellen Umfeld einsetzbar ist. Zudem konnte die Flexibilität und Modularität der Anlage im Vergleich zur Prototypenanlage aus dem vorangegangenen Projekt deutlich erhöht werden. So ist es nun auch möglich, verschiedene Halbzeuggeometrien ohne aufwendige Umbauten der Transportsysteme zu reinigen und zu beschichten. Die Bauweise ermöglicht es außerdem, Interessenten eine auf Sie zugeschnittene Anlage mit den benötigten Modulen (z. B. Reinigung, Beschichtung, Erwärmung) anzubieten.

Die prinzipielle Marktreife der Anlage konnte nachgewiesen werden. Bei den industriellen Versuchen in einem Serienprozess zeigte sich, dass es weiteren Bedarf an der Feinjustierung der Anlagenparameter gibt. Um die Anlage standardmäßig in einem Serienprozess einzusetzen benötigt es einer Abwechgenehmigung durch Kunden in der Fertigung, da sich durch die Beschichtung mit dem phosphatfreien Schmierstoff Änderungen im Umformprozess durch die neuen Beschichtungsmedien ergeben.

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	13
3.1. Zink-Phosphatierung	13
3.1.1. Niedrigtemperatur-Phosphatierung.....	15
3.1.2. Elektrolytische-Phosphatierung.....	16
3.1.3. Zwischenfazit – Zink-Phosphatierung	17
3.2. Alternative Schmiersysteme	17
3.2.1. Neuartige Konversionsschichten.....	18
3.2.2. Schmierstoffsysteme ohne Konversionsschicht.....	18
3.2.3. Zwischenfazit – Alternative Schmiersysteme	22
4. Ergebnisdarstellung.....	23
4.1. Anforderungen an eine Anlage zur Flexibilisierung der Bauteilgeometrie bei der zinkphosphatfreien Beschichtung von Bauteilen.....	23
4.1.1. Allgemeine Vorgehensweise.....	23
4.1.2. Auswahl eines Bauteils	23
4.1.3. Anforderungen an die Anlage zur Beschichtung	24
4.2. Entwicklung und Bau der Inline-Beschichtungsanlage	25
4.2.1. Vorgehen bei der Entwicklung	25
4.2.2. Untersuchung möglicher Schmierstoffe und Beschichtungsmethoden .	26
4.2.3. Entwickelte Anlage mit Verkettung der Anlagenkomponenten.....	33
4.2.4. Vorteile der Anlage im Vergleich zur Prototypenanlage.....	35
4.3. Beschichtungshaftung und tribologische Charakterisierung	36
4.3.1. Applikation der Schmierstoffschichten	36
4.3.2. Tribologische Charakterisierung	39
4.3.3. Zwischenfazit für die Verwendung im industriellen Umfeld	42

4.4. Einsatz in der industriellen Praxis am Beispiel eines Serienproduktes.....	43
5. Fazit.....	46
6. Ausblick.....	47
7. Literaturverzeichnis	49

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Energieeinsatz und Werkstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren [Dob10]	10
Abbildung 2: Prozesskette bei der Zink-Phosphatierung nach [Tam15]	13
Abbildung 3: Phosphatieranlage der Schondelmaier Presswerk GmbH	14
Abbildung 4: Querschnitt und Draufsicht auf eine poröse Beschichtung [Bay10]	18
Abbildung 5: Schematische Darstellung des MEC Homat nach [Kas00]	19
Abbildung 6: Mehrstufige Kaltschmiedevorgänge mit ILUB [Illu14]	19
Abbildung 7: Wirkprinzip MoS ₂ nach [Nbh10]	20
Abbildung 8: Schematischer Schichtaufbau von Salzschmiermittelträger nach [Ste08] und [Köh09] (links); Vergleich des prinzipiellen Schichtaufbaus (rechts)	21
Abbildung 9: a+b+c - Ringförmige Rohteile der Schondelmaier GmbH Presswerk c- gewähltes Rohteil für die Versuchsreihen	24
Abbildung 10: Anforderungen an die Beschichtungsanlage	25
Abbildung 11: Ablauf Schmierstoffaufbringung	27
Abbildung 12: Prinzipskizze Schmierstoffapplikation Sprühen	28
Abbildung 13: Schmierstoffgewichte der Beschichtungsversuche	28
Abbildung 14: Oberflächentopographie der Ringprobe	29
Abbildung 15: Vergleich der Beschichtungsergebnisse für die Polymerschmierstoffe	30
Abbildung 16: Ablauf Gleitstauchversuch	30
Abbildung 17: Gleitstauchversuche zum Einfluss der Beschichtungshomogenität (links) und Umgeformte MoS ₂ Gleitstauchprobe mit ablösender Beschichtung der Mantelfläche (rechts)	31
Abbildung 18: Gleitstauchversuche zum Einfluss der Oberflächentopographie	32
Abbildung 19: Neuer Beschichtungsstand mit Reinigungs- und Erwärmungseinheit	33
Abbildung 20: Reinigungseinheit	34
Abbildung 21: Erwärmungseinheit (oben links) mit Teilerutsche (unten links), Transportband durch das Beschichtungsmedium (Mitte) und Förderband zur Verkettung mit Umformpresse (rechts)	35
Abbildung 22: Ergebnis der Versuchsreihen zur Schichthaftung in Abhängigkeit der Temperaturen und Bandgeschwindigkeiten	37
Abbildung 23: Ergebnis der Versuchsreihen zur Schichthaftung in Abhängigkeit der Temperaturen und Bandgeschwindigkeiten	39

Abbildung 24: Erste Parametersätze der Beschichtungsanlage	40
Abbildung 25: Bauteilfehler: Verfärbung der Probe (links) und Gummianhaftungen des Transportbandes (rechts)	40
Abbildung 26: Erzielte Schmierstoffgewichte zu den variierten Anlagenparameter ..	41
Abbildung 27: Ergebnisse Gleitstauchversuch der beiden Beschichtungsvarianten.	42
Abbildung 28: integrierte Beschichtungsanlage mit Pressenzuführung im Hintergrund (links) und Reinigungs- und Erwärmungseinheit im Dauerbetrieb (rechts, oben und unten).	43
Abbildung 29: Presse und Beschichtungsstand bei SPW	44
Abbildung 30: Bodenansicht der Pressteile	45
Abbildung 31: Sicht auf Verzahnungsbereich der Pressteile; a=Serienteil ZnPh+MoS ₂ , b=7,3% MoS ₂ , c=5%MoS ₂	45
Abbildung 32: Neue Prozesskette in der Kaltmassivumformung.	47

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 Phosphatschlämmen. 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.

Bereits in einem Vorgängerprojekt wurde ein Prototyp einer inlinefähigen Beschichtungsanlage entwickelt, die die prinzipielle Eignung zur Beschichtung mit Einschichtschmierstoffen belegte. Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts wird die Prototypenanlage weiterentwickelt und die Praxistauglichkeit in einem Serienprozess beim beteiligten Anwender belegt. Eine vollständige Neukonstruktion der Anlage war erforderlich, um gleichermaßen auch die Flexibilität und Modularität der Anlage zu erhöhen. So sind mit der neu entwickelten und gebauten Anlage nun auch scheibenförmige, ungestrahlte Probekörper beschichtbar. Außerdem können die einzelnen Module zur Reinigung, Erwärmung und Beschichtung je nach Bedarf kombiniert und auch Zusatzmodule integriert werden. Trotz der Verbesserungen hinsichtlich der Flexibilität und Modularität ist die Anlage sehr kompakt gebaut und besitzt als weiteren Vorteil einen geringen Platzbedarf zur Aufstellung und Inline-Integration in Produktionsbetrieben. Der Test der Anlage beim Anwender brachte den Beleg für die Integration und Verwendung der Anlage in einem Serienprozess.

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.

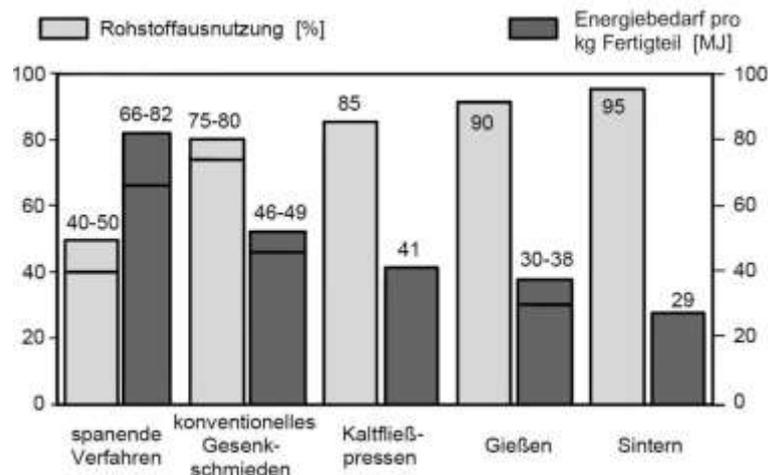


Abbildung 1: Energieeinsatz und Werkstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren [Dob10]

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/mm² und bis zu 30-fache Oberflächenvergrößerungen beinhalten können, werden oftmals komplexe Trennschicht-

Schmierstoff-Systeme eingesetzt [Gar07], [Bab04]. Dabei haben sich Zinkphosphatschichten 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.

Im Rahmen eines Vorgängerprojektes wurde Grundlagenwissen über eine neue Prozesskette in der Kaltmassivumformung erarbeitet. Durch die Entwicklung neuartiger, zinkphosphatfreier Schmierstoffe war es möglich, die Prozesskette und -zeit stark zu verkürzen. Weiterhin konnte durch die Prozessverbesserung ein ökologischer Vorteil erreicht werden, so dass bei diesem innovativen Prozess keine als Sondermüll zu entsorgenden Phosphatschlämme mehr entstehen. [DBU16]

Die Entwicklung einer Prototypenanlage zur Beschichtung von einfachen Bauteilen brachte weiterhin die Kenntnis, dass die aufgetragenen Schmierstoffschichten tribologisch in der Lage sind, die bis dahin alternativlose Zinkphosphatschicht zu substituieren und damit erfolgsversprechend für eine industrielle Anwendung sind. [DBU16]

2.2. Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist die konsequente Fortführung des Projektes mit dem Aktenzeichen 30738/01. Die zinkphosphatfreie Umformung von Abschnitten wurde erprobt und funktioniert.

Im Laufe des Vorgängerprojektes zeigte sich, dass die Praxistauglichkeit der Prototypenanlage bislang nicht erprobt war. Auch die Flexibilität der Anlage bezüglich modularisierter Anlagenbestandteile sowie die Flexibilität bei der Handhabung von unterschiedlichen Rohteilgeometrien war nicht gegeben. So war es nur möglich, zylinderförmige Geometrien zu transportieren und zu beschichten. Weiterhin konnte im Laufe des Projektes die Ineffizienz der Erwärmung des Beschichtungs- und Waschmediums festgestellt werden.

Aus diesen Erkenntnissen leitet sich die Zielsetzung für das Fortsetzungsprojekt ab. Neben der Erprobung der Praxistauglichkeit der Prototypenanlage ist die Flexibilität der Anlage zu verbessern. Ein weiteres Ziel ist die Integration der Reinigungs- und Beschichtungseinheit in die Prozesskette beim Anwender (Inline). Hierfür sind umfangreiche konstruktive Anpassungen bis hin zu einer vollständigen Neuentwicklung der Anlage vorzusehen. Ökologisch zielführend ist auch die Erweiterung der Beschichtbarkeit von ungestrahlten Rohlingen. Durch den Verzicht auf Strahlvorgänge entfällt damit auch die Entsorgung von kontaminiertem Strahlgut.

Im Vergleich zu dem vorangegangenen Projekt, siehe [DBU16], grenzt sich das beantragte Vorhaben derart ab, dass das Ziel die Steigerung der Flexibilität sowie der Beleg der Praxistauglichkeit der Beschichtungsanlage ist. Die Ausweitung auf scheibenförmige Rohteile mit einem Längen- zu Durchmesser Verhältnis von kleiner als 1 und zu

beschichtenden Innenflächen bedingt auch zwangsläufig ein neues Transportkonzept durch die Beschichtungsanlage. Durch den Verzicht auf den Strahlprozess können die angelieferten Rohteile direkt (ohne zentralen Vorprozess) der Umformung zugeführt werden. Die Umsetzung an mechanischen Mehrstufenpresse ermöglicht dann eine Prozesskette, bei der ein Behälter mit angelieferten Rohteilen dem Kippgerät der Anlage zugeführt wird, diese über Bunker und Steilförderer vereinzelt der Beschichtungsanlage zugeführt und danach in den Zuführkanal der Presse übergeben werden. Nach dem Pressen werden die umgeformten Teile automatisch einer Waschanlage zugeführt und fallen vom Restschmierstoff gereinigt in die Versandbehälter. Mit dieser angestrebten Vervollständigung der Gesamtprozesskette kann ein idealer Materialfluss sichergestellt werden.

3. Stand der Technik

Kaltmassivumformprozesse, wie zum Beispiel das Fließpressen, vereinen in der Massenproduktion wirtschaftliche und technologische Vorteile gegenüber konkurrierenden Fertigungsverfahren. Neben der hohen Produktivität und einer hohen Werkstoffausnutzung können zudem einbaufertige Oberflächen erreicht werden [Kap05]. Kaltmassivumgeformte Komponenten weisen gegenüber spanend hergestellten Bauteilen vorteilhafte mechanische Eigenschaften auf [Klo06, Kap05]. Diesen Vorteilen in der Anwendung stehen jedoch Nachteile in der Fertigung, insbesondere der große Kraftbedarf, gegenüber. Aufgrund der großen auftretenden Spannungen während der Umformung kommen zum Schutz des Werkzeuges komplexe tribologische Schmierstoffsysteme zum Einsatz. Schmierstoffsysteme werden in der Kaltmassivumformung mit dem Ziel eingesetzt, Reibung zwischen dem Werkstück und Werkzeug zu minimieren und eine Trennung der Oberflächen zu gewährleisten. Damit gehen Kraft- und Energieeinsparungen einher. Gleichermaßen werden durch reduzierte Reibung und durch das Trennen der Kontaktpartner ein frühzeitiges Verschleissen der Werkzeuge verhindert und damit die Werkzeugstandzeit erhöht. Mit der Wärmeabfuhr durch die Schmierung wird zudem eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Werkzeug erreicht, welche standzeitmindernde Temperaturwechsellasten reduziert [Bar04].

Bei Schmierstoffsystemen kann grundsätzlich zwischen Systemen mit und ohne Trägerschichten unterschieden werden. Diese Trägerschichten, auch Konversionsschichten genannt, gewährleisten auch bei großen Oberflächenvergrößerungen die Trennung von Werkzeug und Werkstück und fungieren zudem als Haftgrund und Reaktionspartner für den Schmierstoff [Köh10, Lan08]. Das von Singer [Sin34] entwickelte System einer Phosphatschicht findet in Form von Zinkphosphatierungen bei nicht und niedrig legierten Stählen eine breite Anwendung [Bay94].

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]. 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 Phosphatschicht erfolgt nach einer komplexen Bäderfolge, die in Abbildung 2 dargestellt ist.

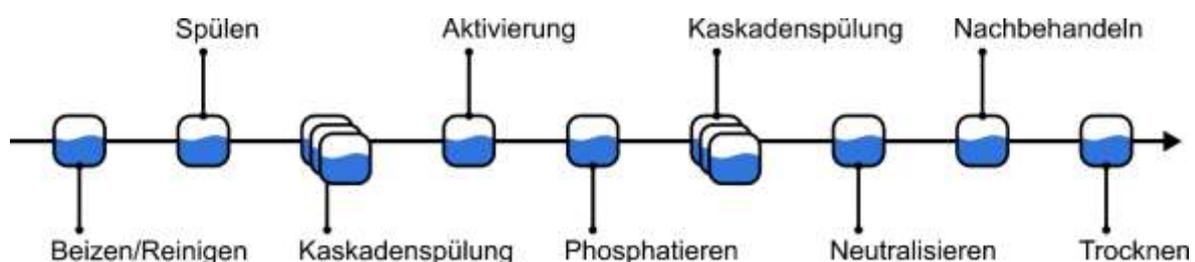


Abbildung 2: Prozesskette bei der Zink-Phosphatierung nach [Tam15]



Abbildung 3: Phosphatieranlage der Schondelmaier GmbH Presswerk

Abbildung 3 zeigt die vorliegende Phosphatieranlage der Firma Schondelmaier GmbH. Darin sind gut die verschiedenen notwendigen Bäder und die dabei entstehenden Dämpfe zu erkennen. Zur Ausbildung einer homogenen Phosphatschicht müssen die Oberflächen der Halbzeuge von Fremdpartikeln, wie Fett, Rost und Zunder, gereinigt werden. Dazu werden die Rohlinge in 80 – 95 °C warmen, stark alkalischen oder organischen Reinigern für 5 bis 10 min entfettet und von Schmutzpartikeln befreit. Vor dem Beizen durchlaufen die Halbzeuge eine Kaskadenspülung, um eine Verschleppung der alkalischen Badbestandteile in das saure Beizmedium zu verhindern. Das Entfernen von verwachsenen Oxidschichten erfolgt mittels eines angeschlossenen Beizprozesses. Dieser erfolgt in Bädern mit wässrigen Lösungen von anorganischen Säuren für 10 – 18 min bei 50 – 65 °C. Als Säuren kommen überwiegend Schwefelsäure, Salzsäure und Phosphorsäure zum Einsatz [Bay95, Nit10, Rau88]. Nach dem Beizen erfolgt eine weitere Kaskadenspülung, um die Säurereste von den Halbzeugen zu entfernen. Bei der anschließenden Aktivierung werden die Rohlinge in einer niedrig konzentrierten Dispersion aus Titanphosphaten getaucht, was ein Aufwachsen einer feinkristallinen Zinkphosphatschicht begünstigt [Nit10, Nit11]. Der eigentliche Phosphatiervorgang ist das Ergebnis von drei ablaufenden chemischen Reaktionen. Zuerst wird bei dem Beizvorgang durch die Reaktion von Eisen und Phosphorsäure freies Eisen in Eisenphosphat, unter der Bildung von Wasserstoff, umgewandelt. Dies bewirkt eine Verschiebung der Säurekonzentration an der Grenzfläche, was zur Auslösung der eigentlichen Reaktion zur Schichtbildung führt. Das in dem Phosphatierbad gelöste primäre Zinkphosphat wird an der Grenzfläche von Lösung und Metall als schwerlösliches tertiäres Zinkphosphat unter Bildung von Phosphorsäure abgeschieden. Bei der dritten Reaktion wird primäres Eisenphosphat, welches während der Beizreaktion entstanden ist, mit im Bad vorhandenen Oxidationsmittel in tertiäres Eisenphosphat umgewandelt. Diese nur schwer lösliche Verbindung setzt sich als Phosphatschlamm ab [Nit09b]. In Abhängigkeit der Badzusammensetzung und der eingesetzten Oxidationsmittel bilden sich an der Stahloberfläche drei verschiedene Kristallstrukturen: Hopeit, Phosphoyllit und Scholzit. Dabei treten die Kristallstrukturen meist

in unterschiedlichen prozentualen Verhältnissen nebeneinander auf. Der bei der Beizreaktion gebildete Wasserstoff wirkt verlangsamernd auf die Schichtbildung der Phosphatierung. Um dies zu verhindern werden Oxidationsmittel in die Bäder gegeben, die unter Verbrauch des Wasserstoffs reduzieren und dadurch die Bildung der Phosphatschicht beschleunigen. Um die in der Kaltmassivumformung erwünschten, hohen Schichtgewichte von über 12 g/m² zu erreichen werden Nitrat beschleunigte Verfahren angewandt. Die dabei aufgebrauchten Schichtgewichte der Phosphatierung reichen dabei von 5 – 15 g/m² bei der Drahtbearbeitung und 20 – 40 g/m² beim Kaltfließpressen [Bar04, Nit09b]. Nach einer anschließenden Neutralisation werden die Schmierstoffe aufgetragen. Dabei haben sich Schmierstoffe auf Seifenbasis etabliert. Die phosphatierten Rohlinge werden dazu mit einer alkalischen Seifenlösung behandelt. Bei dem Tauchvorgang kommt es an der Halbzeugoberfläche zur Reaktion. Dabei wird Natriumstearat unter Bildung von tertiärem Natriumphosphat mit tertiärem Zinkphosphat zu Zinkstearat umwandelt. Das Zinkstearat wirkt in dem entstandenen Tribosystem maßgeblich schmierend [Bay94].

Schmierstoffsysteme auf Basis von Zinkphosphatschichten sind jedoch mit einer Vielzahl von ökologischen und ökonomischen Nachteilen behaftet. Die in den Tauchbädern bei der Phosphatierung anfallenden Schlämme können unter anderem Hydroxide von Kupfer, Zink, Nickel, Eisen, Aluminium Chrom und Calcium enthalten. Die mit Zink als Schwermetall belasteten Schlämme sind als Sondermüll mit dem Abfallschlüssel 1101108 als Phosphatschlamm beschrieben und müssen auf entsprechenden Depo-nien endgelagert werden. Ein Recycling des Schlammes ist aufgrund der zu geringen Mengen an Eisen und Zink nicht wirtschaftlich. Auch werden für die Bäder großen Mengen an Frischwasser benötigt, dazu fallen entsprechende Mengen an Abwasser an, die zudem mit den Badkomponenten kontaminiert sind. Dadurch müssen die Abwässer mittels einer Neutralisation und Entgiftung aufbereitet werden [Rau88]. Phosphatierungsanlagen sind in der Anschaffung teuer und benötigen durch die Vielzahl von Bädern eine große Stellfläche, die dadurch nicht für fertige Aggregate zur Verfügung steht [Bay10a, Bay10b, Hof09]. Daneben ist die Phosphatierung durch die ständige Erwärmung der Bäder und den Verdampfungsanteil mit hohen energetischen Verlusten behaftet. 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 μm auf 50 μm 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-SiO₂ in den Zink-Phosphatierbädern präsentiert. Sie erreichten eine Beschichtung mit einem Gewicht von 10 - 12 g/m² 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 Phosphatierungsbades erforderlich ist. Bei der Wahl der Schmiermittel muss nicht

zwischen einer herkömmlichen Zinkphosphatschicht und einer elektrolytisch aufgebracht 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 Schmierensystemen. 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 Schmierensysteme

Es existieren verschiedene Konzepte für alternative Schmierensysteme. 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 Schmiermitteln 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 4 zu sehen.

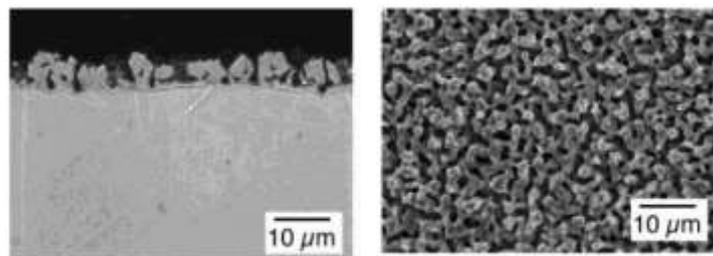


Abbildung 4: Querschnitt und Draufsicht auf eine poröse Beschichtung [Bay10]

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 Antriebsritzelwellen 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 5 gezeigt, einen Film aus Eisensulfid, der eine gute Schmierwirkung besitzt [Gar07].

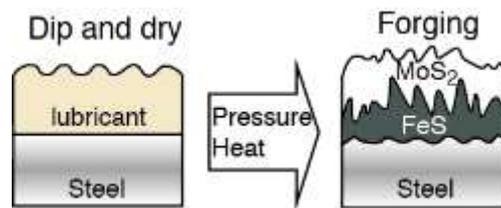


Abbildung 5: Schematische Darstellung des MEC Homat nach [Kas00]

Allerdings werden in Japan häufig die Umformprozesse auf die noch ertragbaren Lasten für das verwendete Schmiersystem ausgelegt. Abbildung 6 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 6: Mehrstufige Kaltschmiedevorgänge mit ILUB [Ilu14]

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 (MoS_2)
- Polymerbeschichtungen
- Salzschiemstoffträger mit integrierter Schmierung

Molybdändisulfid

Die Gleitwirkung des Festschmierstoffes Molybdändisulfid, nach der chemischen Summenformel auch MoS_2 genannt, basiert auf dem molekularen Aufbau mit einer hexagonalen Gitterstruktur. Die MoS_2 -Atome bilden Gleitebenen, die über Schwefelbrücken verbunden sind. Die Gleitebenen liegen parallel zur Oberfläche des beschichteten Körpers und lassen sich unter hohem Druck gegeneinander verschieben, siehe Abbildung 7 [Nit10].

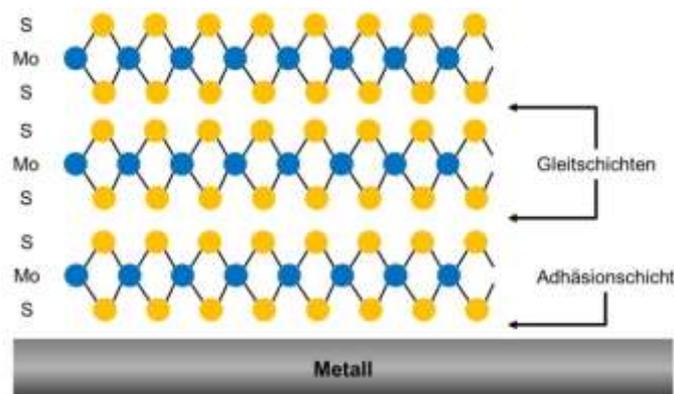


Abbildung 7: Wirkprinzip MoS₂ nach [Nbh10]

Mit MoS₂ 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 MoS₂ als Substitutionsschmierstoff umgeformten Teile zu einem Anstieg der Umformkraft und der Auswerferkraft um bis zu 10 %, was wiederum mit niedrigeren Werkzeugstandzeiten einhergeht [Kle09].

Die Schichtaufbringung erfolgt in Form von Pulvern oder in einer Suspension. Die dabei erzielten Schichtgewichte liegen zwischen 4 und 6 g/m² und ist bis zu Temperaturen von 350-400 °C beständig [Her08]. Ab diesen Temperaturen oxidiert es mit Sauerstoff und bildet das Oxidationsprodukt MoS₃, das die Beweglichkeit der Gleitebenen herabsetzt und dadurch die Schmierwirkung reduziert [Bar04]. Reine MoS₂ Auflageschichten versagen bei Scherbelastung weniger durch Ausdünnen, sondern mehr durch Blasenbildung und Aufplatzen, welche durch Oxidationsvorgänge stark beschleunigt werden. Daher werden auch aus Kostengründen MoS₂-Mischungen mit Graphitanteilen verwendet, welche aufgebrochene MoS₂-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 MoS₂haltigen 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 MoS₂ zu einer Reduzierung der Um-

formkraft und somit zu einer Erhöhung der Werkzeugstandzeiten. Polymere Schmierstoffschichten sind ähnlich temperaturbeständig wie seifenbasierende Schmierstoffschichten. Die niedrigen Schichtgewichte von 2 - 3 g/m² 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 Polymerschmierstoffe und MoS₂-Dispersionen oftmals in Kombination mit Zinkphosphatschichten 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 Verjüngversuchen 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 Schmierung und stellt den Schichtaufbau konventioneller Trennschicht-Schmierstoffschichtsysteme gegenüber.

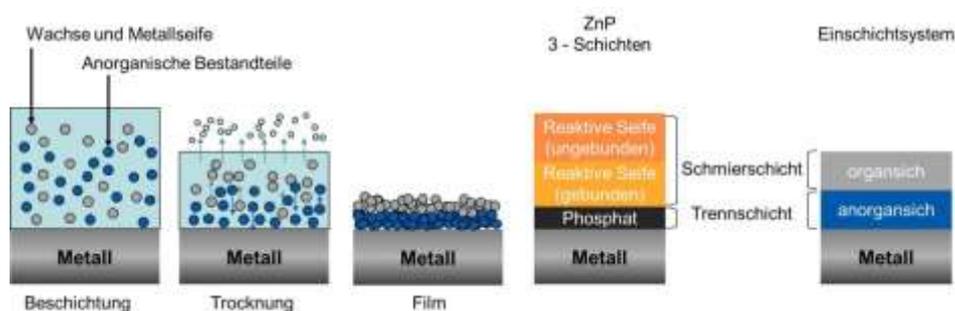


Abbildung 8: Schematischer Schichtaufbau von Salzschmiermittelträger nach [Ste08] und [Köh09] (links); Vergleich des prinzipiellen Schichtaufbaus (rechts)

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. Anforderungen an eine Anlage zur Flexibilisierung der Bauteilgeometrie bei der zinkphosphatfreien Beschichtung von Bauteilen

4.1.1. Allgemeine Vorgehensweise

Um die Ziele im Projekt zu erreichen, mussten zunächst die Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage abgeleitet werden. Unter der Prämisse der Praxistauglichkeit sowie der Flexibilität in der industriellen Anwendung war zunächst ein geeignetes Bauteil für die späteren Versuche im industriellen Umfeld auszuwählen (Siehe Kapitel 4.1.2).

Basierend auf dieser Auswahl ergaben sich anschließend die Anforderungen an die Transport-, Reinigungs- und Beschichtungseinheit einer industrietauglichen Anlage (Kapitel 4.1.3). In Kapitel 4.2 ist das Ergebnis und die Vorgehensweise bei der Anlagenentwicklung dargestellt. Ausgehend von einem Überblick über die Vorgehensweise bei der Entwicklung (Kapitel 4.2.1) ist die wissenschaftlich systematische Vorgehensweise bei der Auswahl der Schmierstoffe und einer geeigneten Beschichtungsmethode (Kapitel 4.2.2) sowie im Anschluss die entwickelte Anlage mit Ihren verketteten Modulen (Kapitel 4.2.3) dargestellt. Aus diesem Entwicklungsprozess können dann die Vorteile der neuen Anlage gegenüber der Prototypenanlage aus dem Vorgängerprojekt beschrieben werden (Kapitel 4.2.4). Kapitel 4.3 beschreibt anschließend die systematisch durchgeführten Untersuchungen mit der fertigen Anlage zur Applikation der Schmierstoffschichten bei der Firma LS-Mechanik (Kapitel 4.3.1) sowie die tribologische Charakterisierung der beschichteten Proben durch das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU), siehe Kapitel 4.3.2. Nach diesen Untersuchungen kann ein Zwischenfazit für die Verwendung der Anlage im industriellen Umfeld gezogen (Kapitel 4.3.3) sowie der Einsatz der Anlage mit Verkettung der Anlagenmodule mit einer Umformpresse bei einem Serienprozess beschrieben werden (Kapitel 4.4).

4.1.2. Auswahl eines Bauteils

Während beim Vorgängerprojekt ein prototypischer Beschichtungsstand für massive Stababschnitte entwickelt und erprobt wurde, soll beim aktuellen Projekt die Beschichtung von ringförmigen Halbzeugen ermöglicht werden. Deshalb muss auch die Benetzung der Innenflächen möglich sein. Ringförmige Bauteile sind in der Kaltmassivumformung eine weitverbreitete Ausgangs- oder Zwischenform zur Herstellung diverser Hohlteile. Diese können wiederum vom massiven Abschnitt oder vom Blech geformt sein. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine aus Stahlblech gestanzte Ronde zur Auslegung des Beschichtungsstandes und Durchführung der Versuchsreihen gewählt, die zur Fertigung eines verzahnten Bauteils in großen Stückzahlen gefertigt wird. Die aktuelle Prozessführung erfordert auch hier ein konventionelles Schmierstoffbeschichten in automatisierten Trommelanlagen auf Basis von ZnPh + MoS₂.



**Abbildung 9: a+b+c - Ringförmige Rohteile der Schondelmaier GmbH Presswerk
c- gewähltes Rohteil für die Versuchsreihen**

4.1.3. Anforderungen an die Anlage zur Beschichtung

Bei den Anforderungen an die Anlage sind prozessspezifische und anlagenspezifische Anforderungen zu unterscheiden. Bei den prozessspezifischen Anforderungen handelt es sich um die Geometrie der Rohlinge sowie die Taktzeiten, die von der Umformpresse und der Prozessführung vorgegeben sind. Die anlagenspezifischen Anforderungen sind aufgeteilt nach den Modulen Reinigungs-, Erwärmungs- und Beschichtungseinheit sowie deren Verkettung untereinander. Auch die Verkettung mit dem Umformaggregat für die Versuche bei der Anwendung in einem Serienprozess ist wichtig bei der Entwicklung der Anlage.

In der Anforderungsdefinition sind auch die Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt sowie die Ergebnisse mehrerer Besprechungen mit den Projektpartnern integriert. Die im Projektkonsortium abgestimmten Anforderungen zeigt Abbildung 10.

Anforderungen Beschichtungsstand	
prozessspezifische Anforderungen	
Abmessungen Rohling	ca. $\varnothing 70 \times \varnothing 35 \times 7$ mm
Zustand des Rohlings	feingestanzte mit Ölrückständen
Taktzeiten	bis zu 40 Teile/min
Schmierstoff	MoS ₂ -Basis, Salz-Wachs/Polymer
anlagenspezifische Anforderungen allgemein	
Bauraum	max. 8x2x2 m
Bauweise	modular und flexibel bei der Umrüstung auf unterschiedliche Geometrien
Reinigungsmodul	
Rohlingszuführung	Schüttgut separiert zuführen
Transportband	wärmebeständig mit kontinuierlichem Transport
Reinigung allgemein	Entfernung der Ölrückstände
Reiniger	alkalisch
Vorratsbehälter Reinigung	Ölabscheider, Partikelabscheidung, leichtes Austauschen des Reinigungsmediums
Temperatur Reiniger	70 °C
Aufbringung Reiniger	sprühen, tauchen oder fluten
Trocknung	abstreifen und in Erwärmungseinheit
Erwärmungseinheit	
Verkettung Reinigung - Erwärmung	Übergabe Förderband, getrennte Fördermöglichkeit zur Einstellungen verschiedener Geschwindigkeiten
Teilerwärmung	induktiv bis zu 150 °C
Taktzeiten	30-40 Teile/min
Teiletransport	Förderband
Beschichtungseinheit:	
Beschichtungsart	Tauchen, überfluten oder sprühen
Transport durch Beschichtungseinheit	kontinuierlich mit geringer Anhaftung von Beschichtungsmedium
Verkettung Erwärmung - Beschichtung	je nach Beschichtungsart über Rutsche oder Zwischenförderband
Temperatur Beschichtungsmedium	Raumtemperatur, aufheizen durch erwärmte Bauteile
Schmierstoffbehälter	einfaches Wechseln des Beschichtungsmediums/-konzentration
Schmierstoffsicht	gleichmäßige Benetzung, 6,5-8g/m ²
Schmierstoff	MoS ₂ -Basis, Salz-Wachs/Polymer
Verkettung mit Umformaggregat:	
Teilezuführung	vorhandener Steilförderer, vereinzelt und lagerichtig
Teileauslauf	vereinzelt, Lage liegend oder stehend, trocken in die Presse
Förderband	kontinuierliche Förderung in das Umformaggregat, Vermeidung von Schmierstoffablagerungen auf dem Transportband

Abbildung 10: Anforderungen an die Beschichtungsanlage

4.2. Entwicklung und Bau der Inline-Beschichtungsanlage

4.2.1. Vorgehen bei der Entwicklung

Startpunkt bei der Entwicklung stellte die Prototypenanlage aus dem Vorgängerprojekt dar. Hier wurden zunächst die umgesetzten Transportsysteme, die Reinigungs- und Beschichtungseinheit sowie eine damals provisorisch angebrachte Erwärmungseinheit analysiert und hinsichtlich der Flexibilität bewertet. Das Resultat dieser Analyse war, dass die Prototypenanlage nicht flexibel verwendbar und modularisiert aufgebaut

sein muss, um schnelle und einfache Umrüstungen für weitere Teilegeometrien vornehmen zu können. Eine vollständig neu konzipierte Anlage musste also in dem Projekt realisiert werden.

Bei der Konstruktion und dem Bau der Anlage stellen die im vorherigen Kapitel formulierten Anforderungen die Grundlage dar. Für jede Anlagenkomponente wurde zunächst mit einer morphologischen Analyse verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten für die einzelnen Module erarbeitet, bewertet und anschließend in der Konstruktion umgesetzt. Dies betrifft alle Förder- und Transportsysteme sowie die Reinigungs-, Erwärmungs- und Beschichtungseinheit. Um einen geeigneten Schmierstoff sowie eine Beschichtungsmethode auszuwählen mussten die im folgenden Kapitel dargestellten wissenschaftlichen Untersuchungen angestellt werden.

4.2.2. Untersuchung möglicher Schmierstoffe und Beschichtungsmethoden

Durch die im Vergleich zum vorangegangenen Projekt geänderte Rohteilgeometrie sowie Oberflächentopographie muss eine erneute Charakterisierung des zu verwendenden Schmierstoffes und der Beschichtungsmethode vorgenommen werden.

Bei den Beschichtungsmethoden stehen drei Arten zur Verfügung:

- Überfluten
- Tauchen
- Besprühen

Im Vorgängerprojekt kam für die massiven Abschnitte in der Beschichtungsanlage das Überfluten zum Einsatz. Dabei wird mit dem Schmierstoff ein Schmierstoffvorhang gebildet, durch den die zu beschichtenden Rohlinge hindurchgeführt werden. Das Tauchen wird in der Kaltmassivumformung in der Regel bei der batchweisen Beschichtung der Rohteile eingesetzt. Dabei werden die Bauteile über einen längeren Zeitraum in rotierenden Trommeln in ein beheiztes Schmierstoffbad getaucht. Die Werkzeugbeschichtung mittels Sprühen, welche in der Regel bei der direkten Schmierung des Werkzeuges eingesetzt wird, gehört zum Stand der Technik im Schmiedebereich.

Die untersuchten Schmierstoffe sind gemäß Stand der Technik aktuelle Vertreter der Einschichtschmierstoffe:

- Molybdändisulfid (MoS_2)
- Polymer
- Salzschniermittelträgerschicht mit integrierter Schmierung (Salz-Wachs)

Von den drei Schmierstoffherstellern Bechem, Chemetall und ZWEZ wurden Schmierstoffe der drei oben genannten Schmierstofftypen zur Verfügung gestellt.

Für die Untersuchungen kommen anonymisiert folgende Schmierstoffe zum Einsatz:

- Salz-Wachs
- MoS_2_1

- MoS₂_2
- MoS₂_3
- Polymer_1
- Polymer_2
- Polymer_3

Zur Untersuchung der Schmierstoffapplikation wird der in Abbildung 11 gezeigte Ablauf verwendet.



Abbildung 11: Ablauf Schmierstoffaufbringung

Zu Beginn erfolgt die Reinigung der mit Öl benetzten Proben mit Aceton, um einen gleichmäßigen Oberflächenzustand für alle Beschichtungen zu erhalten. Im Anschluss werden zur späteren Bestimmung des Schmierstoffschichtgewichtes die Proben im unbeschichteten Zustand gewogen. Hierfür wird eine Feinwaage mit einer Auflösung von 1 mg verwendet. Im vorangegangenen Projekt wurde eine zur Beschichtung optimale Probentemperatur von 130 °C ermittelt. Diese wird bei den Beschichtungsversuchen verwendet, da sie einerseits eine möglichst kurze Trocknungsdauer ermöglicht und andererseits das Auftreten des Leidenfrost-Effekts verhindert. Nach der Erwärmung der Proben in einem Ofen erfolgt die Schmierstoffapplikation mit jeweils einer der drei Beschichtungsmethoden. Hierbei sind alle Schmierstoffe mit Wasser im Massen-Mischungsverhältnis 1:1 verdünnt. Die Beschichtung der Proben erfolgt manuell von Hand. Bei der Schmierstoffapplikation Tauchen wird die erwärmte Probe für eine Sekunde in den Schmierstoff getaucht. Für das Überfluten werden 300 ml Schmierstoff mit einem Becherglas über die Proben gegossen. Der Versuchsaufbau zum Besprühen der Proben ist in Abbildung 12 dargestellt. Der Sprühkopf wird per Hand in einer Bahnkurve an der Ringprobe vorbeigeführt, welche an einem drehenden Probenhalter befestigt ist. Für eine deckende Beschichtung wird die Probe 30 Sekunden mit 1 bar Sprühdruk beschichtet.

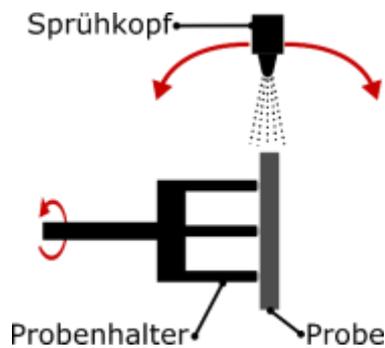


Abbildung 12: Prinzipskizze Schmierstoffapplikation Sprühen

Nach dem Beschichten trocknen die Proben bei Raumtemperatur, um im Anschluss erneut auf der Feinwaage gewogen zu werden.

Zur Bewertung der Beschichtungsmethoden wird neben der Beschichtungsgüte auch das Schmierstoffgewicht einbezogen. Abbildung 13 zeigt die in den Beschichtungsversuchen erzielten Schmierstoffschichtgewichte, gemittelt über jeweils fünf Ringproben.

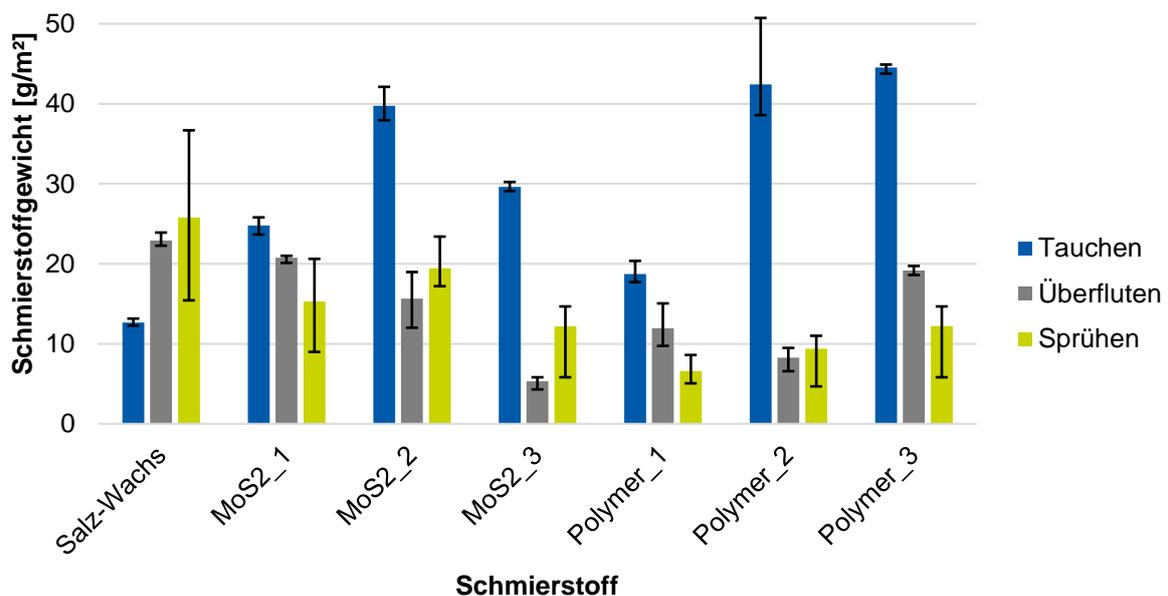


Abbildung 13: Schmierstoffgewichte der Beschichtungsversuche

Bei der Betrachtung der Schichtgewichte zeigt sich eine starke Schwankung zwischen den einzelnen Schmierstoffen und der Beschichtungsmethode. Die Schichtgewichte schwanken zwischen 5 und 45 g/m². Das Tauchen erzeugt im Vergleich zum Überfluten und Sprühen bei den MoS₂- und Polymer-Schmierstoffen jeweils die höchsten

Schichtgewichte. Die Streuung beim Besprühen ist im Mittel mit $9,5 \text{ g/m}^2$ mehr als doppelt so hoch wie beim Tauchen ($3,5 \text{ g/m}^2$) und Besprühen ($2,9 \text{ g/m}^2$). Dies ist auf das manuelle Führen des Sprühkopfes zurückzuführen.

Durch den Wegfall der Vorbehandlung gibt es zwei Oberflächentopographien auf der Ringprobe, die bei der Betrachtung der Beschichtungsgüte zu beachten sind (siehe Abbildung 14). Die Stirnseite der Ringproben ist eine gewalzte Oberfläche mit einer Rauigkeit von $R_z 8,04 \mu\text{m}$. Die Oberflächenstruktur der Mantelflächen entsteht beim Schneiden der Rohlinge und ist mit einer Rauigkeit von $R_z 4,78 \mu\text{m}$ geringer und zudem in Richtung der Höhe orientiert.

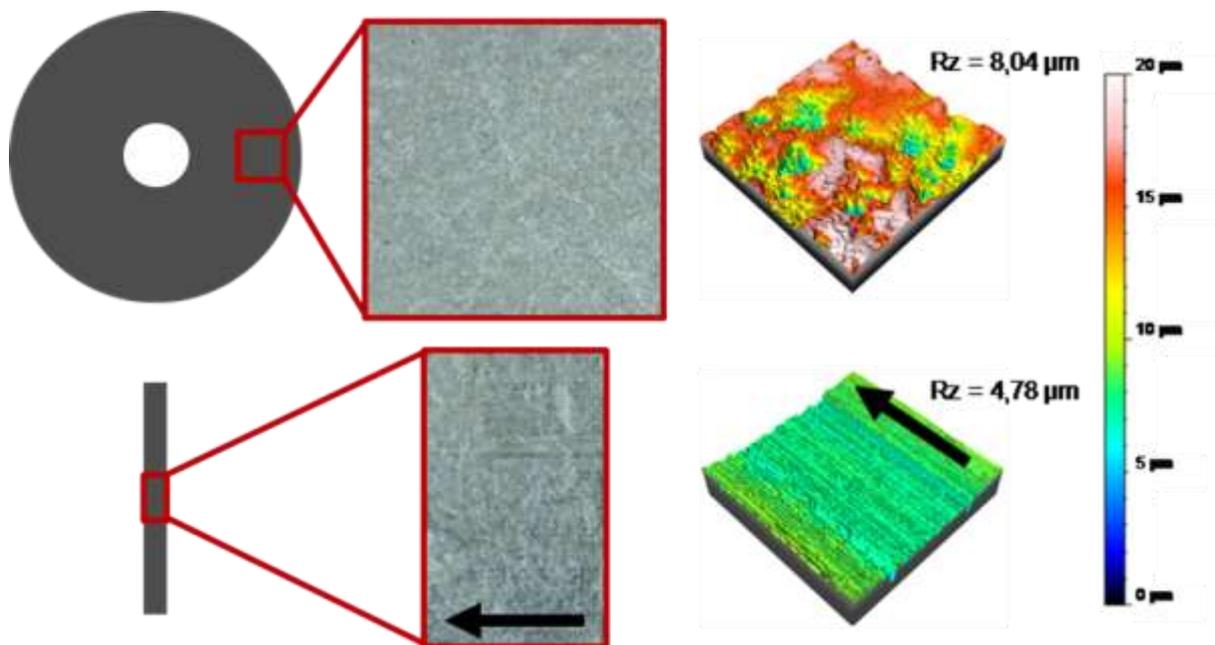


Abbildung 14: Oberflächentopographie der Ringprobe

Zur Bewertung der optischen Beschichtungsgüte werden beide Oberflächentopographien betrachtet. In Abbildung 15 sind beispielhaft die Ergebnisse der Polymer-schmierstoffe abgebildet. Für die Einschichtschmierstoffe auf MoS_2 - und Salz-Wachs-Basis gelten die gleichen Erscheinungen. Die beiden Oberflächentopographien (gewalzte und geschnittene Oberfläche) der Probe zeigen keinen optisch erkennbaren Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Das Sprühen erzeugt im Vergleich zum Tauchen und Überfluten die homogenere Beschichtung.

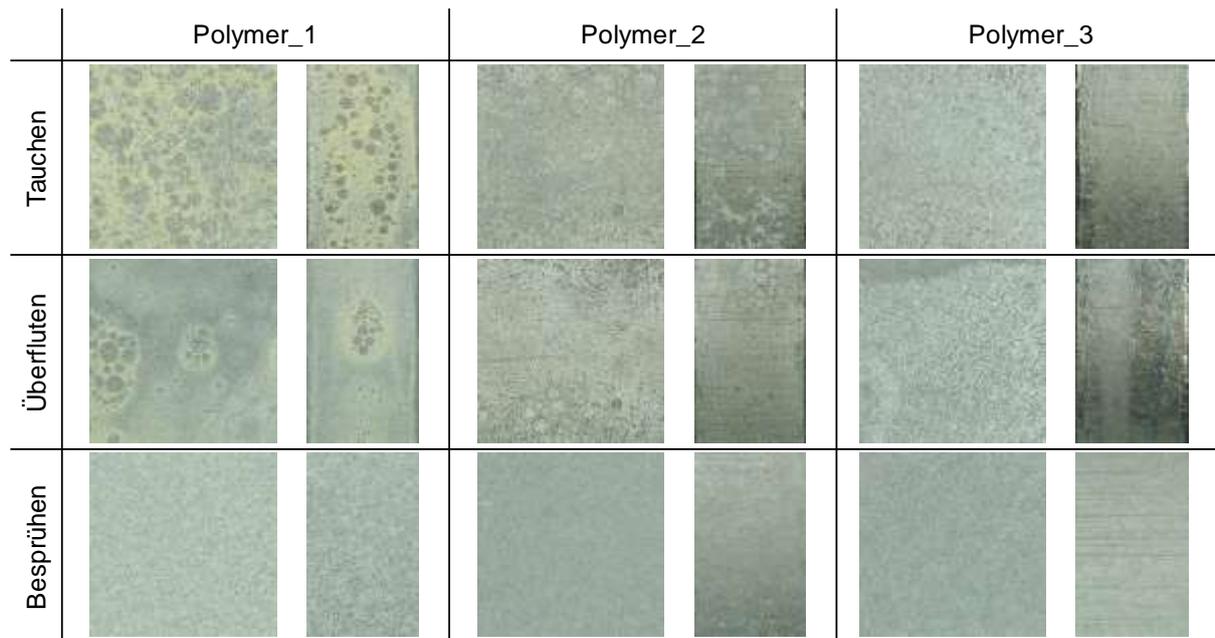


Abbildung 15: Vergleich der Beschichtungsergebnisse für die Polymerschmierstoffe

Aufgrund der optischen Unterschiede in der Homogenität der Beschichtung werden Tribometeruntersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Homogenität der Schmierstoffschicht und der Oberflächentopographie auf den Reibkoeffizienten und somit auf die Leistungsfähigkeit der Schmierstoffe durchgeführt.

Als Tribometer kommt der Gleitstauchversuch zum Einsatz. Dieser gehört bei der Bestimmung von Reibungskoeffizienten zu den direkten Messverfahren und kann durch hohe Kontaktnormalspannungen, Oberflächenvergrößerungen und Umformgrade die meisten Kaltmassivverfahren abbilden [GRO19]. Der Gleitstauchversuch ist in einen Stauch- und einen Gleitvorgang unterteilt. Abbildung 16 zeigt den Versuchsablauf schematisch.

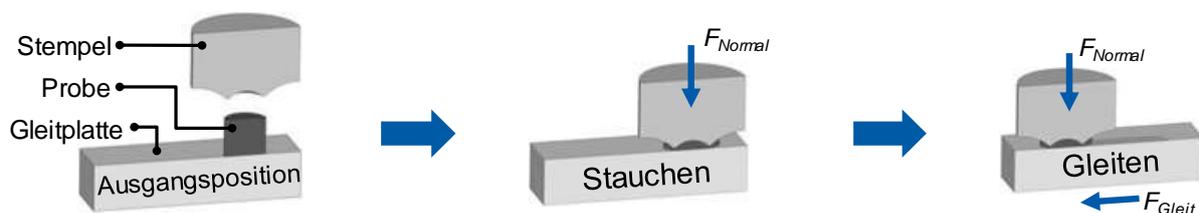


Abbildung 16: Ablauf Gleitstauchversuch

Die Probe wird mit Hilfe einer Zentriereinheit unter dem Stempel positioniert. Darauf erfolgt der Stauchvorgang. Der Stempel verfährt nach unten und staucht die Probe, bis eine bestimmte Kontaktnormalspannung oder ein definierter Stauchweg erreicht ist. Danach beginnt der Gleitvorgang, währenddessen die Normalkraft auf die Probe konstant gehalten wird. Beim Verfahren der Gleitplatte wird neben dem Gleitweg auch

die Reibkraft aufgezeichnet. Zusammen mit der Normalkraft kann nach dem Coulombschen Reibgesetz der Reibungskoeffizient über den Gleitweg bestimmt werden. Bei den Versuchen kommen die in Tabelle 1 aufgeführten Parameter zum Einsatz.

Tabelle 1: Versuchparameter Gleitstauchversuch

Stauchkraft	400 kN
Stauchgeschwindigkeit	1 mm/s
Gleitweg	47 mm
Gleitgeschwindigkeit	10 mm/s
Werkzeugtemperatur	100 °C

Für die Tribometeruntersuchungen wird der aus der Mitte der Ringprobe herausgeschnittene Butzen verwendet, wodurch das Material und die Oberflächentopographie mit den Ringproben übereinstimmt. Untersucht wird jeweils ein Vertreter der einschichtschmierstoffarten sowie die Beschichtungsverfahren Überfluten und Sprühen, um je eine homogene und eine inhomogene Beschichtung zu erhalten. Zusätzlich wird eine Probe mit dem aktuell in der Industrie verwendeten Schmierstoffsystem aus Zinkphosphatschicht und MoS₂ untersucht.

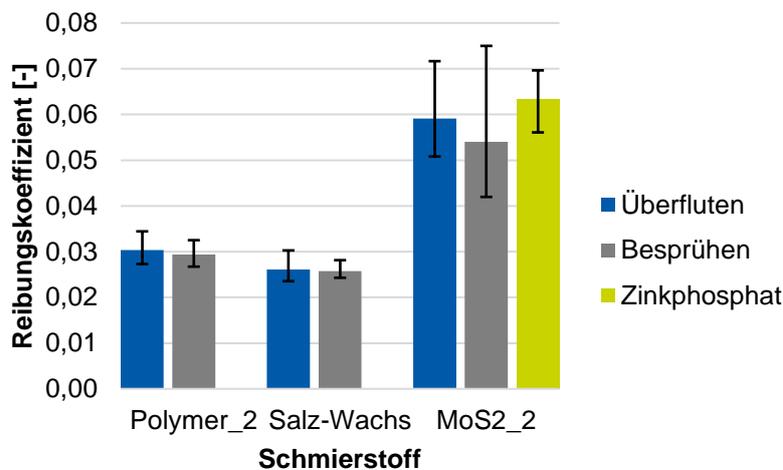


Abbildung 17: Gleitstauchversuche zum Einfluss der Beschichtungshomogenität (links) und Umgeformte MoS₂ Gleitstauchprobe mit ablösender Beschichtung der Mantelfläche (rechts)

Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 17 (links) als durchschnittlicher Reibkoeffizient über den Gleitweg dargestellt. Polymer und Salz-Wachs zeigen keine Abhängigkeit des Reibkoeffizienten von der Beschichtungshomogenität. Der Reibwert des MoS₂-Schmierstoffes sinkt durch das Besprühen im Mittel um 9 % im Vergleich zum Überfluten, die Streuung des Reibwertes steigt jedoch um 57 %. Zusätzlich zeigt sich nach der Umformung bei den durch Sprühen beschichteten MoS₂ Proben ein Ablösen der Schicht an der Mantelfläche (siehe Abbildung 17 rechts). Dies deutet auf

eine schlechte Haftung der Schmierstoffschicht hin, was durch das schichtweise Aufbringen der Beschichtung entsteht. Das Schmierstoffsystem mit Zinkphosphat + MoS₂ besitzt mit $\mu = 0,063$ einen höheren Reibwert, die Streuung ist mit einer Breite von $\Delta\mu = 0,014$ am geringsten.

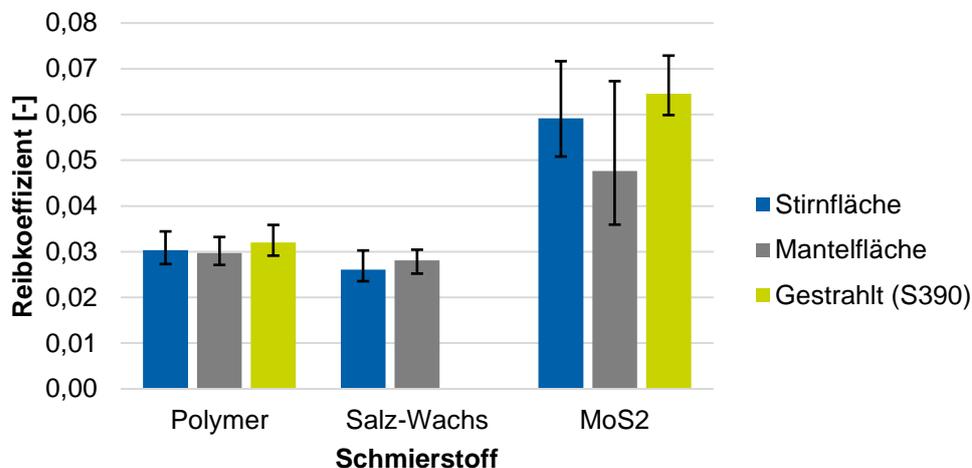


Abbildung 18: Gleitstauchversuche zum Einfluss der Oberflächentopographie

Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächentopographie werden ebenfalls die Probenbutzen verwendet. Die Nachstellung der Oberflächenbeschaffenheit der Ringproben-Mantelflächen erfolgt durch ein Schleifen der Butzen. Zusätzlich wird die Oberflächentopographie von gestrahlten Proben untersucht, wie sie häufig in der Industrie zum Einsatz kommen. Als Beschichtungsmethode wird das Überfluten verwendet. Die Ergebnisse der Gleitstauchversuche sind in Abbildung 18 als durchschnittlicher Reibkoeffizient über den Gleitweg dargestellt. Hier zeigt sich, dass wie beim Einfluss der Schmierstoffhomogenität die beiden Schmierstoffe Polymer und Salz-Wachs nur eine geringe Abhängigkeit zeigen, die innerhalb der Streubreite liegt. Für den MoS₂-Schmierstoff steigt der Reibwert der gewalzten Stirnfläche um 23 %, zudem ist die Streuung im Vergleich zur geschliffenen Fläche um 48 % niedriger. Durch die Hohe Streuung ist eine Abhängigkeit der Oberflächentopographie für den MoS₂-Schmierstoff nicht eindeutig darstellbar.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind anschließend in einem Projekttreffen diskutiert worden und das Projektkonsortium einigte sich auf die Aufbringungsmethode Tauchen und den Schmierstoff MoS₂. Das Tauchen war aus Sicht der LS-Mechanik GmbH die erfolgversprechendere Beschichtungsmethode hinsichtlich einer flexibel umrüstbaren Anlage und der Schmierstoff MoS₂ ist der Schmierstoff, der bereits bei der Schondelmaier GmbH Presswerk zum Einsatz kommt und bislang in der Praxis zufriedenstellend eingesetzt wird. Zudem zeigte das Tauchen an den Versuchen ausreichende Schichtdicken bei tolerierbaren Streuungen.

4.2.3. Entwickelte Anlage mit Verkettung der Anlagenkomponenten

In Abbildung 19 ist die neue Beschichtungsanlage dargestellt. Die Anlage ist mit den Abmaßen 2,70 m x 1,70 m x 0,70 m sehr kompakt ausgeführt und ermöglicht eine platzsparende Aufstellung. Bei den durchgeführten Dauerversuchen, sowohl bei der LS-Mechanik GmbH als auch bei dem Serienprozess bei Schondelmaier, stellte sich heraus, dass die zwei verwendeten Induktionsanlagen durch einen ausreichend dimensionierten Wasserkreislauf für den Dauerbetrieb gekühlt werden müssen. Aufgrund der fortgeschrittenen Projektzeit und um das Projektziel nicht zu verfehlen, wurde sich im Konsortium darauf verständigt, dass hierfür zunächst Kühlwassertanks und Pumpen zur Kühlung verwendet werden, wobei diese im Serieneinsatz durch Anschluss an den Kühlwasserkreislauf ersetzt werden könnten. Die Nutzung der dabei entstehenden Wärme kann im Sinne einer ökologisch betriebenen Anlage zukünftig noch für die Erwärmung des Reinigungsmediums genutzt werden.

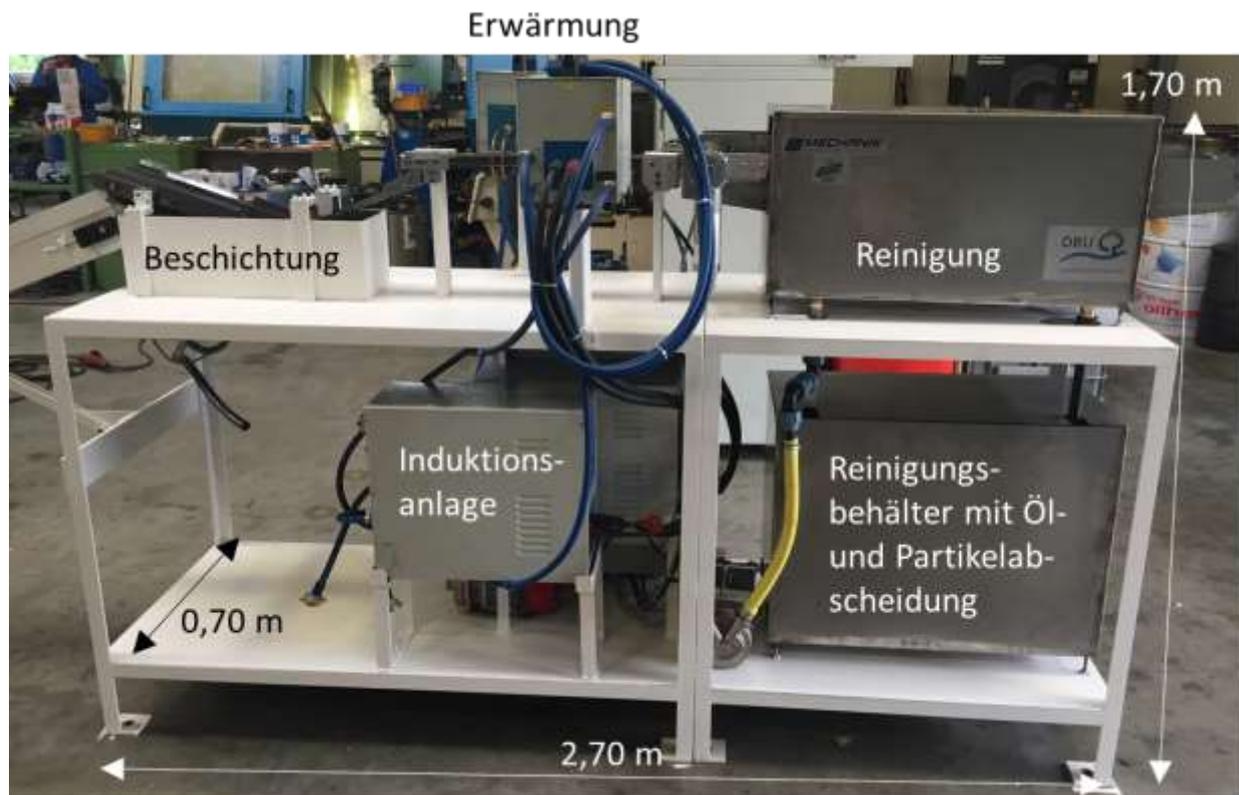


Abbildung 19: Neuer Beschichtungsstand mit Reinigungs- und Erwärmungseinheit.

Die entwickelte Reinigungseinheit zeigt Abbildung 20. Der Transport der Bauteile erfolgt mittels parallel angeordneter Schnurbänder aus Kunststoff, deren Oberfläche für den sicheren Teiletransport aufgeraut wurde. In Tests während der Entwicklungsphase lieferte dieses Transportsystem das beste Ergebnis und ist auch für verschiedene andere Teilegeometrien flexibel verwendbar. Die Reinigung der Bauteile erfolgt mit Hilfe einer Sprühvorrichtung. Das Reinigungsmedium wird am Boden der Reinigungskammer gesammelt und läuft in den Reinigungsbehälter unterhalb der Kammer,

worin sich ein Mehrkammersystem zur Öl- und Partikelabscheidung sowie zur Erwärmung des Reinigungsmittels befindet (siehe auch Abbildung 20 Mitte). Die gereinigten Teile laufen über einen Abstreifer aus der Anlage und gelangen über eine Teilerutsche auf das Förderband zur induktiven Erwärmung, siehe Abbildung 20 rechts.



Reinigungseinheit mit Förderband



Mehrkammersystem zur Öl- und Partikelabscheidung sowie zur Erwärmung des Reinigungsmediums



Abstreifsystem mit Führungsblechen und Verkettung zum Erwärmungsband

Abbildung 20: Reinigungseinheit.

Die Anlage ist mit einer Induktionserwärmung ausgestattet, die mit Hilfe von zwei Induktoren die Erwärmung von bis zu 40 Teilen pro Minute ermöglicht, siehe Abbildung 21 links oben. In Versuchen wurden hierfür die effektivsten Induktor-Wicklungen ermittelt und in die Anlage integriert. Um die kontinuierliche Nutzung der Anlage im Dauerbetrieb zu ermöglichen, erwiesen sich Baumwoll-Gewebebänder als beste Lösung für den Transport durch die Induktionsstrecke. Auch ist es durch wenige Handgriffe möglich, individuell angepasste Transportbänder im Sinne einer flexibel verwendbaren Anlage für andere Rohteile zu tauschen. Die Erwärmungseinheit ist mit Hilfe einer zweistufigen Teilerutsche mit der Beschichtungseinheit verkettet. Hier ist ebenfalls eine schnelle Montage und Demontage der Rutsche möglich, so dass auch hier das Ziel einer modular verwendbaren Anlage gegeben ist.

Die erwärmten Bauteile tauchen in das Beschichtungsmedium ein und werden durch das in Abbildung 21 Mitte dargestellte Förderband mit Schnurbändern aus dem Schmierstoffbad gefördert. Durch die jeweils separat angetriebenen Förderbänder der einzelnen Module der Anlage kann leicht die Verweildauer in jedem Modul durch Änderung der Geschwindigkeiten des Förderbandes angepasst werden.

Um die Verkettung mit einer Umformpresse zu realisieren ist das in Abbildung 21 rechts dargestellte lange und in seiner Neigung stufenlos verstellbare Förderband in die Anlage integriert worden. Zusätzlich ist die etwa 2,50 m lange Förderstrecke zum Trocknen der beschichteten Teile vorgesehen. Die Trocknung erfolgt dabei alleine

durch Umgebungsluft und Restwärme der beschichteten Teile. Die Trocknungsstrecke kann bei Bedarf durch die gewählte Platzierung im gesamten Zuführstrang der Presse angepasst werden.



Abbildung 21: Erwärmungseinheit (oben links) mit Teilerutsche (unten links), Transportband durch das Beschichtungsmedium (Mitte) und Förderband zur Verkettung mit Umformpresse (rechts).

4.2.4. Vorteile der Anlage im Vergleich zur Prototypenanlage

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Beschichtungsanlage vereint sowohl die aus dem Vorgängerprojekt übertragenen Lessons-Learned-Ansätze, als auch die zur zuverlässigen Beschichtung ringförmiger Teile modifizierte Erwärmungs-, Reinigungs- und Transporteinheit. Während zur Beschichtung mit dem prototypischen Beschichtungsstand aus dem Vorgängerprojekt zur Reinigung der Abschnitte ein zentraler, vorgeschalteter Reinigungsstrahlprozess erforderlich war, wurde im Rahmen dieses Projektes für die Bearbeitung von Rohteilen aus Blech oder geschältem Stabmaterial ein Reinigungsbecken vorgeschaltet, um Rückstände von Korrosion, Ölen oder Fetten vor der eigentlichen Schmierstoffbeschichtung sicher entfernen zu können.

Folgende Vorteile der umgesetzten Beschichtungsanlage wurden erarbeitet:

- Integration einer 2. Induktionserwärmung zum schonenden Erwärmen (Vermeidung der Beschädigung des Schmierstoffs) der Rohteile bei erhöhtem Durchsatz.
- Die Teile werden nicht mehr mittels speziell angepasster Transportkette, sondern auf Bändern auf der Mantelfläche liegend durch den Beschichtungsstand transportiert, sondern auf einer Stirnfläche. Im Bereich der Erwärmungsstrecke hat sich hierfür ein Baumwoll-Gewebeband als vorteilhaft erwiesen, da dieser Werkstoff die Temperaturen im Vergleich zu Kunststoffbändern deutlich besser ertragen kann. Für den Bereich des Beschichtungsbeckens und des

Austragebandes wurde ein spezielles Band aus Elastomer-Rundschnur entwickelt, das minimale Auflageflächen und ein sicheres Mitnehmen garantiert sowie die erhöhten Temperaturen ebenfalls sicher ertragen kann. Zudem neigt dieser Werkstoff weniger zu Schmierstoffanhaftungen als ein Kettenband.

- Mit der Umsetzung dieser innerhalb der Becken liegenden Transportbänder werden die Teile nicht mehr überflutet sondern getaucht. Dies stellt ein zuverlässiges Benetzen der Stirn-, Aussen- und Innenflächen sicher.
- Kleinere Becken für Reiniger und Schmierstoff. Dadurch schnelles Erreichen einer stationären Beckentemperatur von Reiniger und Schmierstoff. Ebenfalls gelingt durch die Verwirbelung des Schmierstoffes durch das im Becken liegende Transportband und die durchgeführten Teile eine permanente Durchmischung. Dies verhindert das Absetzen der Feststoffpartikel am Beckengrund und ermöglicht eine einfachere und genauere Nachdosierung. Optional wäre eine automatisierte Nachdosierung aus größeren Vorratsbehältern möglich, wobei dies bisher durch manuelle Nachdosierung direkt in die Beschichtungsbecken umgesetzt wird.
- Kleiner Bauraum bei geringem Gewicht. Somit kann die Anlage auch z.B. in der 2. Ebene direkt in den Zuführstrang der Presse integriert werden.

4.3. Beschichtungshaftung und tribologische Charakterisierung

4.3.1. Applikation der Schmierstoffschichten

Für den Erfolg des Projektes war es von großer Bedeutung, die Schmierstoffe so zu applizieren, dass die Umformung der Rohlinge in einem Serienprozess möglich ist. Dabei ist es wichtig, dass weder zu viel, noch zu wenig Schmierstoff aufgebracht wird, um ein optimales Umformergebnis zu erreichen. Bei zu wenig Schmierstoff können die Werkzeuge nach kurzer Zeit durch Adhäsion versagen, bei zu viel Schmierstoff bleiben Ablagerungen des Schmierstoffes in den Umformwerkzeugen zurück und führen zu Geometrieunterfüllungen an den umgeformten Teilen.

Ziel der Untersuchung war es daher, den Einfluss verschiedener Parameter auf das Trocknungsverhalten und die erzielten Schichtdicken der Proben zu ermitteln. Die folgenden Parameter erwiesen sich als zielführend, um ein optimales Beschichtungsergebnis zu erreichen:

- Parameter 1: Temperatur der Probe vor dem Eintauchen in den Schmierstoff
- Parameter 2: Geschwindigkeit Ausfuhrband (Zeit der Probe in Kontakt mit Schmierstoff)
- Parameter 3: Konzentration Schmierstoff

In einer ersten Versuchsreihe wurden zunächst die nötigen Einstellungen der Anlage ermittelt, um die gewünschten Zieltemperaturen der Proben zu erreichen. Die verwendeten Einstellgrößen waren dabei die Temperatur des Reinigungsmediums sowie die

Geschwindigkeiten der Transportbänder in der Erwärmungs- und Beschichtungseinheit. Bei der Temperatur des Reinigers wurden die folgenden drei Einstellungen verwendet:

- Raumtemperatur (ca. 28°C)
- erwärmt (ca. 60°C)
- kurz vor Siedepunkt (ca. 90°C)

Bei der Erwärmung der Bauteile in der Induktionsstrecke wurden ebenfalls drei Geschwindigkeiten variiert:

- 1500mm/min
- 2400mm/min
- 3450mm/min

Bei einem Ergänzungsversuch zu Ende der Versuchsreihe erfolgte eine Stichprobenuntersuchung mit einer Geschwindigkeit von 785mm/min, um den Einfluss von stark erhitzten Proben zu analysieren. Die Stromstärke und der Frequenzbereich der Induktionsanlagen blieben während der Versuche unverändert. Durch die gewählten Parameter ergaben sich 9 (10 mit Ergänzungsversuch) Versuchsreihen. Jede Versuchsreihe wurde mit 20 Proben durchgeführt. Die Temperaturen wurden an zwei Messpunkten, nach dem Verlassen der Reinigungseinheit und nach dem Verlassen des zweiten Induktionsfeldes, mittels eines Laser-Pyrometers dokumentiert.

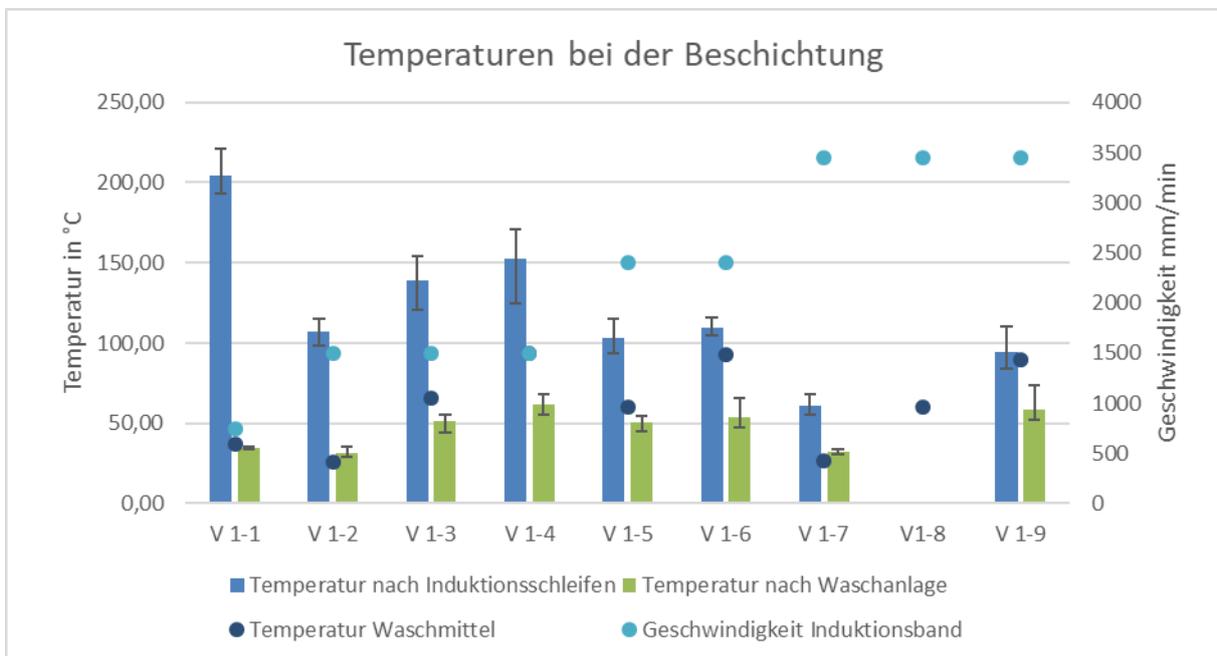


Abbildung 22: Ergebnis der Versuchsreihen zur Schichthftung in Abhängigkeit der Temperaturen und Bandgeschwindigkeiten.

Die gemessenen Temperaturen auf den Proben zeigt Abbildung 22. Die blauen Säulen stellen die Erwärmungstemperatur nach der Induktion dar und die grünen B die Temperatur nach der Reinigungseinheit. Die Streubreite zeigt jeweils, wie die Temperatur bzw. die -messungen im Verlaufe der Versuche variieren. Ein Streubereich ist dabei

die Veränderung der gemessenen Temperaturen aus 20 Messungen. Die dunkelblauen und hellblauen Punkte zeigen jeweils die eingestellten Temperaturen im Reinigungsbecken sowie die Geschwindigkeit des Transportbandes bei der Induktion.

Bei den Versuchen konnten die nötigen Einstellungen für die gewünschten Temperaturen ermittelt werden. Wie zu erwarten, erfolgt durch die Erwärmung des Reinigers eine Vorerwärmung der Proben. Dadurch reduziert sich die zusätzlich erforderliche Erwärmung mittels Induktionsanlagen, welche für die gewünschte Zieltemperatur notwendig ist. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Bandgeschwindigkeit der Induktionsanlage aus. Daher wurde für eine zweite Versuchsreihe festgelegt, dass alle Versuche bei einer festen Reinigertemperatur von 90°C durchgeführt werden.

Gemeinsam mit dem Projektpartner PtU der Technischen Universität Darmstadt wurde das Trocknungsverhalten und der Einfluss verschiedener Parameter auf die erzielten Schichtdicken ermittelt, siehe hierzu auch Kapitel 4.3.2.

Die wesentlichen untersuchten Parameter bei der Versuchsreihe waren:

- Temperatur der Probe vor dem Eintauchen in das Beschichtungsmedium
- Dauer des Kontakts der Probe mit dem Schmierstoff (durch Geschwindigkeit des Ausfuhrbandes geregelt)
- Konzentration Schmierstoff

Die Temperaturen der Versuchsproben wurden dabei zwischen 150 °C, 110 °C und 90 °C variiert. Die Schmierstoffkonzentration wurde dabei in dem Verhältnis Schmierstoff zu Wasser im Bereich 1:1,67 sowie 1:2,15 variiert.

Durch diese Parameter ergaben sich insgesamt 18 Versuchsreihen. Zusätzlich zu einer scheibenförmigen Geometrie mit zu beschichtender Innenfläche war hier auch eine Flachprobe verwendet worden.

Das Trocknungsverhalten wurde durch Sichtkontrolle der Proben ermittelt. Es wurde als ausreichend gut bewertet, wenn keine feuchten Stellen bis zum Erreichen des Anlagenendes mehr zu erkennen waren. Jede Parametervariation wurde getrennt verpackt und anschließend vom PtU der tribologischen Analyse sowie der Schichtdickenmessung unterzogen.

Abbildung 23 zeigt das Ergebnis der Versuche, wobei hier bereits die vom PtU gemessenen Schmierstoffgewichte als Säulen dargestellt sind. Die gemessenen Temperaturen (als Mittelwert) bei den verschiedenen Schmierstoffkonzentrationen sind mit hellgrünen (1:1,67) und dunkelgrünen (1:2,15) Punkten dargestellt. Die Geschwindigkeit des Förderbandes, das die Eintauchzeit der Proben in dem Beschichtungsmedium definiert, ist jeweils mit einem hellblauen Punkt gekennzeichnet.

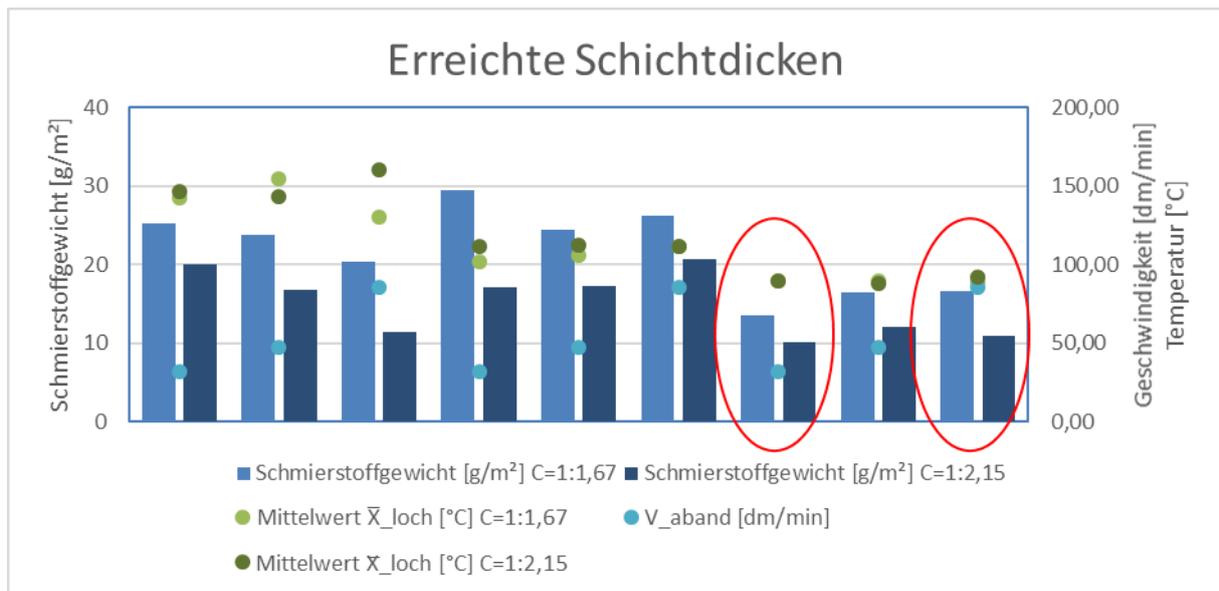


Abbildung 23: Ergebnis der Versuchsreihen zur Schichthaftung in Abhängigkeit der Temperaturen und Bandgeschwindigkeiten.

Als Ergebnis der Beschichtungsversuche lässt sich festhalten, dass das Trocknungsverhalten bei allen Versuchsreihen ausreichend gut war. Ein eindeutiger Einfluss der Ausführungsgeschwindigkeit des Bandes auf die Schichtdicke konnte mit der Anzahl an Versuchen nicht nachgewiesen werden.

Nach Diskussion der Ergebnisse im Rahmen eines Projektmeetings wurden die Parametereinstellungen der rot eingekreisten Versuche als optimal für die Versuche im Serienprozess ausgewählt. Dies zeigte sich auch bei den im Folgenden dargestellten Untersuchungen zur tribologischen Charakterisierung.

4.3.2. Tribologische Charakterisierung

Die Charakterisierung der Schmierstoffschichten erfolgt auf Basis des erzielbaren Schichtgewichtes, der optischen Erscheinung der Proben und der Leistungsfähigkeit basierend auf Tribometeruntersuchungen.

Zur Eingrenzung der Anlagenparameter erfolgten Versuche mit zwei Parametersätzen. Abbildung 24 zeigt die Schichtgewichte der ersten beiden Parametersätze (siehe dazu auch Kap. 4.3.1). Die Schichtgewichte sind wie bei den Beschichtungsuntersuchungen gravimetrisch bestimmt. Nach dem Wiegen der beschichteten Proben wurden diese entschichtet und erneut gewogen. Die Gewichts Differenz bezogen auf die Probenfläche ergibt das Schmierstoffgewicht. Bei einem Zielgewicht von $15 \text{ g/m}^2 \pm 5 \text{ g/m}^2$ konnten mit den Versuchen zwei Extreme der Schichtgewichte (44 g/m^2 und 3 g/m^2) abgebildet werden. Basierend auf diesen Ergebnissen sind die Parametersätze für die Hauptuntersuchungen gewählt worden.

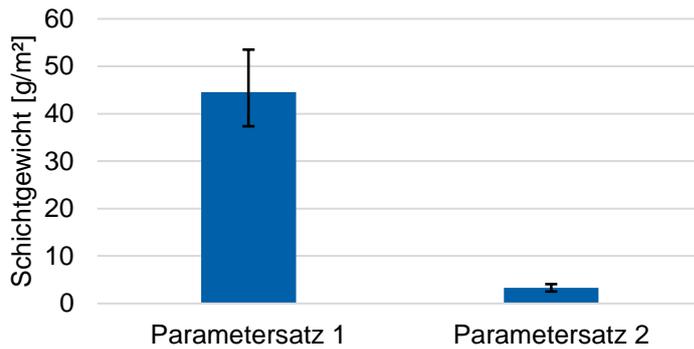


Abbildung 24: Erste Parametersätze der Beschichtungsanlage

Für die Hauptuntersuchungen werden die drei Parameter Schmierstoffkonzentration, Bandgeschwindigkeit der Induktionsspule sowie Geschwindigkeit des Transportbandes aus dem Schmierstoffbecken variiert. Alle diese Parameter haben sowohl einen Einfluss auf das erzielbare Schmierstoffgewicht als auch auf die mögliche Ausbringungsrates der Anlage.

Die entschichteten Proben wurden zusätzlich optisch auf Fehler untersucht, die durch den Schmierstoff überdeckt sein können. Bei einer Bandgeschwindigkeit durch die Induktionsspule von 1500 mm/min ist die Erwärmung der Proben zu hoch, wodurch es zu thermisch bedingten Verfärbungen der Proben kommt durch Überhitzung (Abbildung 25 links). Durch die Erhöhung der Bandgeschwindigkeit auf 2400 mm/min sinkt die resultierende Probentemperatur aufgrund des geringeren Energieeintrags und die Überhitzungen treten nicht mehr auf.

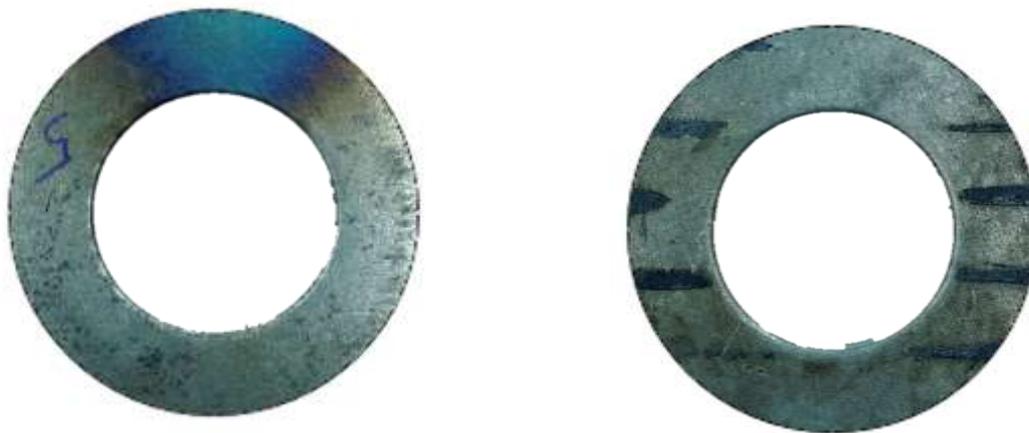


Abbildung 25: Bauteilfehler: Verfärbung der Probe (links) und Gummianhaftungen des Transportbandes (rechts)

Ein weiterer Fehler ist in Abbildung 25 rechts dargestellt. Hierbei kommt es zu Anhaftungen von Kunststoff durch Anschmelzen der Rndschnüre des Transportbandes. Der Abstand der Spuren entspricht dem Transportband aus dem Schmierstoffbecken. Dieser Fehler tritt bei den Bandgeschwindigkeiten der Induktionserwärmung von 1500 mm/min auf und ist daher teilweise auf die zu hohe Temperatur der Proben zurück zu

führen. Ebenfalls tritt der Fehler bei einer Bandgeschwindigkeit von 2400 mm/min und einer Schmierstoffkonzentration von 1:2,15 auf. Durch den höheren Schmierstoffanteil im Schmierstoffbecken ist die Kühlwirkung soweit herabgesetzt, dass die resultierende Probentemperatur am Ausfuhrband zu hoch für das Bandmaterial ist und es auch hier zu Anhaftungen kommt.

Mit diesen beiden Bauteilfehlern können die Beschichtungsparameter in drei Kategorien eingeteilt werden, die in Abbildung 26 farblich unterteilt sind. Von jeder Variante werden 5 Proben betrachtet, sowohl zur Bestimmung der Schichtdicke als auch zur Identifizierung möglicher Bauteilfehler. Die Proben der grünen Kategorie weisen keine Fehler auf, in der gelben Kategorie hat eine der fünf Proben einen Fehler und in der roten Kategorie besitzen mehrere Proben einen der beiden oben beschriebenen Fehler.

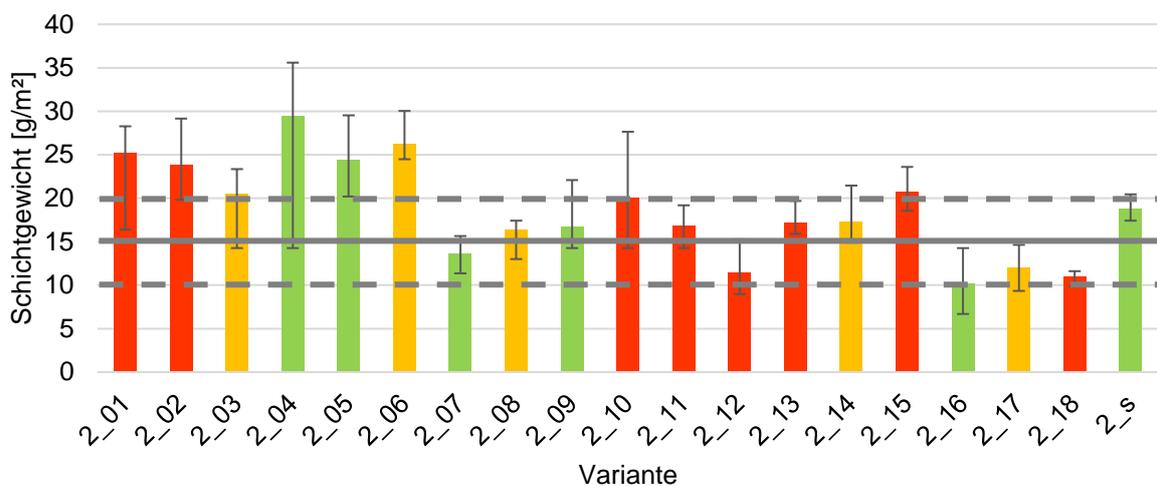


Abbildung 26: Erzielte Schmierstoffgewichte zu den variierten Anlagenparameter

Neben der Kategorisierung der Beschichtungsvarianten sind in Abbildung 26 auch die erzielten Schichtgewichte dargestellt. Hier zeigt sich, dass 13 der 19 Beschichtungsparameter das gewünschte Zielgewicht erreichen.

Unter Einbeziehung der vorherigen Kategorisierung sind die beiden Beschichtungsvarianten „2_07“ und „2_09“ am erfolgversprechendsten.

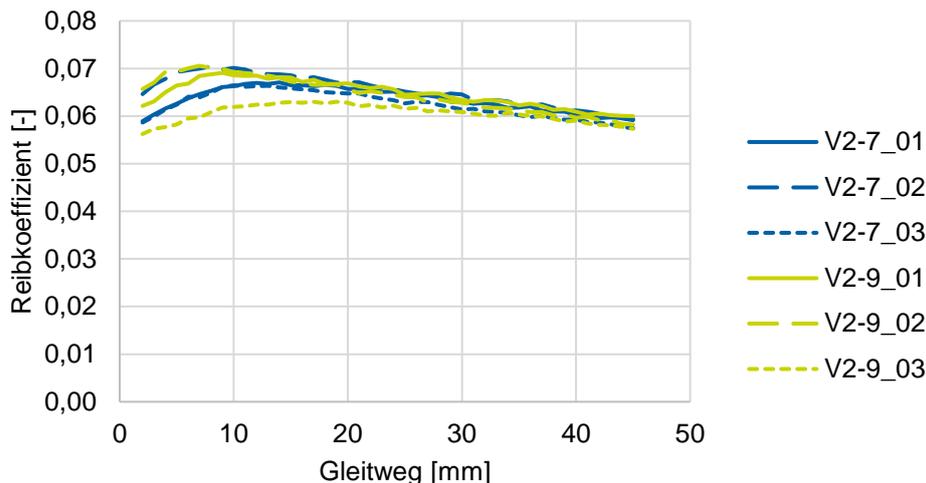


Abbildung 27: Ergebnisse Gleitstauchversuch der beiden Beschichtungsvarianten

Abschließend erfolgt eine weitere Charakterisierung beider Beschichtungsvarianten mittels Gleitstauchversuchen. Hier zeigt sich, dass beide Varianten ein ähnliches Verhalten aufweisen. Auf den ersten 10 mm des Gleitweges besitzen sie eine relativ große Streuung der Reibkoeffizienten von 0,007 (2_07) und 0,01 (2_09). Die Streuung nimmt über den weiteren Gleitweg ab, bis diese bei 30 mm bei beiden Varianten nur noch 0,002 beträgt. Abgesehen von der Streuung des Reibwertes zu Beginn des Gleitwegs zeigen die Proben keine Verschleißerscheinungen auf den Werkzeugen.

4.3.3. Zwischenfazit für die Verwendung im industriellen Umfeld

Über die Laufzeit des Projektes wurden vielschichtige Versuchsfertigungen durchgeführt. Hierfür wurden die Teile vorab bei LS-Mechanik in verschiedenen Ausbaustufen der Anlage beschichtet. Anfänglich wurden die Proben ohne Vorreinigung beschichtet bei Feststoffkonzentrationen zwischen 10-13%. Diese Teile wurden dann bei SPW mit den zum Serienprozess identischen Versuchswerkzeugen gefertigt. Diese Teile konnten prinzipiell wie auch die Serienteile produziert werden, wobei je nach Beschichtungsparametern wenige Dutzend bis mehrere Hundert gefertigt wurden, bevor adhäsiver Verschleiß in der Hauptumformstufe auftrat. Hierbei hatten sich aufgrund der erhöhten MoS₂-Konzentration (Vergleichsmaßstab 5-7%) erwartete Schmierstoffablagerungen im Verzahnungsbereich nicht bestätigt. Eine geeignete Schmierstoffkonzentration sollte ergänzend durch die abgestimmte Vorreinigung bei der Versuchsreihe bei SPW gefunden werden. Die Beschichtungsversuche haben gezeigt, dass eine Beschichtung von 35 Teilen/min möglich sein sollte, wobei das Ziel mit 40 Teilen / min im Versuch noch nicht erreicht werden konnte. Die Benetzung der Teile und die Anlagenverfügbarkeit bestätigen einen möglichen Einsatz der Anlage im industriellen Umfeld.

4.4. Einsatz in der industriellen Praxis am Beispiel eines Serienproduktes

Bei der Erprobung der Anlage auf Praxistauglichkeit wurden mehrere Versuchsreihen gefahren. Da sich bei den Versuchen bei LS-Mechanik herausgestellt hat, dass sich eine Vorwärmtemperatur der Rohteile von 110°C am besten für das Beschichten eignet, wurde diese für alle Versuchsreihen übernommen. Abbildung 28 zeigt die bei Schondelmaier GmbH Presswerk (SPW) in die Prozesskette integrierte Beschichtungsanlage mit Bildern während des Dauerbetriebs.



Abbildung 28: integrierte Beschichtungsanlage mit Pressenzuführung im Hintergrund (links) und Reinigungs- und Erwärmungseinheit im Dauerbetrieb (rechts, oben und unten).

Die Anlage wurde direkt an der Umformanlage bei SPW mehrere Tage getestet (Abbildung 29). Hierbei wurden die beschichteten Teile unmittelbar der Umformanlage zugeführt.

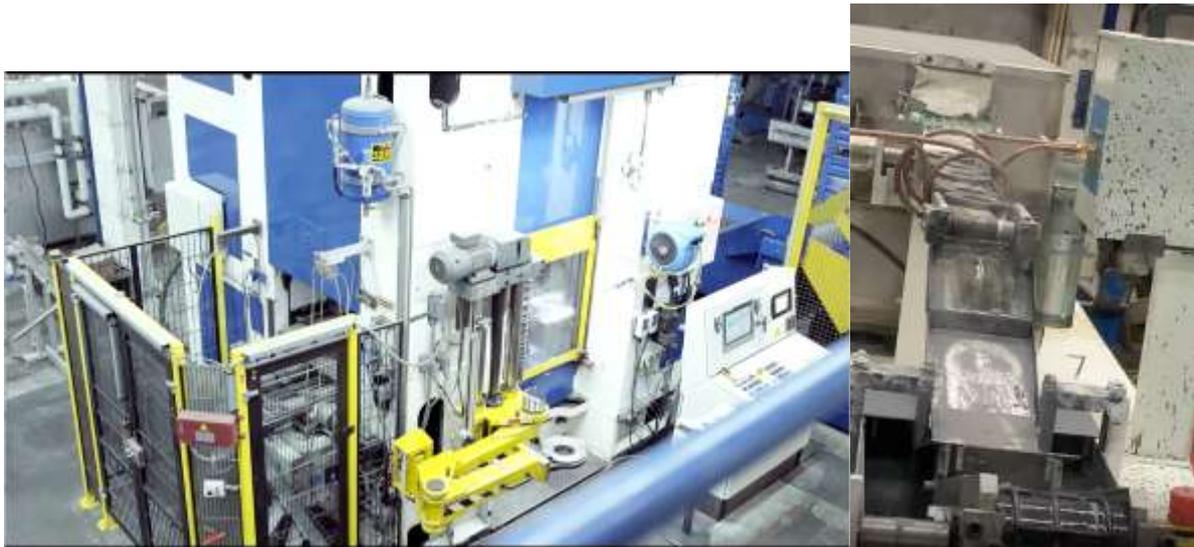


Abbildung 29: Presse und Beschichtungsstand bei SPW

Bei diesem Versuch wurde mit einer MoS₂-Startkonzentration von 13% Feststoffgehalt begonnen. Die Teile zeigten nach wenigen Hüben im Bereich der Verzahnung Unterfüllungen durch Schmierstoffablagerungen, die bei den bisherigen Versuchen nicht festgestellt werden konnten. Während der Versuchsreihe wurde der Feststoffgehalt des Schmierstoffes in mehreren Schritten dann bis auf 5% reduziert. Mit dieser Konzentration konnten im Rahmen der Versuchsreihe 2.000 Teile im Automatikbetrieb gefertigt werden ohne jeglichen Werkzeugverschleiß und ohne Schmierstoffablagerungen im Verzahnungsbereich. Aufgrund einer leichten Unterfüllung an der Unterseite des Bauteils wurden weitere 1.000 Teile mit den gleichen Parametern beschichtet und über Nacht in einem Trockenlager eingelagert, um den Restfeuchtegehalt den Vorversuchen anzugleichen.. Diese Teile konnten nicht produziert werden, da die Umformkräfte und damit die Werkzeugbelastung deutlich anstiegen. Zudem trat nach wenigen Teilen wieder adhäsiver Verschleiß am Verzahnungsstempel auf. Insofern scheint der Zeitraum zwischen Beschichtung und Verarbeitung aufgrund der Restfeuchtigkeit im Schmierstoffsystem einen mitentscheidenden Einfluss auf die Verarbeitbarkeit der Teile zu haben. Hier gilt es im Nachgang eine geeignete Schmierstoffkonzentration und Zusammensetzung in weiteren Versuchsfertigungen zu finden, was nur im industriellen Umfeld gelingen kann. Die im Automatikbetrieb gefertigten 2.000 Teile sind bis auf die angesprochene Unterfüllung auf der Unterseite (siehe blauer Pfeil Abbildung 30) spezifikationskonform. Diese Abweichung beeinflusst die Funktion des Bauteil in keiner Weise, muss dennoch vor einem Großserienversuch mit dem Kunden geklärt und über eine Bauabweichungsgenehmigung abgesichert werden.

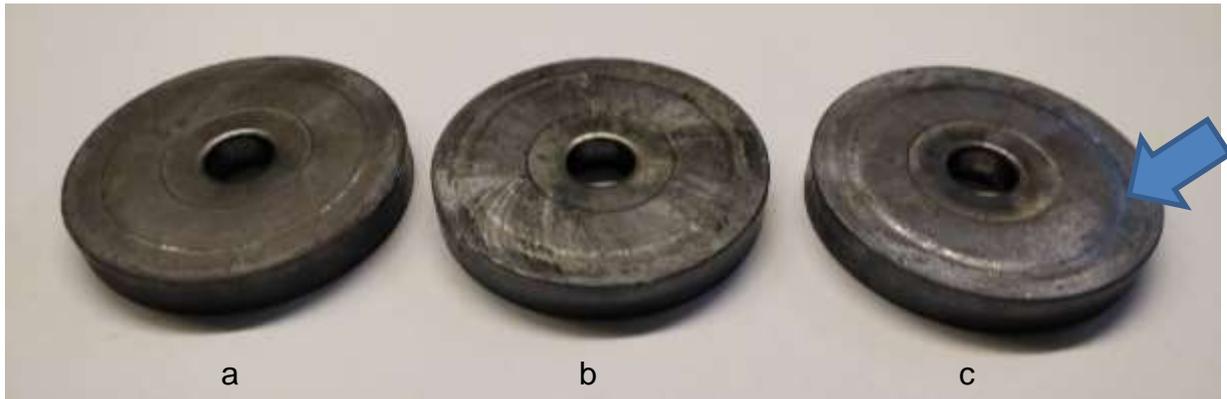


Abbildung 30: Bodenansicht der Pressteile



Abbildung 31: Sicht auf Verzahnungsbereich der Pressteile; a=Serienteil ZnPh+MoS₂ , b=7,3% MoS₂, c=5%MoS₂

Mit den so gewählten Parametern konnte eine Ausbringung von ca. 35 Teilen/min gefahren werden, was über weitere Optimierungen sicher noch zu steigern ist. Insofern ist der im Antrag formulierte Korridor von 30-40 Teilen/min erreicht. Somit könnten mit dieser Beschichtungsanlage bei aktueller Parameterwahl je nach erreichbarem OEE zwischen 9,5 Mio Teile/a und 10 Mio Teile/a gefertigt werden. Ebenso wären damit über nur dieses Projekt bereits bei dieser Ausbringung etwa 3,2t Phosphatschlamm zu vermeiden.

5. Fazit

Im Projekt „Weiterentwicklung einer Reinigungs- und Beschichtungseinheit für die umweltfreundliche Verarbeitung von Halbzeugen und Ermittlung der Praxistauglichkeit bei der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung“ wurde eine Prototypenanlage zur Reinigung und Erwärmung von Probekörpern mit anschließender Beschichtung mit einschichtschmierstoffen konsequent optimiert und wesentliche Teile neu konzipiert. Die Art des Schmierstoffauftrags sowie die in Frage kommenden Schmierstoffe sind dabei mit wissenschaftlichen Untersuchungen evaluiert worden.

Nach einer systematisch durchgeführten Versuchsreihe zur Beschichtung von Probesteilen zeigte sich im Rahmen einer sich anschließenden tribologischen Analyse, dass die beschichteten Proben für die Verwendung im industriellen Umfeld geeignet sind.

Die im Projekt entwickelte Anlage konnte im Anschluss den Test der Praxistauglichkeit bestehen und ermöglicht als inlinefähige Beschichtungsanlage die Verwendung im industriellen Umfeld. Die Anlage ist damit geeignet für den Einsatz im Serien-Pressentakt (entspricht etwa 30-40 Teile/Minute) und kann in die Prozesskette bei Anwendern der Kaltmassivumformung integriert werden.

Auch konnte im Rahmen des Projektes die Baugröße im Vergleich zur Prototypenanlage deutlich reduziert und gleichzeitig die Flexibilität und Modularität gesteigert werden. Die Ergebnisse zeigen zwar weiterhin einige Verbesserungsmöglichkeiten, die aber in Abstimmung mit dem jeweiligen Einsatzfall mit Interessenten und bei Versuchen in Produktionsunternehmen abgestimmt werden müssen.

Für die Untersuchungen in diesem Projekt bei der Schondelmaier GmbH Presswerk (SPW) bleibt festzuhalten, dass sobald SPW eine Abweichgenehmigung zur Fertigung von Teilen mit der Inlinebeschichtung vorliegt, die Fertigung eines ersten Serienloses von 2 Versandboxen (entspricht $2 \times 6.000 = 12.000$ Stck) geplant ist. Damit ist die Verwendung der fertigen Bauteile beim Kunden abzusichern, was wiederum gängige Praxis bei Modifikationen ist. Sollte auch dieser Test erfolgreich verlaufen, steht einer Serienumsetzung nichts mehr im Wege.

6. Ausblick

Mit dem Beleg über die Praxistauglichkeit in einem Serienprozess der neuen Beschichtungsanlage ergeben sich für Unternehmen der Kaltmassivumformung neue Möglichkeiten bei der Gestaltung ihrer Prozessketten. Zudem ist die neue Beschichtungsanlage modular aufgebaut und kann verschiedene Bauteile durch geringe Umrüstarbeiten flexibel bei der Reinigung, Erwärmung und Beschichtung handhaben. Damit stellt die neue Anlage eine nahezu marktreife Anlage dar, die den Anforderungen von Interessenten größtenteils entspricht.

Für eine weitere ökologische Verbesserung kann angestrebt werden, dass die in der Erwärmungseinheit entstehende Wärme zusätzlich zum Beheizen der Reinigungseinheit genutzt wird. Weiterhin können die bislang eingesetzten, „entphosphatierenden“ Reiniger durch einfache alkalische Reiniger ersetzt werden, um hier weitere ökologische Vorteile zu erzielen.

Die im Dauerbetrieb festgestellte Erwärmung des Schmierstoffbades durch die erwärmten Proben sowie die Umwälzung des Schmierstoffes sollte in einem weiteren Schritt geregelt werden. Auch eine automatisierte Nachdossierung der Schmierstoffemulsion ist möglich. Durch den modularen Aufbau der Anlage kann die Ausbringung mit wenigen konstruktiven Anpassungen, zum Beispiel durch Parallelisierung mehrerer Beschichtungseinheiten, erhöht werden. Dies erscheint sinnvoll bei Prozessen, die eine höhere Ausbringung als die 30-40 Teile/Minute bei dem untersuchten Serienprozess erfordern.

Mit dem durchgeführten Projekt ist man der Produktion von versandfertigen Artikeln durch zentrale Integration des Beschichtungsprozesses direkt an der Umformpresse einen großen Schritt näher gekommen. Dieser Prozess ist in Abbildung 32 dargestellt. Zusätzlich konnte im Rahmen dieses Projektes die Verwendung ungestrahlter Oberflächen nachgewiesen und damit auch der in Abbildung 32 dargestellte Verzicht auf den Prozess „strahlen“ belegt werden.



Abbildung 32: Neue Prozesskette in der Kaltmassivumformung.

Als nächster Schritt ist die dauerhafte Integration der Beschichtungsanlage in Serienprozesse bei Anwendern geplant. Weiterhin ist es auch denkbar, dass einzelne Module, wie die Reinigungs-, Erwärmungs- und Beschichtungseinheit, für eine Vermarktung angeboten werden.

Über eine Verwendung der Anlagentechnologie für die Beschichtung von Teilen, die direkt vom Draht abgewickelt werden ist prinzipiell nachzudenken, wobei hier das Problem besteht, dass dabei nur die Mantelfläche der späteren Abschnitte beschichtet ist und noch nicht klar ist, wie sich diese nichtbeschichteten Stirnflächen bei der Umformung verhalten. Eine Integration der Beschichtungsanlage nach dem Abscher- und Richtprozess erscheint derzeit aufgrund der direkten Kopplung des Abscher- an den Umformprozess fraglich.

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
- [DBU16] Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt „Umweltfreundliche Prozessketten in der Kaltmassivumformung von Abschnitten durch den Verzicht auf nasschemisch aufgebrauchte Konversionsschichten. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen: 30738. 2016.
- [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.
- [Gro19] P. Groche (1), P. Kramer, N. Bay (1), P. Christiansen, L. Dubar, K. Hayakawa, C. Hu, K. Kitamura, P. Moreau; Friction coefficients in cold forging: A global perspective; In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 67 (2018) 261–264
- [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.
- [Ilü14] 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 Kaltstau-chen. Proceed. 23th Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Düsseldorf, VDI (2008).
- [Nsg11] Nittel, K ; Stahlmann, J.; Groche, P.: Kaltstauhdraht 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 zinkphosphatschicht-freier 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: Bonder-lube 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 SiO₂ 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.