

1 Einleitung

Die Oberflächentechnik ist ein Instrument zur Entwicklung und Herstellung von Oberflächeneigenschaften, die weder durch das Beschichtungsmaterial noch durch den Grund- bzw. Substratwerkstoff allein erreicht werden können [Qui14]. Meist werden Beschichtungen zur Verlängerung der Lebensdauer von Komponenten eingesetzt. Insbesondere der Korrosionsschutz bildet aus ökonomischen Gründen zur Reduzierung des gesamtwirtschaftlichen Schadens das größte Einsatzgebiet für Beschichtungen weltweit ab [För18, Kan23]. Die National Association of Corrosion Engineers (NACE International) beziffert den weltweiten wirtschaftlichen Schaden auf ca. 3,4 % des globalen Bruttoinlandsprodukt (BIP) [Ger16]. Die NACE International zeigt, dass bei Anwendung der derzeit verfügbaren Korrosionsschutzmethoden die Kosten für Korrosionsverluste um 15 – 35 % reduziert werden könnten [Ger16, Kan23, She17]. Derzeit eingesetzte Korrosionsschutzmethoden sind bspw. Lackierungen von Autos, das Schmelztauchen von Fahrzeuggestellen, sowie die Galvanisierung mit Nickel bei Kokillen.

Neben dem Korrosionsschutz werden Beschichtungen außerdem für tribologische Kontakte zur Reduzierung des Verschleißes und zur Beeinflussung der Reibung eingesetzt. Durch die Abnutzung des Materials an Kontaktflächen beeinflusst der Verschleiß die Lebensdauer mechanischer Komponenten negativ [Zha21]. Ebenso haben Beschichtungen einen Einfluss auf die Energieeffizienz und Feinstaubemissionen. In den Untersuchungen nach *Holmberg et al.* wurde für 2017 ein durch Reibung verursachter Energieverlust von ca. 103 EJ (Exajoule) und ein Verschleiß von ca. 16 EJ für die verschiedenen Bereiche Transport, Industrie und Wohnen weltweit ermittelt. Dadurch entstehen energetische und materielle Mehraufwendungen durch Instandsetzungen von ca. 1860 Mrd.€ und durch Verschleiß ca. 680 Mrd.€. Durch den Einsatz neuer Materialien, geeigneter Beschichtungsverfahren und Schmierstoffe könnten die Verluste um bis zu 40 % bis 2032 reduziert werden. Die größten Einsparungspotenziale sind dabei im Bereich Transport und Energiegewinnung erzielbar. [Hol17]

Beispiele für Verschleißschutztechnologien sind die Beschichtung von Bohrern mittels physikalischer Gasabscheidung (PVD, engl. *Physical Vapour Deposition*), die Beschichtung von Hydraulikzylindern mittels galvanischer Hartverchromung und die Beschichtung von Bremsscheiben zur Reduzierung der Feinstaubemissionen mittels thermischer Spritzen (HVOF, engl. *High Velocity Oxygen Fuel*), Kaltgasspritzen oder laserbasiertem Directed Energy Deposition (DED-LB).

Für die Erzeugung von Korrosions- und Verschleißschutzbeschichtungen können galvanische Beschichtungsverfahren eingesetzt werden. Grundsätzlich umfassen die galvanischen Verfahren die drei Verfahrensschritte Reinigung, Metallabscheidung und Nachbehandlung einschließlich Trocknung [Ger03]. Aufgrund des hohen Bedarfs an unterschiedlichen, teilweise toxischen Betriebsmitteln für die einzelnen Verfahrensschritte und dem großen Energiebedarf ist der Einsatz von galvanischen Verfahren im Hinblick auf den Umweltschutz, insbes. EC 1907/2006 (Registration, Evaluation,

Authorisation of Chemicals, REACH-Verordnung), der CO₂-Reduzierung und der Energieeffizienz (z. B. 1999/13/EC, 2011/65/EU, 2012/19/EU) reglementiert [Spa14]. Insbesondere der Einsatz von Chrom VI ist aufgrund seiner mutagenen und kanzerogenen Wirkung seit September 2017 nur unter strengen Auflagen erlaubt [REA06].

Alternativ zur galvanischen Beschichtung können Beschichtungen aus pulverförmigen Werkstoffen mittels Spritzverfahren, wie dem thermischen- oder dem Kaltgasspritzen, und DED-Prozessen erzeugt werden. Insbesondere in den Bereichen System- und Prozesstechnik für das DED-LB sind in den vergangenen Jahren große Entwicklungsschritte erfolgt. Dadurch konnte die Integrationstiefe in der industriellen Anwendung vergrößert werden [TWI20]. In der Oberflächenfunktionalisierung und der Reparatur ist insbesondere das High-Speed DED-LB (HS DED-LB) aufgrund des großen ökonomischen und ökologischen Potenzials ein etabliertes Verfahren. [Li19, Qui14]

Im Zuge wachsender Ressourcenknappheit und steigender technischer Anforderungen werden zunehmend kombinierte Oberflächeneigenschaften gefordert, wie kombinierter Verschleiß- und Korrosionsschutz. Zur Realisierung der gewünschten Oberflächeneigenschaften können beim HS DED-LB Materialmischungen oder mehrlagige Schichtsysteme eingesetzt werden. Für die Erzeugung von Materialmischungen werden beim HS DED-LB mehrere Materialien simultan gefördert und in-situ vor der Prozesszuführung gemischt oder als vorabgemischte Pre-Blends zugeführt und mittels der thermischen Energie des Laserstrahls aufgeschmolzen. Für den Auftragprozess werden die Prozessparameter in Abhängigkeit der Materialmischung derart entwickelt, dass eine geschlossene, möglichst riss- und porenfreie Schicht entsteht. Die Aufheizung der einzelnen Materialien innerhalb der Mischung und daraus resultierend die Schichtzusammensetzung kann nur eingeschränkt beeinflusst werden. [Bay21, Li18, Wei18]

Die simultane Verarbeitung von zwei Materialien mit individueller Steuerung des thermischen Energieeintrags kann durch eine separate Materialzuführung realisiert werden. Dabei werden die einzelnen Pulvermaterialien dem Laserstrahl simultan und getrennt über separate Pulvergasstrahlen (PGS), welche relativ zueinander im Laserstrahl positioniert werden können, zugeführt. Der jeweilige Energieeintrag in die Pulvermaterialien kann durch die Interaktionszeit der Partikel im Laserstrahl gesteuert und dadurch das Lösungsverhalten der beiden Materialien innerhalb der Beschichtung beeinflusst werden. Dies ermöglicht innovative Beschichtungen zu erzeugen und bietet das Potenzial die Eigenschaften von Zweischichtsystemen in einer Schicht zu realisieren.

Bisher sind keine Untersuchungen zur separaten Materialzuführung und den Einflüssen der relativen PGS-Verschiebung zueinander sowie der Prozessparameter auf die Zusammensetzung der Beschichtung durchgeführt worden. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Ansatz der separaten Materialzuführung zur Vergrößerung des Prozessverständnisses systematisch untersucht und die Prozessparametereinflüsse auf die resultierende Beschichtungszusammensetzung analysiert werden.