

## 1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund wachsender Klimaschutzanstrengungen liegt im Bereich der Verkehrs-, Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie ein besonderer Schwerpunkt auf der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Insbesondere der Automobilindustrie kommt als bedeutender Industriezweig Deutschlands eine Schlüsselrolle in der Reduzierung der Schadstoffemissionen zu. Zusätzlich führen gestiegene Kundenanforderungen und restriktive gesetzliche Regularien dazu, dass sich die Unternehmen immer stärker dazu verpflichtet sehen, ihre Tätigkeiten zur Verringerung der Schadstoffemissionen zu verstärken. Im Jahr 2018 war alleine der Straßenverkehr für 26 % aller CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU und für knapp 18 % des Treibhausausstoßes in Deutschland im Jahr 2015 verantwortlich [1,2]. Gemäß der Zielsetzung der Bundesregierung sollen die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2030 um 55 Prozent, bis zum Jahr 2040 um 70 Prozent und bis 2050 um bis zu 95 Prozent bezogen auf das Basisjahr 1990 reduziert werden [3]. Die gesetzten Ziele lassen sich folglich nur erreichen, wenn auch die Emissionen im Bereich des Verkehrswesens beträchtlich reduziert werden. Möglichkeiten hierzu können eine verbesserte Abgastechnik, effizientere Motoren und Antriebssysteme und vor allem eine Gewichtseinsparung der Fahrzeuge darstellen. Eine Verringerung des Fahrzeug- und Flugzeuggewichts geht mit einer Erhöhung der Kraftstoffeffizienz und der Reichweite einher oder ermöglicht größere Ladekapazitäten. All dies trägt zur Senkung der Emissionen im Verkehrssektor bei.

Die Auslegungskriterien für Strukturen in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie betreffen vor allem die Dichte, Festigkeit, Steifigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Materials [4]. Eine geringe Materialdichte reduziert das Gewicht. Hohe Festigkeit und Steifigkeit der Werkstoffe sind jedoch für die Konstruktions- und Sicherheitseigenschaften erforderlich, während die Korrosionsbeständigkeit die Lebensdauer der jeweiligen Bauteile gewährleisten soll [4]. Für strukturtragende Leichtbauanwendungen sind eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit die geforderten Haupteigenschaften [5]. Vor allem die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium besitzen bei Raumtemperatur unter anderem eine höhere spezifische Festigkeit (Abbildung 1.1) und eine ähnliche spezifische Steifigkeit wie zum Beispiel hochfeste Baustähle. Zudem sind sie kostengünstiger als die höherschmelzenden, korrosionsstabilen und ebenfalls zu den Leichtmetallen zählenden Titanlegierungen [6].

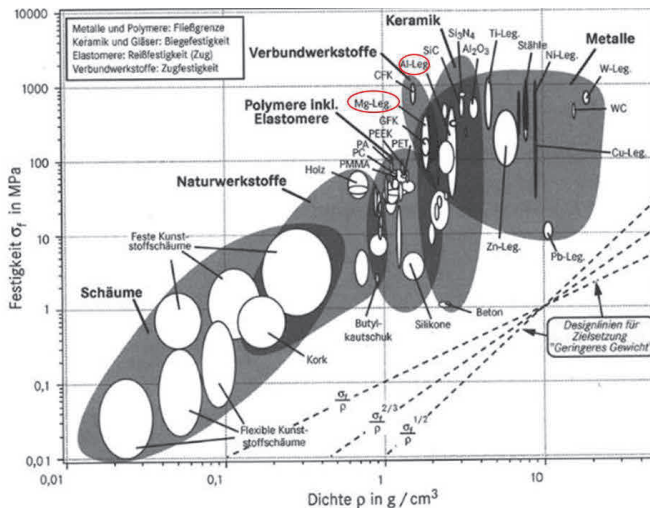


Abbildung 1.1: Vergleichende Darstellung der Dichte der Werkstoffklassen bezogen auf deren Festigkeit [7]. Nach [8]

Dies ermöglicht die Auslegung von leichteren Strukturen im Vergleich zu Stahl, bei gleicher Festigkeit. Allerdings sind Aluminium und Magnesium und deren Legierungen weniger korrosions- und verschleißbeständig als Titanlegierungen oder Edelstähle. Um die Nachteile der Leichtmetalle auszugleichen, ohne die materialspezifischen Vorteile zu verlieren, können die Oberflächeneigenschaften gezielt an die Anforderungen angepasst werden. Durch eine Oberflächenbehandlung oder Beschichtung der Halbzeuge wird eine Funktionstrennung zwischen der Bauteiloberfläche und dem dazugehörigen Volumen erreicht. Das Volumen bestimmt hierbei weiterhin die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit oder Elastizität und Gewicht, während die Oberfläche auf ein entsprechendes Anforderungsprofil hin optimiert wird. Schutzschichten können dabei unter einem relativ geringen Werkstoff- und Energieeinsatz zu einer Verlängerung der Bauteillebensdauer und somit zusätzlich zu einer in der heutigen Zeit stets an Bedeutung gewinnenden Ressourcenschonung beitragen [9].

Im Hinblick auf Korrosions- und Abrasionsschutzschichten zeichnen sich vor dem Hintergrund der geringen Dichte und der damit verbundenen Gewichtseinsparung insbesondere keramische Schutzschichtsysteme aus. Zusätzlich weist dieser Werkstoff eine hohe Härte und eine gute chemische Beständigkeit auf. Keramische Schutzschichtsysteme werden meist über Vakuumtechniken (Physical Vapour Deposition (PVD) oder Chemical Vapour Deposition (CVD)), thermisches Spritzen oder Sol-Gel-Prozesse aufgebracht. Nachteilig wirken sich bei diesen Verfahren der ap-

parative und kostenintensive Aufwand, die z.T. hohen Substrattemperaturen (CVD), die Beschränkung auf dünne Schichten (Sol-Gel) und die Porosität der Schichten (thermisches Spritzen, Sol-Gel-Prozess) aus [9-11].

Eine Alternative zu den konventionellen Oberflächenverfahren zur Herstellung keramischer Schichten stellt die Precursorrouten dar. Bei den Precursoren handelt es sich überwiegend um siliziumhaltige Verbindungen, wobei Polysiloxane, Poly(carbo)silazane, Polycarbosilane und Polysilane am weitesten verbreitet sind [9]. Wesentliche Vorteile der Precursorrouten im Vergleich zu den etablierten Verfahren und den pulverkeramischen Verfahren liegen in der vergleichsweise niedrigen Keramisierungstemperatur und der Möglichkeit, diese kunststofftechnologisch zu verarbeiten. Eine Pyrolyse der Precursoren resultiert in Abhängigkeit von der Auslagerungsatmosphäre in Keramiken im System SiCO (Siliziumoxycarbid), SiC (Siliziumcarbid), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Siliziumnitrid) und SiCN (Siliziumcarbonitrid) [9]. Diese Keramiken zeichnen sich durch eine hohe Härte, eine hohe thermische Stabilität und Kriechbeständigkeit, gute Temperaturwechselbeständigkeit und vor allem durch eine gute Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit aus [9,12-15]. Aufgrund dieses Eigenschaftsspektrums, verbunden mit der einfachen Applizierbarkeit auch auf komplexe Geometrien und der vergleichsweise niedrigen Keramisierungstemperatur eignen sich die präkeramischen Polymere zur Herstellung von keramischen Abrasions-, Oxidations- und Korrosionsschutzschichten auf metallischen Werkstoffen.

### **Problemstellung**

Eine Vielzahl an Arbeiten beschäftigt sich mit der Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von Beschichtungen auf Basis von präkeramischen Polymeren zum Oxidations-, Korrosions- und Abrasionsschutz von metallischen Werkstoffen. Hierbei wird sowohl von reinen polymerabgeleiteten Beschichtungen als auch von gefüllten Precursorschichten berichtet. Füllstoffe werden vor allem zur Verringerung der bei der Pyrolyse auftretenden Precursorschumpfung und zur gezielten Steuerung der Schichteigenschaften eingesetzt. Gemeinsam haben sowohl die ungefüllten als auch die gefüllten Schichtsysteme, dass die thermische Umwandlung der precursorbasierten Schichten in eine Keramik nahezu ausschließlich in konventionellen Kammer- oder Rohröfen erfolgt. Dies hat zur Folge, dass das Substrat die gleiche Temperaturbelastung wie die Beschichtung erfährt. Damit kann die Precursortechnologie nur in Kombination mit temperaturbeständigen hochschmelzenden Substratwerkstoffen wie warmfesten Stählen, Hochtemperaturlegierungen oder Keramiken eingesetzt werden. Aber auch bei temperaturbeständigen Substratwerkstoffen können sich die hohen Pyrolysetemperaturen negativ auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes auswirken. Eine Verringerung der Pyrolysetemperatur ist im Hinblick

auf die Schichteigenschaften ebenfalls nicht zielführend. Daher konnten bisher keine polymerabgeleiteten keramischen Schichten als effektive Korrosions- und Abrasionsschutzschichten auf niedrigschmelzenden Substraten wie Aluminium und Magnesium hergestellt werden.

### **Zielsetzung und Vorgehensweise**

Die Motivation der Arbeit liegt darin, polysilazanbasierte keramische Schichten auf niedrigschmelzenden Substratwerkstoffen herzustellen, ohne dabei die mechanischen Eigenschaften und das Gefüge der Substratmaterialien thermisch zu beeinflussen. Als Substratwerkstoffe für diese Untersuchungen wurden Aluminium und Magnesium bzw. deren Legierungen ausgewählt, deren Schmelzpunkte und Rekristallisationstemperaturen deutlich unterhalb der Keramisierungstemperaturen der präkeramischen Polymere liegen, aber als Leichtbaustrukturwerkstoffe industriell eine breite Anwendung finden. Aufgrund ihrer geringen Dichte, hohen spezifischen Festigkeit und der Möglichkeit zum Recycling finden sie sowohl als Konstruktionswerkstoff im Fahrzeug-, Apparate- und Behälterbau, als auch für Alltagsgebrauchsgüter Verwendung. Nachteilig wirkt sich hingegen die im Vergleich zu Edelfählen geringe Härte und das schlechte Verschleiß- und Korrosionsverhalten in bestimmten Medien aus [4,11,16,17]. Daher sollen durch die polysilazanbasierten Beschichtungen auch die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit der beiden Leichtmetalle verbessert werden. Effektive Schutzschichten können zur Verlängerung der Standzeiten, verbunden mit einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit führen, aber auch neue Anwendungsfelder für die Leichtmetalle erschließen. Dadurch zielt die Schichtentwicklung und -optimierung auf die Herstellung dicker, dichter, riss- und fehlerfreier, harter und gut haftender Schutzschichten auf den beiden Leichtmetallen ab. Mit reinen polysilazanbasierten Schichten ist die Schichtdicke jedoch aufgrund der Precursorschrumpfung während der Pyrolyse auf ca. 1  $\mu\text{m}$  beschränkt, wodurch die an die Schicht gestellten Anforderungen nicht erfüllt werden können [18,19]. Deshalb ist es notwendig, geeignete Füllstoffe zu verwenden, die zur Verringerung der Gesamtschrumpfung und zur Verbesserung der Abrasions- und Korrosionsbeständigkeiten der Schicht beitragen.

Die wissenschaftliche Zielsetzung geht jedoch über die reine Schichtentwicklung für diese Anwendungen hinaus. Es muss ein Verfahren zur Überführung der silazanbasierten und gefüllten Schichtsysteme in eine keramische Beschichtung entwickelt und evaluiert werden, bei dem trotz der Keramisierung der Schichten die Substratwerkstoffe thermisch unbeeinflusst bleiben. Dies kann durch die gezielte Verwendung von Laserstrahlung als Energiequelle für die Keramisierung des Polysilazans bzw. zum Aufschmelzen der Füllstoffe ermöglicht werden. Der Laserprozess hat zudem den Vorteil der schnellen Verarbeitung und der selektiven Pyrolyse der Beschichtungen, die durch die hohe Energie und Präzision ermöglicht wird. Durch die Fokussierbarkeit des Laser-

strahls kann eine definierte Wärmemenge in die Beschichtung eingebracht werden, ohne das Substrat thermisch zu belasten. Ein weiterer Vorteil der Laserpyrolyse im Vergleich zur konventionellen Ofenpyrolyse besteht darin, dass durch die Anpassung der Laserparameter an die Schichtdicke und deren Zusammensetzung eine definierte Wärmemenge selektiv und gezielt in die zu pyrolysierende Beschichtung eingetragen werden kann. Die Erwärmung der Beschichtung sowie die anschließende Abkühlung erfolgen in sehr kurzer Zeit, wodurch sich die Zykluszeiten im Vergleich zur Ofenpyrolyse deutlich verkürzen. Dies reduziert die Herstellungskosten und erhöht die Wirtschaftlichkeit. Zudem ist es möglich, komplexe Geometrien und definierte Strukturen wie z.B. Leiterbahnen selektiv zu pyrolysieren. Die Laserbehandlung von silazanbasierten gefüllten Schichten hat im Vergleich zum selektiven Laserschmelzen zur Herstellung keramischer Schichten den entscheidenden Vorteil, dass die keramischen Partikel in einer stabilen Matrix eingebettet sind und sich damit auch komplexe Strukturen und Geometrien beschichten und keramisieren lassen, wohingegen beim selektiven Laserschmelzen der Werkstoff in Pulverform vorliegt und somit eine Applikation auf komplexen Strukturen erschwert. Im Vergleich zur konventionellen Ofenpyrolyse ist die Laserbehandlung silazanbasierter Beschichtungen kaum untersucht. So beschränken sich die Arbeiten und Publikationen auf dünne Schichten oder der Schichtpyrolyse auf höherschmelzenden Substratwerkstoffen wie Edelstahl oder Keramiken [20-23]. Die Laserbehandlung gefüllter Silazanbeschichtungen zur Herstellung dicker Schutzschichten auf niedrigschmelzenden Metallen war hingegen noch kein Gegenstand intensiver Forschung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher zum ersten Mal mit der Entwicklung und Herstellung polysilazanbasierter keramischer Schichten auf Leichtmetallen, die mittels einer Laserbestrahlung thermisch behandelt werden.

Daher lässt sich die Zielsetzung der Arbeit wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung von harten, gut haftenden keramischen Beschichtungssystemen zur Steigerung der Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit der beiden Substratwerkstoffe Aluminium und Magnesium
- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Beschichtung
- Grundlegende Charakterisierung der resultierenden Schichtstruktur
- Charakterisierung und Evaluierung der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit der Beschichtungen
- Untersuchung des Einflusses der Laserbestrahlung auf die Substratwerkstoffe

Wichtige Aspekte bei der Auswahl der geeigneten Polysilazane stellen die kommerzielle Verfügbarkeit, die Applizierbarkeit durch einfache Verfahren, eine hohe Absorption bzw. Wechselwirkung mit der Laserstrahlung, sowie eine gute Abrasions-, Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit der Materialien dar [9]. Bei der Auswahl der Füllstoffe für die Schichtsysteme müssen neben den mechanischen auch die optischen und thermischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Zusätzlich müssen diese in oxidativer Umgebung und gegenüber korrosiven Medien stabil sein und zur Verbesserung des Verschleißverhaltens der Schichten beitragen. Als Ausgangsmaterial für die Beschichtungssysteme wurden entsprechend der Kriterien, eigenen Voruntersuchungen und fachspezifischen Literaturangaben [9,22,24-28] die beiden kommerziell erhältlichen Polysilazane Durazane 1800 und Durazane 2250 ausgewählt. Als Füllstoffe wurden zunächst verschiedene keramische und metallische Materialien untersucht. Der Fokus dieser Arbeit wurde auf die oxidkeramischen Füllstoffe  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{ZrO}_2$  gelegt, die sich durch ihre vergleichsweise hohe Härte und Festigkeit und ihre chemische Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl an korrosiven Medien auszeichnen [14,29,30]. Hingegen scheiden karbidische und nitridische Werkstoffe aufgrund möglicher thermischer Zersetzungsreaktionen infolge der Laserbestrahlung in Luftatmosphäre aus [14,29,31-38]. Als metallischer Füllstoff wurde Aluminium untersucht, das im betrachteten Wellenlängenbereich zur Erhöhung der Laserstrahleinkopplung beiträgt und eine gute Benetzbarkeit zu Keramiken im schmelzflüssigen Zustand aufweist [39-41]. Bei der Auswahl des Lasers spielen vor allem die Wellenlänge und die damit verbundene Absorption der Laserstrahlung im Material, die Möglichkeit zur flexiblen Strahlführung zur Bestrahlung komplexer Strukturen sowie eine hohe Effizienz eine wichtige Rolle. Aufgrund dieser Kriterien wurde als Laser ein Nd:YVO<sub>4</sub>-Laser ausgewählt, der sowohl im Dauerstrichbetrieb als auch gepulst betrieben werden kann. Zudem sind Polysilazane und Keramiken bei der charakteristischen Wellenlänge dieses Lasersystems teildurchlässig, womit eine Volumenabsorption in der Beschichtung und eine gleichmäßige Pyrolyse der Beschichtung über den gesamten Querschnitt ermöglicht wird.

Auf Basis unterschiedlicher Beschichtungsformulierungen wurde zu Beginn der Arbeit mithilfe ausgewählter Indikatoren die aussichtsreichste Schichtzusammensetzung gewählt, die im weiteren Verlauf grundlegend untersucht und charakterisiert wurde. Hierzu wurden, um ein grundlegendes Verständnis der Laserbehandlung gefüllter silazanbasierter Beschichtungen zu erhalten, zunächst die Laserparameter bestimmt und das Absorptionsverhalten der Grünsichten untersucht. Im Anschluss daran wurde die resultierende Oberflächentopographie, Mikrostruktur, das Erstarrungsgefüge sowie das Keramisierungsverhalten und die Entwicklung kristalliner Phasen charakterisiert und evaluiert. An ausgewählten Beschichtungssystemen wurden die wesentlichen Eigenschaften wie Haftfestigkeit, Umformverhalten, Härte und Thermoschockbeständigkeit ermittelt. Ferner

wurden die Abrasions-, Oxidations- und Korrosionsschutzeigenschaften des optimierten Schichtsystems untersucht. Zusätzlich erfolgte die Untersuchung und Evaluierung des Einflusses des Laserprozesses auf mögliche thermisch-induzierte Substratbeeinträchtigungen der beiden verwendeten Substratwerkstoffe. Hierfür kamen verschiedene analytische, mikroskopische und mechanische Charakterisierungsmethoden zum Einsatz.

## 2 Grundlagen und Literaturübersicht

Die Literaturübersicht zum Stand der Technik liefert im ersten Kapitel einen Überblick über Oberflächenbehandlungsverfahren für Metalle mit Fokus auf die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium. Der zweite Teil befasst sich mit der Precursorkeramik. Im dritten Kapitel wird auf die Grundlagen der physikalischen Wechselwirkungsmechanismen zwischen Laserstrahlung und Materie eingegangen sowie der Stand der Technik zur Laserbehandlung von präkeramischen Polymeren und allgemein von keramischen Werkstoffen erörtert.

### 2.1 Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungsverfahren

Die Oberflächenbehandlung von Halbzeugen oder Bauteilen aus Metallen dient neben dekorativen Aspekten vor allem der Funktionstrennung zwischen der Bauteiloberfläche und dem dazugehörigen Volumen. Häufig können einzelne Werkstoffe alleine die an sie gestellten Anforderungen kaum noch erfüllen, wodurch die Oberflächenbehandlung eine Möglichkeit darstellt, unterschiedliche Anforderungen an das Bauteil zu erfüllen. Mögliche Gründe für Oberflächenbehandlungen sind dabei der Schutz von Bauteilen gegenüber mechanischer Belastung wie Verschleiß, Reibung und Abrasion oder aber gegenüber Korrosion, Oxidation oder anderweitigen chemischen Angriffen. Zudem ist es auch möglich, zusätzliche funktionelle Eigenschaften im Bereich der Oberfläche zu erzeugen. Darunter zählen z.B. elektrische und magnetische sowie auch thermische und optische Eigenschaften. Fertigungsverfahren werden nach der DIN 8580 in sechs Hauptgruppen unterteilt, von denen neben Urformen, Umformen, Trennen und Fügen für die Oberflächentechnik vor allem die beiden Gruppen „Beschichten“ und „Stoffeigenschaften ändern“ eine zentrale Rolle spielen. Während bei der zuletzt genannten Gruppe die Eigenschaften des Werkstoffes, aus dem das Werkstück besteht, geändert werden, wird beim Beschichten definitionsgemäß eine fest haftende Schicht aus einem formlosen Stoff auf das Werkstück aufgebracht [42]. Je nach Applikationsverfahren und Material bleibt dabei der Grundwerkstoff unverändert.

Beschichtungsverfahren werden nach dem Aggregatzustand bzw. Ausgangszustand des aufzubringenden, formlosen Stoffes eingeteilt. Neben dieser herkömmlichen Einteilung können die Oberflächenbeschichtungsverfahren auch hinsichtlich der einstellbaren Schichtdicke sowie der thermischen Belastung des Substrates abgegrenzt werden [9,42]. Als Beschichtungstechniken werden Verfahren wie Sprühen, Tauchen, Lackieren, Plattieren, thermisches Spritzen, galvanische Abscheidung und die der Dünnschichttechnik (z.B. CVD, PVD, Ionenimplantation) eingesetzt. Dabei können metallische, organische und nichtmetallisch-anorganische Überzüge appliziert werden [9,16]. Entsprechend der DIN 8580 können die Stoffeigenschaften bzw. das Gefüge oder die



chemische Zusammensetzung der Oberfläche durch eine Wärmebehandlung, thermomechanische Behandlung, Sintern, Magnetisieren, photochemische Verfahren, Bestrahlung (z.B. Laser, Elektronenstrahl) und durch Umformen (z.B. Verfestigung durch Walzen) verändert werden.

Auch für niedrigschmelzende Substratwerkstoffe wie die beiden Leichtmetalle Aluminium und Magnesium haben sich folglich eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächen- und Beschichtungsverfahren zum Schutz vor Verschleiß, Korrosion und Oxidation entwickelt und etabliert. Da eine detaillierte Übersicht den Rahmen der Arbeit sprengen würde, werden im Folgenden ausgewählte Oberflächenbehandlungsverfahren, mit ihren Hauptcharakteristika, die zum Verschleiß-, Korrosions- und Oxidationsschutz auf niedrigschmelzenden metallischen Substratwerkstoffen und im Speziellen auf Aluminium- und/oder Magnesiumwerkstoffen eingesetzt werden, beschrieben. Eine klare Abtrennung der Oberflächenbehandlungsverfahren für die einzelnen metallischen Werkstoffe wie Magnesium- und Aluminiumsubstrate erfolgt nicht, da die vorgestellten Oberflächenbehandlungsmethoden im Grunde auf den gleichen physikalischen oder chemischen Prinzipien beruhen, sich gleichwohl aber in den Verfahrensparametern unterscheiden können. Eine detaillierte Zusammenfassung über Oberflächen- und Beschichtungsverfahren für Magnesium- und Aluminiumwerkstoffe liefert [43].

Unterschieden werden können die Methoden zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften nach [16,17] grob in folgende Oberflächenbehandlungsverfahren:

- Chemische Oberflächenbehandlung (Phosphatieren, Chromatieren)
- Elektrochemische Oberflächenbehandlung (Anodische Oxidation und Galvanisieren)
- Physikalische Oberflächenbehandlungsmethoden (PVD, Flamm-, Plasmaspritzen, thermisches Spritzen, Laseroberflächenbehandlung)
- Organische und anorganische Beschichtungen

Chemische Oberflächenbehandlungen verfolgen unterschiedliche Ziele. Neben den oberflächenabtragenden Verfahren, worunter Beizen oder Ätzen zählen, gehören zu den chemischen Verfahren die chemische Oxidation zur Erzeugung einer korrosionsresistenten Oberfläche oder das Chromatieren und Phosphatieren. Diese Konversionsschichten sollen hauptsächlich die Korrosionsbeständigkeit erhöhen und als Haftvermittler mit korrosionsinhibitorischer Wirkung für weitere Beschichtungen dienen [16]. Beim Chromatieren wird die Oberfläche des Bauteils mit einer Chromatschicht überzogen, die dabei durch die Behandlung des Metalls mit Chromsalzen entsteht. Die Chromatschichten besitzen eine gute Korrosionsschutzwirkung und können zudem als Haftvermittler für weitere Schichten oder für optische Anwendungen eingesetzt werden. Als Nachteil ist

die Verwendung von umwelt- und gesundheitsschädlichen Chromverbindungen zu nennen, weshalb sich zunehmend chromfreie Konversionsschichten durchsetzen [16]. Wichtiger als das Chromatieren ist die Abscheidung von metallischen Überzügen durch anodische Oxidation. Für Magnesium haben sich hier verschiedene Prozesse etabliert, die sich im Elektrolyt, der Stromdichte und der resultierenden Schichtfarbe unterscheiden. Das wohl bekannteste Verfahren für Magnesiumlegierungen stellt das sog. Magoxid-Coat®-Verfahren dar [11,17]. Bei diesem Verfahren wird durch eine plasmachemische Reaktion im Elektrolyten die Oberfläche des Magnesiumwerkstoffs in eine Keramik überführt [17]. Gemeinsam haben diese Verfahren, dass durch ein elektrochemisches Verfahren eine Oxidschicht erzeugt wird, die deutlich dicker ist als die natürliche Oxidschicht [11,16,44]. Die Hartoxidschichten zeichnen sich durch ihre hohe Abriebfestigkeit aus. Die Schichten bestehen meistens aus einer dünnen, nahezu porenfreien Sperrschicht und einer darüber liegenden feinporigen Deckschicht. Vor allem auf Aluminium ist in Abhängigkeit der Verfahrenssparameter die Sperrschicht nur wenige nm dick, weshalb zur Verbesserung des Korrosionsverhaltens eine zusätzliche Verdichtung der Hartoxidschicht vorgenommen wird [16].

Ein weiteres Oberflächenbehandlungsverfahren stellt das Galvanisieren dar, das vor allem für Aluminiumwerkstoffe von Bedeutung ist [16]. Entscheidend bei diesem Prozess ist die Substratvorbehandlung (Entfernen der natürlichen Oxidschicht, Reinigen, Entfetten). Auf Aluminium können Schichtdicken von bis zu 250 µm erreicht werden, die sich zum Verschleißschutz eignen [44]. Dickere metallische oder nichtmetallische Schichten lassen sich durch thermische Spritzverfahren erzeugen, indem ein draht- oder pulverförmiges Material in schmelzflüssige Partikel überführt und mittels eines Gasstroms zerstäubt und auf das Substrat geschleudert wird. Auf diese Weise können Schichten bis zu einigen Millimetern aufgetragen werden. Die Werkstückoberfläche bleibt trotz der hohen Temperaturen der Wärmequelle relativ kalt, sodass keine thermisch-induzierten Substratschäden zu erwarten sind. Als Spritzwerkstoff können u.a. Keramiken, Metalle oder Cermets verwendet werden [45]. Thermisch gespritzte Schichten auf Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen dienen überwiegend zum Verschleißschutz. Als Beschichtungsstoffe werden überwiegend oxidkeramische Werkstoffe wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  oder Mischungen dieser Werkstoffe eingesetzt [16]. In Abhängigkeit vom thermischen Spritzverfahren kann die Porosität der Schichten zwischen 1 und 15 % betragen, wodurch kein vollständiger Korrosionsschutz gewährleistet wird. Kritisch zu betrachten ist eine mögliche plastische Deformation der Leichtmetallsubstrate in Folge des Spritzprozesses [16,44].

Organische und anorganische Beschichtungen auf Aluminium- und Magnesiumwerkstoff zielen vor allem auf den Korrosionsschutz der Werkstoffe ab. Die Wahl des Beschichtungssystems ist dabei von der jeweiligen Legierung und der zu erwartenden Korrosionsbelastung abhängig